

И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов

Электротехника и основы электроники



И. И. ИВАНОВ,
Г. И. СОЛОВЬЕВ, В. Я. ФРОЛОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Издание седьмое,
переработанное и дополненное

*Рекомендовано
Учебно-методическим объединением
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся
по направлениям подготовки и специальностям
в области техники и технологии*



Санкт-Петербург • Москва • Краснодар
2012

ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА

Издательство «Лань»



ББК 31.277.1

И 20

Иванов И. И., Соловьев Г. И., Фролов В. Я.

И 20 Электротехника и основы электроники: Учебник. 7-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2012. — 736 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-0523-7

В книге изложены основы теории электрических, электронных и магнитных цепей, рассмотрены устройство, принцип действия и характеристики электрических машин, аппаратов, электроизмерительных приборов, электронных приборов и устройств, а также основы автоматического управления электроустановками, основы электроснабжения и др. 6-е издание книги «Электротехника» авторов И. И. Иванова и Г. И. Соловьева вышло в 2009 г.

Учебник предназначен для студентов технических и технологических направлений подготовки.

ББК 31.277.1

Рецензенты:

В. А. СКОРНЯКОВ — зав. кафедрой электротехники и электрооборудования СПбГЛТА им. С. М. Кирова; **Ю. А. БЫСТРОВ** — зав. кафедрой электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ», доктор технических наук, профессор; **А. А. ЛИСЕНКОВ** — ведущий научный сотрудник лаборатории модифицирования поверхностей и материалов учреждения РАН «Институт проблем машиностроения РАН», доктор технических наук, профессор.

Обложка

Н. А. ГОНЧАРОВА

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2012

© И. И. Иванов, Г. И. Соловьев,
В. Я. Фролов, 2012

© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2012



ПРЕДИСЛОВИЕ

Прошло более 100 лет с тех пор, как началось использование электрической энергии в жизнедеятельности человека (в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве, в быту и других не менее важных областях). Представители разных специальностей в своей работе имеют дело с различного рода электрооборудованием. Поэтому электротехническая подготовка инженеров не-электротехнических специальностей должна включать достаточно подробное изучение вопросов теории и практики использования различных электроустановок и электронных приборов. Инженер любой специальности должен знать устройство, принцип действия, характеристики и эксплуатационные возможности электрических машин, электроизмерительных приборов, аппаратов и другого электрооборудования, способы регулирования и управления ими.

Изложение материала базируется на знаниях, полученных студентами при изучении курсов математики и физики (в области электричества, физических законов электромагнитного поля, механики и др.).

Содержание и методика изложения материала во многом определены практикой преподавания электротехники в Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина (ныне в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете), основы которой были заложены первым заведующим кафедрой электротехники, Героем Социалистического Труда, лауреатом Государственной премии профессором М. А. Шателеном (1866–1957).

Авторы выражают благодарность членам кафедры «Электротехники и электротехнологии» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ), а также всем коллегам из других вузов, которые в своих устных и письменных отзывах сделали полезные замечания и предложения к первому изданию книги «Электротехника» (авторы И. И. Иванов, В. С. Равдоник), вышедшей в 1984 г. в издательстве «Высшая школа», и к последующим изданиям (авторы И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник), вышедшим в издательстве «Лань».

Настоящее издание выходит под названием «Электротехника и основы электроники» и является переработанным и дополненным в части «Электротехника»; добавлена часть «Основы электроники». Содержание книги соответствует государственным образовательным стандартам высшего профессионального образования, в которых учебная дисциплина для большинства направлений и специальностей подготовки имеет название «Электротехника и основы электроники» или «Электротехника и электроника».

Переработка и дополнения в части «Электротехника» выполнены профессорами И. И. Ивановым и Г. И. Соловьевым, часть «Основы электроники» написана профессором В. Я. Фроловым.

Отзывы о книге просим направлять по адресу: 194251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, или в издательство «Лань» по адресу: market@lanbook.ru.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ВВЕДЕНИЕ

В.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Развитие научной мысли привело в конце XIX века к практическому использованию электрической энергии. Это было началом научно-технической революции. Развитие электроэнергетики и сегодня является основным условием научно-технического прогресса и технического совершенствования производства. Такая важнейшая роль электроэнергии обусловлена следующим:

1) в электрическую энергию легко преобразуются любые виды энергии (тепловая, атомная, механическая, химическая, лучистая, энергия водного потока), и наоборот, электрическая энергия может быть легко преобразована в любой другой вид энергии;

2) электроэнергию можно передавать практически на любое расстояние;

3) ее можно легко дробить на любые части (мощность электроприемников может быть от долей ватта до тысяч киловатт);

4) процессы получения, передачи, распределения и потребления можно просто и эффективно автоматизировать;

5) управление процессами, в которых используют электроэнергию, обычно очень простое (нажатие кнопки управления, выключателя и т. п.);

6) использование электрической энергии способствует созданию комфортных условий труда и быта.

Единственным недостатком электроэнергии является отсутствие «склада готовой продукции». Запасать электроэнергию и сохранять эти запасы в течение больших сроков человечество еще не научилось. Запасы электроэнергии в аккумуляторах, гальванических элементах

и конденсаторах достаточны лишь для работы сравнительно маломощных установок, причем сроки хранения этих запасов ограничены. Поэтому электроэнергия должна быть произведена тогда и в таком количестве, когда и в каком количестве в ней возникает потребность.

Применение электрической энергии позволило повысить производительность труда во всех областях деятельности человека, внедрить и автоматизировать целый ряд технологических процессов в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и быту, основанных на новых принципах, ускоряющих, облегчающих и удешевляющих процесс получения окончательного продукта, а также создать комфорт в производственных, общественных и жилых помещениях.

Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется электродвигателями, которые используют для привода станков и вращающихся машин в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, в подъемно-транспортных устройствах и т. д. Благодаря преимуществам электродвигателей перед другими типами двигателей их мощность в промышленности по отношению к общей мощности установленных двигателей в настоящее время составляет почти 100% (в 1890 г. — 5%, в 1927 г. — 75%).

Электрическую энергию также широко используют в технологических установках для нагрева изделий, плавления металлов, сварки, электролиза, для получения плазмы, новых материалов с помощью электрохимии, для очистки материалов и газов и т. д. Работа современных средств связи (телеграфа, телефона, радио, телевидения) основана на применении электрической энергии. Без нее невозможно было бы развитие кибернетики, вычислительной и космической техники и т. д. Электрическая энергия является сейчас практически единственным видом энергии для искусственного освещения. Продолжается расширение области использования электроэнергии, и вместе с этим повышается электровооруженность труда, зависимость производства от квалификации работников, от степени надежности электроснабжения. Следовательно, обеспечение электротехнического образования всех специалистов технических и экономических направлений является важнейшей задачей высшей школы.



В.2. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СТРАНЫ

В России первые опыты передачи электрической энергии на расстояние были произведены в 1874 г. Мощность передачи составляла всего 6 л. с., а дальность передачи — сначала 200 м, а затем 1 км. Только разработка трансформатора, позволившего повысить напряжение передачи, и разработка элементов трехфазной системы русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским в конце XIX века позволили повысить мощность и дальность передачи. И все же до 1913 г. были только зачатки электрификации страны.

По предложению В. И. Ленина в 1920 г. был разработан Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО). В разработке плана под руководством крупного энергетика Г. М. Кржижановского принимали участие передовые ученые и инженеры России: К. А. Круг, Р. Э. Классон, М. А. Шателен, Т. Ф. Макарьев и др. Тысячи людей были увлечены этим планом хозяйственного переустройства.

Практически план ГОЭЛРО был первым планом развития народного хозяйства страны. Предполагалось за 10–15 лет построить 30 электростанций общей мощностью 1750 МВт. Это Каширская ГЭС (1922 г.), ГЭС «Красный Октябрь» под Ленинградом (1922 г.), Шатурская ГЭС (1925 г.), Волховская ГЭС (1925 г.), каскад Свирских ГЭС и др. Планом ГОЭЛРО предусматривалось также строительство линий электропередач высокого напряжения, электрификация железных дорог, развитие электрифицированных промышленных комплексов. В 1931 г. план ГОЭЛРО был выполнен по всем основным показателям.

В планах дальнейшего развития народного хозяйства предусматривались опережающие темпы развития электроэнергетики. Выработка электроэнергии увеличивалась с каждым годом (табл. В.1).

К концу 1980 г. мощность всех электростанций страны составляла 350 млн кВт. Мощность отдельных тепловых электростанций достигла 3,0 млн кВт, атомных — 4,0 млн кВт, гидравлических — 6,4 млн кВт. Мощность отдельных энергоблоков составила 1200 МВт (турбогенератор Костромской ГРЭС) и 640 МВт (гидрогенератор

Саяно-Шушенской ГЭС). Доля атомных электростанций в выработке электроэнергии достигла примерно 13 процентов.

Постепенно происходит изменение структуры энергетических ресурсов, используемых для производства электроэнергии. Кроме энергии органического топлива, воды и атома для производства электроэнергии сейчас используют энергию термальных вод, ветра, приливов и отливов океана и солнечную энергию. Однако эти источники еще не играют существенной роли в развитии большой энергетики. Перспективным видом энергии является термоядерная энергия, получаемая при синтезе легких элементов. Ее использование решит проблему обеспечения человечества энергией на исторически обозримое время.

Как известно, электростанции объединяют в энергосистемы для совместной работы. Все электростанции

Таблица В.1

Выработка электроэнергии в СССР

Год	Выработка, млрд. кВт·ч	Год	Выработка, млрд. кВт·ч	Год	Выработка, млрд. кВт·ч
1913	~2	1950	91	1975	1039
1928	5,0	1955	170	1980	1294
1932	13,5	1960	292	1985	1545
1940	48,6	1965	507	1988	1705
1945	43,3	1970	740	1990	1840

Таблица В.2

Выработка электроэнергии в Российской Федерации

Год	Выработка, млрд. кВт·ч	Год	Выработка, млрд. кВт·ч	Год	Выработка, млрд. кВт·ч
1980	805	1995	864	2003	916
1985	962	1996	847	2004	932
1988	1066	1997	834	2005	953
1990	1081	1998	827	2006	931
1991	1068	1999	849	2007	1008
1992	1008	2000	878	2008	1033
1993	956	2001	891	2009	977
1994	877	2002	891		

Советского Союза были объединены в 95 энергосистем, которые входили в 11 объединенных энергосистем (ОЭС). ОЭС Средней Азии и Востока работали изолированно, а остальные ОЭС, в которых параллельно работали 79 энергосистем, входили в состав Единой энергосистемы (ЕЭС) СССР. Распад СССР в 1991 г. не позволил продолжить работу по включению в ЕЭС объединенных энергосистем Средней Азии и Востока. Были прекращены работы по строительству мощных линий электропередач высокого напряжения (1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока) из района Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса в европейскую часть страны. В табл. В.2 приведены данные по выработке электроэнергии электростанциями Российской Федерации.

В 2009 г. выработка электрической энергии на ТЭС составила 66%, на ГЭС — 18,3% и на АЭС — 15,7%.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Электрической цепью называют совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении.

В электрической цепи постоянного тока могут действовать как постоянные токи, значение и направление которых в любой момент времени остаются неизменными (рис. 1.1а), так и токи, направление которых остается постоянным, а значение изменяется во времени произвольно (рис. 1.1б) или по какому-либо закону (рис. 1.1в) (такие токи, строго говоря, нельзя назвать постоянными).

Под цепями постоянного тока в современной технике подразумевают цепи, в которых ток не меняет своего направления, т. е. полярность источников ЭДС в них постоянна.

Электрическая цепь состоит из отдельных устройств или элементов, которые по назначению можно подразделить на три группы. Первая группа — элементы, предназначенные для *генерирования* (выработки) электроэнергии (источники питания или источники ЭДС). Вторая группа — элементы, *преобразующие* электроэнергию в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую, химическую и т. д.); эти элементы называют приемниками электрической энергии или электроприемниками. Третья группа — это элементы, предназначенные для *передачи* электроэнергии от источника питания к электроприемнику (провода, устройства, обеспечивающие уровень и качество напряжения, и др.).

Источники питания (рис. 1.2) цепи постоянного тока — это гальванические элементы, электрические аккумуляторы, электромеханические генераторы, термоэлектрические генераторы, фотоэлементы и др. Все источники питания имеют внутреннее сопротивление $R_{вт}$, значение которого невелико по сравнению с сопротивлением других элементов электрической цепи.

Электроприемниками постоянного тока являются электродвигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую, нагревательные и осветительные приборы, электролизные установки и др. Условные обозначения некоторых из них приведены на рис. 1.3. Все электроприемники характеризуются электрическими параметрами, среди которых основные — напряжение и мощность.

Для нормальной работы электроприемника на его зажимах необходимо поддерживать номинальное напряжение $U_{ном}$ (для приемников постоянного тока по ГОСТ 721 $U_{ном} = 27, 110, 220, 440$ В, а также 6, 12, 24, 36 В).

Элементы электрической цепи делят на активные и пассивные. К *активным элементам* относят те, в которых индуцируется ЭДС (источники ЭДС, электродвигатели, аккумуляторы в процессе зарядки и т. п.). Все прочие электроприемники и соединительные провода относят к *пассивным элементам*.

Элементы электрической цепи, обладающие электрическим сопротивлением R и называемые *резисторами*, характеризуются так называемой *вольт-амперной характеристикой* — зависимостью напряжения на зажимах элемента от тока в нем или зависимостью тока в элементе от напряжения на его зажимах (рис. 1.4).

Сопротивление R , а также проводимость G (величина, обратная сопротивлению R) элемента — это *параметры электрической цепи*. Если сопротивление R элемента не зависит от тока в нем, то такой элемент называют *линейным элементом*, а его вольт-амперная характеристика $U = RI$ или $I = U/R$ представляет собой прямую линию.

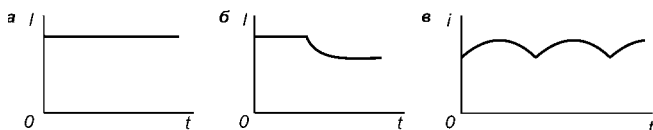


Рис. 1.1
Примеры графиков постоянного тока

Рис. 1.2
Условные обозначения
источников питания
постоянного тока

a — гальванический и аккумуляторный элементы; *б* — электромеханический генератор, *в* — термоэлектрический генератор (термопара); *г* — фотоэлемент; *д* — общее обозначение источника ЭДС постоянного тока.

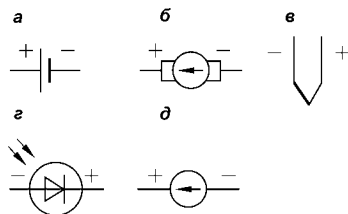


Рис. 1.3
Условные обозначения
электроприемников
постоянного тока

a — электродвигатель; *б* — резистор; *в* — нагревательный элемент; *г* — электрическая печь нагрева; *д* — лампа накаливания.

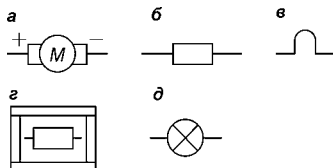
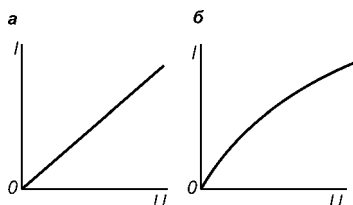


Рис. 1.4
Вольт-амперные характеристики
элементов
электрической цепи

a — линейный элемент; *б* — нелинейный элемент.



В общем случае сопротивление R элемента зависит как от тока в нем, так и от напряжения. Одна из причин этого состоит в изменении сопротивления проводника вследствие его нагрева током. При повышении температуры сопротивление проводника

$$R = R_0 (1 + \alpha (\tau - \tau_0)), \quad (1.1)$$

где R_0 — сопротивление при температуре окружающей среды τ_0 (обычно $\tau_0 = 20^\circ\text{C}$); α — температурный коэффициент; τ — температура проводника.

Но так как во многих случаях эта зависимость незначительна, элемент считают линейным ($R = \text{const}$).

Электрическую цепь, электрическое сопротивление участков которой не зависит от значений и направлений токов и напряжений в цепи, называют линейной электрической цепью. Такая цепь состоит только из линейных элементов, а ее состояние может быть описано линейными алгебраическими уравнениями.

Если сопротивление элемента цепи существенно зависит от тока или напряжения, то вольт-амперная

характеристика носит нелинейный характер (рис. 1.4б), а такой элемент называют *нелинейным элементом*.

Электрическую цепь, электрическое сопротивление хотя бы одного из участков которой зависит от значений или от направлений токов и напряжений в этом участке цепи, называют *нелинейной электрической цепью*. Такая цепь содержит хотя бы один нелинейный элемент.

Для расчета и анализа работы электрической цепи, состоящей из любого количества различных элементов, удобно эту цепь представить графически. Графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов и показывающее соединения этих элементов, называют *электрической схемой цепи*. Простейшая схема электрической цепи, состоящая из источника ЭДС E и резистора с сопротивлением R , изображена на рис. 1.5.

Участок электрической цепи, во всех элементах которого существует один и тот же ток, называют *ветвью*. Место соединения ветвей электрической цепи называют *узлом*. На электрических схемах узел обозначают точкой (рис. 1.6). Иногда несколько геометрических точек, соединенных проводниками, сопротивление которых принимают равными нулю, образуют один узел (рис. 1.6, узел a). Таким образом, каждая ветвь соединяет два соседних узла электрической схемы. Число ветвей

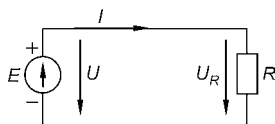


Рис. 1.5
Простейшая схема электрической цепи

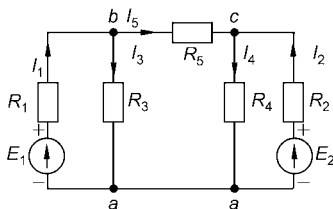


Рис. 1.6
Схема многоконтурной электрической цепи ($p = 5$, $q = 3$)

схемы принято обозначать буквой p , а число узлов — q . Электрическая цепь, изображенная на схеме рис. 1.6, имеет число ветвей $p = 5$ и число узлов $q = 3$ (a , b , c).

Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, называют *контуром электрической цепи*. Простейшая электрическая цепь имеет одноконтурную схему (рис. 1.5), сложные электрические цепи — несколько контуров (рис. 1.6).

1.2.

УСЛОВНЫЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭДС, ТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ЦЕПИ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ

Чтобы правильно записать уравнения, описывающие процессы в электрических цепях, и произвести анализ этих процессов, необходимо задать *условные положительные направления* ЭДС источников питания, токов в элементах или ветвях цепи и напряжений на зажимах элементов цепи или между узлами цепи.

Внутри *источника ЭДС* постоянного тока положительным является направление ЭДС от отрицательного полюса к положительному, т. е. от полюса с низшим потенциалом к полюсу с высшим потенциалом (см. рис. 1.5). Это соответствует определению электродвижущей силы как величины, характеризующей способность стороннего поля и индуцированного электрического поля вызывать электрический ток.

По отношению к источнику ЭДС все элементы, входящие в состав цепи, составляют *внешний участок цепи*. За положительное направление *тока* в цепи принимают направление, совпадающее с направлением ЭДС. Это значит, что во внешней цепи положительным является направление от положительного полюса источника ЭДС к отрицательному, т. е. направление, совпадающее с направлением движения положительно заряженных частиц.

Условным положительным направлением *падения напряжения*, или просто напряжения, на элементе цепи или между двумя узлами цепи принимают направление, совпадающее с условным положительным направлением тока в этом элементе или в этой ветви. Действительно, падение напряжения U_R на резисторе R (см. рис. 1.5) определяется соотношением $U_R = RI$. Так как $R > 0$, то падение напряжения U_R и ток I имеют одинаковые знаки.

Напряжение U_R , как это видно из рис. 1.5, является напряжением U на зажимах источника ЭДС. Таким образом, положительное направление напряжения на зажимах источника ЭДС всегда противоположно положительному направлению ЭДС источника.

Условные положительные направления (или просто положительные направления) тока, ЭДС и напряжения показывают на электрических схемах стрелками.

Действительные направления электрических величин, определяемые расчетом, могут совпадать или не совпадать с условными. Если расчетом или каким-либо иным образом определено, что ток, ЭДС и напряжение положительны, то их действительные направления совпадают с условно принятыми положительными направлениями, и наоборот.

1.3. ЗАКОНЫ КИРХГОФА

Соотношения между токами и ЭДС в ветвях электрической цепи и напряжениями на элементах цепи, позволяющие произвести расчет электрической цепи, определяются двумя законами Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа отражает принцип непрерывности движения электрических зарядов, из которого следует, что в любой момент времени количество электрических зарядов, направленных к узлу, равно количеству зарядов, направленных от узла, т. е., что электрический заряд в узле не накапливается. Поэтому

алгебраическая сумма токов в ветвях, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (1.2)$$

где n — число ветвей, сходящихся в узле.

До написания уравнения (1.2) необходимо задать условные положительные направления токов в ветвях, обозначив эти направления на схеме стрелками. В уравнении (1.2) токи, направленные к узлу, записывают с одним знаком (например, с плюсом), а токи, направленные от узла, — с противоположным знаком (с минусом). Таким образом, для узла b схемы (рис. 1.6) уравнение по первому закону Кирхгофа будет иметь вид

$$I_1 - I_3 - I_5 = 0.$$

Первый закон Кирхгофа может быть сформулирован иначе:

сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла.

Тогда уравнение для узла b (рис. 1.6) будет записано так:

$$I_1 = I_3 + I_5.$$

Второй закон Кирхгофа

отражает физическое положение, состоящее в том, что изменение потенциала во всех элементах контура в сумме равно нулю. Это значит, что при обходе контура $abcd$ электрической цепи, показанной на рис. 1.7, в силу того, что потенциал точки a один и тот же, общее изменение потенциала в контуре равно нулю. Из этого следует такая формулировка второго закона Кирхгофа:

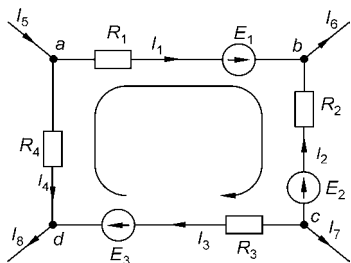


Рис. 1.7

Схема одного контура многоконтурной электрической цепи

в любом контуре электрической цепи постоянного тока алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на всех элементах этого контура:

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k, \quad (1.3)$$

где n — число ЭДС в контуре; m — число элементов с сопротивлением R_k в контуре.

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа предварительно задают условные положительные направления токов во всех ветвях электрической цепи и для каждого контура выбирают направление обхода. Если при этом направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, то такую ЭДС берут со знаком плюс, если не совпадает — со знаком минус. Падения напряжений в правой части уравнения (1.3) берут со знаком плюс, если положительное направление тока в данном элементе цепи совпадает с направлением обхода контура, если не совпадает — со знаком минус.

Внутренние сопротивления $R_{\text{вн}}$ источников ЭДС на электрических схемах могут быть изображены по-разному (рис. 1.8).

Для контура $abcd$ (рис. 1.7), сопротивления ветвей которого

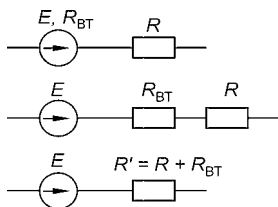


Рис. 1.8

Способы отображения на электрических схемах наличия внутреннего сопротивления источника ЭДС

включают в себя и внутренние сопротивления источников ЭДС, уравнение (1.3) принимает вид

$$E_1 - E_2 + E_3 = R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 - R_4 I_4.$$

Рассмотрим теперь контур $abca$ (рис. 1.7), состоящий из ветвей ab , bc и ca . Ветвь ca , замыкающая контур, проходит в пространстве, в котором отсутствуют источники ЭДС. Падение напряжения на ней равно напряжению U_{ca} между точками c и a (условное положительное направление напряжения U_{ca} принято от точки c к точке a). По второму закону Кирхгофа для этого контура можно написать уравнение

$$E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{ca},$$

откуда напряжение между точками c и a

$$U_{ca} = E_1 - E_2 - R_1 I_1 + R_2 I_2.$$

Если напряжение U_{ca} положительно, то это означает, что потенциал точки c выше потенциала точки a , и наоборот.

Таким образом, используя второй закон Кирхгофа, можно определять разность потенциалов (напряжение) между любыми двумя точками электрической цепи.

Для одноконтурной схемы (см. рис. 1.5) в соответствии с уравнением (1.3) можно записать: $E = RI = U_R$. Но вместо ЭДС E при обходе контура по направлению тока можно взять напряжение на зажимах источника ЭДС, которое направлено противоположно направлению обхода контура, в результате чего получим $U_R - U = 0$ или $U = U_R$.

Следовательно, второй закон Кирхгофа можно сформулировать в таком виде:

||| *сумма напряжений на всех элементах контура, включая источники ЭДС, равна нулю:*

$$\sum_k U_k = 0.$$

Если в ветви имеется n последовательно соединенных элементов с сопротивлением k -го элемента R_k , то

$$U = \sum_{k=1}^n U_k,$$

где $U_k = R_k I_k$, т. е. падение напряжения на участке цепи или напряжение между зажимами ветви, состоящей из последовательно соединенных элементов, равно сумме падений напряжений на этих элементах.

1.4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Элементами электрической цепи являются конкретные электротехнические устройства, которые могут работать в различных режимах. Режимы работы как отдельных элементов, так и всей электрической цепи характеризуются значениями тока и напряжения. Поскольку ток и напряжение в общем случае могут принимать любые значения, то режимов может быть бесчисленное множество.

Рассмотрим наиболее характерные режимы работы электрической цепи с источником ЭДС, к которому подключен электроприемник с регулируемым сопротивлением R (рис. 1.9). Пусть ЭДС E источника и его внутреннее сопротивление $R_{\text{вт}}$ остаются неизменными. Ток в цепи изменяется при изменении сопротивления R электроприемника, который является линейным элементом. Для схемы (рис. 1.9) по второму закону Кирхгофа можно записать:

$$E = RI + R_{\text{вт}}I, \quad (1.4)$$

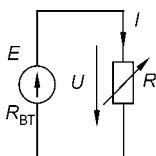


Рис. 1.9
Схема
простейшей
цепи постоян-
ного тока с
переменным
сопротивлени-
ем электро-
приемника

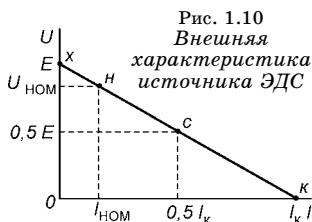
где $RI = U$ — напряжение на зажимах приемника, т. е. напряжение на зажимах внешней цепи; $R_{\text{вт}}I$ — падение напряжения внутри источника ЭДС. Так как приемник присоединен непосредственно к зажимам источника ЭДС, то напряжение U одновременно является напряжением и на его зажимах.

Из уравнения (1.4) следует

$$U = E - R_{\text{вт}}I. \quad (1.5)$$

Это уравнение, описывающее зависимость напряжения на зажимах источника ЭДС от тока в цепи, является уравнением *внешней характеристики источника ЭДС* (рис. 1.10). При условии, что $E = \text{const}$ и $R_{\text{вт}} = \text{const}$, зависимость $U(I)$ является линейной. Характерные режимы удобнее всего рассматривать, пользуясь внешней характеристикой.

Режим холостого хода — это режим, при котором ток в цепи $I = 0$, что имеет место при разрыве цепи. Как следует из



уравнения (1.5), при холостом ходе напряжение на зажимах источника ЭДС $U = E$, поэтому вольтметр (прибор с очень большим внутренним сопротивлением), будучи включен в такую цепь, измеряет ЭДС источника. На внешней характеристике точка холостого хода обозначена x .

Номинальный режим имеет место тогда, когда источник ЭДС или любой другой элемент цепи работает при значениях тока, напряжения и мощности, указанных в паспорте данного электротехнического устройства. Номинальные значения тока $I_{\text{ном}}$, напряжения $U_{\text{ном}}$ и мощности $P_{\text{ном}}$ соответствуют наиболее выгодным условиям работы устройства с точки зрения экономичности, надежности, долговечности и т. п. На внешней характеристике точка, соответствующая номинальному режиму, обозначена n .

Режим короткого замыкания — это режим, когда сопротивление приемника равно нулю, что соответствует соединению зажимов источника ЭДС между собой.

Из уравнения (1.4) следует, что ток в цепи в любом из режимов

$$I = \frac{E}{R + R_{\text{вт}}}. \quad (1.6)$$

При коротком замыкании цепи, когда $R = 0$, ток достигает максимального значения $I_{\text{к}} = E/R_{\text{вт}}$, ограниченного внутренним сопротивлением $R_{\text{вт}}$ источника ЭДС, а напряжение на зажимах источника ЭДС $U = RI = 0$. Значению тока $I_{\text{к}}$ и напряжению $U = 0$ соответствует точка k на внешней характеристике источника ЭДС. Ток короткого замыкания может достигать больших значений, во много раз превышающих номинальный ток. Поэтому режим короткого замыкания для большинства электроустановок является аварийным режимом.

Согласованный режим источника ЭДС и внешней цепи имеет место, когда сопротивление внешней цепи $R = R_{\text{вт}}$. В согласованном режиме ток в цепи

$$I_{\text{с}} = \frac{E}{2R_{\text{вт}}} = 0,5I_{\text{к}}, \quad (1.7)$$

т. е. в два раза меньше тока короткого замыкания. ЭДС E источника уравнивается двумя равными по значению падениями напряжения, обусловленными сопротивлением внешней цепи и внутренним сопротивлением, т. е. $U = 0,5E$. Точка, соответствующая согласованному режиму, на внешней характеристике обозначена c .

1.5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для схемы (см. рис. 1.9) уравнение (1.4) имеет вид $E = U + R_{\text{вт}}I$.

После умножения всех членов этого уравнения на ток I получим $EI = UI + R_{\text{вт}}I^2$, или

$$P_1 = P_2 + P_{\pi}, \quad (1.8)$$

где $P_1 = EI$ — мощность источника ЭДС (источника электроэнергии); $P_2 = UI$ — мощность энергии, потребляемой электроприемником; $P_{\pi} = R_{\text{вт}}I^2$ — мощность потерь энергии в источнике ЭДС.

Уравнение (1.8) является *уравнением баланса мощностей электрической цепи*.

Записав выражение для мощности P_2 электроприемника с учетом (1.6), получим зависимость мощности приемника от его сопротивления R при $E = \text{const}$ и $R_{\text{вт}} = \text{const}$:

$$P_2 = UI = RI^2 = \frac{E^2 R}{(R + R_{\text{вт}})^2}. \quad (1.9)$$

Мощность P_2 в режиме холостого хода, когда $I = 0$, и в режиме короткого замыкания, когда $U = 0$, равна нулю. Следовательно, зависимость $P_2(I)$ при изменении тока I от 0 до $I_{\text{к}}$ имеет максимум. Для определения условий, при которых эта мощность будет наибольшей ($P_2 = P_{2\text{max}}$), воспользуемся уравнением (1.8):

$$P_2 = P_1 - P_{\pi} = EI - R_{\text{вт}}I^2.$$

Приравняв к нулю производную dP_2/dI , т. е.

$$\frac{dP_2}{dI} = E - 2R_{\text{вт}}I = 0,$$

с учетом (1.7) получим

$$I = \frac{E}{2R_{\text{вт}}} = I_{\text{с}} = 0,5I_{\text{к}}.$$

Таким образом, максимальная мощность потребляемой электроэнергии имеет место при согласованном режиме, когда $R = R_{\text{вт}}$. С учетом этого равенства из формулы (1.9) определим значение мощности $P_{2\text{max}}$ или мощности $P_{2\text{с}}$ при согласованном режиме:

$$P_{2\text{max}} = P_{2\text{с}} = \frac{E^2 R_{\text{вт}}}{(2R_{\text{вт}})^2} = \frac{E^2}{4R_{\text{вт}}}.$$

Мощность P_{1c} источника электроэнергии в согласованном режиме, если учесть (1.7),

$$P_{1c} = EI_c = \frac{E^2}{2R_{\text{вт}}}.$$

Наибольшую мощность источник электроэнергии развивает при коротком замыкании, когда ток достигает наибольшего значения. В этом случае $P_{1\text{max}} = EI_{\text{к}} = E^2/R_{\text{вт}}$. Мощность источника в согласованном режиме в два раза меньше его максимальной мощности.

Коэффициент полезного действия (КПД) источника электроэнергии в согласованном режиме

$$\eta_c = P_{2c}/P_{1c} = 0,5.$$

Из-за такого низкого значения КПД, обусловленного большими потерями мощности и энергии в источнике питания и сетях, согласованный режим в промышленных установках не применяют.

Однако этот режим имеет преимущество перед другими режимами, заключающееся в том, что при $E = \text{const}$ мощность приемника достигает наибольшего значения. Поэтому согласованный режим применяют в цепях с малыми токами (схемы автоматики, электрических измерений, связи и т. д.), в которых КПД не имеет решающего значения.

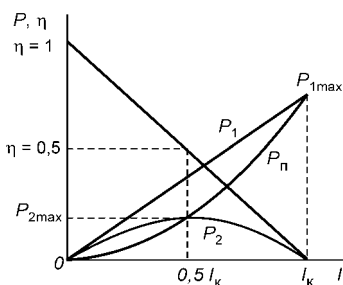


Рис. 1.11
Энергетические зависимости
в цепях постоянного тока

Зависимости P_1 , P_2 , $P_{\text{п}}$ и η от тока в цепи показаны на рис. 1.11. При их построении принималось во внимание, что $E = \text{const}$ и $R_{\text{вт}} = \text{const}$. Зависимость $P_1(I) = EI$ имеет линейный характер. Мощность потерь энергии в источнике параболически зависит от тока, причем при токе короткого замыкания она имеет максимальное значение:

$$P_{\text{п}} = R_{\text{вт}} I_{\text{к}}^2 = R_{\text{вт}} \left(\frac{E}{R_{\text{вт}}} \right)^2 = \frac{E^2}{R_{\text{вт}}} = P_{1\text{max}}.$$

Мощность электроприемника $P_{2\text{max}}$ имеет наибольшее значение при согласованном режиме, т. е. при $I = 0,5I_{\text{к}}$.

Так как для КПД справедливо следующее равенство:



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{\text{п}}}{P_1} = 1 - \frac{R_{\text{вт}} I^2}{EI} = 1 - \frac{I}{I_{\text{к}}},$$

то зависимость $\eta(I)$ является линейной. При номинальном режиме КПД много выше, чем при согласованном режиме. Для большинства промышленных источников электроэнергии при номинальном режиме $\eta = 0,8 \dots 0,9$. Следовательно, $I_{\text{ном}} = (0,1 \dots 0,2) I_{\text{к}}$, т. е. номинальный ток во много раз меньше тока короткого замыкания.

1.6. НЕРАЗВЕТВЛЕННЫЕ И РАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

Если большое число пассивных элементов вместе с источником ЭДС образуют электрическую цепь, то их взаимное соединение может быть выполнено различными способами. Существуют следующие характерные способы таких соединений.

Последовательное соединение элементов — это самое простое соединение. При таком соединении во всех элементах цепи ток имеет одно и то же значение. Таким способом могут быть соединены или все пассивные элементы цепи, и тогда цепь будет одноконтурной неразветвленной (рис. 1.12а), или может быть соединена только часть элементов многоконтурной цепи.

При последовательном соединении n элементов напряжение на зажимах цепи будет равно сумме падений напряжения на n последовательно включенных элементах, т. е.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n,$$

или

$$\begin{aligned} U &= R_1 I + R_2 I + R_3 I + \dots + R_n I = \\ &= (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) I = R_{\text{эк}} I, \end{aligned} \quad (1.10)$$

где $R_{\text{эк}} = \sum_{k=1}^n R_k$ — эквивалентное сопротивление цепи.

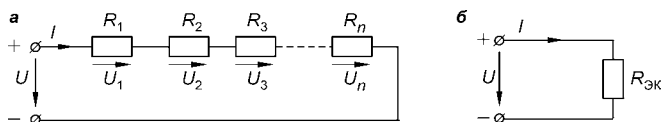


Рис. 1.12

Последовательное соединение линейных элементов

а — общая схема; б — эквивалентная схема.

Таким образом, эквивалентное сопротивление последовательно соединенных пассивных элементов равно сумме сопротивлений этих элементов. Схема электрической цепи (рис. 1.12а) может быть представлена эквивалентной схемой (рис. 1.12б), состоящей из одного элемента с эквивалентным сопротивлением $R_{\text{эк}}$. Для такой схемы $U = R_{\text{эк}}I$, что совпадает с уравнением (1.10).

При расчете цепи с последовательным соединением элементов при заданных напряжении источника питания и сопротивлениях элементов ток в цепи рассчитывают по закону Ома:

$$I = U/R_{\text{эк}}.$$

Падение напряжения на k -м элементе

$$U_k = R_k I = \frac{R_k}{R_{\text{эк}}} U$$

зависит не только от сопротивления этого элемента R_k , но и от эквивалентного сопротивления $R_{\text{эк}}$, т. е. от сопротивления других элементов цепи. В этом заключается существенный недостаток последовательного соединения элементов. В предельном случае, когда сопротивление какого-либо элемента цепи становится равным бесконечности (разрыв цепи), ток во всех элементах цепи становится равным нулю.

Так как при последовательном соединении ток во всех элементах цепи один и тот же, то отношение падений напряжения на элементах равно отношению сопротивлений этих элементов:

$$\frac{U_k}{U_n} = \frac{R_k}{R_n}.$$

Параллельное соединение элементов — это такое соединение, при котором ко всем элементам цепи приложено одно и то же напряжение. По схеме параллельного соединения могут быть соединены или все пассивные элементы цепи (рис. 1.13а), или только часть их. Каждый

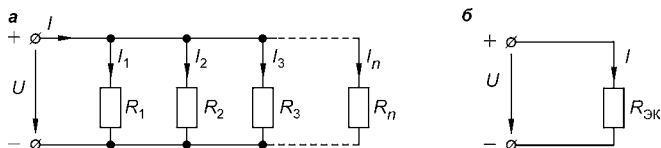


Рис. 1.13
Параллельное соединение линейных элементов
а — общая схема; б — эквивалентная схема.

параллельно включенный элемент образует отдельную ветвь. Поэтому цепь с параллельным соединением элементов, изображенная на рис. 1.13а, хотя и является простой цепью (так как содержит только два узла), в то же время разветвленная. В каждой параллельной ветви ток

$$I_k = \frac{U}{R_k} = G_k U, \quad (1.11)$$

где $G_k = 1/R_k$ — проводимость k -й ветви.

По первому закону Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n,$$

или

$$\begin{aligned} I &= G_1 U + G_2 U + G_3 U + \dots + G_n U = \\ &= (G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n) U = G_{\text{эк}} U, \end{aligned}$$

где $G_{\text{эк}} = \sum_{k=1}^n G_k$ — эквивалентная проводимость цепи.

Таким образом, при параллельном соединении пассивных элементов их эквивалентная проводимость равна сумме проводимостей этих элементов. Эквивалентная проводимость всегда больше проводимости любой части параллельных ветвей. Эквивалентной проводимости $G_{\text{эк}}$ соответствует эквивалентное сопротивление $R_{\text{эк}} = 1/G_{\text{эк}}$.

Тогда эквивалентная схема цепи, изображенная на рис. 1.13а, будет иметь вид, представленный на рис. 1.13б. Ток в неразветвленной части цепи с параллельным соединением элементов может быть определен из этой схемы по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R_{\text{эк}}} = G_{\text{эк}} U.$$

Следовательно, если напряжение источника питания постоянно, то при увеличении числа параллельно включенных элементов (что приводит к увеличению эквивалентной проводимости) ток в неразветвленной части цепи (ток источника питания) увеличивается.

Из формулы (1.11) видно, что ток в каждой ветви зависит только от проводимости данной ветви и не зависит от проводимостей других ветвей. Независимость режимов параллельных ветвей друг от друга — важное преимущество параллельного соединения пассивных элементов. В промышленных установках параллельное соединение электроприемников применяют в большинстве

случаев. Самым наглядным примером является включение электрических осветительных ламп.

Так как при параллельном соединении ко всем элементам приложено одно и то же напряжение, а ток в каждой ветви пропорционален проводимости этой ветви, то отношение токов в параллельных ветвях равно отношению проводимостей этих ветвей или обратно пропорционально отношению их сопротивлений:

$$\frac{I_k}{I_n} = \frac{G_k}{G_n} = \frac{R_n}{R_k}.$$

Смешанное соединение элементов представляет собой сочетание последовательного и параллельного соединений. Такая цепь может иметь различное число узлов и ветвей. Пример смешанного соединения приведен на схеме (рис. 1.14а).

Для расчета такой цепи необходимо последовательно определять эквивалентные сопротивления для тех частей схемы, которые представляют собой только последовательное или только параллельное соединение. В рассматриваемой схеме имеется последовательное соединение элементов с сопротивлениями R_1 и R_2 и параллельное соединение элементов с сопротивлениями R_3 и R_4 . Используя полученные ранее соотношения между параметрами элементов цепи при последовательном и параллельном их соединении, реальную схему цепи можно последовательно заменить эквивалентными схемами.

Эквивалентное сопротивление последовательно соединенных элементов $R_{12} = R_1 + R_2$. Эквивалентное сопротивление параллельно соединенных элементов R_3 и R_4

$$R_{34} = \frac{1}{G_{34}} = \frac{1}{G_3 + G_4} = \frac{1}{1/R_3 + 1/R_4} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}.$$

Эквивалентная схема с сопротивлениями элементов R_{12} и R_{34} изображена на рис. 1.14б. Для этой схемы последо-

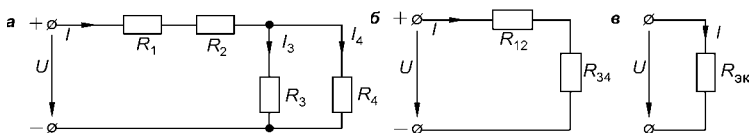


Рис. 1.14

Смешанное соединение линейных элементов

а — общая схема; б, в — эквивалентные схемы.

вательного соединения R_{12} и R_{34} эквивалентное сопротивление $R_{\text{эк}} = R_{12} + R_{34}$, а соответствующая эквивалентная схема представлена на рис. 1.14в. Найдем ток в этой цепи:

$$I = \frac{U}{R_{\text{эк}}}.$$

Это ток источника питания и ток в элементах R_1 и R_2 реальной цепи. Для расчета токов I_3 и I_4 определяют напряжение на участке цепи с сопротивлением R_{34} (рис. 1.14б):

$$U_{34} = R_{34}I = R_{34} \frac{U}{R_{\text{эк}}}.$$

Тогда токи I_3 и I_4 можно найти по закону Ома:

$$I_3 = \frac{U_{34}}{R_3}; \quad I_4 = \frac{U_{34}}{R_4}.$$

Подобным образом можно рассчитать и ряд других схем электрических цепей со смешанным соединением пассивных элементов.

Для сложных схем с большим количеством контуров и источников ЭДС не всегда может быть проведено такое эквивалентное преобразование. Их расчет ведется с использованием других методов, которые изложены в гл. 3.

1.7. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

По виду вольт-амперной характеристики различают нелинейные элементы с *симметричной* и *несимметричной характеристиками* (по отношению к началу координат). Значение тока в нелинейном элементе с симметричной характеристикой не зависит от полярности приложенного напряжения (рис. 1.15а), а сопротивление этого элемента не зависит от направления тока в нем. В нелинейном элементе с несимметричной характеристикой значение тока зависит от полярности приложенного напряжения (рис. 1.15б), а сопротивление элемента зависит от направления тока в нем.

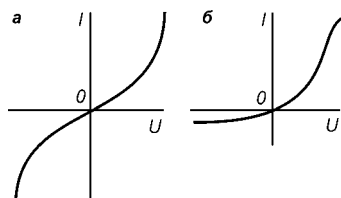


Рис. 1.15
Вольт-амперные
характеристики
нелинейных элементов
а — симметричная; б — несимметричная.

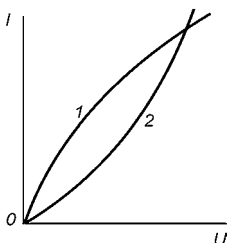


Рис. 1.16
Вольт-амперные характеристики ламп накаливания

1 — с вольфрамовой нитью; 2 — с угольной нитью.

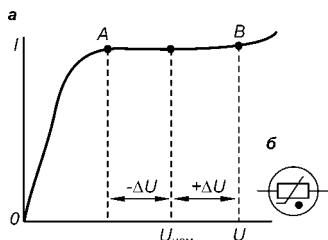


Рис. 1.17
Бареттер

а — вольт-амперная характеристика;
б — условное обозначение на электрических схемах.

К нелинейным элементам с симметричной характеристикой относятся лампы накаливания, терморезисторы, тиритовые и вилитовые элементы, бареттеры, лампы с тлеющим разрядом, электрическая дуга между одинаковыми электродами и др.

Нелинейность характеристик *ламп накаливания* обусловлена тем, что, например, вольфрамовая нить имеет положительный температурный коэффициент сопротивления и в соответствии с формулой (1.1) при повышении температуры (с увеличением тока) ее сопротивление увеличивается и возрастание тока замедляется (1 на рис. 1.16). Угольная же нить имеет отрицательный температурный коэффициент сопротивления, и поэтому зависимость 2 имеет вогнутый характер.

Терморезистор имеет вольт-амперную характеристику, аналогичную характеристике угольной нити. С увеличением тока его сопротивление уменьшается. Терморезисторы применяют для компенсации изменений сопротивления элементов, изготовленных из металлических проводников, сопротивление которых увеличивается с увеличением тока в цепи. При последовательном включении такого элемента и терморезистора общее сопротивление цепи остается неизменным при любом значении тока.

Бареттер по внешнему виду напоминает лампу накаливания. В стеклянном баллоне, заполненном водородом, помещается стальная нить. На вольт-амперной характеристике (рис. 1.17) имеется участок АВ, на протяжении которого с увеличением напряжения сопротивление нити увеличивается так, что ток остается почти постоянным. Бареттер включают последовательно в ту цепь, в которой

надо поддерживать ток постоянным. Тогда все изменения напряжения $\pm \Delta U$ источника питания принимает на себя бареттер, а напряжение на приемнике и, следовательно, ток в нем не изменяются.

Тиритовые и вилитовые элементы изготавливают из карборунда. Они имеют вольт-амперную характеристику, изображенную на рис. 1.18. Из нее видно, что с увеличением напряжения проводимость элемента увеличивается. Из тиритовых дисков выполняют разрядники, предназначенные для защиты установок высокого напряжения (подстанций, линий электропередачи) от перенапряжений.

При возрастании напряжения в два раза проводимость тиритового элемента увеличивается примерно в десять раз.

К нелинейным элементам с симметричной характеристикой относится также *электрическая дуга*, возникающая между одинаковыми электродами и являющаяся элементом цепи электросварочных установок, электроплавильных печей, прожекторов, проекционных аппаратов и т. д.

Вольт-амперная характеристика дуги представлена на рис. 1.19. С увеличением тока дуги падение напряжения на ней уменьшается, что обусловлено резким увеличением ее проводимости.

У *ламп с тлеющим разрядом* стеклянный баллон заполняют инертным газом (неоновые лампы). При увеличении напряжения ток в газе между электродами сначала увеличивается очень медленно (см. рис. 1.20). Когда напряжение достигает некоторого значения U_0 , между электродами возникает тлеющий разряд, газ ионизируется, проводимость лампы резко возрастает и ток продолжает увеличиваться даже при уменьшении напряжения. Постоянство напряжения в некотором диапазоне изменения тока (участок AB) позволяет исполь-

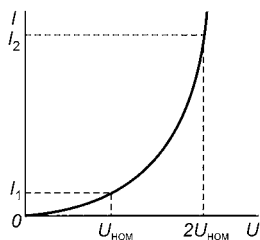


Рис. 1.18
Вольт-амперная характеристика тиритового элемента

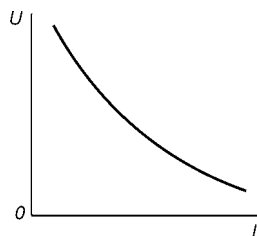


Рис. 1.19
Вольт-амперная характеристика электрической дуги

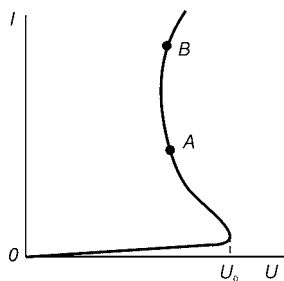


Рис. 1.20
Вольт-амперная
характеристика лампы
с тлеющим разрядом

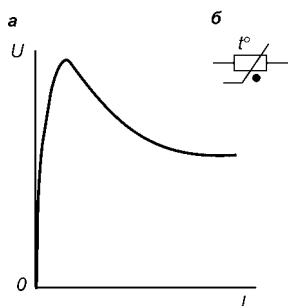


Рис. 1.21
Термистор

а — вольт-амперная характеристика; б — условное обозначение на электрических схемах.

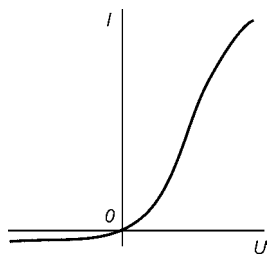


Рис. 1.22
Вольт-амперная
характеристика
электронной лампы
(диода)

зовать лампы с тлеющим разрядом для стабилизации напряжения.

К нелинейным элементам с несимметричной вольт-амперной характеристикой относятся электронные лампы, ртутные вентили, полупроводниковые диоды и триоды, электрическая дуга при неоднородных электродах и др. В основном их используют для преобразования переменного тока в постоянный ток.

На рис. 1.21 изображена вольт-амперная характеристика *термистора* — терморезистора из полупроводникового материала. Значительная часть характеристики термистора имеет падающий характер, что обусловлено его высоким отрицательным температурным коэффициентом в этой части характеристики. Термисторы применяют в измерительных устройствах, в технике высокой частоты и т. п.

Электронная лампа (диод) проводит электрический ток, если анод имеет положительный потенциал, а катод — отрицательный. При обратной полярности электродов ток, замыкающийся через лампу, практически равен нулю (рис. 1.22). Характеристики твердотельных полупроводниковых диодов (селеновых, кремниевых, германиевых и др.) аналогичны (рис. 1.23).

Нелинейные элементы характеризуются двумя параметрами: статическим $R_{ст}$ и дифференциальным $R_{диф}$ сопротивлениями.

Эти сопротивления изменяются от точки к точке вольт-амперной характеристики.

Статическое сопротивление нелинейного элемента определяется отношением напряжения в данной точке вольт-амперной характеристики к току в этой же точке. Для точки *A* характеристики (рис. 1.24а, б) статическое сопротивление

$$R_{\text{ст}} = \frac{U}{I} = \frac{m_U}{m_I} \left| \frac{OB}{BA} \right| = m_R \operatorname{tg} \alpha,$$

где m_U , m_I , m_R — масштабные коэффициенты для напряжения, тока и сопротивления соответственно.

Статическое сопротивление нелинейного элемента в любой точке характеристики пропорционально тангенсу угла наклона линии, проведенной из начала координат через эту точку, к оси тока.

С увеличением напряжения статическое сопротивление $R_{\text{ст}}$ для элемента с выпуклой характеристикой увеличивается (рис. 1.24а), а с вогнутой характеристикой — уменьшается (рис. 1.24б).

Под *дифференциальным сопротивлением* понимают предел отношения приращения напряжения в данной точке вольт-амперной характеристики к приращению медленно изменяющегося тока, когда это приращение стремится к нулю.

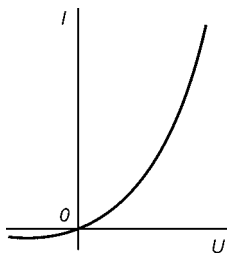


Рис. 1.23
Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

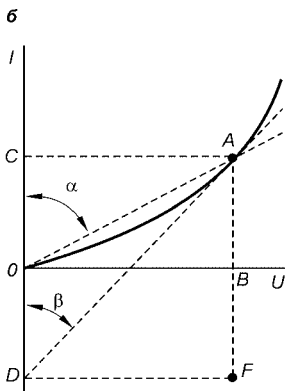
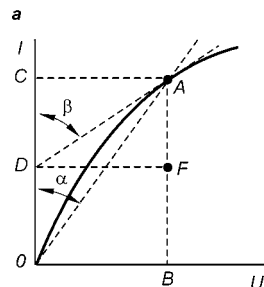


Рис. 1.24
Определение статического и дифференциального сопротивлений нелинейных элементов с монотонно возрастающей зависимостью между напряжением и током

а — с выпуклой вольт-амперной характеристикой; б — с вогнутой вольт-амперной характеристикой.

Для точки A характеристики (рис. 1.24а, б) дифференциальное сопротивление

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = \frac{m_u}{m_i} \left| \frac{DF}{FA} \right| = m_R \operatorname{tg} \beta. \quad (1.12)$$

Дифференциальное сопротивление нелинейного элемента в любой точке характеристики пропорционально тангенсу угла наклона касательной линии, проведенной через эту точку, к оси тока.

С увеличением напряжения дифференциальное сопротивление $R_{\text{диф}}$ элемента с выпуклой характеристикой увеличивается (рис. 1.24а), а элемента с вогнутой характеристикой — уменьшается (рис. 1.24б). При этом в первом случае $R_{\text{диф}} > R_{\text{ст}}$, а во втором — $R_{\text{диф}} < R_{\text{ст}}$. Следовательно, если на каком-то участке вольт-амперной характеристики имеет место соотношение $R_{\text{диф}} > R_{\text{ст}}$, то с увеличением напряжения или тока сопротивление нелинейного элемента увеличивается, и наоборот.

Для нелинейного элемента с обратной зависимостью между напряжением и током (рис. 1.25) угол $\beta > 90^\circ$ и, следовательно, дифференциальное сопротивление такого элемента отрицательно. На горизонтальном участке AB характеристики бареттера (см. рис. 1.17) $R_{\text{диф}} \rightarrow \infty$, а на вертикальном участке AB характеристики лампы с тлеющим разрядом (см. рис. 1.20) $R_{\text{диф}} \rightarrow 0$.

Это показывает, что если статическое сопротивление всегда положительно, то дифференциальное сопротивление может быть отрицательным и положительным, равным нулю и стремиться к бесконечности. Чем больше разница между статическим и дифференциальным сопротивлениями, тем сильнее проявляется нелинейность данного элемента.

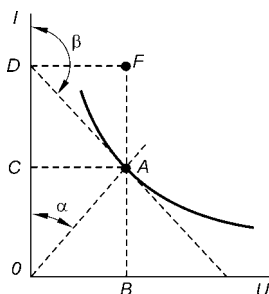


Рис. 1.25
Определение
статического
и дифференциального
сопротивлений
нелинейных элементов
с обратной зависимостью
между напряжением
и током

1.8. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Все методы основаны на использовании законов Кирхгофа, которые справедливы для расчета электрических цепей и с нелинейными элементами.

Графический метод расчета. Нелинейные элементы, подобно линейным, могут быть соединены между собой по схемам последовательного, параллельного и смешанного соединений. При графическом методе расчета электрических цепей вольт-амперные характеристики нелинейных элементов должны быть заданы в графической или табличной форме. Графический расчет имеет целью построение вольт-амперной характеристики всей нелинейной электрической цепи или ее части.

На рис. 1.26а изображена схема последовательного соединения двух нелинейных элементов (НЭ 1 и НЭ 2), вольт-амперные характеристики которых $I_1(U_1)$ и $I_2(U_2)$ представлены на рис. 1.26б. При последовательном соединении ток во всех элементах один и тот же, т. е. $I_1 = I_2 = I$, а напряжение источника питания $U = U_1 + U_2$. Для построения вольт-амперной характеристики всей цепи необходимо задаться некоторыми значениями тока в ней, по характеристикам отдельных элементов определить напряжения U_1 и U_2 на этих элементах при заданных значениях тока и сложить эти напряжения. Например, задаваясь током $I = |Oa|$ (рис. 1.26б), проводим через точку *a* горизонтальную штриховую линию, пересечение которой с характеристиками $I_1(U_1)$ и $I_2(U_2)$ в точках *b* и *c* дает значения напряжений $U_1 = |ab|$ и $U_2 = |ac|$. Складывая абсциссы точек пересечения, получаем абсциссу точки *d*, принадлежащей характеристике $I(U)$ всей цепи.

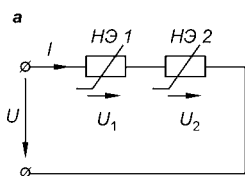
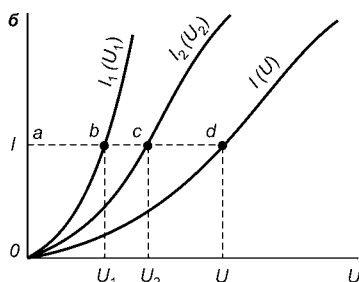
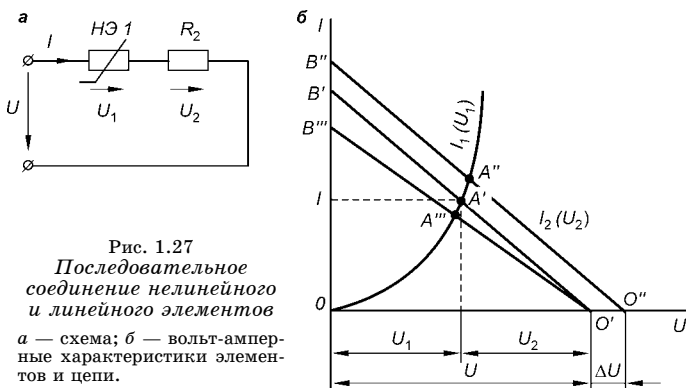


Рис. 1.26

*Последовательное соединение
нелинейных элементов*

a — схема; б — вольтамперные характеристики элементов и цепи.





Найдя таким образом семейство точек d , проводим через них искомую характеристику $I(U)$.

Если последовательно соединено несколько нелинейных элементов, то характеристику всей цепи находят аналогично. При наличии в цепи линейных элементов методика графического расчета в общем не изменяется. Однако в некоторых случаях (при постоянстве напряжения источника питания, при наличии линейного элемента в цепи и др.) удобнее применить другой графический метод. Он также основан на условиях, что при последовательном соединении $I_1 = I_2 = I$ и $U = U_1 + U_2$. При использовании этого метода характеристику одного из элементов строят из начала координат, а для второго строят так называемую *опрокинутую характеристику*. Рассмотрим этот метод на примере последовательного соединения нелинейного элемента $HЭ\ 1$ и линейного элемента R_2 (рис. 1.27а).

Характеристику нелинейного элемента $I_1(U_1)$ строят обычным образом. Напряжение на втором, линейном, элементе $U_2 = U - U_1$. Поэтому при заданном напряжении U источника питания для характеристики $I_2(U_2)$ второго элемента за начало координат можно взять точку O' и всю характеристику строить влево. Построенную таким образом характеристику и называют опрокинутой.

Опрокинутая характеристика линейного элемента, представляющая собой прямую линию, может быть построена по двум точкам. Если $U_2 = 0$, то характеристике $I_2(U_2)$ принадлежит точка O' ; если $U_1 = 0$, то характеристика $I_2(U_2)$ пересекает ось ординат в точке B' , определяемой соотношением $I_2 = U/R_2$.



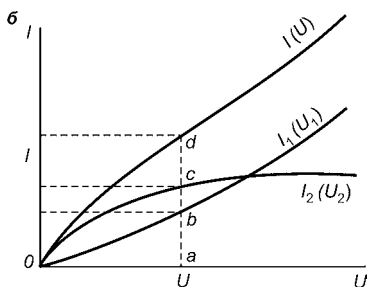
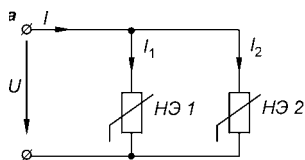


Рис. 1.28
Параллельное соединение
нелинейных элементов
а — схема; б — вольт-амперные ха-
рактеристики элементов и цепи.

Точка пересечения двух характеристик (точка A') определяет ток I в цепи и напряжения U_1 и U_2 на элементах при заданном напряжении U источника питания. При увеличении этого напряжения на ΔU характеристика линейного элемента перемещается вправо на ΔU и рабочей становится точка A'' . При напряжении $U = \text{const}$, но изменении сопротивления R_2 изменяется положение точки B' (точка B''' при увеличении R_2). Рабочая точка при этом A''' .

При параллельном соединении нелинейных элементов (рис. 1.28а) напряжение на них $U_1 = U_2 = U$, а ток в неразветвленной части цепи $I = I_1 + I_2$. Используя вольт-амперные характеристики нелинейных элементов (рис. 1.28б) и задаваясь некоторыми значениями напряжения, складывают ординаты, соответствующие токам в нелинейных элементах, и находят ток во всей цепи, например, $|ab| + |ac| = |ad|$. По нескольким точкам проводят искомую характеристику всей цепи.

При смешанном соединении элементов задача решается последовательно. Для схемы, представленной на рис. 1.29а, сначала находят характеристику части цепи, состоящей из последовательно соединенных нелинейного элемента НЭ 2 и линейного элемента R_3 . Эта характеристика на рис. 1.29б обозначена $I_2(U)$. Затем находят характеристику всей цепи $I(U)$, рассматривая параллельное соединение двух элементов с характеристиками $I_1(U)$ и $I_2(U)$.

Имея характеристики, представленные на рис. 1.29б, достаточно знать одно из напряжений (U_2 , U_3 , U) или один из токов (I_1 , I_2 , I), чтобы определить все остальные напряжения и токи. Допустим, что задано напряжение U_3 . Тогда по характеристике $I_2(U_3)$ определяют ток I_2 , затем по характеристикам $I_2(U_2)$ и $I_2(U)$ находят напряжения U_2 и U , соответствующие току I_2 , и, наконец, по

напряжению U и характеристикам $I_1(U)$ и $I(U)$ определяют токи I_1 и I .

Если теперь в цепь с нелинейным элементом последовательно включить источник ЭДС E (рис. 1.30а), то ее вольт-амперная характеристика несколько изменится. Известными являются вольт-амперная характеристика нелинейного элемента $I(U_{ab})$ (рис. 1.30б), а также значение и направление ЭДС. Для расчета цепи необходимо найти характеристику всей цепи, т. е. $I(U_{ac})$.

По второму закону Кирхгофа имеем $E = U_{ab} - U_{ac}$, или

$$U_{ac} = U_{ab} - E. \quad (1.13)$$

Из формулы (1.13) следует, что для построения характеристики $I(U_{ac})$ необходимо при всех значениях тока

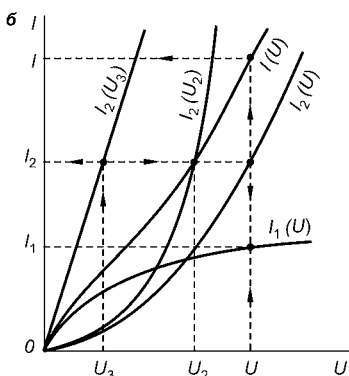
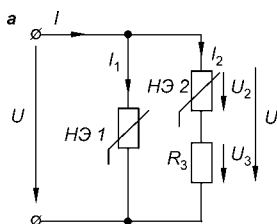


Рис. 1.29
Смешанное соединение
нелинейных и линейного
элементов

а — схема; б — вольт-амперные характеристики элементов и цепи.

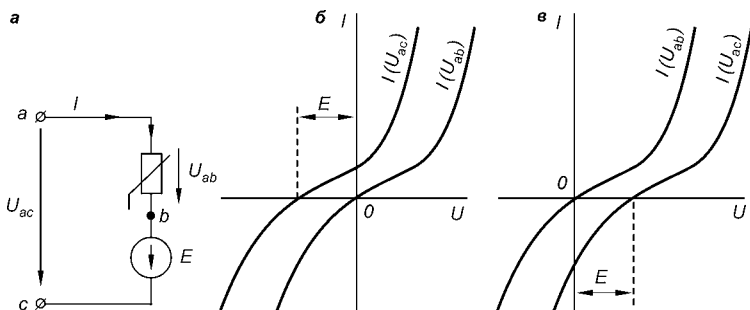


Рис. 1.30
Последовательное включение нелинейного элемента
и источника ЭДС

а — схема; б — вольт-амперные характеристики при согласном направлении ЭДС и тока; в — то же при встречном направлении ЭДС и тока.

характеристики $I(U_{ab})$ из напряжения U_{ab} вычесть ЭДС E . Это равносильно сдвигу характеристики нелинейного элемента влево на значение ЭДС (рис. 1.30б).

Если ЭДС направлена навстречу току в цепи, то для U_{ac} получим

$$U_{ac} = U_{ab} + E.$$

Следовательно, в этом случае характеристика всей цепи будет сдвинута вправо на значение ЭДС (рис. 1.30в).

Полученные выводы подтверждают известное положение, что если ЭДС и ток в цепи совпадают по направлению, то для поддержания какого-то значения тока требуется меньшее напряжение U_{ac} внешнего источника, и наоборот.

В случае смешанного соединения ветвь, содержащая нелинейный элемент и источник ЭДС, при графическом расчете учитывается вольт-амперной характеристикой $I(U_{ac})$, приведенной на рис. 1.30б, в.

Графический метод — наиболее простой метод расчета для нелинейных электрических цепей. Он применим во всех случаях, так как характеристики нелинейных элементов всегда бывают заданы графически.

Аналитический метод расчета. При графическом методе расчета невозможно провести общий анализ процессов, протекающих в электрической цепи. Если же выразить характеристики нелинейных элементов аналитически, то по законам Кирхгофа для любой нелинейной цепи можно написать систему нелинейных уравнений, в результате решения которой можно получить все интересные зависимости токов в ветвях от ЭДС и параметров ветвей. Однако характеристики некоторых нелинейных элементов затруднительно или даже невозможно выразить аналитически, а решение системы нелинейных уравнений даже при использовании приближенных методов затруднено.

Рассмотрим пример применения аналитического метода. В тех случаях, когда режим нелинейной электрической цепи изменяется в небольших пределах, небольшой участок характеристики можно заменить прямой линией, касательной к середине этого участка, или некоторые участки характеристики можно считать прямолинейными. Поэтому на рис. 1.31 участок ab характеристики

заменяют прямой линией. Напряжение, соответствующее точке A вольт-амперной характеристики, равно

$$U_A = -U_0 + m_U |dc|,$$

где U_0 — напряжение, измеряемое отрезком оси абсцисс между началом координат и точкой пересечения линии dA с осью абсцисс: $|dc| = |cA| \operatorname{tg} \beta = (I_A / m_I) \operatorname{tg} \beta$.

Тогда напряжение, соответствующее точке A , равно

$$U_A = -U_0 + m_u \frac{I_A}{m_i} \operatorname{tg} \beta = -U_0 + m_R I_A \operatorname{tg} \beta.$$

С учетом формулы (1.12) получим

$$U_A = -U_0 + R_{\text{диф}} I_A. \quad (1.14)$$

Постоянное по значению напряжение $-U_0$ может быть представлено источником ЭДС E , значение которой равно U_0 , а направление противоположно, т. е. совпадает с направлением тока в цепи.

Тогда уравнение (1.14), справедливое для участка ab характеристики, примет вид

$$U = E + R_{\text{диф}} I,$$

которому соответствует электрическая цепь, изображенная на рис. 1.31в.

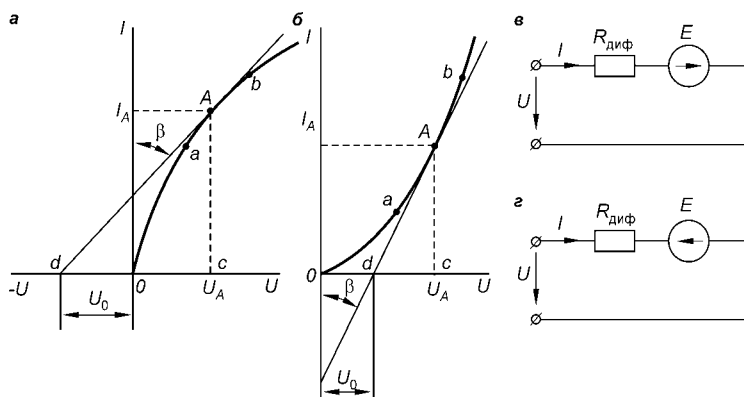


Рис. 1.31

Примеры использования вольт-амперных характеристик для аналитического расчета нелинейной цепи и построения схем замещения нелинейного элемента

$a, в$ — с выпуклой характеристикой; $б, г$ — с вогнутой характеристикой.

Таким образом, нелинейный элемент с выпуклой вольт-амперной характеристикой при работе его на участке ab характеристики может быть представлен схемой, состоящей из последовательно включенных линейного элемента, сопротивление которого равно дифференциальному сопротивлению нелинейного элемента на участке ab , и источника ЭДС $E = U_0$, направление которой совпадает с направлением тока в цепи.

В случае вогнутой вольт-амперной характеристики (рис. 1.31б) напряжение, соответствующее точке A , определяется уравнением

$$U_A = U_0 + m_U |dc|.$$

После преобразований получим

$$U_A = U_0 + R_{\text{диф}} I_A.$$

Заменяя напряжение U_0 на ЭДС E , направленную против тока в цепи, получим для участка ab характеристики

$$U = -E + R_{\text{диф}} I,$$

чему соответствует электрическая цепь, представленная на рис. 1.31г.

Нелинейный элемент с вогнутой вольт-амперной характеристикой заменяется последовательным включением линейного элемента с дифференциальным сопротивлением $R_{\text{диф}}$, соответствующего участку ab характеристики, и ЭДС $E = U_0$, направление которой противоположно направлению тока в цепи.

Замещение нелинейных элементов линейной эквивалентной цепью позволяет далее производить их расчет любым из рассмотренных в гл. 3 способов. Но полученные результаты будут справедливы только для участков ab вольт-амперных характеристик нелинейных элементов. Если в результате расчета рабочая точка A характеристики, определяемая напряжением U на нелинейном элементе и током I в нем, окажется за пределами участка ab , то нужно перейти к новому участку, найти для него значения $R_{\text{диф}}$ и E и провести новый расчет.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Широкое применение в электрических цепях электро-, радио- и других установок находят периодические ЭДС, напряжения и токи. Периодические величины изменяются во времени по значению и направлению, причем эти изменения повторяются через некоторые равные промежутки времени T (рис. 2.1), называемые *периодом*.

На практике все источники энергии переменного тока (генераторы электростанций) создают ЭДС, изменяющуюся по синусоидальному закону (рис. 2.1*д*).

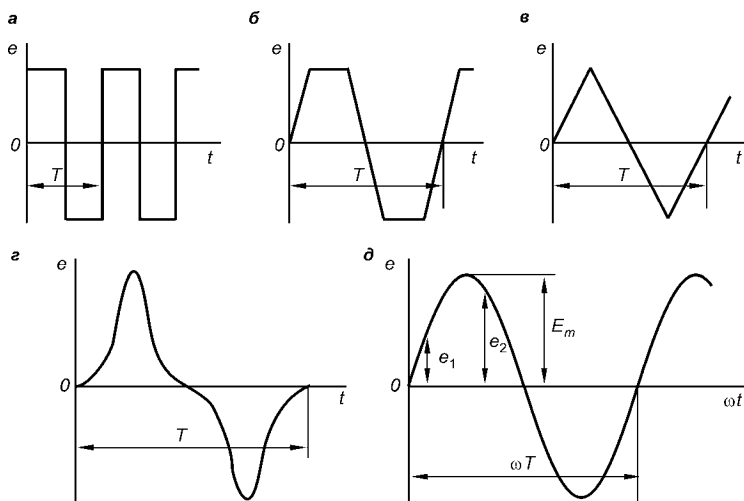


Рис. 2.1
Переменные периодические ЭДС различной формы

a — прямоугольной; *б* — трапецидальной; *в* — треугольной; *г* — произвольной; *д* — синусоидальной.

Основное преимущество такого закона изменения ЭДС и напряжения заключается в том, что в процессе передачи электроэнергии на большие расстояния (сотни и даже тысячи километров) от источника до потребителя при многократной трансформации (изменении) напряжения временная зависимость напряжения остается неизменной, т. е. синусоидальной.

Синусоидальные ЭДС, напряжения и токи начали широко применять в электротехнике во второй половине XIX века. В настоящее время практически вся вырабатываемая электроэнергия является энергией синусоидального тока. Лишь некоторую долю этой электроэнергии при использовании преобразуют в энергию постоянного тока.

Любая периодическая величина имеет ряд характерных значений. *Максимальные значения*, или *амплитуды*, ЭДС, напряжения и тока обозначают соответственно E_m , U_m , I_m (рис. 2.1*б*). Значение периодически изменяющейся величины в рассматриваемый момент времени называют *мгновенным* ее значением и обозначают e , u , i — ЭДС, напряжение и ток соответственно. Максимальное значение — частный случай мгновенного значения.

Величину, обратную периоду и равную числу полных изменений периодической величины за 1 с, называют *частотой*:

$$f = 1/T. \quad (2.1)$$

В качестве единицы измерения частоты принят герц (Гц). Во всех энергосистемах нашей страны и других европейских стран в качестве стандартной промышленной частоты принята частота $f = 50$ Гц, в США и Японии $f = 60$ Гц. Это обеспечивает получение оптимальных частот вращения электродвигателей переменного тока и отсутствие заметного для глаза мигания осветительных ламп накаливания.

Некоторые электротехнические устройства работают при более высокой частоте. Повышенная частота (обычно 175–200 Гц) позволяет снизить вес электродвигателей, применяемых для привода электроинструмента и средств автоматики. В установках сквозного нагрева металлов для горячей штамповки иковки применяют частоту от 500 до 10 000 Гц, а в установках поверхностного

нагрева металлов — от 2000 до 10^6 Гц. В радиотехнических устройствах применяют частоты от 10^5 до $3 \cdot 10^{10}$ Гц.

Находят применение также синусоидальные токи пониженной частоты. Частоту $f = 5 \dots 10$ Гц применяют в металлургической промышленности. В некоторых странах для электротяги на железных дорогах применяют частоту $16^{2/3}$ Гц.

Электрические цепи, в которых действуют синусоидальные ЭДС и токи, называют электрическими цепями синусоидального тока.

К ним относятся понятия схемы цепи, контура, ветви и узла, которые были даны ранее для цепей постоянного тока.

2.2. ПОЛУЧЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ЭДС

Поместим прямоугольную рамку в однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B = \text{const}$ (рис. 2.2a). Площадь рамки $S_m = bl$, где b — ее ширина, а l — длина. При вращении рамки с постоянной угловой скоростью ω сцепленный с нею магнитный поток Φ будет изменяться в зависимости от угла поворота $\alpha = \omega t$ рамки по закону (рис. 2.2б):

$$\Phi = BS_\alpha = BS_m \cos \alpha = \Phi_m \cos \omega t, \quad (2.2)$$

где $S_\alpha = S_m \cos \alpha$ — площадь рамки, сцепленная с магнитным потоком, $\Phi_m = BS_m$ — максимальный магнитный поток рамки, когда она занимает горизонтальное положение.

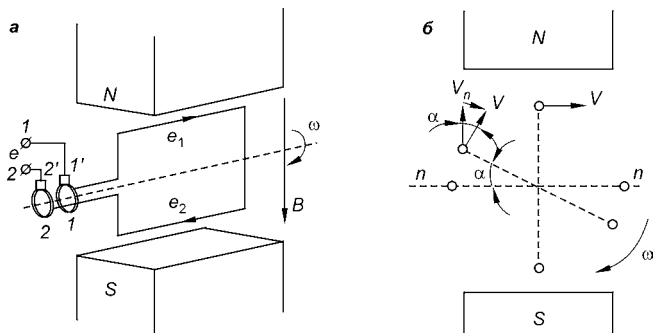


Рис. 2.2
К принципу получения синусоидальной ЭДС

Согласно закону электромагнитной индукции в рамке будет индуцироваться ЭДС, изменяющаяся по синусоидальному закону:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\Phi_m \cos \omega t) = \omega \Phi_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t, \quad (2.3)$$

где $E_m = \omega \Phi_m$ — амплитудное (максимальное) значение ЭДС. Направление ЭДС в проводниках определяют по правилу правой руки.

В простейшем генераторе концы витка присоединяют к вращающимся вместе с ним кольцам 1 и 2, по которым скользят неподвижные щетки 1' и 2'. От щеток отходят проводники к зажимам щитка генератора. Время одного оборота витка соответствует периоду T , а угол поворота равен ωT .

При числе пар полюсов $p = 1$ угловая частота ω изменения синусоидальной ЭДС равна угловой скорости вращения витка. При большем числе пар полюсов за один оборот витка синусоидальная ЭДС сделает большее число полных изменений, т. е. период T будет меньше времени, необходимого для одного оборота витка. На рис. 2.3 показаны две пары полюсов ($p = 2$). В этом случае угловая частота в два раза больше угловой скорости. В общем случае

$$\omega = 2\pi n p / 60,$$

где $2\pi n / 60$ — угловая скорость вращения; n — угловая частота вращения, об/мин.

На основании равенства $\omega T = 2\pi$ (см. рис. 2.1б) и с учетом формулы (2.1) можно получить соотношение между угловой скоростью ω и частотой f :

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f, \quad (2.4)$$

причем $f = p n / 60$.

У современных генераторов синусоидального тока обмотка состоит из большого числа последовательно соединенных витков. В каждом из них индуцируются синусои-

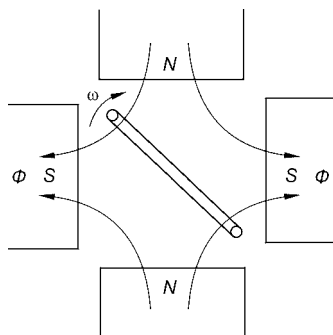


Рис. 2.3
Принципиальная схема простейшего генератора синусоидальной ЭДС с двумя парами полюсов

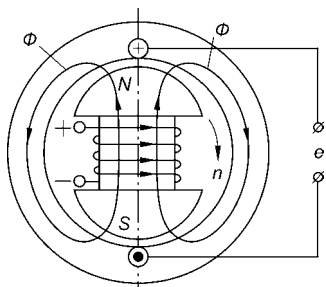


Рис. 2.4
Принципиальная схема
простейшего генератора
синусоидальной ЭДС с
вращающимися полюсами

дальние ЭДС, которые, складываясь, образуют также синусоидальную ЭДС, определяемую выражением (2.3). Обычно обмотка расположена на неподвижной части генератора — *статоре*, а вращающиеся магнитные полюсы вместе с обмоткой возбуждения, питаемой от источника постоянного тока, являются *ротором* (рис. 2.4). Постоянный по отношению к ротору магнитный поток вращается вместе с ним.

Магнитная индукция в воздушном зазоре между статором и ротором неодинакова: она максимальна по оси полюсов, а к их краям уменьшается по закону косинуса $B = B_m \cos \alpha$ (угол α отсчитывают от осевой линии полюсов ротора). Магнитный поток, а следовательно, и потокосцепление с любым витком, изменяется во времени по закону $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$.

ЭДС, индуцируемая в витке

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t,$$

где $E_m = \omega \Phi_m$.

Таким образом, ЭДС генератора также изменяется по синусоидальному закону.

2.3. ДЕЙСТВУЮЩИЕ И СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЭДС, НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Как постоянный, так и синусоидальный токи используются для совершения какой-либо работы, в процессе которой электроэнергия преобразуется в другие виды энергии (тепловую, механическую и т. д.). Для количественной оценки синусоидального тока (ЭДС и напряжения), который в течение времени непрерывно периодически изменяется, используют значение постоянного тока, эквивалентное значению синусоидального тока по совершаемой работе. Такое значение будет *действующим* для синусоидального тока.

Действующим значением синусоидального тока называют такое значение постоянного тока, при котором в одном и том же резисторе с сопротивлением R за время одного периода T выделяется столько же теплоты, сколько и при синусоидальном токе.

При синусоидальном токе $i = I_m \sin \omega t$ количество теплоты Q_- , выделяемое в резисторе R за время T ,

$$Q_- = \int_0^T i^2 R dt,$$

а при постоянном токе

$$Q_- = RI^2 T.$$

Согласно определению, $Q_- = Q_+$, тогда

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (2.5)$$

Таким образом, действующее значение синусоидального тока является его среднеквадратичным значением за время, равное одному периоду.

Чтобы найти соотношение между максимальным и действующим значениями синусоидального тока, надо вычислить интеграл в (2.5):

$$\int_0^T i^2 dt = I_m^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt = I_m^2 \int_0^T \frac{dt}{2} - I_m^2 \int_0^T \frac{\cos 2\omega t}{2} dt.$$

Так как $\int_0^T \cos 2\omega t dt = 0$, получаем

$$\int_0^T i^2 dt = \frac{I_m^2}{2} \int_0^T dt = \frac{I_m^2 T}{2}.$$

Подставляя это выражение в формулу (2.5), получим

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m. \quad (2.6)$$

Аналогично, действующие значения ЭДС и напряжений равны соответственно

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707 E_m, \quad (2.7)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m. \quad (2.8)$$

Действующие значения синусоидальных величин в $\sqrt{2}$ раз меньше их амплитудных значений. Для периодических величин, изменяющихся по другому закону, это соотношение будет другим. Действующие значения синусоидального тока, ЭДС и напряжения обозначают прописной буквой без индексов, как постоянные ток, ЭДС и напряжение.

В большинстве электроизмерительных приборов, измеряющих ток и напряжение, используется принцип теплового или электродинамического эффекта. Поэтому они всегда показывают действующее значение, зная которое можно вычислить амплитуду по формулам (2.6)–(2.8). Так, например, если вольтметр показывает 220 В синусоидального напряжения, то амплитуда этого напряжения равна $\sqrt{2} \cdot 220 = 311$ В.

Под *средним значением* синусоидальной величины понимают ее среднеарифметическое значение. Если определять среднее значение синусоидальных величин за период, то оно будет равно нулю, так как положительная и отрицательная полуволны синусоидальных кривых совпадают по форме. Поэтому среднее значение синусоидального тока, ЭДС и напряжения определяют за полпериода.

За среднее значение синусоидального тока принимают такое значение постоянного тока, при котором за полпериода переносится такой же электрический заряд, что и при синусоидальном токе.

Согласно этому можно написать

$$I_{\text{ср}} \frac{T}{2} = \int_0^{T/2} i dt, \quad (2.9)$$

где $I_{\text{ср}}$ — среднее значение тока.

Для синусоидального тока $i = I_m \sin \omega t$ с учетом (2.4) получим

$$\int_0^{T/2} i dt = I_m \int_0^{T/2} \sin \omega t dt = \frac{I_m T}{\pi}.$$

Подставляя это выражение в (2.9), имеем

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m.$$

Аналогично, для ЭДС и напряжения

$$E_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} E_m = 0,637 E_m; \quad U_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} U_m = 0,637 U_m.$$

Как и следовало ожидать, среднее значение меньше действующего. Отношение действующего значения к среднему называют *коэффициентом формы периодической кривой*. Для синусоидальной кривой коэффициент формы

$$k_{\Phi} = \frac{I}{I_{\text{ср}}} \cong 1,11.$$

Для периодической кривой, имеющей прямоугольную форму (см. рис. 2.1а), $I = I_{\text{ср}} = I_m$ и $k_{\Phi} = 1$. Чем больше коэффициент формы кривой отличается от единицы, тем больше кривая отличается от прямоугольной формы, т. е. имеет более «пиковый» характер.

2.4. ИЗОБРАЖЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЭДС, НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КООРДИНАТАХ

В общем случае аргумент синусоидальной функции, называемый *фазовым углом* или просто *фазой*, равный $\omega t + \psi$ или $\omega t - \psi$, может отличаться от нуля при $t = 0$. Тогда мгновенные значения можно записать так:

$$\begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t \pm \psi_e); & u &= U_m \sin(\omega t \pm \psi_u); \\ i &= I_m \sin(\omega t \pm \psi_i). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Значение фазового угла при $t = 0$ называют *начальной фазой* (ψ_e, ψ_u, ψ_i).

Графическое изображение синусоидальной ЭДС в прямоугольных координатах было показано ранее (см. рис. 2.1б). Аналогично этому изображают напряжение и ток, записываемые уравнениями (2.10), когда начальные фазы равны нулю (рис. 2.5). В этом случае синусоидальные величины одновременно принимают нулевые или максимальные значения. О таких величинах говорят, что они *совпадают по фазе*. Синусоидальные величины будут также совпадать по фазе, если их начальные фазы равны.

Если две синусоидальные величины одновременно проходят

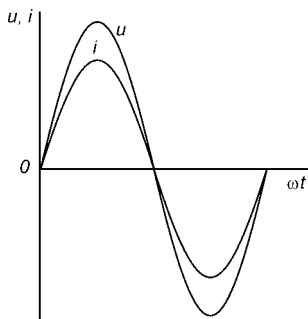


Рис. 2.5
Синусоидальные напряжение и ток, совпадающие по фазе

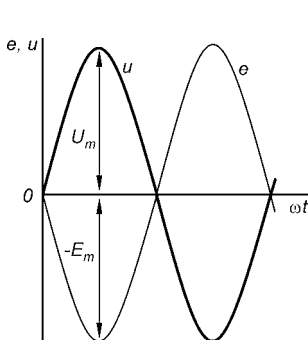


Рис. 2.6
Синусоидальные ЭДС и напряжение,
находящиеся в противофазе

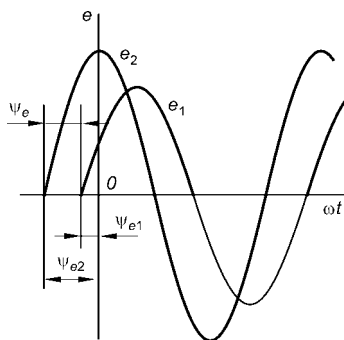


Рис. 2.7
Синусоидальные ЭДС,
не совпадающие по фазе

через нулевые значения и одновременно принимают максимальные значения противоположных знаков, то такие величины *находятся в противофазе* или *сдвинуты по фазе* на угол π (рис. 2.6).

На практике чаще всего имеют место случаи, когда ЭДС, напряжения и токи не совпадают по фазе, т. е. через нулевые значения проходят не одновременно (рис. 2.7). Если такие ЭДС описываются уравнениями

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t \pm \psi_{e_1}); \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t \pm \psi_{e_2}),$$

то при $\psi_{e_2} > \psi_{e_1}$ ЭДС e_2 *опережает по фазе* ЭДС e_1 , или ЭДС e_1 *отстает по фазе* от ЭДС e_2 . Разность фазовых углов, равную разности начальных фаз

$$\psi_e = \psi_{e_2} - \psi_{e_1}, \quad (2.11)$$

называют разностью или *сдвигом фаз*.

С помощью графического изображения в прямоугольных координатах можно находить опережающую и отстающую синусоидальные величины. При этом пользуются таким правилом. Отстает по фазе та из двух синусоидальных величин, которая при переходе от отрицательных значений к положительным позже (правее) пересекает ось абсцисс. На рис. 2.7 ЭДС e_1 отстает по фазе от ЭДС e_2 . Фазовый угол, определяемый отрезком оси абсцисс, заключенным между точками пересечения ее синусоидальными кривыми, является углом сдвига по фазе (угол ψ_e).

Таким образом, можно сделать вывод: если синусоидальная величина при переходе от отрицательных значе-

ний к положительным пересекает ось абсцисс левее оси ординат, то она имеет положительную начальную фазу, а если правее — то отрицательную. Например, ЭДС, изображенные на рис. 2.8, описываются уравнениями

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_{e_1});$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - \psi_{e_2}).$$

Особое значение в электротехнике и электроэнергетике имеет сдвиг по фазе φ между напряжением и током. В соответствии с формулой (2.11)

$$\varphi = \psi_u - \psi_i,$$

где ψ_u и ψ_i — начальные фазы напряжения и тока.

Если начальную фазу тока выразить через начальную фазу напряжения: $\psi_i = \psi_u - \varphi$, то напряжение и ток будут описываться уравнениями

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u);$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi).$$

Если $\psi_u = 0$, то $u = U_m \sin \omega t$;
 $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$.

Эти уравнения показывают, что если угол φ положительный, то ток отстает по фазе от напряжения на этот угол (рис. 2.9), и наоборот.

При сложении синусоидальных величин, изображенных в прямоугольных координатах, надо сложить ординаты для ряда значений угла ωt и по точкам построить синусоиду суммарной величины. Чем больше

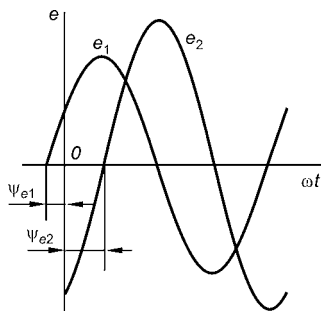


Рис. 2.8
Синусоидальные ЭДС с положительной и отрицательной начальными фазами

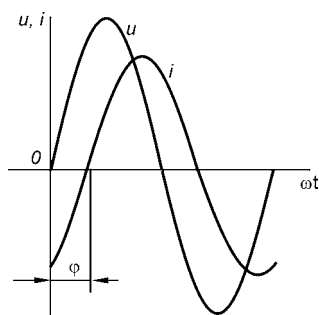


Рис. 2.9
Синусоидальное напряжение и ток, сдвинутые по фазе на φ

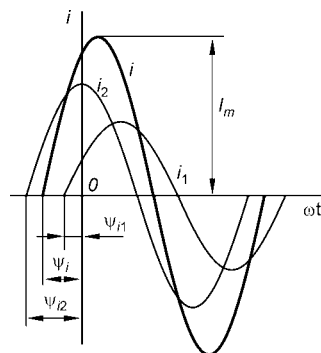


Рис. 2.10
Графическое сложение синусоидальных токов

точек берут для построения, тем точнее сложение. На рис. 2.10 показано сложение двух токов i_1 и i_2 . Суммарный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, причем $I_m \neq I_{1m} + I_{2m}$, а $\psi_i \neq \psi_{i2} - \psi_{i1}$.

2.5. ВЕКТОРНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЭДС, НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Графическое построение синусоидальных величин в прямоугольных координатах является довольно трудоемкой операцией. Графическое сложение двух (или более) таких величин требует больших затрат времени, а хорошая точность при определении амплитуды суммарной величины и ее начальной фазы может быть достигнута лишь путем сложения очень большого числа мгновенных значений слагаемых. Значительно проще складывать две синусоидальные величины, изменяющиеся с одинаковой частотой, представив их вращающимися векторами.

В плоскости с осями координат OX и OY (рис. 2.11а) рассмотрим вращающийся с постоянной скоростью, равной угловой частоте ω , вектор OA , длина которого равна амплитуде синусоидальной ЭДС $e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$, т. е. $|OA| = E_m$.

За положительное направление вращения вектора OA принимаем направление, противоположное вращению часовой стрелки, а угол поворота вектора отсчитываем от

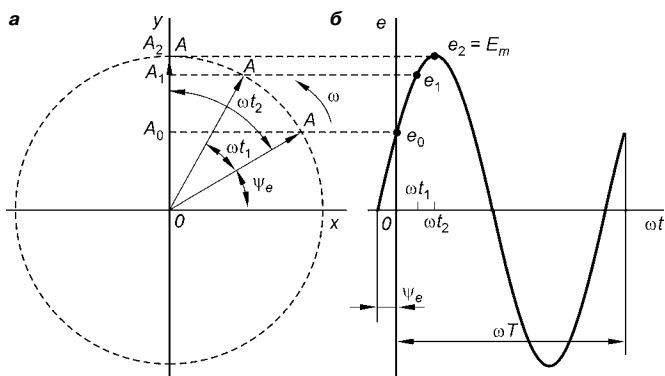


Рис. 2.11
Векторное изображение синусоидальных ЭДС

а — вращающийся вектор; б — кривая изменения его проекции на ось OY .

оси OX . В начальном положении (при $t = 0$) вектор OA повернут по отношению к оси OX на угол ψ_e .

Построим проекции вектора OA на ось OY (рис. 2.11б), которые изменяются по мере поворота вектора на угол ωt по отношению к начальному положению. В начальном положении проекция $OA_0 = OA \sin \psi_e = E_m \sin \psi_e = e_0$, т. е. равна мгновенному значению ЭДС при $t = 0$. Через некоторое время вектор OA повернется на угол ωt_1 и будет составлять с осью OX угол $\omega t_1 + \psi_e$. Проекция его на ось OY : $OA_1 = OA \sin(\omega t + \psi_e) = E_m \sin(\omega t_1 + \psi_e) = e_1$, т. е. равна мгновенному значению ЭДС при $t = t_1$. При $t = t_2$ вектор OA направлен по оси OY и его проекция $OA = E_m = e_2$. При дальнейшем вращении вектора OA его проекции на ось OY начнут уменьшаться, затем станут отрицательными и т. д.

Таким образом, проекции на ось OY вектора, вращающегося с постоянной скоростью ω и имеющего длину, равную амплитуде ЭДС, изменяются по синусоидальному закону, т. е. представляют собой мгновенные значения синусоидальной ЭДС. Следовательно, справедливо и обратное: любую синусоидально изменяющуюся во времени величину можно изображать вращающимся вектором, длина которого равна амплитуде, а угловая скорость вращения — угловой частоте этой синусоидальной величины. Начальное положение вращающегося вектора определяется углом, равным начальной фазе синусоидальной величины и откладываемым от положительного направления оси OX в сторону, противоположную вращению часовой стрелки.

Векторами можно изображать синусоидальные ЭДС, напряжения, потенциалы и токи. В одних и тех же координатах OX и OY можно представить векторы всех ЭДС, действующих в данной электрической цепи, напряжений на всех участках этой цепи и токов во всех ее ветвях. Так как все ЭДС, напряжения и токи имеют одинаковую частоту, то изображающие их векторы вращаются с одинаковой угловой скоростью. Их взаимное расположение на плоскости остается постоянным. Поэтому векторы на практике не вращают, а строят их, соблюдая углы между векторами, которые представляют собой углы сдвига фаз. Отказавшись от вращения векторов, можно строить векторы не только максимальных, но и действующих значений.

Найдем сумму двух ЭДС, имеющих разные амплитуды и начальные фазы (рис. 2.12а):

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_{e_1}); e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_{e_2}).$$

Проекции слагаемых векторов на ось OY равны мгновенным значениям e_1 и e_2 слагаемых ЭДС. Мгновенное значение суммарной ЭДС $e = e_1 + e_2$, т. е. равно сумме проекций слагаемых векторов на ось OY . Как известно, сумма проекций векторов на какую-либо из осей равна проекции их геометрической суммы на эту же ось. Следовательно, надо сложить геометрически (по правилу параллелограмма) векторы слагаемых ЭДС E_{1m} и E_{2m} и найти вектор суммарной ЭДС $E_m = E_{1m} + E_{2m}$. Длина этого вектора равна амплитуде искомой ЭДС, а угол ψ_e между ним и осью OX равен ее начальной фазе. Определив амплитуду и начальную фазу, находим суммарную ЭДС:

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e).$$

Так как слагаемые ЭДС имеют одинаковую частоту ω , то такую же частоту будет иметь и суммарная ЭДС. Геометрическое сложение векторов действующих значений E_1 и E_2 тех же ЭДС показано на рис. 2.12б.

В связи с отсутствием необходимости вращения векторов отпадает необходимость в изображении осей координат. Интересуясь только взаимным расположением векторов, один из них можно проводить в любом направлении. Обычно начальный вектор для удобства располагают горизонтально (рис. 2.12в) или вертикально. При построе-

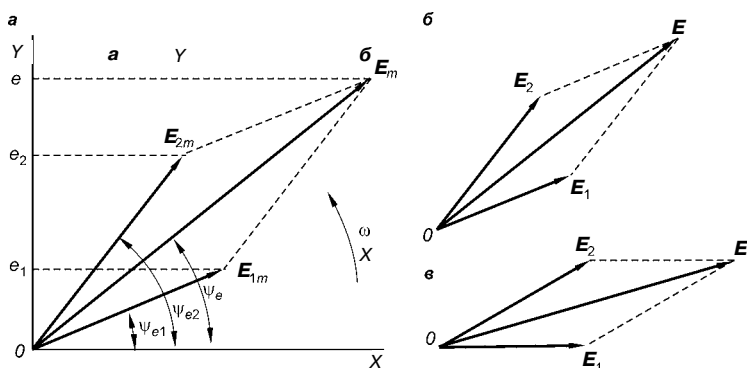


Рис. 2.12

Геометрическое сложение вращающихся векторов

a — максимальных значений ЭДС; *б* — действующих значений ЭДС при произвольном расположении векторов; *в* — действующих значений ЭДС при расположении начального вектора E_1 по горизонтальной линии.

нии остальных векторов соблюдают их правильное взаимное положение.

Совокупность векторов ЭДС, напряжений и токов, являющихся изображениями ЭДС, напряжений и токов одинаковой частоты, действующих в какой-то электрической цепи, построенных с учетом их правильного взаимного расположения на плоскости, называют *векторной диаграммой*.

Для простейшей электрической цепи, состоящей из одного элемента, на зажимах которого действует напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ и ток в котором $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi)$ отстает по фазе на угол φ от напряжения, векторная диаграмма имеет вид, представленный на рис. 2.13.

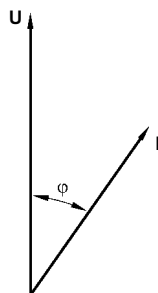


Рис. 2.13
Векторная
диаграмма
простейшей
электрической
цепи

Начальные фазы напряжения (ψ_u) и тока (ψ_i) на векторной диаграмме никак не изображаются, так как взаимное положение векторов полностью определяется разностью фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

2.6. КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА

Синусоидальные функции (ток, напряжение, ЭДС) очень просты, но их графическое изображение и операции с ними трудоемки и недостаточно точны. Эти операции можно существенно упростить, если синусоидальные функции времени изобразить комплексными числами.

Из курса математики известно, что любое комплексное число \underline{A} можно представить:

- | | | |
|--------------------------------|---|----------|
| а) в алгебраической форме: | $\underline{A} = A' + jA'';$ | } (2.12) |
| б) в тригонометрической форме: | $\underline{A} = A(\cos \alpha + j \sin \alpha);$ | |
| в) в показательной форме: | $\underline{A} = A e^{j\alpha};$ | |
- г) вектором на комплексной плоскости (рис. 2.14),

где $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица, $A' = \Re(\underline{A}) = A \cos \alpha$ — реальная часть комплексного числа \underline{A} (проекция вектора \underline{OA} на ось вещественных); $A'' = \Im(\underline{A}) = A \sin \alpha$ — мнимая часть комплексного числа \underline{A} (проекция вектора \underline{OA} на ось мнимых); $A = |\underline{A}| = \sqrt{A'^2 + A''^2}$ — модуль комплексного числа;

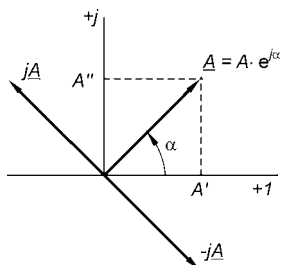


Рис. 2.14
Изображение комплексного числа на комплексной плоскости

Угол α отсчитывают от положительного направления оси вещественных (ось Re). Положительный угол отсчитывают в направлении, противоположном движению часовой стрелки, отрицательный — в направлении движения часовой стрелки.

Множитель $e^{j\alpha}$ называют также *оператором поворота*. Умножение любого комплексного числа на $e^{j\alpha}$ приводит к изменению его аргумента на угол α и повороту вектора, соответствующего этому числу, на тот же угол в положительном или отрицательном направлении относительно положительного направления оси вещественных. Поскольку $e^{\pm j\pi/2} = \pm j$, то умножение комплексного числа \underline{A} на j приводит к увеличению его аргумента на $\pi/2$ и повороту вектора, изображающего комплексное число \underline{A} , на угол $\pi/2$ в положительном направлении, а умножение на $-j$ — к уменьшению аргумента на $\pi/2$ и повороту вектора на тот же угол в отрицательном направлении (рис. 2.14).

Два комплексных числа, имеющие равные модули и равные, но противоположные по знаку аргументы, называют *сопряженными*.

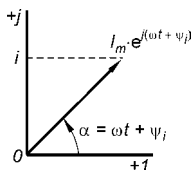


Рис. 2.15
Изображение комплексного числа вращающимся вектором на комплексной плоскости

Для комплексного числа $\underline{A} = A' + jA'' = Ae^{j\alpha}$ сопряженным является комплексное число $\underline{A}^* = A' - jA'' = Ae^{-j\alpha}$, причем $\underline{A}\underline{A}^* = A^2$.

Рассмотрим синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ и комплексное число

$$I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_m e^{j\psi_i} e^{j\omega t} = \underline{I_m} e^{j\omega t},$$

модуль и аргумент которого соответственно равны амплитуде и фазе синусоидального тока.

множитель $e^{j\alpha} = \cos\alpha + j\sin\alpha$ называют формулой Эйлера; $\alpha = \arg(\underline{A})$ — главное значение аргумента комплексного числа, причем

$$\alpha = \begin{cases} \arctg \frac{A''}{A'}, & A' > 0, \\ \arctg \frac{A''}{A'} \pm \pi, & A' < 0. \end{cases} \quad (2.13)$$

Угол α отсчитывают от положительного направления оси вещественных (ось Re).

С одной стороны, данное комплексное число представляет аналитическую запись вектора с модулем I_m , вращающегося в комплексной плоскости с постоянной угловой скоростью ω , равной угловой частоте синусоидального тока, в направлении, противоположном движению часовой стрелки (рис. 2.15).

С другой стороны, данное комплексное число, согласно формуле Эйлера, можно представить в тригонометрической форме:

$$I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_m \cos(\omega t + \psi_i) + j I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Сравнивая последнее с формулой для тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, видно, что

$$i = \Im \left(I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} \right) = \Im \left(\underline{I}_m e^{j\omega t} \right),$$

т. е. синусоидальный ток равен проекции на ось мнимых вращающегося вектора, изображающего комплексное число.

Таким образом, синусоидальному току i (*оригиналу*) может быть поставлено в соответствие комплексное число (*изображение*) $\underline{I}_m e^{j\omega t}$. Условная запись такого преобразования имеет вид

$$i \rightarrow \underline{I}_m e^{j\omega t}. \quad (2.14)$$

Аналогичные преобразования могут быть выполнены для синусоидальных напряжений и ЭДС:

$$u \rightarrow \underline{U}_m e^{j\omega t}, \quad e \rightarrow \underline{E}_m e^{j\omega t}. \quad (2.14a)$$

Над комплексными числами, изображающими синусоидальные ЭДС, напряжения и токи, можно производить все алгебраические действия. При сложении и вычитании комплексных чисел удобнее пользоваться алгебраической формой записи, а при умножении, делении, возведении в степень и извлечении корней — показательной формой записи в соответствии с уравнениями (2.12).

Комплексное число

$$\underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = I_m \cos \psi_i + j I_m \sin \psi_i = I'_m + j I''_m, \quad (2.15)$$

модуль и аргумент которого соответственно равны амплитуде и начальной фазе синусоидального тока, называют *комплексной амплитудой тока*.

Комплексным действующим током (комплексным током) называют комплексное число

$$\underline{I} = \frac{\underline{I}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\psi_i} = I \cos \psi_i + j I \sin \psi_i = I' + j I'' \quad (2.15a)$$

Аналогично комплексные амплитуды и комплексные действующие напряжения и ЭДС соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_m &= U_m e^{j\psi_u}, \quad \underline{U} = U e^{j\psi_u}, \\ \underline{E}_m &= E_m e^{j\psi_e}, \quad \underline{E} = E e^{j\psi_e}. \end{aligned} \right\} \quad (2.15b)$$

Таким образом, при изображении синусоидальных величин комплексными числами в показательной форме записи в качестве модуля следует брать амплитуду (или действующее значение) синусоидальной величины, а в качестве аргумента — ее начальную фазу.

Режим работы электрической цепи переменного тока, как правило, описывается системой дифференциальных уравнений для мгновенных значений синусоидальных токов, напряжений и ЭДС, членами которых могут быть производные любого порядка и интегралы от синусоидальных функций времени. Поскольку производные любого порядка и интегралы от синусоидальных функций также являются синусоидальными функциями, то им, как и синусоидальным токам, напряжениям и ЭДС, можно поставить в соответствие комплексные числа, являющиеся изображениями этих величин. Так, для синусоидального тока, для которого имеем $i \rightarrow \underline{I}_m e^{j\omega t}$, получим

$$\frac{di}{dt} \rightarrow j\omega \underline{I}_m e^{j\omega t}, \quad \frac{d^n i}{dt^n} \rightarrow (j\omega)^n \underline{I}_m e^{j\omega t}, \quad \int i dt \rightarrow \frac{1}{j\omega} \underline{I}_m e^{j\omega t}. \quad (2.16)$$

Таким образом, производной от синусоидального тока можно поставить в соответствие комплексное число, изображающее этот синусоидальный ток, умноженное на $j\omega$, а интегралу от синусоидального тока — комплексное число, изображающее синусоидальный ток, деленное на $j\omega$.

Аналогичные преобразования могут быть выполнены и для синусоидальных напряжений и ЭДС.

Комплексный метод расчета электрических цепей синусоидального тока применим только при установившихся режимах работы цепей и основан на использовании преобразований (2.14)–(2.16). Сущность его заключается в том, что, используя указанные преобразования, систему дифференциальных уравнений для действительных функций времени можно заменить системой алгебраических уравнений с комплексными токами, напряжениями и ЭДС.



Переход от дифференциальных уравнений к алгебраическим уравнениям с комплексными числами осуществляется заменой в них мгновенных значений тока i , напряжения u и ЭДС e комплексными числами в соответствии с (2.14) и (2.14а), а производных и интегралов от них — комплексными числами в соответствии с (2.16).

Так как комплексные амплитуды тока, напряжения и ЭДС и комплексные действующие токи, напряжения и ЭДС можно изображать векторами на комплексной плоскости, то расчет электрических цепей полезно сопровождать построением *векторных диаграмм*, под которыми понимают совокупность векторов на комплексной плоскости, изображающих синусоидально изменяющиеся функции времени одной и той же частоты и построенных с соблюдением правильной их ориентации относительно друг друга по фазе, что в ряде случаев позволяет выявить ошибки расчета. На векторных диаграммах принято изображать векторы комплексных токов, напряжений и ЭДС или комплексные амплитуды этих величин для момента времени $t = 0$.

В отличие от реальных физических величин, таких как ток, напряжение, ЭДС, комплексные ток \underline{I} , напряжение \underline{U} , ЭДС \underline{E} и, следовательно, производные от них, а также комплексные сопротивление \underline{Z} , проводимость \underline{Y} и др. не являются физическими величинами и поэтому не имеют никакого физического смысла, а значит, и единиц измерения. В то же время замена синусоидальных токов, напряжений и ЭДС соответствующими им комплексными числами позволяет существенно упростить математический анализ процессов в электрических цепях и электротехнических устройствах переменного тока в установившихся режимах.

2.7. ЗАКОНЫ КИРХГОФА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Для цепей синусоидального тока также справедливы законы Кирхгофа, сформулированные ранее для цепей постоянного тока. Но так как синусоидальные величины (ЭДС, напряжение, ток) характеризуются мгновенными,

максимальными и действующими значениями, то для каждого из них существуют свои формулировки законов Кирхгофа.

Для мгновенных значений законы Кирхгофа справедливы в алгебраической форме.

Первый закон Кирхгофа (для мгновенных значений).

Алгебраическая сумма мгновенных значений токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0,$$

где n — количество ветвей, подключенных к узлу.

Второй закон Кирхгофа (для мгновенных значений).

Алгебраическая сумма ЭДС в контуре равна алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n e_k = \sum_{k=1}^m u_k,$$

где n — количество источников ЭДС в контуре, а m — количество пассивных элементов в этом же контуре.

Для максимальных и действующих значений законы Кирхгофа справедливы только в векторной или комплексной форме.

Первый закон Кирхгофа (в комплексной форме).

Сумма комплексных токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (2.17a)$$

Второй закон Кирхгофа (в комплексной форме).

Сумма комплексных ЭДС в контуре равна сумме комплексных падений напряжения в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n \underline{E}_k = \sum_{k=1}^m \underline{U}_k. \quad (2.176)$$

Второй закон Кирхгофа (альтернативная формулировка).

Сумма мгновенных или комплексных значений напряжений на всех элементах контура, включая источники ЭДС, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \text{ или } \sum_{k=1}^n \underline{U}_k = 0. \quad (2.18)$$

При составлении уравнений по законам Кирхгофа в цепях синусоидального тока необходимо указать условное положительное направление ЭДС, задать условное положительное направление токов в ветвях и положительное направление падений напряжений на участках цепи, совпадающее с положительным направлением тока. Знак слагаемых в уравнениях определяется так же, как в цепях постоянного тока. Это относится как к мгновенным значениям синусоидальных величин, так и к комплексным.

2.8. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ С РЕЗИСТОРОМ

Электрический ток проводимости в металлах представляет собой направленное движение свободных электронов, скорость и направление которого определяются значением и полярностью приложенного к проводнику напряжения. При движении электроны сталкиваются с атомами проводящего вещества, и кинетическая энергия электронов, запасенная ими при ускорении, превращается в тепловую энергию, затрачиваемую на нагрев проводника и рассеиваемую в окружающую среду. Это необратимый активный процесс преобразования электрической энергии, который количественно определяется сопротивлением R . Потому его называют *активным сопротивлением*.

Активным сопротивлением обладают практически все материалы, проводящие электрический ток (металлы, уголь, электролиты). Таким образом, все провода, обмотки, реостаты и другие элементы цепи обладают активным сопротивлением. Элементы электрической цепи, обладающие только активным сопротивлением R , называют *резисторами*.

При рассмотрении электрических цепей постоянного тока сопротивление R называли просто сопротивлением. В теории цепей синусоидального тока его называют активным сопротивлением. С одной стороны, это вызвано тем, что необходимо привести название этого сопротивления в соответствие с названиями других по характеру сопротивлений (индуктивное, емкостное, реактивное, полное), характеризующих цепь синусоидального тока, с другой стороны — тем, что один и тот же проводник оказывает большее сопротивление движению электронов при синусоидальном токе, чем при постоянном (это будет

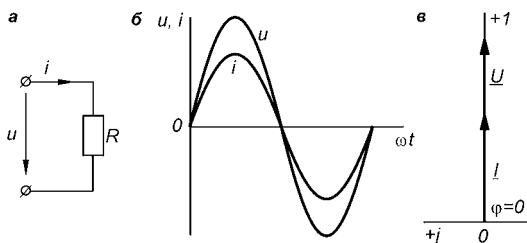


Рис. 2.16
Электрическая цепь с резистором R
а — схема; б — изменение мгновенных значений тока и напряжения; в — векторная диаграмма.

показано далее), т. е. активное сопротивление резистора больше его сопротивления постоянному току.

Пусть к зажимам цепи с активным сопротивлением R (рис. 2.16а) приложено напряжение источника питания $u = U_m \sin \omega t$. Для простоты принимаем, что начальная фаза напряжения равна нулю, так как для установившегося режима начальная фаза не имеет никакого значения.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для мгновенных значений напряжения имеем $u = Ri$. Решая это уравнение относительно тока i и заменяя u на $U_m \sin \omega t$, получаем

$$i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad (2.19)$$

причем амплитуда тока в цепи

$$I_m = U_m / R. \quad (2.20)$$

Из уравнения (2.19) видно, что ток в элементе с активным сопротивлением совпадает по фазе с напряжением на этом элементе (рис. 2.16б). Так как действующие значения напряжения и тока в $\sqrt{2}$ раз меньше их максимальных значений, то аналогично (2.20) можно записать $I = U/R$, т. е. действующие значения синусоидальных напряжений и тока связаны между собой законом Ома так же, как постоянные напряжение и ток.

На векторной диаграмме (рис. 2.16в) комплексные напряжение \underline{U} и ток \underline{I} в цепи представлены векторами на комплексной плоскости. Начала векторов совмещены с началом координат, длины векторов в соответствующем масштабе равны действующим значениям напряжения и тока. За начальный вектор принимаем вектор напряжения и совмещаем его с положительным направлением оси вещественных на комплексной плоскости. Для цепи с активным сопротивлением векторы напряжения \underline{U} и тока \underline{I} совпадают по направлению.

2.9. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ С ИНДУКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Индуктивностью L теоретически обладают все проводники с током. Но в некоторых случаях эта индуктивность так мала, что ею вполне можно пренебречь. Значительна индуктивность у обмоток или катушек, состоящих из большого числа витков провода. Индуктивность возрастает, если созданный током обмотки магнитный поток замыкается по пути с малым магнитным сопротивлением (например, по стальному сердечнику), вследствие чего магнитный поток увеличивается.

Рассмотрим идеальную катушку с постоянной индуктивностью L , т. е. такую катушку, активное сопротивление которой равно нулю.

Пусть к цепи с индуктивностью L (рис. 2.17а) приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$. Под действием этого напряжения в цепи индуктивной катушки возникает ток i . Этот ток создает магнитный поток Φ , который согласно закону электромагнитной индукции индуцирует в катушке ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (2.21)$$

где w — число витков катушки.

Знак минус согласно принципу электромагнитной инерции, сформулированному Э. Х. Ленцем, указывает на то, что ЭДС самоиндукции e_L всегда имеет такое направление, при котором она препятствует изменению магнитного потока или тока в цепи.

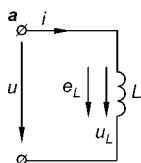
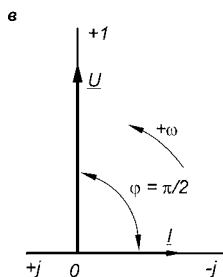
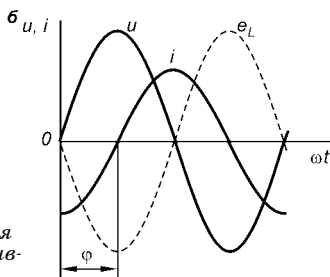


Рис. 2.17
Электрическая
цепь с индуктив-
ностью L



a — схема; b — изменение ЭДС самоиндукции, напряжения и тока; $в$ — векторная диаграмма.

На рис. 2.17а показаны условные положительные направления тока i в цепи и падения напряжения u_L на элементе с индуктивностью L . Условное положительное направление ЭДС e_L выбирают из условия, что ее действительное направление в любой момент времени противоположно направлению u_L ($u_L = -e_L$).

По второму закону Кирхгофа (2.18) имеем $u - u_L = 0$, а с учетом того, что $u_L = -e_L$, получаем

$$u + e_L = 0. \quad (2.22)$$

Чтобы получить это уравнение на основании (2.17б), условное положительное направление e_L следует всегда принимать совпадающим с положительным направлением тока.

Так как $u = U_m \sin \omega t$, а e_L определяется из (2.21), уравнение (2.22) принимает вид

$$U_m \sin \omega t - L \frac{di}{dt} = 0, \text{ или } \frac{di}{dt} = \frac{U_m}{L} \sin \omega t.$$

Решая это уравнение, получим выражение для тока в цепи (так как до включения цепи при $t = 0$ ток в цепи отсутствовал, то постоянная интегрирования равна нулю):

$$i = \frac{U_m}{L} \int \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Так как амплитуда тока

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}, \quad (2.23)$$

то окончательное выражение для тока имеет вид

$$i = I_m \sin(\omega t - \pi/2).$$

Видно, что в цепи с индуктивностью ток также изменяется по синусоидальному закону и отстает по фазе от напряжения на $\pi/2$ (рис. 2.17б).

Величину ωL в формуле (2.23), имеющую размерность сопротивления, обозначают X_L и называют *индуктивным сопротивлением*:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL. \quad (2.24)$$

Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте и индуктивности.

С учетом формулы (2.23) получаем

$$I_m = U_m/X_L.$$

Для действующих значений напряжения и тока

$$I = U/X_L. \quad (2.25)$$

Так как согласно (2.22) ЭДС самоиндукции численно равна напряжению на элементе с индуктивностью, то, используя формулу (2.25), имеем

$$X_L I = U = E_L. \quad (2.26)$$

Видно, что индуктивное сопротивление является коэффициентом пропорциональности между током и ЭДС самоиндукции.

Как было показано в § 2.6, в общем случае напряжению u и производной di/dt от синусоидального тока соответствуют комплексные числа

$$u \rightarrow U_m e^{j(\omega t + \psi_u)} = \underline{U}_m e^{j\omega t}, \quad \frac{di}{dt} \rightarrow j\omega I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = j\omega \underline{I}_m e^{j\omega t}.$$

Подставив последние выражения в уравнение

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$$

и сократив все его члены на $\sqrt{2}e^{j\omega t}$, получим уравнения связи для комплексных напряжения \underline{U}_L и тока \underline{I} , называемые **законом Ома в комплексной форме**:

$$\underline{U}_L = j\omega L \underline{I} = jX_L \underline{I}, \quad \underline{I} = \frac{\underline{U}}{jX_L} = -jB_L \underline{U}, \quad (2.27)$$

где $B_L = 1/X_L = 1/\omega L$ — реактивная индуктивная проводимость.

Если принять начальную фазу напряжения $\psi_u = 0$, то $\underline{U} = U$ и комплексный ток с учетом уравнений (2.25) и (2.27)

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{jX_L} = -jI = Ie^{-j\frac{\pi}{2}}.$$

На векторной диаграмме (рис. 2.17а) вектор напряжения, имеющий начальную фазу, равную нулю, отложен по вещественной оси, а вектор тока, имеющий начальную фазу $\psi_i = -\pi/2$, — в отрицательном направлении мнимой оси. Сдвиг фаз между напряжением и током в цепи с индуктивностью $\varphi = \pi/2$.

2.10. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ С ЕМКОСТНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Элементом электрической цепи, обладающим значительной емкостью, является конденсатор. Конструктивно конденсатор представляет собой две пластины с большой поверхностью, выполненные из проводящего материала и разделенные диэлектриком. Емкость C конденсатора определяет тот электрический заряд, который накапливается на пластинах при разности потенциалов между ними в 1 В.

Хотя пластины конденсатора и разделены диэлектриком, при переменном напряжении ток в цепи с конденсатором существует. Это связано с тем, что синусоидальное напряжение непрерывно меняется по значению и направлению, а следовательно, и заряд на пластинах конденсатора непрерывно меняется. Это изменение заряда и связанное с ним движение электронов и есть электрический ток в цепи.

Емкостью обладают любые два проводника, расположенные недалеко друг от друга. Но при малой поверхности их емкость невелика и ею обычно пренебрегают.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника питания и конденсатора емкостью C (рис. 2.18а). Будем считать, что конденсатор имеет идеальный диэлектрик, т. е. его активное сопротивление равно нулю. К цепи с конденсатором подведено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, под действием которого в цепи возникает ток i и на каждой пластине конденсатора скапливается заряд $Q = Cu_C$, где u_C — напряжение на конденсаторе.

По второму закону Кирхгофа для данной цепи имеем $u = u_C$. Тогда заряд на конденсаторе

$$Q = Cu = CU_m \sin \omega t.$$

Ток в цепи, представляющий собой изменение заряда во времени,

$$i = \frac{dQ}{dt} = \omega CU_m \cos \omega t = \omega CU_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

или

$$i = I_m \sin(\omega t + \pi/2), \quad (2.28)$$

где амплитуда тока

$$I_m = \omega CU_m = \frac{U_m}{1/\omega C}. \quad (2.29)$$

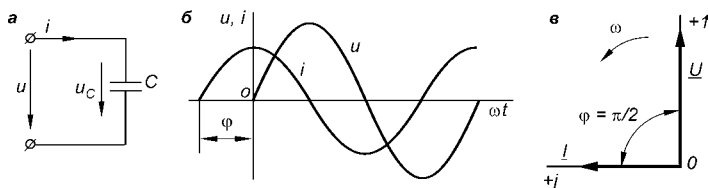


Рис. 2.18

Электрическая цепь с емкостью C

a — схема; b — изменение напряжения и тока; c — векторная диаграмма.

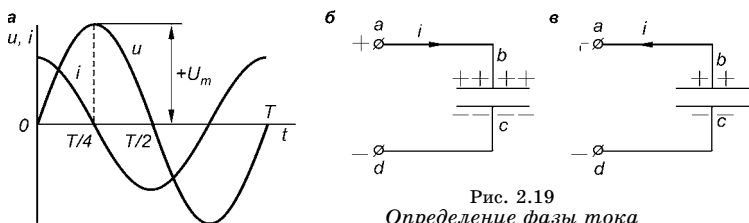


Рис. 2.19

Определение фазы тока
в цепи с емкостью

a — изменение напряжения и тока; b — направление тока в первую четверть периода; c — направление тока во вторую четверть периода.

Из формулы (2.28) видно, что ток в цепи с емкостью является синусоидальным и опережает напряжение по фазе на $\pi/2$ (рис. 2.18б).

Рассмотрим процесс возникновения тока в цепи с емкостью подробнее. Под действием приложенного к конденсатору напряжения происходит поляризация диэлектрика, т. е. смещение заряженных частиц, входящих в состав молекул его вещества, в противоположных направлениях. Электрически нейтральные при отсутствии внешнего электрического поля молекулы диэлектрика превращаются в *электрические диполи*, т. е. системы двух противоположных по знаку точечных зарядов. В процессе поляризации в диэлектрике происходит движение элементарных частиц в пределах молекулы, образующее *ток поляризации*, или *ток смещения*.

На рис. 2.19б, в показаны действительные мгновенные значения потенциалов точек a и d . В первую четверть периода ($0 < t < T/4$) потенциал точки a (рис. 2.19б) положительный и увеличивается от 0 до $+U_m$. Поляризация диэлектрика и ток в цепи пропорциональны скорости изменения потенциала точки a . Ток в цепи направлен от точки a , имеющей в данный промежуток времени больший потенциал, и совпадает по направлению с напряжением.

В момент времени $t = T/4$ потенциал точки a достигает значения $+U_m$ и в течение $\Delta t \rightarrow 0$ не изменяется, вследствие чего ток $i = 0$ (рис. 2.19а).

Во вторую четверть периода ($T/4 < t < T/2$) потенциал точки a остается положительным, но уменьшается от $+U_m$ до нуля. Пластина b конденсатора, заряженная до потенциала $+U_m$, оказывается в таких условиях, когда ее потенциал больше потенциала точки a . Направление тока изменяется на противоположное (рис. 2.19в), т. е. ток становится отрицательным. Наибольшая разность потенциалов имеет место при $t = T/2$. В этот момент времени ток достигает отрицательного максимума. Далее процесс повторяется.

Величину $1/(\omega C)$ в знаменателе правой части уравнения (2.29), имеющую размерность сопротивления, обозначают X_C и называют *емкостным сопротивлением*:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте и емкости конденсатора.

С учетом сделанных обозначений уравнение (2.29) для амплитудного значения тока в цепи с конденсатором примет вид $I_m = U_m/X_C$. Поделив обе части этого уравнения на $\sqrt{2}$, получим выражение закона Ома для действующих значений тока и напряжения:

$$I = U/X_C.$$

Уравнения связи для комплексных напряжения \underline{U}_C и тока \underline{I} в конденсаторе устанавливаются аналогично изложенному в § 2.9 и имеют вид

$$\underline{U}_C = -jX_C \underline{I}, \quad \underline{I} = \frac{\underline{U}}{-jX_C} = jB_C \underline{U},$$

где $B_C = 1/X_C = \omega C$ — реактивная емкостная проводимость.

Если принять начальную фазу напряжения $\psi_u = 0$, то комплексный ток

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{-jX_C} = j \frac{\underline{U}}{X_C} = j \frac{U}{X_C} = jI = Ie^{j\frac{\pi}{2}}. \quad (2.30)$$

Векторная диаграмма комплексных значений напряжения и тока представлена на рис. 2.18в.

2.11. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ С R , L И C . ЗАКОН ОМА В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ

Схеме электрической цепи, изображенной на рис. 2.20а, может соответствовать цепь последовательно соединенных индуктивной катушки с активным сопротивлением R и индуктивностью L и конденсатора с емкостью C . Активное сопротивление может также соответствовать сопротивлению какого-либо резистора, включенного последовательно с этими элементами. Во всяком случае R , L и C — это *параметры электрической цепи*, причем активное сопротивление R характеризует активный (необратимый) процесс преобразования электрической энергии в другие виды энергии, а индуктивность L и емкость C — обратимый процесс преобразования энергии электромагнитного поля.

Под действием напряжения $u = U_m \sin \omega t$ источника питания в цепи возникает ток i . Ток создает падения напряжения на элементах цепи:

$u_R = Ri$ — на элементе с активным сопротивлением;

$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$ — на элементе с индуктивностью;

$u_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt$ — на элементе с емкостью.

При заданных параметрах элементов R , L и C задача в конечном итоге сводится к определению действующих значений тока в цепи, напряжений на ее элементах и сдвига фаз φ между током и напряжением на зажимах

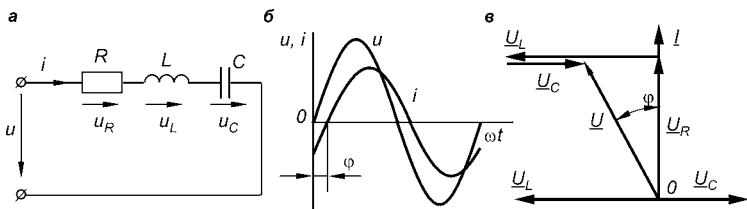


Рис. 2.20
Электрическая цепь при последовательном
соединении элементов с R , L и C

а — схема; б — изменение напряжения и тока; в — векторная диаграмма напряжений и тока.

цепи с тем, чтобы иметь возможность проводить количественный анализ процессов в цепи.

По второму закону Кирхгофа для данной цепи с учетом уравнений связи можно написать уравнение

$$u = u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt, \quad (2.31)$$

в результате решения которого определяют ток $i(t)$ в цепи.

Полным решением линейного дифференциального уравнения (2.31) с постоянными коэффициентами является сумма частного решения этого уравнения и общего решения однородного дифференциального уравнения

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = 0. \quad (2.32)$$

Уравнение (2.32) записано по второму закону Кирхгофа для цепи с последовательным соединением элементов R , L и C , когда напряжение источника питания равно нулю, т. е. когда электрическая цепь замкнута накоротко и электрическая энергия извне в цепь не поступает. В этих условиях ток в цепи может существовать только за счет запасов энергии в магнитном поле катушки или в электрическом поле конденсатора. При наличии тока в элементе с сопротивлением R происходит преобразование электроэнергии в тепловую и рассеяние ее в окружающую среду. Поэтому через некоторое время запасы электроэнергии будут израсходованы. Иными словами, ток, найденный в результате решения уравнения (2.32), через некоторое время будет равен нулю. Время, в течение которого существует этот ток, является *временем переходного процесса* в цепи и обычно исчисляется долями секунды.

Так как на данном этапе нас интересует только установившийся, стабильный режим цепи, существующий сколь угодно долго, то общего решения уравнения (2.31) искать не будем.

Найдем частное решение уравнения (2.31), т. е. ток установившегося режима. Так как правая часть этого уравнения — синусоидальная функция, то и частное решение следует искать в виде синусоидальной функции

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi). \quad (2.33)$$

Функция $i(t)$ полностью определена, если известны амплитуда тока I_m и сдвиг фаз φ между напряжением и током. Найдем эти величины.

Как было показано ранее, напряжение $u = U_m \sin \omega t$ изображается комплексным числом $\underline{U}_m e^{j\omega t}$; ток $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ — комплексным числом $\underline{I}_m e^{j\omega t}$; производная di/dt — комплексным числом $j\omega \underline{I}_m e^{j\omega t}$; интеграл $\int i dt$ — комплексным числом $\frac{\underline{I}_m e^{j\omega t}}{j\omega}$.

Перейдем от дифференциального уравнения (2.31) к алгебраическому уравнению в комплексной форме:

$$\underline{U}_m e^{j\omega t} = R \underline{I}_m e^{j\omega t} + j\omega L \underline{I}_m e^{j\omega t} + \frac{1}{j\omega C} \underline{I}_m e^{j\omega t}. \quad (2.34)$$

После преобразований имеем

$$\underline{U}_m = \left(R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \right) \underline{I}_m = \underline{Z} \underline{I}_m, \quad (2.34a)$$

а разделив обе части уравнения (2.34a) на $\sqrt{2}$, получим уравнение для комплексных действующих значений напряжения \underline{U} и тока \underline{I} :

$$\underline{U} = (R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}) \underline{I} = \underline{Z} \underline{I}. \quad (2.34б)$$

Из полученных уравнений следует, что

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}} \text{ и } \underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}. \quad (2.35)$$

Выражения (2.34a и б) и (2.35) являются записью **закона Ома в комплексной форме**. Коэффициент \underline{Z} в этих формулах называют *комплексным электрическим сопротивлением*.

Из уравнений (2.34a) и (2.34б) следует, что

$$\begin{aligned} \underline{Z} &= R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = \\ &= R + j(X_L - X_C) = R + jX, \end{aligned} \quad (2.36)$$

а из уравнения (2.35)

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_m}{\underline{I}_m} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U e^{j\psi_u}}{I e^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} e^{j\varphi} = Z e^{j\varphi}, \quad (2.37)$$

где $R = \Re(\underline{Z})$ — вещественная составляющая комплексного сопротивления \underline{Z} , равная активному сопротивлению цепи; $X = X_L - X_C = \Im(\underline{Z})$ — мнимая составляющая комплексного сопротивления \underline{Z} , называемая *реактивным сопротивлением цепи*, причем реактивное сопротивление цепи равно алгебраической разности индуктивного и емкостного сопротивлений. Реактивное сопротивление положительно, если $X_L > X_C$, и отрицательно, если $X_L < X_C$; Z — *полное сопротивление цепи*, причем

$$Z = |\underline{Z}| = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (2.38)$$

Из сказанного следует, что под комплексным электрическим сопротивлением \underline{Z} цепи понимают комплексную величину, равную отношению комплексного напряжения на зажимах цепи к комплексному току в этой цепи.

Модуль комплексного сопротивления равен полному электрическому сопротивлению цепи, а его аргумент равен сдвигу фаз между напряжением и током в этой цепи.

Полное электрическое сопротивление Z — это *параметр* электрической цепи. Оно равно отношению действующего значения напряжения на зажимах электрической цепи к действующему значению тока в этой цепи, а также равно корню квадратному из суммы квадратов активного и реактивного сопротивлений, взятому с положительным знаком.

Сказанное в равной мере относится и к участкам цепи, и к ее отдельным элементам. Так, для цепи с резистором R , индуктивностью L или емкостью C комплексные сопротивления равны:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_R = \frac{\underline{U}_R}{\underline{I}} = R; \quad \underline{Z}_L = \frac{\underline{U}_L}{\underline{I}} = j\omega L = jX_L; \\ \underline{Z}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{I}} = -j\frac{1}{\omega C} = -jX_C, \end{aligned}$$

а комплексные напряжения на этих элементах:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_R &= \underline{Z}_R \underline{I} = R \underline{I}, \\ \underline{U}_L &= \underline{Z}_L \underline{I} = jX_L \underline{I}, \\ \underline{U}_C &= \underline{Z}_C \underline{I} = -jX_C \underline{I}. \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

Таким образом, определив комплексный ток \underline{I} и напряжения на элементах цепи, можно найти их действующие значения:

$$I = |\underline{I}| = \frac{U}{Z}; \quad U_R = |\underline{U}_R| = RI;$$

$$U_L = |\underline{U}_L| = X_L I; \quad U_C = |\underline{U}_C| = X_C I.$$

Если воспользоваться равенством

$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi} = R + jX,$$

которое следует из уравнений (2.36) и (2.37), то можно определить сдвиг фаз

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R} = \operatorname{arctg} \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (2.40)$$

Для определения функции $i(t)$ в соответствии с уравнением (2.33) амплитудное значение тока находят из соотношения

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{\sqrt{2}U}{Z},$$

а сдвиг фаз φ определяют по уравнению (2.40), из которого видно, что значение угла φ зависит от соотношения между реактивным X и активным R сопротивлениями. Чем больше реактивное сопротивление по сравнению с активным, тем больше угол φ . Знак угла φ зависит от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями. Если $X_L > X_C$, то угол φ положительный и ток можно определять по формуле (2.33), откуда видно, что ток отстает по фазе от напряжения на угол φ . Если $X_L < X_C$, то угол φ отрицательный и ток $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, т. е. опережает по фазе напряжение на угол φ .

На рис. 2.20б показано, как изменяются напряжение и ток в цепи, представленной на рис. 2.20а, при условии $X_L > X_C$.

Векторную диаграмму строят на основании уравнений (2.39) с учетом того, что комплексное напряжение \underline{U} на зажимах цепи согласно второму закону Кирхгофа в комплексной форме равно

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C.$$

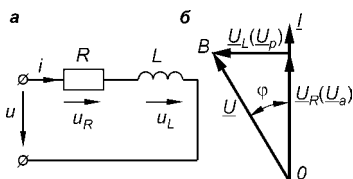


Рис. 2.21
Электрическая цепь
при последовательном
соединении элементов с R и L
а — схема; б — векторная диаграмма.

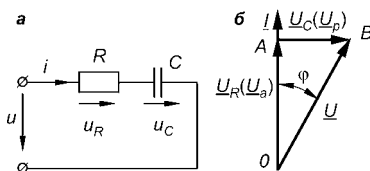


Рис. 2.22
Электрическая цепь
при последовательном соединении
элементов с R и C
а — схема; б — векторная диаграмма.

При построении векторной диаграммы (рис. 2.20в) в качестве начального удобно выбрать вектор тока, так как при последовательном соединении ток во всех элементах один и тот же. Как и ранее, начальный вектор совмещаем с положительным направлением вещественной оси (здесь и далее оси обозначать не будем).

Вектор \underline{U}_R на участке с активным сопротивлением совпадает по фазе с вектором \underline{I} , и на векторной диаграмме его проводим в направлении вектора тока. Падение напряжения \underline{U}_L на участке с индуктивностью опережает ток по фазе на угол $\pi/2$, причем поворачивать вектор надо против направления вращения часовой стрелки по отношению к вектору \underline{I} (см. § 2.6). Падение напряжения \underline{U}_C на участке с емкостью отстает от тока на угол $\pi/2$, причем вектор \underline{U}_C следует повернуть на угол 90° в направлении вращения часовой стрелки по отношению к вектору \underline{I} .

Вектор комплексного напряжения \underline{U} находят как геометрическую сумму векторов комплексных напряжений \underline{U}_R , \underline{U}_L и \underline{U}_C . Для этого к концу вектора \underline{U}_R пристраиваем вектор \underline{U}_L путем параллельного переноса, а к концу вектора \underline{U}_L пристраиваем вектор \underline{U}_C . Вектор полного напряжения \underline{U} соединяет начало координат с концом вектора \underline{U}_C (последнего слагаемого вектора). Поскольку векторная диаграмма построена для случая, когда $X_L > X_C$ (следовательно, и $U_L > U_C$), ток в цепи отстает от комплексного напряжения на угол φ .

Аналогично проводят анализ для электрических цепей с последовательным соединением элементов с R и L или с R и C . В первом случае (рис. 2.21а) имеем:

$$X_C = 0; \quad X = X_L; \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_L}{R}; \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}.$$

На рис. 2.21б представлена векторная диаграмма, соответствующая этому случаю. Ток в цепи отстает от напряжения на угол φ .

При последовательном соединении элементов с R и C (рис. 2.22а) имеем:

$$X_L = 0; \quad X = X_C; \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{-X_C}{R}; \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}.$$

На рис. 2.22б построена векторная диаграмма для такой цепи. Ток в ней опережает напряжение на угол φ .

Основные соотношения между электрическими величинами в электрических цепях приведены в табл. 2.1 на с. 74–75.

2.12. ТРЕУГОЛЬНИКИ НАПРЯЖЕНИЙ И СОПРОТИВЛЕНИЙ

Если электрическая цепь состоит из последовательно соединенных элементов с активным и реактивным сопротивлениями, то векторная диаграмма напряжений имеет вид прямоугольного треугольника (см. рис. 2.20в; 2.21б; 2.22б). Гипотенуза этого треугольника равна полному напряжению U на зажимах цепи, а катеты треугольника — активной $U_a = RI$ и реактивной U_p составляющим этого напряжения, причем

$$U_p = U_L - U_C = (X_L - X_C) I = XI. \quad (2.41)$$

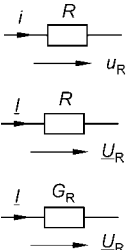
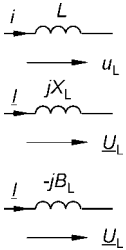
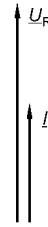
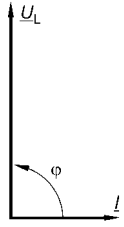
Из треугольников напряжений OAB (рис. 2.21б и 2.22б) можно получить ряд важных соотношений между напряжениями:

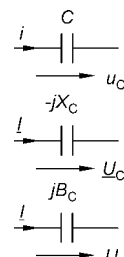
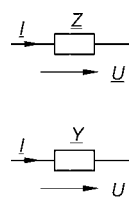
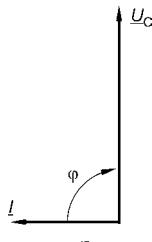
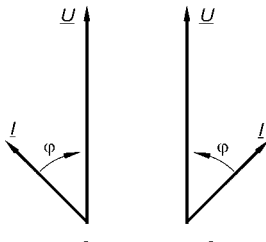
$$U_a = U \cos \varphi; \quad (2.42)$$

$$U_p = U \sin \varphi, \quad (2.43)$$

где

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_p}{U_a} = \operatorname{arctg} \frac{U_L - U_C}{U_a}.$$

	Элементы схем замещения	
	Резистивный	Индуктивный
Обозначение на схемах замещения		
Уравнения связи	$u_R = Ri$ $\underline{U}_R = R \underline{I}$ $\underline{I} = G_R \underline{U}_R$	$u_L = L \frac{di}{dt}$ $\underline{U}_L = jX_L \cdot \underline{I}$ $\underline{I} = -jB_L \cdot \underline{U}_L$
Сопротивления: Комплексное Полное Активное Реактивное	$\underline{Z}_R = R$ $Z_R = \underline{Z}_R = R$ R 0	$\underline{Z}_L = jX_L$ $Z_L = \underline{Z}_L = X_L$ 0 $X_L = \omega L$
Проводимости: Комплексная Полная Активная Реактивная	$\underline{Y}_R = G_R$ $Y = \underline{Y}_R = G_R$ $G_R = 1/R$ 0	$\underline{Y}_L = -jB_L$ $Y = \underline{Y}_L = B_L$ 0 $B_L = 1/X_L = 1/\omega L$
Мощности: Комплексная Полная Активная Реактивная	$\underline{S} = \underline{U}_R \underline{I}^* = U_R I$ $S = \underline{S} = P$ $P = RI^2 = G_R U_R^2$ 0	$\underline{S} = \underline{U}_L \underline{I}^* = U_L I e^{j\frac{\pi}{2}}$ $S = \underline{S} = Q_L$ 0 $Q_L = X_L I^2 = B_L U_L^2$
Векторные диаграммы	 <p>$\varphi = 0$</p>	 <p>$\varphi = \pi/2$</p>

Элементы схем замещения	
Емкостной	Обобщенный
	
$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$ $\underline{U}_C = -jX_C \underline{I}$ $\underline{I} = jB_C \underline{U}_C$	$\underline{U} = \underline{Z} \underline{I}$ $\underline{I} = \underline{Y} \underline{U}$
$\underline{Z}_C = -jX_C$ $Z_C = \underline{Z}_C = X_C$ 0 $X_C = \frac{1}{\omega C}$	$\underline{Z} = R + jX = Ze^{j\varphi}$ $Z = \underline{Z} = \sqrt{R^2 + X^2}$ $R = Z \cos \varphi$ $X = Z \sin \varphi = X_L - X_C, \varphi = \arctg(X/R)$
$\underline{Y}_C = jB_C$ $Y = \underline{Y}_C = B_C$ 0 $B_C = \frac{1}{X_C} = \omega C$	$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = G - jB = Ye^{-j\varphi}$ $Y = \underline{Y} = \sqrt{G^2 + B^2}$ $G = Y \cos \varphi$ $B = Y \sin \varphi = B_L - B_C, \varphi = \arctg(B/G)$
$\underline{S} = \underline{U}_C \underline{I}^* = Se^{-j\frac{\pi}{2}}$ $S = \underline{S} = Q_C$ 0 $Q_C = X_C I^2 = B_C U^2$	$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = Se^{j\varphi} = P + jQ$ $S = \underline{S} = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$ $P = \Re(\underline{S}) = UI \cos \varphi$ $Q = \Im(\underline{S}) = UI \sin \varphi = Q_L - Q_C, \varphi = \arctg(Q/P)$
 <p>$\varphi = -\pi/2$</p>	 <p>$\varphi < 0$ $\varphi > 0$</p>

Вид треугольника напряжений зависит от соотношения между X_L и X_C (см. рис. 2.21б и 2.22б).

После деления всех сторон треугольника напряжений на ток I получим треугольник сопротивлений, подобный треугольнику напряжений (рис. 2.23), стороны которого равны:

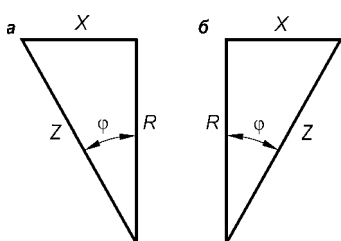


Рис. 2.23

Треугольники сопротивлений

а — при $X_L > X_C$; б — при $X_L < X_C$.

$$\frac{U_a}{I} = R; \quad \frac{U_p}{I} = X; \quad \frac{U}{I} = Z.$$

Из треугольника сопротивлений можно получить соотношения, аналогичные (2.42) и (2.43):

$$R = Z \cos \varphi; \quad (2.44)$$

$$X = Z \sin \varphi, \quad (2.45)$$

а также известные уже равенства

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R}.$$

2.13.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

Рассмотрим электрическую схему цепи с последовательным соединением нескольких приемников электрической энергии (электроприемников), у каждого из которых известно как активное, так и реактивное сопротивление (рис. 2.24); значит, известны их комплексные сопротивления

$$\underline{Z}_1 = R_1, \quad \underline{Z}_2 = R_2 + jX_{L_2}, \quad \underline{Z}_3 = R_3 + jX_{L_3}, \quad \underline{Z}_4 = R_4 - jX_{C_4}$$

и их полные сопротивления

$$Z_1 = R_1, \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L_2}^2}, \quad Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_{L_3}^2}, \quad Z_4 = \sqrt{R_4^2 + X_{C_4}^2}.$$

Задача сводится к определению действующих значений тока I в цепи и напряжений на элементах, а также сдвига фаз между током и напряжением на зажимах цепи.

На основании второго закона Кирхгофа и закона Ома (2.34) в комплексной форме можем записать

$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 + \underline{U}_4 = \underline{Z}_1 \underline{I} + \underline{Z}_2 \underline{I} + \underline{Z}_3 \underline{I} + \underline{Z}_4 \underline{I} = \underline{Z} \underline{I},$$

где $\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4$ — эквивалентное комплексное сопротивление цепи.

Следовательно, при последовательном соединении приемников эквивалентное комплексное сопротивление \underline{Z} цепи равно алгебраической сумме комплексных сопротивлений всех последовательно включенных электроприемников, т. е.

$$\underline{Z} = \sum_{k=1}^n \underline{Z}_k = \sum_{k=1}^n R_k + j \sum_{k=1}^n X_k = R + jX.$$

Это означает, что при последовательном соединении приемников эквивалентные активное R и реактивное X сопротивления цепи равны соответственно алгебраической сумме активных и реактивных сопротивлений всех элементов цепи, причем при суммировании реактивных сопротивлений сопротивления емкостных элементов считают отрицательными.

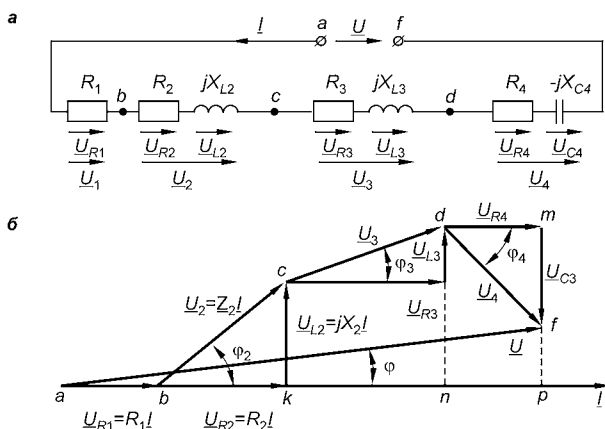


Рис. 2.24

Последовательное соединение нескольких электроприемников
а — схема; б — векторная диаграмма.

Так, для схемы, представленной на рис. 2.24а,

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4, \quad X = X_{L_2} + X_{L_3} - X_{C_4}.$$

После того как найдено эквивалентное комплексное сопротивление, определяют комплексный ток в цепи согласно (2.35), его действующее значение и согласно (2.40) — сдвиг фаз между током и напряжением на зажимах цепи:

$$\underline{I} = \frac{U}{\underline{Z}} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ze^{j\varphi}} = \frac{U}{Z} e^{j(\psi_u - \varphi)} = Ie^{j\psi_i}; \quad I = \frac{U}{Z}; \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R},$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ — полное электрическое сопротивление цепи; $\psi_i = \psi_u - \varphi$ — аргумент комплексного тока, равный его начальной фазе. Если принять начальную фазу напряжения на зажимах цепи равной нулю ($\psi_u = 0$), то комплексный ток в цепи будет равен $\underline{I} = Ie^{-j\varphi}$.

Комплексные \underline{U}_k и действующие U_k значения напряжений на отдельных приемниках находят по закону Ома. Например, для напряжения на приемнике с сопротивлением \underline{Z}_2 имеем

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}, \quad U_2 = Z_2 I.$$

Аналогично определяют напряжения на других электроприемниках.

После определения тока в цепи можно построить векторную диаграмму напряжений и тока. За начальный вектор выбирают вектор тока \underline{I} . Затем все векторы падений напряжения на элементах с активным сопротивлением \underline{U}_R откладывают совпадающими по фазе с током; векторы падений напряжения \underline{U}_L на элементах с индуктивным сопротивлением — опережающими вектор тока на угол $\pi/2$, а вектор падения напряжения \underline{U}_C на элементе с емкостным сопротивлением — отстающим от вектора тока на угол $\pi/2$. Одновременно производят сложение векторов падений напряжения (рис. 2.24б).

Прямоугольный треугольник apf является треугольником напряжений всей цепи, причем $ap = U_a$; $pf = U_p$. Действующее значение активной составляющей напряжения на зажимах цепи

$$U_a = U_{R_1} + U_{R_2} + U_{R_3} + U_{R_4} = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)I = RI.$$

Реактивная составляющая напряжения

$$U_p = U_{L_2} + U_{L_3} - U_{C_4} = (X_{L_2} + X_{L_3} - X_{C_4})I = XI.$$

По векторной диаграмме можно определить напряжение между любыми точками цепи. Например, для определения напряжения между точками b и d необходимо измерить расстояние между этими точками на векторной диаграмме и умножить на масштаб напряжений (В/мм) и т. д. В связи с этим векторную диаграмму иногда называют *топографической*.



2.14. МОЩНОСТЬ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Мгновенное значение мощности цепи синусоидального тока равно произведению мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = ui.$$

Если к цепи приложено напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то в общем случае ток в цепи $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ (рис. 2.25а).

Следовательно,

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= UI(\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)). \end{aligned} \quad (2.46)$$

Таким образом, мгновенное значение мощности имеет две составляющие: постоянную $UI \cos \varphi$, не изменяющуюся во времени, и переменную $UI \cos(2\omega t - \varphi)$, изменяющуюся периодически с частотой 2ω . Вследствие этого мгновенное значение мощности также изменяется с двойной частотой (рис. 2.25б). При этом мощность положительна, если напряжение и ток совпадают по направлению, и отрицательна, если напряжение и ток имеют разные знаки. Когда мощность положительна, тогда электрическая энергия передается от источника к приемнику, и наоборот.

Для количественной оценки электроэнергетических процессов удобнее использовать среднее значение мощности $P_{\text{ср}}$, которое можно найти, вычислив работу, совершаемую за один период:

$$\int_0^T p dt = P_{\text{ср}} T,$$

откуда

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt.$$

Подставив вместо p выражение (2.46), получим

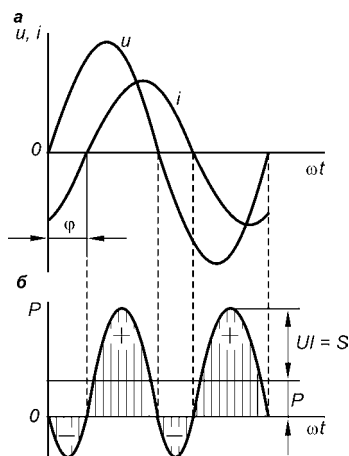


Рис. 2.25

Изменение электрических величин в цепи при последовательном соединении элементов с активным и реактивным сопротивлениями

a — напряжения и тока; б — мощности.

$$P_{cp} = \frac{UI}{T} \cos \varphi \int_0^T dt - \frac{UI}{T} \int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt.$$

Так как

$$\int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt = 0,$$

то $P_{cp} = UI \cos \varphi$, т. е. среднее значение мощности равно постоянной составляющей мгновенного значения мощности.

Средняя мощность характеризует интенсивность передачи электроэнергии от источника к приемнику и ее преобразования в другие виды энергии, т. е. активный необратимый процесс.

Поэтому среднюю мощность называют *активной мощностью*

$$P = UI \cos \varphi \quad (2.47)$$

и измеряют в ваттах (Вт), киловаттах (кВт) и мегаваттах (МВт).

Активная мощность цепи синусоидального тока равна произведению действующих значений напряжения и тока и косинуса угла, равного сдвигу фаз между ними.

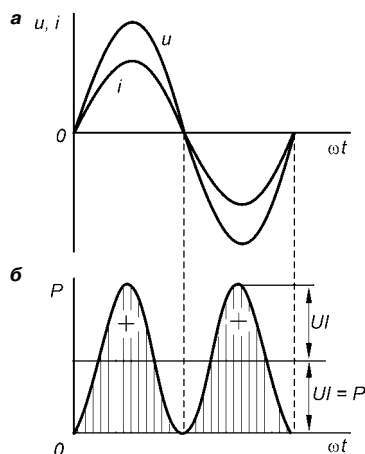


Рис. 2.26

Изменение электрических величин в цепи с активным сопротивлением

a — напряжения и тока; *б* — мощности.

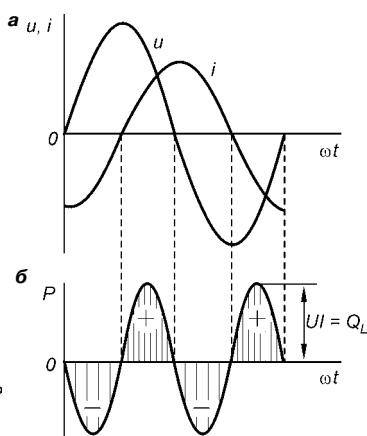


Рис. 2.27

Изменение электрических величин в цепи с индуктивностью

a — напряжения и тока; *б* — мощности.

Для цепи, состоящей из элемента только с активным сопротивлением R , $\varphi = 0$ и

$$p = UI(1 - \cos 2\omega t).$$

В этом случае напряжение и ток (рис. 2.26а) совпадают по фазе и мгновенное значение мощности всегда положительно (рис. 2.26б). Это указывает на то, что при наличии в цепи только элемента с активным сопротивлением вся электроэнергия преобразуется в тепловую или другие виды энергии.

Среднее значение мощности или активная мощность $P = UI$, так как $\cos \varphi = 1$.

Поскольку на элементе с сопротивлением R напряжение $U_R = U_a = RI$, активная мощность цепи может быть определена как

$$P = U_a I = RI^2 = U_a^2 / R = GU_a^2,$$

где $G = 1/R$ — активная проводимость.

В цепи с индуктивностью L угол $\varphi = \pi/2$ (см. рис. 2.27а), и формула (2.46) принимает вид

$$p = -UI \sin 2\omega t, \quad (2.48)$$

т. е. мгновенное значение мощности имеет только переменную составляющую (рис. 2.27б).

В моменты времени, когда ток и напряжение имеют одинаковые знаки (рис. 2.27а), мгновенная мощность положительна (рис. 2.27б) и энергия передается от источника питания к приемнику (индуктивной катушке) и запасается в его магнитном поле.

В моменты времени, когда ток и напряжение противоположны по знаку, мощность отрицательна и запасенная в магнитном поле катушки энергия возвращается источнику питания.

Таким образом, в течение одного периода электроэнергия дважды поступает от источника в катушку и обратно. При этом вся передаваемая энергия запасается в магнитном поле катушки и затем возвращается источнику. Такая энергия обмена между источником и приемником, которая не преобразуется в другие виды энергии, называется *реактивной*. Интенсивность обмена электроэнергией характеризуется *реактивной мощностью* Q_L , равной амплитуде мгновенного значения мощности (2.48), т. е.

$$Q_L = UI.$$

Реактивную мощность измеряют в вольт-амперах реактивных (В Ар), киловольт-амперах реактивных (кВ Ар) и т. д.

Напряжение на элементе с индуктивностью $U = U_L = X_L I$, поэтому реактивную мощность можно также определить по формулам

$$Q_L = U_L I = X_L I^2 = U_L^2 / X_L = B_L U_L^2,$$

где $B_L = 1/X_L$ — индуктивная проводимость.

Если в цепь включен конденсатор с емкостью C , то $\varphi = -\pi/2$ (рис. 2.28а) и мгновенное значение мощности

$$p = UI \sin 2\omega t$$

отличается от (2.48) только знаком. Изменение мощности для этой цепи показано на рис. 2.28б.

В цепи с емкостью также происходит обмен электроэнергией между источником питания и конденсатором. При передаче энергии от источника питания в течение четверти периода энергия запасается в электрическом поле конденсатора, а в течение следующей четверти периода энергия электрического поля освобождается и возвращается источнику. Электроэнергетический процесс в цепи характеризуется только реактивной мощностью

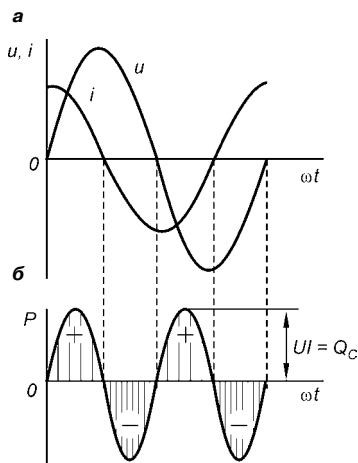


Рис. 2.28

Изменение электрических величин в цепи с емкостью

а — напряжения и тока; б — мощности.

$$Q_C = U_C I = X_C I^2 = U_C^2 / X_C = B_C U_C^2,$$

где $B_C = 1/X_C$ — емкостная проводимость.

В общем случае, когда электрическая цепь состоит из элементов с активным R и реактивным X сопротивлениями, сдвиг по фазе между напряжением и током в цепи $\varphi = 0 \dots \pm \pi/2$ (см. рис. 2.25а), а мгновенное значение мощности (см. рис. 2.25б) описывается уравнением (2.46). Заштрихованная площадь, ограниченная положительным значением мощности и осью абсцисс,

больше площади, ограниченной отрицательным значением мощности и осью абсцисс. Это означает, что в итоге часть электроэнергии передается от источника приемнику и преобразуется в нем в другие виды энергии. Количественно процесс преобразования электроэнергии оценивается активной мощностью (2.47).

Амплитуду UI переменной составляющей мощности называют *полной мощностью* и обозначают S .

Полную мощность выражают в вольт-амперах (В·А), киловольт-амперах (кВ·А) и т. д. Ее можно вычислять по формуле

$$S = UI = ZI^2 = U^2/Z = YU^2, \quad (2.49)$$

где $Y = 1/Z$ — полная проводимость цепи.

То, что мгновенные значения мощности в некоторые промежутки времени принимают отрицательные значения, свидетельствует об обмене электроэнергией между источником питания и приемником электроэнергии. Обмен энергией количественно оценивают реактивной мощностью $Q = U_p I$. Так как в общем случае реактивная составляющая напряжения $U_p = U \sin \varphi$, то реактивная мощность цепи

$$Q = UI \sin \varphi, \quad (2.50)$$

причем в цепи с индуктивностью мощность $Q_L > 0$, а в цепи с емкостью $Q_C < 0$.

Реактивная мощность цепи может быть вычислена как

$$Q = XI^2 = U_p^2/X = BU_p^2,$$

где $B = 1/X$ — реактивная проводимость цепи.

Если цепь включает элементы и с индуктивным, и с емкостным сопротивлениями, то ее реактивное сопротивление $X = X_L - X_C$, а

$$Q = (X_L - X_C)I^2 = X_L I^2 - X_C I^2 = Q_L - Q_C.$$

Таким образом, реактивная мощность цепи равна разности реактивной индуктивной и реактивной емкостной мощностей. Реактивная мощность положительна, если $Q_L > Q_C$, и отрицательна, если $Q_C > Q_L$.

Соотношение между полной, активной и реактивной мощностями можно получить, воспользовавшись формулами (2.47), (2.49) и (2.50):

$$P^2 + Q^2 = (UI)^2(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) = (UI)^2 = S^2, \\ \text{или } S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Следовательно, полная мощность равна корню квадратному из суммы квадратов активной и реактивной мощностей. Кроме того,

$$P = S\cos\varphi = UI\cos\varphi = U_a I = UI_a; \quad (2.51)$$

$$Q = S\sin\varphi = UI\sin\varphi = U_p I = UI_p. \quad (2.52)$$

Рассматривая выражения (2.51) и (2.52) и треугольник напряжений (см. рис. 2.21б), можно сделать вывод, что активная мощность определяется произведением составляющих напряжения и тока, совпадающих по фазе, а реактивная мощность — произведением составляющих напряжения и тока, находящихся в *квадратуре* (сдвинутых по фазе на $\pi/2$).

Мощность цепи синусоидального тока в комплексной форме равна произведению комплексного напряжения на сопряженный комплексный ток:

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = U e^{j\psi_u} I e^{-j\psi_i} = UI e^{j\varphi} = S e^{j\varphi},$$

где \underline{I}^* — сопряженный комплексный ток.

Используя формулу Эйлера, получим

$$\underline{S} = UI(\cos\varphi + j\sin\varphi) = P + jQ.$$

Таким образом, вещественная составляющая комплексной мощности \underline{S} является активной, а мнимая составляющая — реактивной мощностью цепи. Если в цепи преобладает индуктивность ($\varphi > 0$), то

$$\underline{S} = P + jQ = P + jQ_L,$$

а если преобладает емкость ($\varphi < 0$), то

$$\underline{S} = P - jQ = P - jQ_C.$$

В формуле (2.47) косинус угла φ , равного сдвигу фаз между током и напряжением, называют *коэффициентом мощности*:

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{P}{S}.$$

Он показывает, какая доля полной мощности составляет активную мощность или какая доля всей электроэнергии преобразуется в другие виды энергии.

Когда $\cos\varphi = 1$, т. е. когда $Z = R$, активная мощность равна полной мощности.

Коэффициент мощности — важный эксплуатационный параметр электроприемников. Так как

$$I = \frac{P}{U \cos\varphi},$$

то чем выше $\cos\varphi$, тем при меньшем значении тока в цепи может быть произведено преобразование электроэнергии в другие виды энергии. Это приводит к уменьшению потерь электроэнергии, ее экономии и удешевлению устройств электропередачи.

2.15.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ С R , L И C

При анализе процессов в электрической цепи с параллельным соединением элементов, обладающих активным сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C , к которой приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin\omega t$, воспользуемся комплексным методом. Для этого на электрической схеме цепи (см. рис. 2.29а) элементы с R , L и C заменяем соответствующими им комплексными сопротивлениями

$$\underline{Z}_R = R; \quad \underline{Z}_L = j\omega L = jX_L; \quad \underline{Z}_C = -j\frac{1}{\omega C} = -jX_C.$$

Аналогично поступим с напряжением и токами.

Тогда согласно закону Ома комплексные токи в ветвях

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= \frac{\underline{U}}{R} = G\underline{U}; \quad \underline{I}_L = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_L} = \frac{\underline{U}}{jX_L} = -jB_L\underline{U}; \\ \underline{I}_C &= \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_C} = \frac{\underline{U}}{-jX_C} = jB_C\underline{U}, \end{aligned} \quad (2.53)$$

где $G = \frac{1}{R}$; $B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L}$; $B_C = \frac{1}{X_C} = \omega C$ — активная, индуктивная и емкостная проводимости соответственно.

Ток в неразветвленной части цепи в соответствии с первым законом Кирхгофа с учетом уравнений (2.53)

$$\begin{aligned} \underline{I} &= \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C = (G - j(B_L - B_C))\underline{U} = \\ &= (G - jB)\underline{U} = \underline{Y}\underline{U}. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Последнее уравнение также является записью закона Ома в комплексной форме.

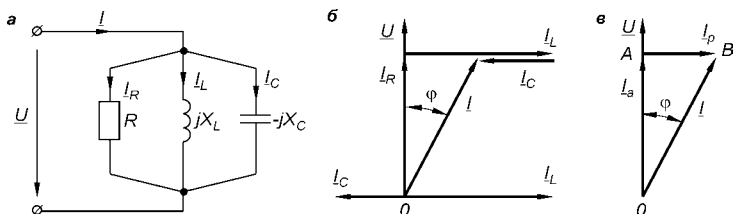


Рис. 2.29
Параллельное соединение элементов с R , L и C

a — схема цепи; b — векторная диаграмма токов; c — треугольник токов.

Коэффициент \underline{Y} в нем называют *комплексной электрической проводимостью*.

Из уравнения (2.54) следует, что

$$\underline{Y} = \begin{cases} \frac{\underline{I}}{\underline{U}} = \frac{I e^{j\psi_i}}{U e^{j\psi_u}} = \frac{I}{U} e^{-j\varphi} = Y e^{-j\varphi}; \\ G - jB = \sqrt{G^2 + B^2} e^{-j\varphi} = Y e^{-j\varphi}, \end{cases} \quad (2.55)$$

где $Y = |\underline{Y}| = \frac{I}{U} = \sqrt{G^2 + B^2}$ — *полная электрическая проводимость* цепи. Это *параметр* электрической цепи, равный отношению действующего значения тока в неразветвленной части цепи (или ветви) к действующему значению напряжения на зажимах цепи (или ветви), равный также корню квадратному из суммы квадратов активной и реактивной проводимостей; $B = B_L - B_C$ — реактивная проводимость цепи, которая может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от соотношения между проводимостями B_L и B_C ; $\varphi = \arctg \frac{B}{G} = \arctg \frac{B_L - B_C}{G}$ — сдвиг фаз между напряжением \underline{U} и током \underline{I} .

Действующие значения токов равны

$$I = YU; I_R = GU; I_L = B_L U; I_C = B_C U. \quad (2.56)$$

На основании уравнений (2.53) и (2.54) можно построить векторную диаграмму токов. При построении векторной диаграммы за начальный вектор удобно принять вектор напряжения \underline{U} (рис. 2.29б). Векторы комплексных токов \underline{I}_R , \underline{I}_L , \underline{I}_C направляют с учетом их сдвига по фазе относительно напряжения. Ток \underline{I} в неразветвленной части цепи находят в соответствии с уравнением (2.54) как геометрическую сумму векторов, соответствующих токам в ветвях.

На рис. 2.29в построен треугольник токов OAB , катеты которого равны активной $\underline{I}_a = G\underline{U}$ и реактивной $\underline{I}_p = -jB\underline{U}$ составляющим тока \underline{I} , что следует из (2.54). Активная составляющая тока совпадает по фазе с напряжением, а реактивная составляющая сдвинута относительно напряжения на угол $\pi/2$. Действующие значения активной и реактивной составляющих тока равны $I_a = GU$, $I_p = BU = I_L - I_C$. Если $I_L > I_C$, то \underline{I}_p отстает по фазе от напряжения на $\pi/2$ (см. рис. 2.29в), а ток в неразветвленной части цепи \underline{I} отстает по фазе от напряжения ($\varphi > 0$). Если $I_L < I_C$, то \underline{I}_p опережает напряжение на $\pi/2$, а ток \underline{I} — на угол φ ($\varphi < 0$).

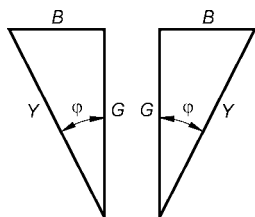


Рис. 2.30
Треугольники
проводимостей

a — при $B_L < B_C$; б — при $B_L > B_C$.

Из треугольника токов следуют соотношения для действующих значений токов:

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I \cos \varphi, \quad I_p = I \sin \varphi; \\ I &= \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{I_a^2 + (I_L - I_C)^2}; \\ \varphi &= \arctg \frac{I_p}{I_a} = \arctg \frac{I_L - I_C}{I_a}. \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

Зная параметры G , B и Y , можно построить треугольник проводимостей (рис. 2.30), из которого следуют соотношения, аналогичные соотношениям (2.57):

$$\left. \begin{aligned} G &= Y \cos \varphi, \quad B = Y \sin \varphi; \\ Y &= \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}; \\ \varphi &= \arctg \frac{B}{G} = \arctg \frac{B_L - B_C}{G}. \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

Активная, реактивная и полная мощности цепи

$$\left. \begin{aligned} P &= UI \cos \varphi = UI_a = GU^2; \\ Q &= UI \sin \varphi = UI_p = BU^2; \\ S &= UI = YU^2 = \sqrt{P^2 + Q^2}, \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

причем реактивная мощность отдельных ветвей $Q_L = B_L U^2$ и $Q_C = B_C U^2$.

2.16. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЦЕПИ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ И ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ

Большинство электроприемников переменного тока характеризуются как активной, так и реактивной мощностью. Рассмотрим активно-индуктивный приемник, в котором ток \underline{I} отстает по фазе от напряжения \underline{U} на угол ϕ . Векторная диаграмма напряжения и тока для такого приемника показана на рис. 2.31.

Схема электрической цепи, эквивалентная данному электроприемнику, может состоять либо из последовательного соединения элементов с активным и реактивным сопротивлениями (рис. 2.32а), либо из параллельного соединения элементов с активной и реактивной проводимостью (рис. 2.32б).

Обе эти схемы эквивалентны, если при одинаковом напряжении \underline{U} комплексные токи в них равны. Согласно закону Ома в комплексной форме ток \underline{I} в схеме с последовательным соединением элементов (рис. 2.32а) может быть найден по уравнению (2.35)

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}},$$

а в схеме с параллельным соединением элементов (рис. 2.32б) — по уравнению (2.55) $\underline{I} = \underline{Y} \underline{U}$.

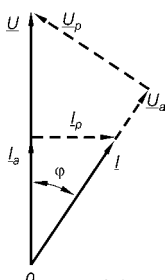


Рис. 2.31
Векторная диаграмма напряжения и тока для электроприемника

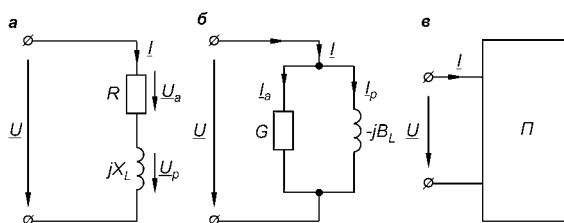


Рис. 2.32
Эквивалентные
схемы электроприемника

а — в виде последовательного соединения элементов;
б — в виде параллельного соединения элементов; в — в виде двухполюсника.

Из условия равенства токов в обеих схемах при одном и том же напряжении \underline{U} следует связь между эквивалентными комплексными сопротивлением \underline{Z} и проводимостью \underline{Y} :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}; \quad \underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}}; \quad \underline{Y}\underline{Z} = 1. \quad (2.60)$$

Соотношения (2.60) справедливы также и для полных сопротивлений Z и проводимости Y , причем не только для цепи в целом, но и для ее участков.

При расчете электрических цепей может оказаться целесообразной замена последовательного соединения активного и реактивного элементов схемы цепи параллельным их соединением или наоборот. Для этого надо знать соотношения между параметрами этих цепей.

Если необходимо заменить последовательное соединение элементов с комплексным сопротивлением $\underline{Z} = R + jX$ (рис. 2.32а) параллельным соединением элементов с комплексной проводимостью $\underline{Y} = G - jB$ (рис. 2.32б), то для этого нужно воспользоваться соотношениями (2.60):

$$\begin{aligned} \underline{Y} = G - jB &= \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{R - jX}{(R + jX)(R - jX)} = \\ &= \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2}. \end{aligned}$$

Откуда следует, что

$$\begin{aligned} Y = \frac{1}{Z} &= \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}; \quad G = \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{R}{Z^2}; \\ B &= \frac{X}{R^2 + X^2} = \frac{X}{Z^2}, \end{aligned} \quad (2.61)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ — полное электрическое сопротивление цепи.

При переходе от параллельного соединения элементов к последовательному соединению поступают аналогично, при этом связь между параметрами будет иметь вид

$$\begin{aligned} Z = \frac{1}{Y} &= \frac{1}{\sqrt{G^2 + B^2}}; \quad R = \frac{G}{G^2 + B^2} = \frac{G}{Y^2}; \\ X &= \frac{B}{G^2 + B^2} = \frac{B}{Y^2}, \end{aligned}$$

где $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$ — полная электрическая проводимость цепи.

В общем случае электрическую цепь или ее часть можно представлять эквивалентными схемами. Если в цепи выделить участок, имеющий два зажима, то его можно заменить эквивалентным двухполюсником. Двухполюсник на схеме изображают в виде прямоугольника (рис. 2.32в), причем если двухполюсник активный (в участке цепи есть источники ЭДС), то его обозначают A , если пассивный (источников ЭДС нет) — $П$.

2.17. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

Рассмотрим электрическую схему цепи с параллельным соединением нескольких электроприемников (рис. 2.33а), параметры которых известны. Задача сводится к определению действующих значений токов в приемниках и в неразветвленной части цепи, сдвига фаз между током \underline{I} и напряжением \underline{U} на зажимах цепи, эквивалентного сопротивления (проводимости) цепи и др.

Поскольку параметры электроприемников известны, то известно и комплексное сопротивление $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ каждого k -го электроприемника.

Комплексный ток в каждом из электроприемников определяют по закону Ома:

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_k} = \underline{Y}_k \underline{U} = (G_k - jB_k) \underline{U} = \underline{I}_{ka} - j\underline{I}_{kp} = I_k e^{-j\psi_{ki}}, \quad (2.62)$$

где $\underline{Y}_k = \frac{1}{\underline{Z}_k} = G_k - jB_k = Y_k e^{-j\varphi_k}$ — эквивалентная комплексная проводимость k -го приемника, причем G_k , B_k и Y_k определяют по соотношениям (2.61); $\underline{I}_{ka} = G_k \underline{U}$ и $\underline{I}_{kp} = B_k \underline{U}$ —

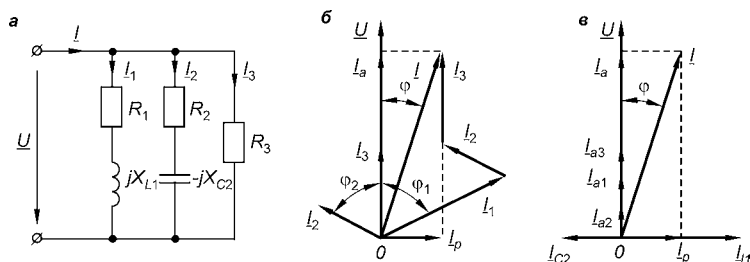


Рис. 2.33

Параллельное соединение нескольких электроприемников

a — схема; $b, в$ — векторные диаграммы токов.

комплексные активная и реактивная составляющие тока \underline{I}_k соответственно; $\psi_{ki} = \psi_u - \varphi_k$ — аргумент тока \underline{I}_k (его начальная фаза); $\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k} = \arctg \frac{B_k}{G_k}$ — сдвиг фаз между напряжением \underline{U} и током \underline{I}_k в k -м приемнике.

Действующие значения тока I_k и его активной и реактивной составляющих равны:

$$I_k = Y_k U; I_{ka} = G_k U; I_{kp} = B_k U. \quad (2.62a)$$

Ток в неразветвленной части цепи находят по первому закону Кирхгофа. При условных направлениях комплексных токов в ветвях (рис. 2.33a) ток \underline{I} равен

$$\underline{I} = \sum_{k=1}^{n=3} \underline{I}_k = \sum_{k=1}^{n=3} \underline{Y}_k \underline{U} = \underline{Y} \underline{U}, \quad (2.63)$$

где

$$\underline{Y} = \sum_{k=1}^{n=3} \underline{Y}_k = \sum_{k=1}^{n=3} (G_k - jB_k) = \sum_{k=1}^{n=3} G_k - j \sum_{k=1}^{n=3} B_k = G - jB = Ye^{-j\varphi}$$

— эквивалентная комплексная электрическая проводимость цепи, а эквивалентные активная G , реактивная B и полная Y проводимости цепи соответственно равны:

$$\begin{aligned} G &= \sum_{k=1}^{n=3} G_k; \quad B = \sum_{k=1}^{n=3} B_k = \sum_{k=1}^{n=3} (B_{kL} - B_{kC}) = \\ &= \sum_{k=1}^{n=3} B_{kL} - \sum_{k=1}^{n=3} B_{kC}; \quad Y = \sqrt{G^2 + B^2}; \end{aligned}$$

$\varphi = \arctg \frac{B}{G}$ — сдвиг фаз между напряжением \underline{U} и током \underline{I} в приемнике.

Так, для цепи (рис. 2.33a) с известными комплексными сопротивлениями приемников $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L1}$, $\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C2}$, $\underline{Z}_3 = R_3$ эквивалентные активная, реактивная и полная проводимости равны:

$$\begin{aligned} G &= G_1 + G_2 + G_3 = \frac{R_1}{Z_1^2} + \frac{R_2}{Z_2^2} + \frac{1}{R_3}; \\ B &= B_{L1} - B_{C2} = \frac{X_{L1}}{Z_1^2} - \frac{X_{C2}}{Z_2^2}; \quad Y = \sqrt{G^2 + B^2}, \end{aligned}$$

где проводимости электроприемников, определяемые соотношениями (2.61),

$$G_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}; \quad G_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}; \quad G_3 = \frac{1}{R_3}; \quad B_{L1} = \frac{X_{L1}}{Z_1^2}; \quad B_{C2} = \frac{X_{C2}}{Z_2^2}.$$

Здесь $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}$, $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}$ — полные электрические сопротивления первого и второго приемников.

Комплексные активную \underline{I}_a и реактивную \underline{I}_p составляющие тока \underline{I} в неразветвленной части цепи можно найти, пользуясь уравнением (2.63), записав его следующим образом:

$$\underline{I} = \underline{Y} \underline{U} = (G - jB) \underline{U} = G \underline{U} - jB \underline{U} = \underline{I}_a - j \underline{I}_p. \quad (2.63a)$$

Откуда

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_a &= G \underline{U} = \sum_{k=1}^{n=3} G_k \underline{U} = \sum_{k=1}^{n=3} \underline{I}_{ka}; \\ \underline{I}_p &= B \underline{U} = \sum_{k=1}^{n=3} B_k \underline{U} = \sum_{k=1}^{n=3} \underline{I}_{kp}. \end{aligned} \right\} \quad (2.63b)$$

Действующие значения тока в неразветвленной части цепи и его активной и реактивной составляющих находят по соотношениям, аналогичным (2.62a):

$$I = YU; \quad I_a = GU = \sum_{k=1}^{n=3} I_{ka}; \quad I_p = BU = \sum_{k=1}^{n=3} I_{kp}.$$

Так, для рассматриваемой схемы (см. рис. 2.33a) имеем:

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} + I_{3a}; \quad I_p = I_{L1} - I_{C2},$$

где $I_{1a} = G_1 U$; $I_{2a} = G_2 U$; $I_{3a} = G_3 U$; $I_{L1} = B_{L1} U$; $I_{C2} = B_{C2} U$.

Активная и реактивная мощность цепи при параллельном соединении нескольких приемников:

$$\left. \begin{aligned} P &= UI \cos \varphi = GU^2 = \sum_{k=1}^{n=3} G_k U^2 = \sum_{k=1}^{n=3} P_k; \\ Q &= UI \sin \varphi = BU^2 = \sum_{k=1}^{n=3} B_k U^2 = \sum_{k=1}^{n=3} Q_k. \end{aligned} \right\}$$

После того как найдены токи в приемниках и в неразветвленной части цепи и их активные и реактивные составляющие, можно построить векторные диаграммы токов (см. рис. 2.33б, в).

В заключение отметим, что замена комплексных сопротивлений \underline{Z}_k приемников эквивалентными им комплексными проводимостями \underline{Y}_k по существу означает за-



мену одной расчетной схемы (см. рис. 2.33) другой эквивалентной ей расчетной схемой (рис. 2.34).

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. При параллельном соединении нескольких электроприемников эквивалентная комплексная проводимость цепи равна алгебраической сумме комплексных проводимостей всех электроприемников.

2. При определении эквивалентных активной и реактивной проводимостей цепи необходимо складывать отдельно активные и отдельно реактивные проводимости параллельных ветвей, причем при суммировании реактивные емкостные проводимости считают отрицательными.

3. Складывать алгебраически полные проводимости ветвей нельзя.

4. Активная и реактивная составляющие тока в неразветвленной части цепи равны соответственно алгебраическим суммам активных и реактивных составляющих всех параллельно включенных приемников, при этом реактивные емкостные составляющие токов берут со знаком минус.

5. Активная P и реактивная Q мощности цепи равны соответственно алгебраическим суммам активных P_k и реактивных Q_k мощностей всех параллельно включенных приемников, что является подтверждением закона о сохранении энергии.

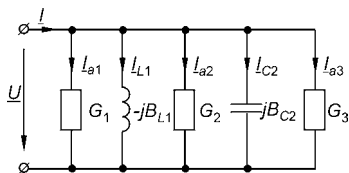


Рис. 2.34
Схема электрической цепи при параллельном соединении нескольких элементов с проводимостями G и B .

2.18.

РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Резонанс — явление в электрической цепи (или на ее участке), содержащей индуктивные и емкостные элементы (хотя бы по одному), возникающее в случае, когда реактивное сопротивление или реактивная проводимость этой цепи (или ее участка) равны нулю.

При резонансе в цепи (или на ее участке) напряжение и ток совпадают по фазе, а реактивная мощность равна нулю.

Представим электрическую цепь в виде пассивного двухполюсника (см. рис. 2.35).

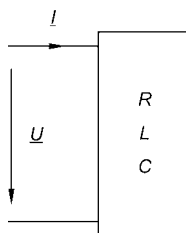


Рис. 2.35
К пояснению
резонанса
в электрических
цепях

Согласно закону Ома в комплексной форме эквивалентное комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_\Sigma = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ie^{j\psi_i}} = Z_\Sigma e^{j\varphi} = R_\Sigma + jX_\Sigma,$$

а эквивалентная проводимость

$$\underline{Y}_\Sigma = \frac{\underline{I}}{\underline{U}} = \frac{Ie^{j\psi_i}}{Ue^{j\psi_u}} = Y_\Sigma e^{-j\varphi} = G_\Sigma - jB_\Sigma.$$

В соответствии с определением резонанс в цепи возникает при условии, если $\underline{X}_\Sigma = 0$ или $\underline{B}_\Sigma = 0$, при этом $\underline{Z}_\Sigma = R_\Sigma$ и $\underline{Y}_\Sigma = G_\Sigma$ являются чисто активными, а сдвиг фаз

$$\varphi = \arctg \frac{X_\Sigma}{R_\Sigma} = \arctg \frac{B_\Sigma}{G_\Sigma} = 0.$$

Различают резонанс напряжений при последовательном и резонанс токов при параллельном соединении R , L и C .

Резонанс напряжений. При последовательном соединении элементов с R , L и C (см. рис. 2.20а) ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

Из всех возможных соотношений между индуктивным X_L и емкостным X_C сопротивлениями особый интерес представляет случай, когда эти сопротивления равны, т. е. $X_L = X_C$. В этом случае реактивное сопротивление цепи $X = X_L - X_C = 0$ и полное сопротивление $Z = R$ минимально. Тогда ток в цепи $I = U/R$, и при $U = \text{const}$, $R = \text{const}$ значение его максимально.

Напряжения на индуктивном и емкостном элементах в комплексной форме $\underline{U}_L = -\underline{U}_C$, а действующие значения равны, т. к. $U_L = X_L I = X_C I = U_C$. Следовательно,

$$U_L = X_L I = \frac{X_L}{R} U; \quad U_C = X_C I = \frac{X_C}{R} U.$$

Таким образом, напряжения на индуктивном и емкостном элементах могут превышать напряжение сети в X_L/R раз, если $X_L > R$. Сдвиг по фазе между напряжениями \underline{U}_L и \underline{U}_C равен π , т. е. эти напряжения находятся в противофазе.

Такой режим цепи при последовательном соединении элементов с R , L и C , когда $X_L = X_C$, а напряжения на индуктивном \underline{U}_L и емкостном \underline{U}_C элементах, находящиеся в противофазе, равны по значению и могут превышать напряжение всей цепи, носит название *резонанса напряжений*.

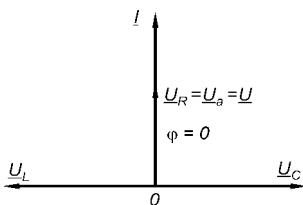


Рис. 2.36
Векторная диаграмма для режима резонанса напряжений

Векторная диаграмма напряжений для режима резонанса представлена на рис. 2.36. Реактивная составляющая напряжения (2.41) равна нулю; следовательно, полное напряжение $\underline{U} = \underline{U}_a$, а сдвиг по фазе $\varphi = 0$; $\cos\varphi = 1$.

Активная мощность такой цепи $P = UI\cos\varphi = UI = S$, а реактивная $Q = UI\sin\varphi = 0$. Реактивные же мощности индуктивной катушки ($Q_L = X_L I^2$) и конденсатора ($Q_C = X_C I^2$) не равны нулю: их мгновенные значения в любой момент времени равны между собой, но противоположны по знаку. Происходит непрерывный обмен энергией между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора.

Добиться равенства индуктивного и емкостного сопротивлений

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

можно, изменяя угловую частоту ω , индуктивность L или емкость C . Угловая частота, при которой наступает резонанс напряжений,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

При этой, резонансной, частоте ток в цепи достигает максимального значения (см. рис. 2.37). При уменьшении частоты увеличивается сопротивление $X_C = 1/(\omega C)$, а следовательно, и реактивное сопротивление цепи $X = X_L - X_C$ становится неравным нулю. Ток $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$ уменьшается. При частоте $\omega = 0$, что формально соответствует напряжению постоянного тока, ток в цепи равен нулю ($X_C = \infty$). При увеличении угловой частоты ($\omega > \omega_0$) реактивное сопротивление цепи также становится больше нуля и ток начинает уменьшаться. Падение напряжения на

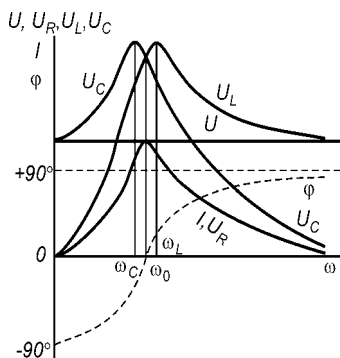


Рис. 2.37
Зависимость напряжений
и тока от частоты

элементе с активным сопротивлением $U_R = RI$ изменяется так же, как ток в цепи, так как $R = \text{const}$. При $\omega = \omega_0$ напряжение на резисторе U_R равно напряжению U , подведенному к цепи.

При резонансе действующие значения напряжений U_L и U_C равны. Но своих максимальных значений они достигают при частотах, отличных от резонансной. Напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{I}{\omega C} = \frac{U}{\omega C \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{(\omega CR)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}.$$

Напряжение U_C максимально тогда, когда функция под квадратным корнем имеет минимум. Взяв первую производную от этой функции по ω и приравняв ее нулю, найдем ее минимум (так как максимум имеет место при $\omega = \infty$). Частота, при которой напряжение максимально,

$$\omega_C = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{R}{2L}\right)^2},$$

т. е. $\omega_C < \omega_0$.

Поступая аналогичным образом, найдем, что частота, при которой напряжение U_L достигает максимума,

$$\omega_L = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{R^2 C}{2L}}},$$

т. е. $\omega_L > \omega_0$.

Явление резонанса широко используют в устройствах радиотехники, телевидения, автоматики и других устройствах. Изменяя индуктивность L или емкость C , можно настраивать контур на ту или иную резонансную частоту

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

и усиливать в цепи напряжения на реактивных элементах.

Поскольку резонансные явления связаны со значительным увеличением напряжения на элементах с индук-

тивностью и емкостью, то это может привести к пробое изоляции этих элементов.

Резонанс токов. В электрической цепи при параллельном соединении ветвей с R (G), L (B_L) и C (B_C) (см. рис. 2.29а) ток определяют по формуле (2.54).

Особый интерес представляет случай, когда индуктивная и емкостная реактивные проводимости равны друг другу. Тогда полная проводимость цепи $Y = G$, так как $B = B_L - B_C = 0$, а ток в неразветвленной части цепи

$$I = GU$$

имеет минимальное значение и только активную составляющую $I = I_a$. Следовательно, $\cos\varphi = 1$.

Токи в ветвях с проводимостями B_L и B_C с учетом (2.56)

$$I_L = B_L U = \frac{B_L}{G} I, \quad I_C = B_C U = \frac{B_C}{G} I,$$

т. е. равны по значению ($I_L = I_C$) и могут превышать ток I в цепи в B_L/G раз, если $B_L = B_C > G$. Векторная диаграмма токов для рассмотренного случая представлена на рис. 2.38.

Режим цепи при параллельном соединении элементов с R , L и C , когда $B_L = B_C$, а токи I_L и I_C в ветвях с реактивными проводимостями равны по значению и могут превышать ток I цепи, называют *резонансом токов*. Для этого режима характерно: $I_L = I_C > I$, если $B_L = B_C > G$; $I = I_{\min}$; $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$; $P = UI\cos\varphi = UI = S$, $Q_L = B_L U^2 > 0$, $Q_C = B_C U^2 > 0$, $Q = Q_L - Q_C = 0$.

При резонансе токов рассматриваемая цепь ведет себя по отношению к источнику питания так, как будто она состоит только из элементов с активной проводимостью. В действительности токи в параллельных ветвях с L и C могут превышать ток в неразветвленной части цепи. Эти токи всегда противоположны по фазе друг другу (рис. 2.38). Это означает, что через каждую четверть периода происходит обмен энергиями между магнитным полем индуктивной катушки и электрическим полем конденсатора, который поддерживается напряжением U источника питания.

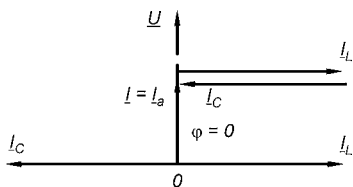


Рис. 2.38
Векторная диаграмма для
режима резонанса токов

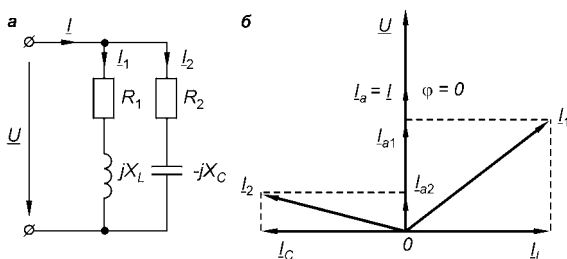


Рис. 2.39
Параллельное
соединение
индуктивной
катушки и
конденсатора
а — схема; б —
векторная диа-
грамма токов.

В частном случае, когда активная проводимость $G = 0$, ток $I = GU = 0$. В замкнутом LC -контуре ток $I_L = I_C = = B_C U > 0$.

Так как реальные индуктивная катушка и конденсатор обладают и активным сопротивлением, схему цепи можно представить в виде, показанном на рис. 2.39а. Резонанс токов в такой цепи имеет место, если $B_L = B_C$, где

$$B_L = \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2}; \quad B_C = \frac{X_C}{Z_2^2} = \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2}.$$

Так как при резонансе токов $B_L = B_C$, то реактивные составляющие токов I_1 и I_2 равны по значению и противоположны по знаку. Поэтому $I_p = I_L + I_C = 0$.

Таким образом, ток I имеет только активную составляющую, как и при резонансе токов в цепи с идеальными индуктивной катушкой и конденсатором. Это видно из векторной диаграммы токов (рис. 2.39б):

$$I_1 + I_2 = I_{a1} + I_{a2} = I_a = I.$$

2.19.

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Итак, только активная составляющая тока определяет преобразование электроэнергии в другие виды энергии, т. е. позволяет количественно оценить совершаемую работу. Реактивная же составляющая тока никакой работы не производит. Однако при ее наличии увеличивается полный ток.

Представим электроприемник, ток которого имеет активную и индуктивную составляющие, схемой последовательного соединения элементов $R_{пр}$ и $X_{Lпр}$ (рис. 2.40а). На векторной диаграмме (рис. 2.40б) вектор тока приемника $I_{пр}$ составляет с вектором напряжения U угол $\varphi_{пр}$, причем

$$I_{\text{пр}} = \frac{U}{Z_{\text{пр}}}, \quad \varphi_{\text{пр}} = \arctg \frac{X_{L\text{пр}}}{R_{\text{пр}}}.$$

Схема на рис. 2.40а предусматривает включение конденсатора C параллельно с электроприемником. В исходном режиме, когда конденсатор отключен, ток $I_{\text{л1}}$ в линии передачи равен току $I_{\text{пр}}$ приемника. При наличии тока $I_{\text{л}}$ в проводах линии передачи, сопротивление которых R , мощность потерь энергии в них $P_{\text{пл}} = RI_{\text{л}}^2$. Так как в данном случае

$$I_{\text{л1}} = I_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пр}}}{U \cos \varphi_{\text{пр}}},$$

то при мощности приемника $P_{\text{пр}} = \text{const}$ и $U = \text{const}$ с уменьшением коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{пр}}$ увеличиваются ток в линии, а следовательно, и мощность потерь энергии в ней:

$$P_{\text{пл1}} = \frac{P_{\text{пр}}^2 R}{(U \cos \varphi_{\text{пр}})^2}.$$

Таким образом, для уменьшения мощности потерь энергии в передающих устройствах необходимо увеличивать коэффициент мощности приемников электроэнергии.

Каждому промышленному предприятию задают то средневзвешенное значение коэффициента мощности (реактивной мощности), которое должно быть обеспечено. Получению заданного коэффициента мощности способствует правильный выбор электрооборудования. Однако при этом всегда необходимо принимать дополнительные меры, например использовать батареи конденсаторов и т. д.

Конденсаторы емкостью C включают параллельно электроприемнику (рис. 2.40а). Ток I_C конденсатора является практически чисто реактивным, опережающим

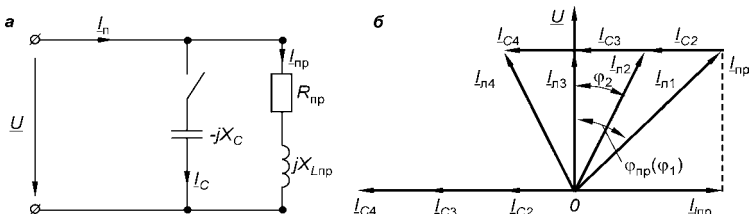


Рис. 2.40

Повышение коэффициента мощности с помощью конденсатора

а — схема; б — векторная диаграмма токов.

напряжение на угол $\pi/2$ (см. рис. 2.40б). Этот ток компенсирует реактивную индуктивную составляющую тока приемника, в результате чего общая реактивная составляющая тока уменьшается.

При емкости конденсатора, равной C_2 , и токе I_{C_2} ток в линии $I_{л_2} = I_{пр} + I_{C_2}$, или

$$I_{л_2} = \sqrt{I_{а.пр}^2 + (I_{Lпр} - I_{C_2})^2} < I_{пр}.$$

Сдвиг по фазе φ_2 между напряжением \underline{U} и током $I_{л_2}$ уменьшился, а коэффициент мощности увеличился ($\cos\varphi_2 > \cos\varphi_{пр} = \cos\varphi_1$).

С увеличением емкости конденсатора ток $I_C = B_C U = \omega C U$ увеличивается так, что при некотором значении емкости C_3 можно получить равенство $I_{C_3} = I_{Lпр}$ (режим резонанса токов). В этом случае реактивная составляющая тока приемника $I_{Lпр}$ полностью компенсируется и ток в линии достигает минимального значения, равного активной составляющей тока приемника $I_{а.пр}$ (рис. 2.40б). При дальнейшем увеличении емкости конденсаторов $I_C > I_{Lпр}$ и реактивная составляющая тока в линии, а следовательно, и полный ток в ней увеличиваются. Наступает режим перекомпенсации, когда реактивная составляющая тока в линии носит емкостный характер.

На рис. 2.41 показано, как изменяется ток $I_{л}$ при изменении емкости C конденсатора при $P_{пр} = \text{const}$ и $U = \text{const}$. Сначала с ростом емкости C ток $I_{л}$ уменьшается, достигает минимума в режиме резонанса токов, а затем снова начинает увеличиваться. Коэффициент мощно-

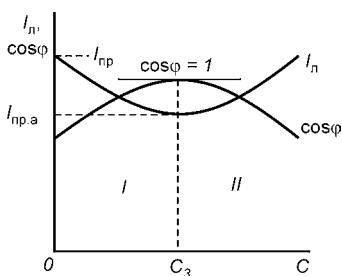


Рис. 2.41

Зависимость тока в линии и коэффициента мощности от емкости конденсаторов

I — область недокомпенсации; II — область перекомпенсации.

сти изменяется в обратном порядке, достигая максимума при полной компенсации ($\cos\varphi = 1$ при $I_{C_3} = I_{Lпр}$). Следует помнить, что при подключении конденсаторов реактивная индуктивная мощность электроприемника остается неизменной, но ее источником становится батарея конденсаторов, установленная вблизи приемника. В результате в линии передачи реактивные токи уменьшаются.



Для обеспечения заданного значения коэффициента мощности предприятия необходимо устанавливать конденсаторы определенной мощности или емкости. Если электроприемники имеют мощность $P = \text{const}$ и $\cos\varphi_1$, то их реактивная индуктивная мощность $Q_1 = P \text{tg}\varphi_1$. При заданном значении $\cos\varphi_2$, которое должно обеспечить предприятие ($\cos\varphi_2 > \cos\varphi_1$), реактивная мощность электроприемников, обеспечиваемая источником питания, $Q_2 = P \text{tg}\varphi_2$.

Разность реактивных мощностей $Q_1 - Q_2$ компенсируется емкостной реактивной мощностью конденсаторов

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = P(\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2). \quad (2.64)$$

Реактивную мощность конденсаторов можно также определить по формуле

$$Q_C = B_C U^2 = \omega C U^2. \quad (2.65)$$

Приравнявая правые части уравнений (2.64) и (2.65), получим

$$C = \frac{P(\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2)}{2\pi f U^2}.$$

При этом емкость измеряется в фарадах, если мощность измерена в ваттах, а напряжение — в вольтах.

Для полной компенсации ($\varphi_2 = 0$) необходимо, чтобы

$$C = \frac{P \text{tg}\varphi_1}{2\pi f U^2}.$$

2.20. ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ В ПРОВОДНИКАХ

Переменный ток i в проводнике создает переменный магнитный поток Φ (см. рис. 2.42а), который индуцирует в проводнике ЭДС самоиндукции $e_L = -d\Phi/dt$. Чем ближе к центру проводника рассматриваемый участок, тем большая ЭДС в нем индуцируется, что обусловлено увеличением потокоцепления. Следовательно, увеличиваются индуктивное и полное сопротивления элементарных участков проводника, расположенных ближе к его центру. По закону Ома плотность тока δ в центре проводника будет меньше, чем у его поверхности (рис. 2.42б).

Явление вытеснения переменного тока к поверхности проводника называют *поверхностным эффектом*, который проявляется тем более заметно, чем выше частота переменного тока и больше диаметр проводника. Поверхностный

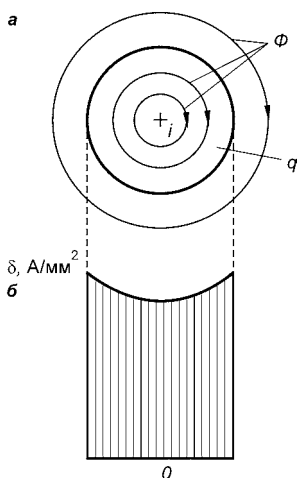


Рис. 2.42
Проводник с током

a — поперечное сечение и линии магнитного потока; *б* — распределение плотности тока.

эффект проявляется очень сильно в стальных проводниках, материал которых имеет небольшое магнитное сопротивление и, следовательно, значительный внутренний магнитный поток. При частотах, измеряемых кило- и мегагерцами, ток в центре проводников практически равен нулю. Основанный на этом высокочастотный нагрев применяют при поверхностной закалке металлов. Уменьшение плотности тока в центре проводника эквивалентно уменьшению сечения проводника ($q' < q$), поэтому сопротивление синусоидальному току $R = \rho L / q'$ будет больше сопротивления постоянному току $R_0 = \rho L / q$.

СЛОЖНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

3.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О СЛОЖНЫХ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЯХ

Встречающиеся на практике электрические цепи постоянного и синусоидального тока зачастую содержат несколько источников ЭДС и представляют собой смешанное соединение пассивных элементов. Такие электрические цепи называют *сложными разветвленными*. Как правило, они не могут быть представлены эквивалентными схемами, состоящими из одного источника ЭДС и одного пассивного элемента.

Обычно при расчете электрических цепей заданными величинами являются ЭДС всех источников и параметры всех ветвей цепи. Для цепей постоянного тока задают значение и направление (полярность) каждой ЭДС E , а также сопротивления R или проводимости G ветвей. Для цепей синусоидального тока ЭДС задают либо в виде функции времени для мгновенного значения $e = E \sin(\omega t + \psi_e)$, либо в комплексной форме для действующего значения ЭДС $\underline{E} = E e^{j\psi_e}$, а параметры ветвей — в виде комплексных сопротивлений $\underline{Z} = Z e^{j\varphi} = R + jX$. Расчет цепей сводится к определению токов в ветвях, электрических потенциалов узлов и падений напряжения на различных элементах или участках цепи.

Для расчета сложных цепей применяют различные методы, используют различные принципы и способы упрощения схем. Все расчеты электрических цепей основаны на использовании законов Кирхгофа и закона Ома. Рассмотренные в этой главе методы в равной мере относятся и к цепям постоянного, и к цепям синусоидального тока. При расчете цепей задают условные положительные направления ЭДС и токов в ветвях.

Уравнения, составленные по законам Кирхгофа для цепей синусоидального тока, записывают в алгебраическом виде с использованием комплексных чисел, а для цепей постоянного тока — в алгебраическом виде с использованием вещественных чисел. Таким образом, как алгебра вещественного числа является частным случаем алгебры комплексного числа, так и электрическая цепь постоянного тока является частным случаем цепи синусоидального тока. Поэтому все методы будут изложены для цепей синусоидального тока с комплексными ЭДС \underline{E} , сопротивлениями ветвей \underline{Z} и токами в ветвях \underline{I} . При применении этих методов расчета для цепей постоянного тока надо брать ЭДС E вместо комплексной ЭДС \underline{E} , сопротивление R вместо комплексного сопротивления \underline{Z} и ток I вместо комплексного тока \underline{I} . В дальнейшем слово «комплексный» будем опускать.

3.2. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ПО УРАВНЕНИЯМ, СОСТАВЛЕННЫМ ПО ЗАКОНАМ КИРХГОФА

В общем случае электрическая цепь имеет p ветвей и q узлов. Так как неизвестными являются токи в ветвях, то число неизвестных равно p , для нахождения которых необходимо иметь систему из p уравнений.

По первому закону Кирхгофа можно записать столько уравнений, сколько узлов имеется в цепи. Так, для схемы электрической цепи, изображенной на рис. 3.1, с числом узлов $q = 3$ таких уравнений три. В уравнение для узла a войдут токи \underline{I}_1 , \underline{I}_3 и \underline{I}_5 ; в уравнение для узла b —

токи \underline{I}_2 , \underline{I}_4 и \underline{I}_5 , причем ток \underline{I}_5 входит в одно уравнение со знаком плюс, а в другое — со знаком минус. Складывая эти два уравнения, получим уравнение, в которое войдут токи \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 и \underline{I}_4 , т. е. токи, входящие в уравнение для узла c . Следовательно, уравнение для узла c не даст новой информации об электрической цепи.

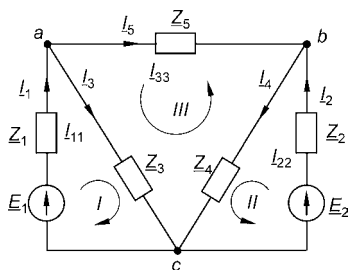


Рис. 3.1
Схема сложной разветвленной
электрической цепи

Это справедливо для любой электрической цепи. Таким образом, по первому закону Кирхгофа можно записать $q - 1$ независимых уравнений для $q - 1$ независимых узлов. Для *независимого уравнения* характерно то, что в него входит хотя бы один ток, не вошедший в другие уравнения.

По второму закону Кирхгофа можно записать столько уравнений, сколько можно выделить замкнутых контуров в цепи. Но не все замкнутые контуры независимы. *Независимым* является такой контур, в который входит хотя бы одна ветвь, не вошедшая в другие контуры. Число независимых контуров n , стало быть, независимых уравнений n зависит от конфигурации схемы, причем $n = p - q + 1$.

Итак, по законам Кирхгофа можно записать $(q - 1) + (p - q + 1) = p$ независимых уравнений. Решив такую систему уравнений, можно найти все комплексные токи в ветвях.

Если в результате решения системы уравнений для цепи постоянного тока ток в какой-либо ветви получится со знаком минус, то это означает, что действительное направление тока в ветви противоположно условно принятому.

Как указывалось ранее, прежде чем приступить к написанию уравнений по законам Кирхгофа, следует задать направление токов в ветвях цепи и направление обхода контуров. Для упрощения уравнений и всего расчета целесообразно выбрать $q - 1$ узлов, в которых сходится наименьшее число ветвей, а в качестве независимых контуров — контуры с наименьшим числом ветвей.

В схеме рассматриваемой электрической цепи $p = 5$, $q = 3$ и $n = 3$. Таким образом, число неизвестных токов в ветвях $p = 5$. По первому и второму законам Кирхгофа для этой схемы можно написать систему линейных уравнений (для узлов a и b и для контуров I, II и III):

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 - \underline{I}_3 - \underline{I}_5 &= 0, \\ \underline{I}_2 - \underline{I}_4 + \underline{I}_5 &= 0, \\ \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_3 \underline{I}_3 &= \underline{E}_1, \\ \underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{Z}_4 \underline{I}_4 &= \underline{E}_2, \\ \underline{Z}_3 \underline{I}_3 - \underline{Z}_4 \underline{I}_4 - \underline{Z}_5 \underline{I}_5 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

В результате решения этой системы находят все известные токи в ветвях.

Используя систему уравнений, записанных по законам Кирхгофа, можно в принципе рассчитать любую линейную цепь. Этот метод расчета является универсальным, классическим, но не всегда самым простым и удобным.

3.3. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ КОНТУРНЫХ ТОКОВ

В основу этого метода положено использование понятия контурного тока.

Под *контурным током* понимают условный (воображаемый) ток, замыкающийся только по своему контуру (при этом рассматривают только независимые контуры). Это позволяет уменьшить число уравнений до числа независимых контуров. Для независимых контуров записывают систему уравнений по второму закону Кирхгофа, в результате решения которой находят эти токи. Действительные токи в ветвях находят затем сложением всех контурных токов, замыкающихся по данной ветви. Если ветвь принадлежит только одному независимому контуру, то ток в ней равен контурному току этого контура.

Для написания уравнений по второму закону Кирхгофа поступают следующим образом:

1. Задают условные положительные направления контурных токов, причем в качестве независимых контуров удобнее выбирать контуры с наименьшим числом ветвей.

2. Направление обхода контура выбирают совпадающим с направлением контурного тока.

3. Суммируют все ЭДС в контуре, причем если направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, то ЭДС считают положительной, и наоборот.

4. Суммируют падения напряжения на всех элементах рассматриваемого контура, обусловленные данным контурным током, а также обусловленные другими контурными токами в элементах этого контура. Если положительное направление контурного тока соседнего контура в общей ветви совпадает с положительным направлением контурного тока данного контура, то создаваемое им падение напряжения считают положительным, и наоборот.

С учетом этого система уравнений для контурных токов I_{11} , I_{22} и I_{33} схемы рис. 3.1 (контуры I, II, III) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3) \underline{I}_{11} + \underline{Z}_3 \underline{I}_{33} &= \underline{E}_1, \\ (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4) \underline{I}_{22} - \underline{Z}_4 \underline{I}_{33} &= \underline{E}_2, \\ \underline{Z}_3 \underline{I}_{11} - \underline{Z}_4 \underline{I}_{22} + (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5) \underline{I}_{33} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Решение системы уравнений (3.2) значительно проще, чем системы (3.1). После нахождения контурных токов \underline{I}_{11} , \underline{I}_{22} и \underline{I}_{33} определяют токи в ветвях:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{11}, \underline{I}_2 = \underline{I}_{22}, \underline{I}_3 = \underline{I}_{11} + \underline{I}_{33}, \underline{I}_4 = \underline{I}_{22} - \underline{I}_{33}, \underline{I}_5 = -\underline{I}_{33}.$$

Для представления уравнений (3.2) для контуров в обобщенном виде сопротивления элементов всех ветвей, входящих в контур k , складывают и обозначают двумя индексами, соответствующими номеру контура, — *собственное сопротивление* \underline{Z}_{kk} контура k . Сопротивление ветви, входящей в контуры k и m , называют *взаимным сопротивлением* этих контуров и обозначают также двумя индексами — \underline{Z}_{km} . ЭДС, входящие в контур k , также складывают и обозначают \underline{E}_{kk} .

Тогда для любой цепи система n линейных алгебраических уравнений для n контурных токов, обозначенных \underline{I}_{11} , \underline{I}_{22} , \underline{I}_{33} , ..., \underline{I}_{kk} , ..., \underline{I}_{nn} , будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{11} \underline{I}_{11} + \underline{Z}_{12} \underline{I}_{22} + \underline{Z}_{13} \underline{I}_{33} + \dots + \underline{Z}_{1k} \underline{I}_{kk} + \\ \dots + \underline{Z}_{1m} \underline{I}_{mm} + \dots + \underline{Z}_{1n} \underline{I}_{nn} &= \underline{E}_{11}, \\ \underline{Z}_{21} \underline{I}_{11} + \underline{Z}_{22} \underline{I}_{22} + \underline{Z}_{23} \underline{I}_{33} + \dots + \underline{Z}_{2k} \underline{I}_{kk} + \\ \dots + \underline{Z}_{2m} \underline{I}_{mm} + \dots + \underline{Z}_{2n} \underline{I}_{nn} &= \underline{E}_{22}, \\ \dots & \\ \underline{Z}_{k1} \underline{I}_{11} + \underline{Z}_{k2} \underline{I}_{22} + \underline{Z}_{k3} \underline{I}_{33} + \dots + \underline{Z}_{kk} \underline{I}_{kk} + \\ \dots + \underline{Z}_{km} \underline{I}_{mm} + \dots + \underline{Z}_{kn} \underline{I}_{nn} &= \underline{E}_{kk}, \\ \dots & \\ \underline{Z}_{n1} \underline{I}_{11} + \underline{Z}_{n2} \underline{I}_{22} + \underline{Z}_{n3} \underline{I}_{33} + \dots + \underline{Z}_{nk} \underline{I}_{kk} + \\ \dots + \underline{Z}_{nm} \underline{I}_{mm} + \dots + \underline{Z}_{nn} \underline{I}_{nn} &= \underline{E}_{nn}. \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Для конкретной электрической цепи слагаемые $\underline{Z}_{km} \underline{I}_{mm}$ в левой части системы уравнений (3.3) будут равны нулю, если контуры k и m не имеют общих ветвей. Перед слагаемыми, которые войдут в уравнение, необходимо ставить знак плюс или минус в зависимости от направления тока и направления обхода контура.

Решая систему уравнений (3.3) относительно контурных токов, находим ток \underline{I}_{kk} в контуре k :

$$\underline{I}_{kk} = \frac{\underline{\Delta}_{kk}}{\underline{\Delta}}, \quad (3.4)$$

здесь $\underline{\Delta}$ — главный комплексный определитель системы (3.3),

$$\underline{\Delta} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{13} & \dots & \underline{Z}_{1k} \dots & \underline{Z}_{1n} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \underline{Z}_{23} & \dots & \underline{Z}_{2k} \dots & \underline{Z}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{Z}_{k1} & \underline{Z}_{k2} & \underline{Z}_{k3} & \dots & \underline{Z}_{kk} \dots & \underline{Z}_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{Z}_{n1} & \underline{Z}_{n2} & \underline{Z}_{n3} & \dots & \underline{Z}_{nk} \dots & \underline{Z}_{nn} \end{vmatrix},$$

причем взаимные сопротивления \underline{Z}_{km} берут с тем знаком, какой они имеют в системе уравнений (3.3); $\underline{\Delta}_{kk}$ — определитель, получаемый из главного определителя путем замены k -го столбца правой частью системы уравнений (3.3).

Для схемы рис. 3.1 с $n = 3$ элементы главного определителя соответственно равны $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3$, $\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_4$, $\underline{Z}_{33} = \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5$, $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = 0$, $\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32} = -\underline{Z}_4$, $\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31} = \underline{Z}_3$, а главный определитель системы

$$\underline{\Delta} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 & 0 & \underline{Z}_3 \\ 0 & \underline{Z}_2 + \underline{Z}_4 & -\underline{Z}_4 \\ \underline{Z}_3 & -\underline{Z}_4 & \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 \end{vmatrix}.$$

ЭДС контуров $\underline{E}_{11} = \underline{E}_1$, $\underline{E}_{22} = \underline{E}_2$, $\underline{E}_{33} = 0$. Например, определитель $\underline{\Delta}_{11}$ равен:

$$\underline{\Delta}_{11} = \begin{vmatrix} \underline{E}_{11} & 0 & \underline{Z}_3 \\ \underline{E}_{22} & \underline{Z}_2 + \underline{Z}_4 & -\underline{Z}_4 \\ 0 & -\underline{Z}_4 & \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 \end{vmatrix}.$$

Аналогично находят определители $\underline{\Delta}_{22}$ и $\underline{\Delta}_{33}$ и контурные токи:

$$\underline{I}_{11} = \frac{\underline{\Delta}_{11}}{\underline{\Delta}}, \quad \underline{I}_{22} = \frac{\underline{\Delta}_{22}}{\underline{\Delta}}, \quad \underline{I}_{33} = \frac{\underline{\Delta}_{33}}{\underline{\Delta}}.$$

3.4. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА НАЛОЖЕНИЯ

Из линейности уравнений, написанных по законам Кирхгофа, следует вывод о том, что в любой сложной цепи с несколькими источниками ЭДС ток в любой ветви создается всеми источниками ЭДС и, следовательно, может быть найден как сумма токов, создаваемых каждым источником ЭДС в отдельности.

На этом основан принцип наложения, позволяющий разбить сложную задачу расчета цепи на несколько простых задач. Используя этот принцип, расчет сложной цепи производят в следующем порядке. Поочередно оставляют в цепи действующим только один источник ЭДС, вместо всех остальных включают их внутренние сопротивления, а если внутренние сопротивления пренебрежимо малы, эти источники ЭДС замыкают накоротко. Производят расчет цепи с одной ЭДС. Таких расчетов производят столько, сколько ЭДС действует во всей цепи. Действительный ток в каждой ветви находят сложением токов, созданных отдельными ЭДС.

Для расчета мощностей, потребляемых в отдельных ветвях, принцип наложения нельзя использовать, так как мощности в ветвях с постоянными параметрами пропорциональны квадрату тока или напряжения.

При использовании принципа наложения для расчета токов в цепи (см. рис. 3.1) необходимо произвести расчет двух схем (рис. 3.2). Эти схемы смешанного соединения пассивных элементов путем последовательных упрощений легко приводятся к эквивалентным схемам, подобно тому, как это было показано ранее. В процессе

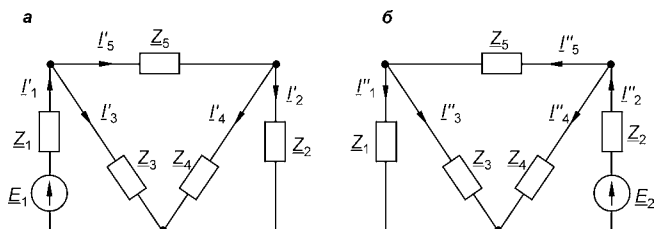


Рис. 3.2

Схемы электрической цепи при использовании принципа наложения для расчета токов в ветвях

а — действует только ЭДС E_1 ; б — действует только ЭДС E_2 .

преобразований схем рассчитывают все частичные токи \underline{I}' , создаваемые ЭДС \underline{E}_1 , и токи \underline{I}'' , создаваемые ЭДС \underline{E}_2 . Действительные токи в ветвях с учетом условных положительных направлений, показанных на рис. 3.1, в результате наложения друг на друга режимов схем рис. 3.2а, б находят по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_1' - \underline{I}_1''; & \underline{I}_2 &= \underline{I}_2' - \underline{I}_2''; \\ \underline{I}_3 &= \underline{I}_3' + \underline{I}_3''; & \underline{I}_4 &= \underline{I}_4' + \underline{I}_4''; & \underline{I}_5 &= \underline{I}_5' - \underline{I}_5''. \end{aligned}$$

3.5. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Рассчитать ток только в одной ветви сложной цепи в некоторых случаях более просто, используя метод эквивалентного генератора. По отношению к этой ветви остальную часть сложной цепи, состоящую из источников ЭДС и пассивных элементов, можно представить в виде эквивалентного генератора с ЭДС \underline{E}_r и внутренним сопротивлением \underline{Z}_r .

На рис. 3.3а представлена схема сложной цепи, в которой требуется найти ток \underline{I}_{ab} в ветви ab . Эта схема может быть замещена эквивалентной схемой, изображенной на рис. 3.3б. Тогда ток в ветви ab

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{E}_r}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_r}. \quad (3.5)$$

Для расчета тока \underline{I}_{ab} по формуле (3.5) необходимо знать ЭДС эквивалентного генератора и его внутреннее сопротивление. Их значения зависят от действительных ЭДС в сложной цепи, сопротивлений остальных ветвей и конфигурации всей цепи. Если известны \underline{E}_r и \underline{Z}_r , то ток \underline{I}_{ab} можно рассчитать при любом значении \underline{Z}_{ab} .

Для определения \underline{E}_r и \underline{Z}_r рассмотрим два режима сложной цепи. Так как нас интересует ток только в ветви ab , то

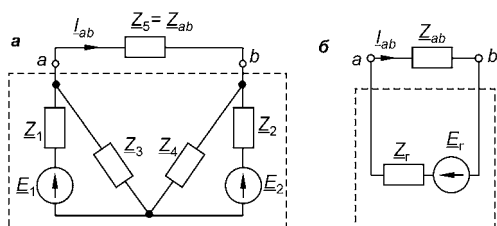


Рис. 3.3
Сложная
электрическая цепь
а — схема; б — эквивалентная схема с выделением ветви ab .

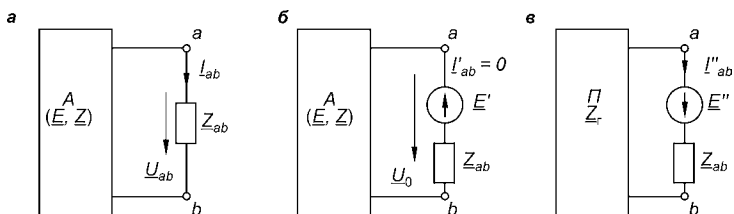


Рис. 3.4
Схемы цепи для определения тока в ветви ab
по методу эквивалентного генератора

всю остальную часть сложной цепи представим активным двухполюсником A (рис. 3.4а). В первом режиме (рис. 3.4б), не изменяя схему двухполюсника, включим в ветвь ab последовательно с элементом Z_{ab} ЭДС E' такого значения и направления, чтобы ток I'_{ab} в ветви ab был равен нулю. Отсутствие тока соответствует режиму холостого хода, что равносильно размыканию ветви. Поэтому согласно второму закону Кирхгофа значение E' должно быть равно напряжению U_0 холостого хода ветви ab , а направление E' противоположно условному положительному направлению тока в ветви, указанному на рис. 3.4а.

Во втором режиме сложной цепи закорачивают все источники ЭДС двухполюсника A , а их внутренние сопротивления складывают с сопротивлением соответствующей ветви. Эту часть цепи, состоящую только из пассивных элементов с сопротивлением Z , можно представить пассивным двухполюсником, обозначенным на рис. 3.4в буквой Π с эквивалентным сопротивлением Z_r . В ветвь ab последовательно с элементом Z_{ab} включаем ЭДС E'' , значение которой равно U_0 , а направление противоположно направлению ЭДС E' . По закону Ома ток в ветви ab в этом режиме

$$I''_{ab} = \frac{E''}{Z_{ab} + Z_r} = \frac{U_0}{Z_{ab} + Z_r}.$$

Применяя принцип наложения для рассмотренных режимов, получим исходную схему, изображенную на рис. 3.4а. Действительно, ЭДС сложной части цепи принималась в расчет только в первом режиме, а ЭДС E' и E'' в ветви ab равны по значению и противоположны по направлению и поэтому взаимно компенсируются. На основании этого можно утверждать, что сумма токов двух

режимов $\underline{I}_{ab}' + \underline{I}_{ab}''$ равна действительному току \underline{I}_{ab} в ветви ab . Но так как ток $\underline{I}_{ab}' = 0$, то

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ab}'' = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_r}. \quad (3.6)$$

Полученная формула может быть использована непосредственно для расчета тока в ветви ab , а также позволяет сделать вывод, что ЭДС \underline{E}_r эквивалентного генератора, использованная в формуле (3.5), равна напряжению \underline{U}_0 между зажимами a и b при разомкнутой ветви ab .

Таким образом, для расчета тока \underline{I}_{ab} необходимо определить напряжение \underline{U}_0 на зажимах интересующей нас ветви и сопротивление \underline{Z}_r остальной части сложной цепи. Это сопротивление находят при коротком замыкании (при исключении из цепи) всех источников ЭДС. Значения \underline{U}_0 и \underline{Z}_r можно определить опытным или расчетным путем.

В первом случае необходимо провести два опыта. Сначала размыкают ветвь ab и измеряют напряжение \underline{U}_0 между зажимами a и b . Затем ветвь ab замыкают коротко и измеряют комплексный ток короткого замыкания с помощью соответствующих приборов. Так как формула (3.6) справедлива при любых значениях сопротивления \underline{Z}_{ab} , в том числе и при равенстве его нулю, то $\underline{I}_k = \underline{U}_0 / \underline{Z}_r$, откуда, зная \underline{U}_0 и \underline{I}_k , находят \underline{Z}_r .

Определив \underline{U}_0 и \underline{I}_k , можно рассчитать \underline{I}_{ab} по формуле (3.6) при любом значении сопротивления \underline{Z}_{ab} , если ЭДС и сопротивления остальной части цепи остаются неизменными.

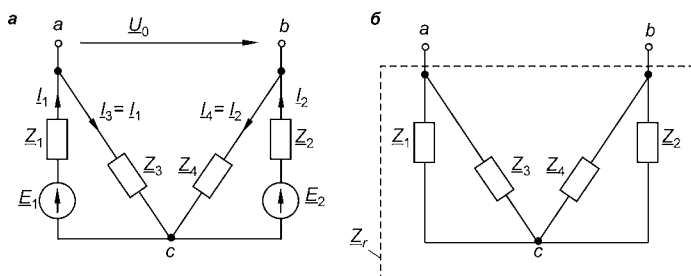


Рис. 3.5

Схемы цепи при расчете по методу эквивалентного генератора
 а — для расчета \underline{U}_0 ; б — для расчета \underline{Z}_r .

Расчетный путь определения \underline{U}_0 и \underline{Z}_r зависит от конкретной схемы цепи. Для нахождения напряжения \underline{U}_0 на зажимах ветви ab (см. рис. 3.3а) составляют схему, представленную на рис. 3.5а. Для внешнего контура этой схемы по второму закону Кирхгофа можно записать уравнение (обход контура по часовой стрелке)

$$\underline{E}_1 - \underline{E}_2 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_0 - \underline{Z}_2 \underline{I}_2,$$

откуда

$$\underline{U}_0 = \underline{E}_1 - \underline{E}_2 - \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_2 \underline{I}_2. \quad (3.7)$$

В оставшейся части цепи каждая ЭДС включена в одноконтурную цепь. Поэтому по закону Ома имеем

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4}.$$

Подставляя эти выражения в формулу (3.7), получим

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} \underline{E}_1 - \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4} \underline{E}_2.$$

Для определения сопротивления \underline{Z}_r составляют схему (рис. 3.5б), в которой все источники ЭДС сложной цепи закорачивают. Эквивалентное сопротивление части цепи, ограниченной на рисунке штриховой линией, является сопротивлением эквивалентного генератора \underline{Z}_r . Нетрудно видеть, что на данной схеме элементы с сопротивлениями \underline{Z}_1 и \underline{Z}_3 , \underline{Z}_2 и \underline{Z}_4 включены между собой попарно параллельно, а эти пары включены последовательно. Поэтому сопротивление эквивалентного генератора

$$\underline{Z}_r = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_4}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4}.$$

Ток в данной цепи

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} \underline{E}_1 - \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4} \underline{E}_2}{\underline{Z}_{ab} + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3} + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_4}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4}}.$$

Для других схем могут быть использованы другие приемы определения \underline{U}_0 и \underline{Z}_r .

3.6. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Ток в любой ветви электрической цепи можно определить по известным потенциалам узлов, к которым она подключена, или напряжению между этими узлами. Согласно второму закону Кирхгофа для любой ветви электрической цепи при заданных условных положительных направлениях ЭДС, тока и напряжения и указанном направлении обхода контура (рис. 3.6) можно написать уравнение

$$-\underline{U}_{km} + \underline{Z}_{km}\underline{I}_{km} = \underline{E}_{km},$$

откуда

$$\underline{I}_{km} = \frac{\underline{E}_{km} + \underline{U}_{km}}{\underline{Z}_{km}} = \left(\underline{E}_{km} + (\varphi_k - \varphi_m) \right) \underline{Y}_{km}, \quad (3.8)$$

где $\underline{U}_{km} = \varphi_k - \varphi_m$ — напряжение между узлами k и m , а φ_k и φ_m — комплексные потенциалы этих узлов,

$\underline{Y}_{km} = \frac{1}{\underline{Z}_{km}}$ — комплексная проводимость ветви.

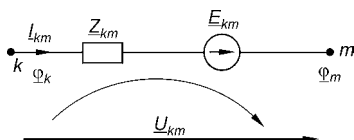


Рис. 3.6
Электрическая схема ветви
с источником ЭДС

Метод расчета электрических цепей, в котором в качестве неизвестных принимают потенциалы узлов схемы, называют методом узловых потенциалов. Метод более эффективен по сравнению с методом контурных токов в

случае, если число узлов в схеме меньше или равно числу независимых контуров, так как в любой электрической цепи потенциал одного из узлов можно принять равным нулю, а число узлов, потенциалы которых следует определить относительно этого узла, станет равным $q - 1$.

Для этих $q - 1$ узлов можно написать $q - 1$ уравнений по первому закону Кирхгофа. При написании уравнений для узла m токи \underline{I}_{km} в ветвях, подключенных к узлу m , выражают по формуле (3.8) через пока неизвестные потенциалы φ_k и φ_m узлов, к которым подключены эти ветви, при этом считают, что ЭДС \underline{E}_{km} и проводимости \underline{Y}_{km} известны.

Если ЭДС в ветви направлена к узлу m , то ее в уравнении (3.8) берут со знаком плюс, если от узла m — со знаком минус. Если ЭДС в ветви отсутствует, то ток в ней



$$I_{km} = (\varphi_k - \varphi_m)Y_{km}, \quad (3.9)$$

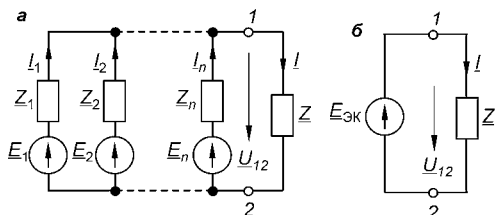


Рис. 3.7
Параллельное
соединение ветвей
с источниками
ЭДС
а — схема цепи; б —
эквивалентная схема.

принять потенциал одного из узлов равным нулю, например, $\varphi_2 = 0$, то на основании системы уравнений (3.10) при $n = 1$ можно найти напряжение между узлами схемы, которое будет равно потенциалу другого (первого) узла:

$$\underline{U}_{12} = \varphi_1 = \frac{\underline{I}_{y1}}{\underline{Y}_{11}} = \frac{\sum_{k=1}^m \underline{E}_k \underline{Y}_k}{\sum_{k=1}^n \underline{Y}_k}, \quad (3.11)$$

где n — число параллельных ветвей цепи, а m — число ветвей с источниками ЭДС.

Все параллельные ветви с источниками ЭДС могут быть замещены одной ветвью с идеальной эквивалентной ЭДС $\underline{E}_{\text{эк}}$ (рис. 3.7б), а параллельные ветви без источников ЭДС — ветвью с эквивалентными комплексными сопротивлениями $\underline{Z}_{\text{эк}}$ или проводимостью $\underline{Y}_{\text{эк}}$. Напряжение эквивалентного источника ЭДС находят по формуле (3.11).

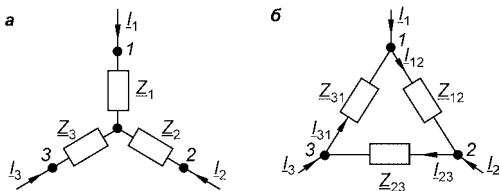
Таким образом, в цепи, состоящей из нескольких параллельных ветвей, комплексное напряжение \underline{U}_{km} на их зажимах равно алгебраической сумме произведений комплексных ЭДС и проводимостей ветвей, деленной на сумму комплексных проводимостей всех ветвей (как содержащих, так и не содержащих источники ЭДС).

3.7. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СХЕМ СОЕДИНЕНИЯ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗВЕЗДОЙ И ТРЕУГОЛЬНИКОМ

В некоторых схемах сложных разветвленных цепей часть схемы, образованная пассивными элементами, может напоминать по внешнему виду трехлучевую звезду (рис. 3.8а) или треугольник (рис. 3.8б). Эквивалентная замена пассивных элементов, соединенных звездой, пассивными элементами, соединенными треугольником, касающаяся только части схемы, может привести к упро-

Рис. 3.8
Схемы соединения
пассивных
элементов

a — звездой; *б* — треугольником.



щению схемы и облегчить ее расчет. В других случаях к такому же упрощению может привести обратная замена.

При этом преобразование должно быть эквивалентным. Условием эквивалентности преобразования является неизменность комплексных токов во всех ветвях цепи, не затронутых преобразованием. Практически достаточно, чтобы токи \underline{I}_1 , \underline{I}_2 и \underline{I}_3 в ветвях 1, 2 и 3, принадлежащих непреобразуемой части схемы, оставались неизменными. Это условие равносильно тому, что комплексные напряжения \underline{U}_{12} , \underline{U}_{23} , \underline{U}_{31} между узлами преобразуемой части схемы должны оставаться неизменными.

Таким образом, чтобы преобразование соединения звездой в соединение треугольником или наоборот было эквивалентным, должно соблюдаться строгое соответствие между сопротивлениями \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 и \underline{Z}_3 элементов, соединенных звездой, и сопротивлениями \underline{Z}_{12} , \underline{Z}_{23} и \underline{Z}_{31} элементов, соединенных треугольником.

Напряжение между узлами 1 и 2 при соединении элементов звездой в общем случае

$$\underline{U}_{12}^Y = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 - \underline{Z}_2 \underline{I}_2,$$

а при соединении треугольником

$$\underline{U}_{12}^\Delta = \underline{Z}_{12} \underline{I}_{12}.$$

Эти формулы справедливы для всех режимов цепи, в том числе и для частного случая, когда ветвь 3 работает в режиме холостого хода (обрыв ветви 3) и ток $\underline{I}_3 = 0$. В этом случае $\underline{I}_2 = -\underline{I}_1$ и напряжение

$$\underline{U}_{12}^Y = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) \underline{I}_1, \quad (3.12)$$

а напряжение

$$\underline{U}_{12}^\Delta = \frac{\underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31})}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}} \underline{I}_1, \quad (3.13)$$



где $\frac{\underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31})}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}$ — эквивалентное сопротивление между точками 1 и 2 при соединении треугольником.

Приравнивая правые части уравнений (3.12) и (3.13) и учитывая, что ток \underline{I}_1 в непреобразуемой части схемы должен быть одним и тем же при соединении элементов как звездой, так и треугольником, получаем

$$\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{12}(\underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31})}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}. \quad (3.14)$$

В левой части этого равенства стоит значение сопротивления между узлами 1 и 2 при соединении элементов звездой, а в правой части — значение сопротивления между теми же узлами при соединении элементов треугольником.

Проводя аналогичные рассуждения, можно написать соответствующие равенства для сопротивлений между другими парами узлов:

$$\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_{23}(\underline{Z}_{31} + \underline{Z}_{12})}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}, \quad (3.15)$$

$$\underline{Z}_3 + \underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{31}(\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23})}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}. \quad (3.16)$$

Решая систему уравнений (3.14–3.16) относительно сопротивлений \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 и \underline{Z}_3 , получаем формулы, позволяющие находить сопротивления лучей эквивалентной звезды при преобразовании треугольника в звезду:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}, \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{23}\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}, \\ \underline{Z}_3 &= \frac{\underline{Z}_{31}\underline{Z}_{23}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Структура полученных формул позволяет сформулировать правило: сопротивление луча эквивалентной звезды равно произведению сопротивлений сторон треугольника, примыкающих к данному лучу, деленному на сумму сопротивлений всех сторон треугольника.

Анализ формул (3.17) показывает, что в общем случае сопротивления лучей эквивалентной звезды меньше сопротивлений сторон треугольника. В случае равенства сопротивлений сторон треугольника ($\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{31} = \underline{Z}_\Delta$)



сопротивления лучей эквивалентной звезды также равны ($\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = \underline{Z}_Y$), причем $\underline{Z}_Y = \underline{Z}_\Delta/3$.

В результате решения систем уравнений (3.14)–(3.16) относительно сопротивлений \underline{Z}_{12} , \underline{Z}_{23} и \underline{Z}_{31} , получим формулы для расчета сопротивлений сторон эквивалентного треугольника при преобразовании звезды в треугольник:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}, \quad \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1},$$

$$\underline{Z}_{31} = \underline{Z}_3 + \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_3 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2}.$$

Из этих формул видно, что сопротивление стороны эквивалентного треугольника равно сумме сопротивлений лучей звезды, соединяемых данной стороной треугольника, плюс произведение сопротивлений этих лучей, деленное на сопротивление третьего луча.

Упрощение схемы в результате применения преобразования треугольника в звезду наглядно видно на примере схемы (см. рис. 3.1), на которой элементы с сопротивлениями \underline{Z}_3 , \underline{Z}_4 и \underline{Z}_5 соединены треугольником. Преобразовав это соединение в соединение звездой с сопротивлениями лучей \underline{Z}_a , \underline{Z}_b и \underline{Z}_c (индексы соответствуют обозначению узлов), получаем схему, изображенную на рис. 3.9. Эта схема имеет три ветви вместо пяти и два независимых контура вместо трех. Поэтому рассчитать ее значительно проще.

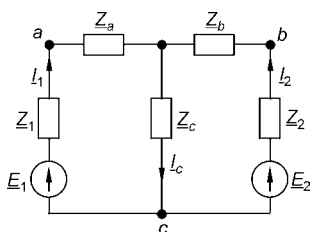


Рис. 3.9
Схема сложной цепи после эквивалентного преобразования соединений элементов треугольником в соединение звездой

3.8. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКАХ

Как указывалось ранее, в целом ряде задач по расчету сложных электрических цепей требуется определить ток и напряжение только одной ветви. Обозначим их \underline{I}_2 и \underline{U}_2 . Если выделить еще ветвь с источником ЭДС, на зажимах которой действует напряжение \underline{U}_1 , создающее ток \underline{I}_1 в этой ветви, то оставшаяся часть сложной цепи будет иметь два входных зажима, к которым присоединяется ветвь

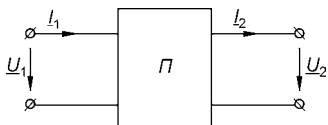


Рис. 3.10
Условное изображение
четырёхполюсника

с источником ЭДС, и два выходных зажима, к которым присоединяется ветвь с током I_2 .

Часть сложной цепи, имеющую два входных и два выходных зажима, называют *четырёхполюсником*. Если в этой части цепи имеются источники ЭДС, то четырёхполюсник *активный*, а если источников ЭДС нет, то четырёхполюсник *пассивный*. В дальнейшем будем рассматривать только пассивный четырёхполюсник.

В качестве примеров четырёхполюсника могут служить линии передачи энергии и сигналов, трансформаторы и другие электротехнические устройства.

Условимся обозначать пассивный четырёхполюсник прямоугольником с буквой Π (рис. 3.10). Если предположить, что сложная цепь Π преобразована в какую-то простую эквивалентную цепь, то на рисунке можно выделить два контура с контурными токами I_1 и I_2 . Для этих контуров можно записать

$$\underline{Z}_{11}I_1 + \underline{Z}_{12}I_2 = \underline{U}_1, \quad \underline{Z}_{21}I_1 + \underline{Z}_{22}I_2 = -\underline{U}_2, \quad (3.18)$$

где сопротивления \underline{Z}_{11} , \underline{Z}_{22} , \underline{Z}_{12} и \underline{Z}_{21} означают то же, что и в системе уравнений (3.3).

Из (3.18) можно получить зависимость электрических величин первого контура от электрических величин второго контура:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}}\underline{U}_2 + \left(\underline{Z}_{12} - \frac{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}} \right) I_2, \\ \underline{I}_1 &= -\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{21}} - \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}} I_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

На практике сопротивления ветвей пассивного четырёхполюсника остаются неизменными. Поэтому коэффициенты перед \underline{U}_2 и I_2 в уравнениях (3.19) являются постоянными коэффициентами, и эти уравнения можно записать в виде

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}I_2, \quad \underline{I}_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}I_2. \quad (3.20)$$

Это и есть *уравнения линейного четырёхполюсника в обобщённом виде*. Коэффициенты \underline{A} и \underline{D} являются комплексными безразмерными величинами, коэффициент \underline{B}

имеет размерность сопротивления, а коэффициент \underline{C} — размерность проводимости. Если коэффициенты \underline{A} и \underline{D} равны, то четырехполюсник называют *симметричным*.

Принимая во внимание, что $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$, получим соотношение между коэффициентами

$$\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} = 1. \quad (3.21)$$

Когда известна схема четырехполюсника, коэффициенты \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} и \underline{D} могут быть определены расчетным путем. Для этого необходимо произвести расчет схемы (рис. 3.10) при размыкании выходного контура (режим холостого хода), когда $I_2 = 0$, и при коротком замыкании выходного контура, когда $U_2 = 0$. Из уравнений (3.20) для первого режима находим

$$\underline{A} = \frac{U_{10}}{U_{20}}, \quad \underline{C} = \frac{I_{10}}{U_{20}}.$$

Для второго режима

$$\underline{B} = \frac{U_{1к}}{I_{2к}}, \quad \underline{D} = \frac{I_{1к}}{I_{2к}}.$$

Определить параметры симметричного четырехполюсника можно и опытным путем. По данным измерений в режимах холостого хода и короткого замыкания получают комплексные значения напряжений \underline{U}_{10} и $\underline{U}_{1к}$ и токов \underline{I}_{10} и $\underline{I}_{1к}$, и на основании уравнений (3.20) вычисляют сопротивления:

$$\underline{Z}_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}, \quad \underline{Z}_{1к} = \frac{U_{1к}}{I_{1к}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}. \quad (3.22)$$

Так как у симметричного четырехполюсника $\underline{A} = \underline{D}$, то, имея систему трех уравнений (3.21) и (3.22), можно вычислить три коэффициента.

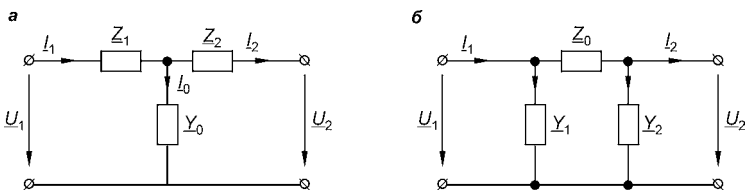


Рис. 3.11
Эквивалентные схемы замещения пассивного четырехполюсника
а — Т-образная; б — П-образная.

Для несимметричных четырехполюсников, у которых $\underline{A} \neq \underline{D}$, необходимо провести еще один опыт при питании четырехполюсника со стороны вторичных зажимов.

В качестве эквивалентной схемы пассивного четырехполюсника чаще всего используют Т-образную (см. рис. 3.11а) или П-образную схемы (рис. 3.11б).

Зная параметры Т-образной эквивалентной схемы, для внешнего контура можно записать

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2. \quad (3.23)$$

Ток в элементе с проводимостью \underline{Y}_0

$$\underline{I}_0 = (\underline{U}_1 - \underline{Z}_1 \underline{I}_1) \underline{Y}_0 = (\underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2) \underline{Y}_0.$$

Так как по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = \underline{I}_2 + (\underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2) \underline{Y}_0, \quad (3.24)$$

из уравнений (3.23) и (3.24) получим

$$\underline{U}_1 = (1 + \underline{Z}_1 \underline{Y}_0) \underline{U}_2 + (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 \underline{Y}_0) \underline{I}_2;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{Y}_0 \underline{U}_2 + (1 + \underline{Z}_2 \underline{Y}_0) \underline{I}_2.$$

Отсюда обобщенные коэффициенты четырехполюсника, определенные через параметры Т-образной эквивалентной схемы, имеют вид

$$\begin{aligned} \underline{A} &= 1 + \underline{Z}_1 \underline{Y}_0; & \underline{B} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 \underline{Y}_0; \\ \underline{C} &= \underline{Y}_0; & \underline{D} &= 1 + \underline{Z}_2 \underline{Y}_0. \end{aligned}$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

4.1. ПОНЯТИЕ О ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Трехфазная система электрических цепей представляет собой совокупность электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе и создаваемые общим источником энергии.

Если все три ЭДС равны по значению и сдвинуты по фазе на 120° по отношению друг к другу, то такую систему ЭДС называют *симметричной* (рис. 4.1а). Если ЭДС не равны по значению (рис. 4.1б) или сдвинуты друг относительно друга на угол, не равный 120° (рис. 4.1в), то такую систему ЭДС называют *несимметричной*. Аналогично определяются трехфазные системы напряжений и токов.

Часть трехфазной электрической цепи, в которой существует один из токов трехфазной системы, называют *фазой*. Таким образом, фазой являются обмотка генератора, в которой индуцируется ЭДС, и приемник, присоединенный к этой обмотке. Это второе значение термина «фаза», которое широко используется в практической электротехнике.

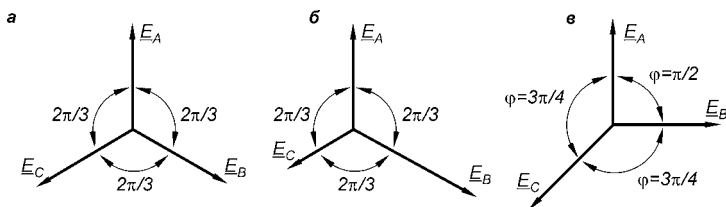


Рис. 4.1
Трехфазная система ЭДС

а — симметричная; б, в — несимметричная.

Основной вклад в разработку трехфазной системы был сделан известным русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским в 1889–1891 гг. Она получила широкое распространение во всех странах мира. В настоящее время вся электроэнергия вырабатывается на электростанциях трехфазными генераторами, передается к местам потребления по трехфазным линиям передачи, и основная ее доля используется в трехфазных приемниках.

Преимущества трехфазной системы основываются, по мнению М. О. Доливо-Добровольского, главным образом на двух ее свойствах, которые используются при эксплуатации не только в совокупности, но и порознь. Это экономичная передача электрической энергии на большие расстояния и превосходное качество двигателей.

В устройствах выпрямления применяют шести- и двенадцатифазные системы, в устройствах автоматики и телемеханики — двухфазные системы.

4.2. ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭДС

Трехфазная система ЭДС создается трехфазными генераторами. В неподвижной части генератора (статоре) размещают три обмотки, сдвинутые в пространстве на 120° (рис. 4.2). Это *фазные обмотки*, или *фазы*, которые обозначают *A*, *B* и *C*. Этими же буквами обозначают начала обмоток фаз генератора. Концы обмоток обозначают соответственно *X*, *Y* и *Z*. На рис. 4.2б показано, как изображают на схемах обмотки генератора с условными положительными направлениями ЭДС.

Каждая фазная обмотка генератора изображена на рис. 4.2а одним витком (у реальных генераторов каждая обмотка имеет много витков, расположенных в несколь-

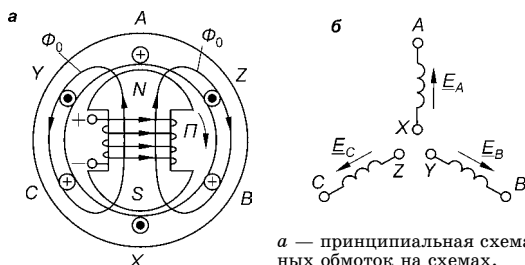


Рис. 4.2
Трехфазный
генератор

а — принципиальная схема; б — изображение фазных обмоток на схемах.

ких соседних пазах, занимающих некоторую дугу внутренней окружности статора). На вращающейся части генератора (роторе) располагают обмотку возбуждения, которую подключают к источнику постоянного тока. Ток обмотки возбуждения создает магнитный поток Φ_0 , постоянный (неподвижный) относительно ротора, но вращающийся вместе с ним с частотой n . Вращение ротора осуществляют каким-либо двигателем.

Магнитная индукция B поля в воздушном зазоре между статором и ротором распределена в пространстве по синусоидальному закону, что достигается специальными конструктивными приемами, причем магнитная индукция имеет максимальное значение на оси полюса и при удалении от нее изменяется по закону $B = B_m \cos \alpha$, где α — пространственный угол, отсчитываемый от оси полюса. При вращении ротора вместе с ним вращается и магнитное поле, магнитные силовые линии которого пересекают проводники фазных обмоток статора и согласно закону электромагнитной индукции индуцируют в них ЭДС. В момент времени, которому соответствует изображенное на рисунке взаимное положение статора и ротора, в обмотке фазы A индуцируется максимальная ЭДС, так как плоскость этой обмотки совпадает с осевой линией полюсов ротора, а магнитная индукция здесь имеет максимальное значение.

Таким образом, ЭДС в каждой последующей фазе будет отставать от ЭДС в предыдущей фазе на $1/3$ периода, т. е. на угол $2\pi/3$. Если принять, что для фазы A начальная фаза равна нулю, то ЭДС фазы A

$$e_A = E_m \sin \omega t,$$

а ЭДС фаз B и C соответственно

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3);$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

Максимальные (амплитудные) значения всех ЭДС и их частоты будут одинаковыми, так как число витков фазных обмоток одинаково, и ЭДС индуцируются одним потоком Φ_0 . Изменение фазных ЭДС e_A , e_B и e_C показано на рис. 4.3.

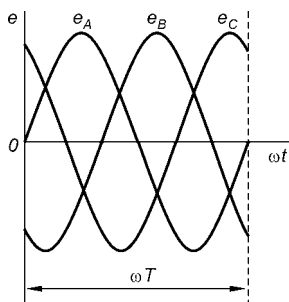


Рис. 4.3
Временные диаграммы
трехфазной системы ЭДС

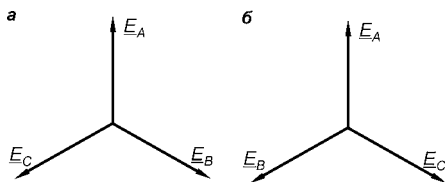


Рис. 4.4
Векторные диаграммы
трехфазной системы ЭДС

a — при прямом чередовании фаз; *b* — при обратном чередовании фаз.

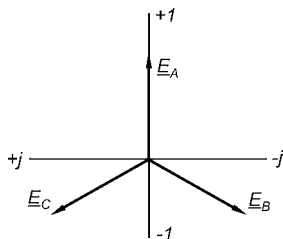


Рис. 4.5
Изображение
трехфазной системы ЭДС
в комплексной плоскости

Действующее значение фазной ЭДС трехфазной системы определяется по формуле (2.7). При равных амплитудах действующие значения ЭДС всех фаз равны. При сдвиге по фазе на $2\pi/3$ они образуют симметричную систему.

Если ЭДС e_B в фазе *B* отстает от ЭДС e_A в фазе *A*, а ЭДС e_C в фазе *C* отстает от ЭДС e_B , то такой порядок следования фаз называют *прямым* и ему соответствует векторная диаграмма на рис. 4.4*a*. В противном случае порядок следования фаз называют *обратным* (рис. 4.4*б*).

При представлении трехфазной системы ЭДС комплексными числами принято ЭДС фазы *A* совмещать с положительным направлением вещественной оси (рис. 4.5). Тогда при прямом чередовании фаз

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_A &= E, \\ \underline{E}_B &= E e^{-j\frac{2\pi}{3}} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) E, \\ \underline{E}_C &= E e^{-j\frac{4\pi}{3}} = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) E, \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где E — действующее значение ЭДС.

При симметричной системе ЭДС, как это видно из формул (4.1), сумма комплексных ЭДС равна нулю. Это же справедливо и для мгновенных значений ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} e_A + e_B + e_C &= 0, \\ \underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

4.3. СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК ГЕНЕРАТОРА И ФАЗ ПРИЕМНИКА ЗВЕЗДОЙ

Каждая фаза трехфазного генератора может являться источником питания для однофазного приемника. В этом случае схема электрической цепи имеет вид, изображенный на рис. 4.6, т. е. каждая фаза работает отдельно от других, хотя в целом цепь является трехфазной. Это *трехфазная несвязанная система*.

ЭДС любой обмотки генератора представляет собой разность потенциалов начала и конца этой обмотки. При этом потенциал одной какой-либо точки (или начала, или конца обмотки) можно считать равным нулю. Тогда комплексный потенциал другой точки будет иметь точно определенное значение.

Принимая равными потенциалы точек, соответствующих концам X , Y и Z обмоток фаз генератора, можно объединить их в одну точку N (рис. 4.7). Концы фаз приемников (Z_a , Z_b и Z_c) также соединяем в одну точку n . Такое соединение обмоток генератора называют *соединением звездой* (Y). Звездой можно соединять также фазы приемника. Точки N и n называют *нейтральными*,

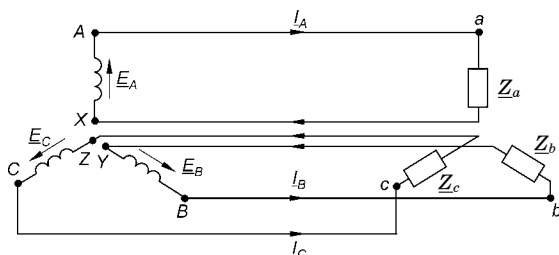


Рис. 4.6

Схема трехфазной несвязанной электрической цепи

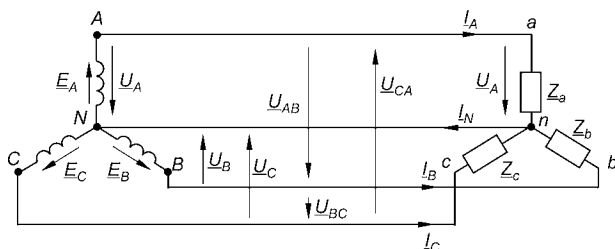


Рис. 4.7

Схема связанной четырехпроводной трехфазной цепи

а провод, соединяющий точку N генератора с точкой n приемника, — *нейтральным*. Провода $A-a$, $B-b$ и $C-c$, соединяющие начала фаз генератора и приемника, называют *линейными*. На электрических схемах линейные провода принято обозначать латинскими буквами L_1 , L_2 и L_3 соответственно, а нейтральный провод — буквой N .

Напряжение между началом и концом фазы — *фазное напряжение* U_ϕ . Таким образом, имеется три фазных напряжения — \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C . Обычно за условное положительное направление ЭДС генератора принимают направление от конца к началу фазы (см. рис. 4.6 и 4.7). Положительное направление тока в фазах совпадает с положительным направлением ЭДС, а положительное направление падения напряжения (напряжение) на фазе приемника совпадает с положительным направлением тока в фазе. Положительным направлением напряжения на фазе генератора, как и на фазе приемника, является направление от начала фазы к ее концу, т. е. противоположное положительному направлению ЭДС.

Напряжение между линейными проводами — *линейное напряжение* U_Δ . Таким образом, имеется три линейных напряжения \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} и \underline{U}_{CA} , условные положительные направления которых приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам, соответствующим второму индексу. Линейные напряжения определяют через известные фазные напряжения. Это соотношение может быть получено из уравнения, написанного по второму закону Кирхгофа для контура $ANBA$, если принять направление обхода контура от точки A к точке N и т. д.: $\underline{U}_A - \underline{U}_B - \underline{U}_{AB} = 0$. Аналогично могут быть найдены и напряжения \underline{U}_{BC} и \underline{U}_{CA} . Отсюда

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B, \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C, \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Таким образом, комплексное линейное напряжение равно разности соответствующих комплексных фазных напряжений.

При построении векторных диаграмм напряжений удобно принимать потенциалы нейтральных точек N и n равными нулю, т. е. совпадающими с началом ко-

ординатных осей комплексной плоскости (рис. 4.8). Таким образом, на векторной диаграмме удобно направить векторы фазных напряжений от точки N к точкам A , B и C , т. е. противоположно условному положительному направлению напряжений на схемах.

Для нахождения вектора линейного напряжения \underline{U}_{AB} , как следует из (4.3), необходимо к вектору напряжения \underline{U}_A прибавить вектор напряжения \underline{U}_B с противоположным знаком. После переноса вектора \underline{U}_{AB} параллельно самому себе он соединит точки A и B на векторной диаграмме фазных напряжений.

Аналогично строят векторы линейных напряжений \underline{U}_{BC} и \underline{U}_{CA} . На векторной диаграмме напряжений векторы фазных напряжений образуют звезду, а векторы линейных напряжений — замкнутый треугольник, откуда следует, что сумма комплексных линейных напряжений всегда равна нулю, т. е.

$$\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0. \quad (4.4)$$

Так как при симметричной системе треугольник линейных напряжений равносторонний, то, чтобы найти соотношение между действующими значениями линейных и фазных напряжений, надо опустить перпендикуляр из точки N на вектор напряжения \underline{U}_{AB} . Тогда $AB = U_{AB} = 2U_{BC}\cos 30^\circ$. Так как $U_{AB} = U_\text{л}$, а $U_B = U_\text{ф}$, то

$$U_\text{л} = 2U_\text{ф} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_\text{ф}. \quad (4.5)$$

Таким образом, если система напряжений симметрична, то при соединении звездой линейное напряжение в $\sqrt{3} = 1,73$ раза больше фазного напряжения. Предусмотренные ГОСТ и применяемые на практике напряжения переменного тока 127, 220, 380 и 660 В как раз и отличаются друг от друга в 1,73 раза. Если $U_\text{л} = 220$ В, то $U_\text{ф} = 127$ В, что обозначают как 220/127 В. Кроме того, применяют системы 380/220 и 660/380 В.

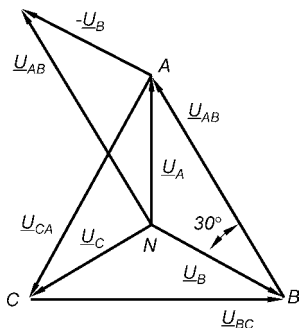


Рис. 4.8
Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при соединении фаз звездой

В четырехпроводной трехфазной цепи имеется два уровня напряжения, различающихся в 1,73 раза, что позволяет использовать приемники с различным номинальным напряжением.

Ток в фазах генератора или приемника называют *фазным током* I_{ϕ} . Ток в линейных проводах называют *линейным током* $I_{\text{л}}$. Так как обмотка генератора, линейный провод и приемник, принадлежащие одной фазе, соединяются последовательно, то при соединении звездой линейный ток равен фазному:

$$I_{\text{л}} = I_{\phi}.$$

Линейные и фазные токи на рис. 4.7 обозначены \underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C .

Ток в каждой фазе может быть определен по закону Ома для цепи синусоидального тока. Так, для фазы А приемника, если принять начальную фазу напряжения U_a равной нулю,

$$\underline{I}_A = \frac{U_a}{\underline{Z}_a} = I_A e^{-j\varphi_a},$$

где $I_A = \frac{U_a}{Z_a}$, $\varphi_a = \arctg \frac{X_a}{R_a}$.

Аналогично определяют фазные токи \underline{I}_B и \underline{I}_C .

Ток в нейтральном проводе \underline{I}_N может быть определен по первому закону Кирхгофа, на основании которого для точки n можно записать уравнение

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C - \underline{I}_N = 0,$$

откуда

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (4.6)$$

Следовательно, ток в нейтральном проводе равен сумме комплексных фазных токов.

Зная модули I_A , I_B и I_C и сдвиги фаз φ_a , φ_b и φ_c между векторами соответствующих фазных напряжений и токов, можно построить векторную диаграмму (рис. 4.9). При построении принято, что система фазных напряжений симметрична (что на практике почти всегда имеет место), а сопротивления фаз приемников различны. В результате фазные токи оказываются различными по значению и сдвинутыми по фазе на различные углы. Геометрическим сложением фазных токов находят вектор



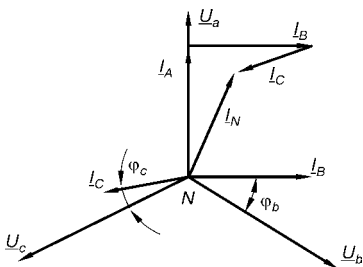


Рис. 4.9
Векторная диаграмма фазных напряжений и токов при несимметричной нагрузке

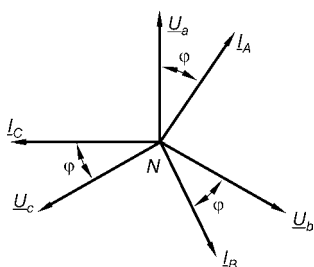


Рис. 4.10
Векторная диаграмма фазных напряжений и токов при симметричной нагрузке

тока \underline{I}_N . Чем больше различие в фазных токах, тем больше ток в нейтральном проводе.

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}$, т. е. когда $R_a = R_b = R_c$ и $X_a = X_b = X_c$, фазные токи равны по значению, и сдвиг по фазе одинаков:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{I}_C = \underline{I}_\phi, \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi.$$

Итак, фазные токи при симметричной нагрузке образуют симметричную систему, вследствие чего ток \underline{I}_N в нейтральном проводе равен нулю:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (4.7)$$

Векторная диаграмма напряжений и токов для симметричной нагрузки показана на рис. 4.10.

При симметричной нагрузке создается такой режим трехфазной цепи, при котором в нейтральном проводе тока нет. Следовательно, можно отказаться от нейтрального провода и перейти к *трехпроводной трехфазной цепи*, изображенной на рис. 4.11.

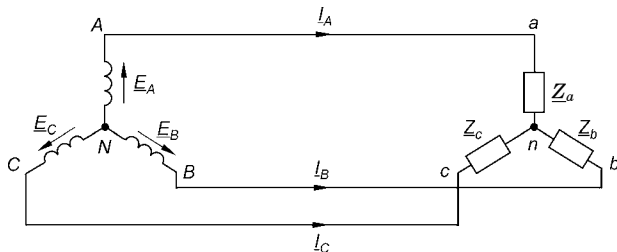


Рис. 4.11
Схема связанной трехпроводной трехфазной цепи

Изменение мгновенных значений симметричной системы токов аналогично изменению мгновенных значений ЭДС (см. рис. 4.3). При $t = 0$ ток $i_A = 0$, ток i_C положителен, а ток i_B отрицателен, причем $i_C = -i_B$. Это значит, что действительное направление тока в фазе C совпадает с условным положительным направлением, указанным на рис. 4.11, а в фазе B противоположно ему. Провод B в данный момент времени является обратным проводом для фазы C . При $t = T/12$ токи i_A и i_C положительны, причем $i_A = i_C = 0,5I_m$, а ток i_B отрицателен, причем $i_B = -I_m$. Провод B является обратным проводом для фаз A и C . Преимущество трехфазной системы по сравнению с однофазной в том и состоит, что не требуется специальных обратных проводов, их функции поочередно выполняют линейные провода.

Обмотки современных трехфазных генераторов, которые устанавливают на электростанциях, соединяют всегда звездой, что позволяет выполнять изоляцию обмоток на фазное напряжение, которое меньше линейного в 1,73 раза. При соединении обмоток генератора звездой фазы приемника могут быть соединены как звездой, так и треугольником.

4.4. СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК ГЕНЕРАТОРА И ФАЗ ПРИЕМНИКА ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Соединение обмоток генератора или фаз приемника, при котором начало одной фазы соединяют с концом другой, образуя замкнутый контур, называют *соединением треугольником* (Δ). Начало фазы A источника питания соединяют с концом Y фазы B (см. рис. 4.6) и точку соединения обозначают A (рис. 4.12). Далее соединяют точки B

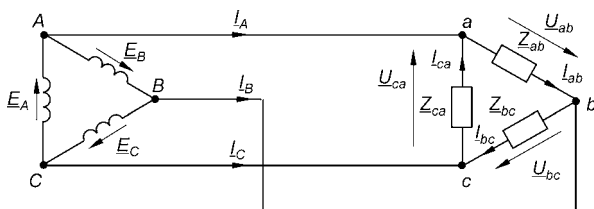


Рис. 4.12
Схема трехпроводной трехфазной цепи
при соединении фаз треугольником

и Z (точка B) и точки C и X (точка C). Положительные направления ЭДС в обмотках те же, что и на рис. 4.6.

Подобным образом соединяют треугольником и фазы приемника, сопротивления которых обозначены двумя индексами, соответствующими началу и концу фазы. Токи \underline{I}_{ab} , \underline{I}_{bc} и \underline{I}_{ca} в фазах приемника являются фазными токами. Условное положительное направление фазных токов приемника принято от точки первого индекса к точке второго индекса. Условное положительное направление фазных напряжений \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} и \underline{U}_{ca} совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное положительное направление линейных токов \underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C принято задавать от источника питания к приемнику.

При отключенном приемнике, когда токи I_A , I_B и I_C равны нулю, в замкнутом контуре обмоток источника питания ток равен нулю, так как система ЭДС симметрична, и суммарная ЭДС в контуре равна нулю ($e_A + e_B + e_C = 0$). Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т. е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная ЭДС в контуре треугольника отлична от нуля, и ток в обмотках может достигать больших значений. Это аварийный режим для источника питания, и поэтому он недопустим.

Напряжение между началом и концом фазы при соединении треугольником — это напряжение между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}.$$

Фазные токи определяют по закону Ома.

Например,

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \underline{U}_{ab} \underline{Y}_{ab} = I_{ab} e^{j\psi},$$

где $\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = U_{ab} Y_{ab}$ — действующее значение фазного тока, $\psi = \psi_{U_{ab}} - \varphi_{ab}$ — аргумент этого тока (его начальная фаза), $\varphi_{ab} = \arctg \frac{X_{ab}}{R_{ab}}$ — сдвиг фаз между напряжением \underline{U}_{ab} и током \underline{I}_{ab} .

Линейные токи можно определить из уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа: $\underline{I}_A + \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{ab} = 0$

для точки a ; $\underline{I}_B + \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{bc} = 0$ для точки b ; $\underline{I}_C + \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ca} = 0$ для точки c .

Таким образом, получаем

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

При соединении треугольником комплексные линейные токи равны разности комплексных фазных токов тех фаз, которые соединены с данным линейным проводом.

Как следует из уравнений (4.8), сумма линейных комплексных токов всегда равна нулю:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0.$$

На векторной диаграмме система линейных (фазных) напряжений \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} и \underline{U}_{ca} при соединении треугольником образует такой же замкнутый треугольник, как и при соединении звездой (рис. 4.13). Фазные токи \underline{I}_{ab} , \underline{I}_{bc} и \underline{I}_{ca} при симметричной нагрузке равны по значению и сдвинуты по отношению к векторам напряжений на одинаковый угол φ .

Для определения соотношения между действующими значениями фазных и линейных токов при симметричной нагрузке можно воспользоваться либо уравнениями (4.8), либо векторной диаграммой токов, построенной на основании этих же уравнений (рис. 4.14а), фазные токи здесь такие же, что и на рис. 4.13. Векторы линейных токов образуют замкнутый треугольник. Поскольку при

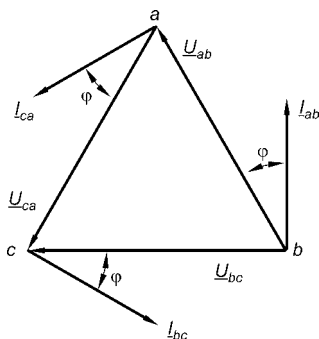


Рис. 4.13
Векторная диаграмма напряжений и фазных токов при соединении фаз треугольником

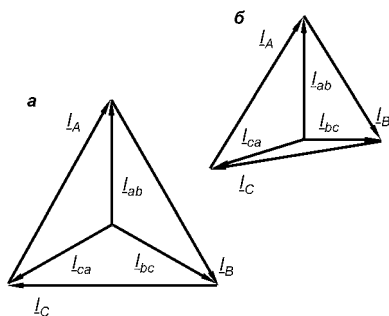


Рис. 4.14
Векторная диаграмма фазных и линейных токов при соединении фаз треугольником
 a — при симметричной нагрузке; b — при несимметричной нагрузке.

симметричной нагрузке системы фазных и линейных токов симметричны, сравнивая векторные диаграммы токов (рис. 4.14а) и напряжений (см. рис. 4.8), можно заключить, что при соединении треугольником при симметричной нагрузке действующее значение линейного тока в $\sqrt{3}$ раз больше фазного, т. е. $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}$.

В общем случае, когда нагрузка несимметрична, системы фазных и линейных токов также несимметричны (рис. 4.14б).

В заключение отметим, что способ соединения фаз приемника (звезда или треугольник) не зависит от способа соединения обмоток источника питания. Электроприемник присоединяют к источнику питания, имеющему три или четыре зажима. При трех зажимах (A , B и C) обмотки источника питания могут быть соединены как звездой без вывода нейтральной точки, так и треугольником. При четырех зажимах (A , B , C и N) обмотки источника питания соединены звездой с выведенной нейтральной точкой. Фазы приемника могут быть соединены звездой с нейтральным проводом только в этом случае.

4.5.

НАПРЯЖЕНИЕ МЕЖДУ НЕЙТРАЛЬНЫМИ ТОЧКАМИ ГЕНЕРАТОРА И ПРИЕМНИКА

Рассмотрим трехфазную цепь при соединении обмоток генератора и фаз приемника звездой (рис. 4.15а). В обмотках генератора индуцируется симметричная система ЭДС. Пренебрегая потерями напряжения в обмотках, можно считать, что системы фазных \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C и линейных \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} и \underline{U}_{CA} напряжений генератора симметричны и неизменны. Сопротивления линейных проводов примем равными нулю. Тогда система линейных напряжений \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} , \underline{U}_{ca} приемника будет совпадать с системой линейных напряжений генератора.

Соединенные звездой фазы приемника представлены комплексными проводимостями \underline{Y}_a , \underline{Y}_b и \underline{Y}_c . Нейтральный провод в общем случае имеет проводимость \underline{Y}_N . На рисунке указаны также положительные направления фазных токов \underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C и тока \underline{I}_N . Как на фазе приемника, так и на элементе \underline{Y}_N условное положительное направление падения напряжения совпадает с направлением тока (на рис. 4.15а напряжения указаны только для фазы A).

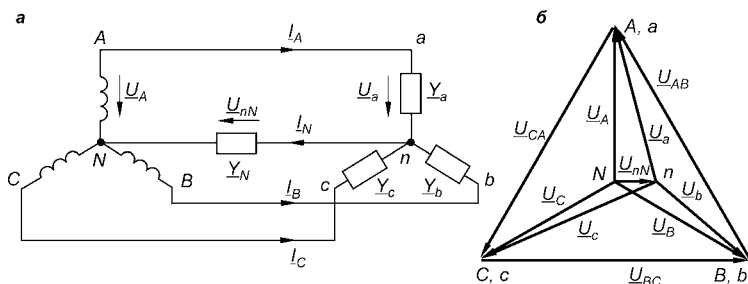


Рис. 4.15
Трехфазная цепь с нейтральным проводом
а — схема; б — векторная диаграмма напряжений.

Электрическая цепь состоит из параллельных ветвей с источниками ЭДС и одной параллельной ветви (нейтральный провод) с пассивным элементом. Напряжение на этой ветви с учетом (3.11)

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}. \quad (4.9)$$

На основании второго закона Кирхгофа для контура фазы A можем записать

$$\underline{U}_{nN} + \underline{U}_a = \underline{U}_A,$$

откуда следует, что фазное напряжение \underline{U}_a приемника:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}.$$

Аналогично для напряжений других фаз:

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}.$$

На рис. 4.15б построена векторная диаграмма напряжений генератора и приемника. Как указывалось, системы фазных и линейных напряжений генератора симметричны и неизменны, точка N лежит в центре тяжести равностороннего треугольника ABC . Линейные напряжения приемника $\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}$, потенциалы точек A и a , B и b , C и c соответственно равны.

Потенциал точки N равен нулю, и начало осей комплексной плоскости совпадает с этой точкой на векторной диаграмме фазных напряжений генератора. Векторы фазных напряжений \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C направлены от точки N к точкам A , B и C . Потенциалам этих точек на схеме рис. 4.15а соответствуют комплексные напряжения \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C .

При известных проводимостях фаз приемника и нейтрального провода по формуле (4.9) можно найти напряжение \underline{U}_{nN} между точками N и n . Вектор напряжения \underline{U}_{nN} будет направлен из точки N векторной диаграммы, причем его концу будет соответствовать потенциал точки n приемника. Фазное напряжение \underline{U}_a приемника — это напряжение между точками a и n . Поэтому на диаграмме вектор напряжения \underline{U}_a будет направлен от точки n к точке a . Аналогично строят фазные напряжения \underline{U}_b и \underline{U}_c .

Если проводимость нейтрального провода бесконечно велика, то напряжение $\underline{U}_{nN} = 0$, поэтому система фазных напряжений приемника будет симметричной при любых проводимостях фаз приемника. Поэтому четырехпроводные трехфазные цепи и применяют для получения двух уровней напряжений и подключения к ним заведомо несимметричных приемников, например, таких как осветительные сети и др.

При обрыве нейтрального провода или снижении его проводимости система фазных напряжений приемника в такой цепи окажется несимметричной. На векторной диаграмме точка n при этом может находиться в любом месте внутри треугольника линейных напряжений и даже вне его в зависимости от проводимостей фаз и нейтрального провода.

4.6. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ПРИЕМНИКОМ

Из большого числа возможных несимметричных режимов трехфазных цепей рассмотрим только те, которые создаются приемником. При этом будем полагать, что система линейных напряжений источника питания остается симметричной и неизменной. Потенциал нейтральной точки источника питания при соединении его обмоток звездой также остается неизменным.

Соединение фаз приемника звездой с нейтральным проводом. Рассмотрим схему соединения фаз приемника, представленную на рис. 4.16. Сопротивление нейтрального провода, как и линейных проводов, примем равным нулю ($Y_N = \infty$). Как следует из формулы (4.9), при этом условии $\underline{U}_{nN} = 0$ и система фазных напряжений приемника остается симметричной и неизменной при любых проводимостях

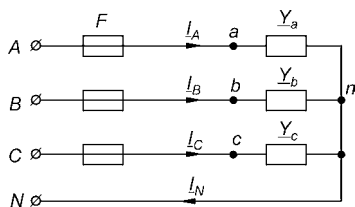


Рис. 4.16
Схема соединения фаз
приемника звездой
с нейтральным проводом

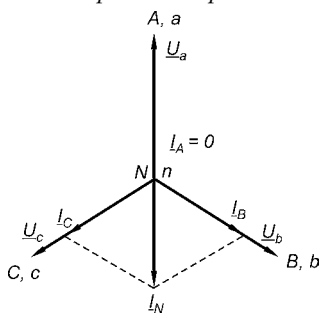


Рис. 4.17
Векторная диаграмма токов
при обрыве линейного
провода A-a (соединение
приемника звездой
с нейтральным проводом)

фаз приемника. Ток в нейтральном проводе определяется фазными токами по формуле (4.6).

Рассмотрим частный случай несимметричного режима, когда при симметричной активной нагрузке ($\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = G$) происходит обрыв провода. На практике такой режим может иметь место при перегорании предохранителя F . В исходном режиме фазные токи образуют симметричную систему, и ток в нейтральном проводе равен нулю. При обрыве провода A-a ток $\underline{I}_A = 0$. Токи в фазах b и c приемника $\underline{I}_B = G\underline{U}_b$, $\underline{I}_C = G\underline{U}_c$ останутся неизменными по значению и по фазе. Ток в нейтральном проводе $\underline{I}_N = \underline{I}_B + \underline{I}_C$, т. е. по значению равен току \underline{I}_A в исходном режиме, а по на-

правлению противоположен ему (рис. 4.17).

При наличии нейтрального провода фазные напряжения приемника остаются постоянными при любых нагрузках фаз и ток каждой фазы зависит только от проводимости данной фазы. Таким образом, нейтральный провод выравнивает фазные напряжения приемника.

Соединение фаз приемника звездой без нейтрального провода. Схема такого соединения фаз приемника представлена на рис. 4.18. При отсутствии нейтрального провода нужно принять $\underline{Y}_N = 0$. Тогда напряжение между точками N и n

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}. \quad (4.10)$$

В общем случае несимметричной нагрузки, когда $\underline{Y}_a \neq \underline{Y}_b \neq \underline{Y}_c$, векторные диаграммы напряжений будут иметь вид, подобный рис. 4.15б. Изменение прово-

димости одной или нескольких фаз приведет к появлению напряжения \underline{U}_{nN} между нейтральными точками источника питания и приемника и изменению фазных напряжений \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c , а следовательно, и токов в фазах. Так как при отсутствии нейтрального провода и неравенстве проводимостей (сопротивлений) фаз приемника фазные напряжения \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c могут значительно отклоняться от номинального значения, соединение фаз приемника звездой без нейтрального провода никогда не применяют, если заведомо известно, что нагрузка по фазам будет несимметричной.

При соединении приемника звездой без нейтрального провода представляют интерес два частных случая несимметричной нагрузки. Пусть в исходном режиме активная нагрузка симметрична ($\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = G$). Система фазных токов симметрична, $\underline{U}_{nN} = 0$, и система фазных напряжений приемника также симметрична.

Рассмотрим случай обрыва линейного провода $A-a$. Проводимость фазы a приемника в этом случае $\underline{Y}_a = 0$. В соответствии с (4.10) и с учетом того, что $\underline{Y}_b = \underline{Y}_c = G$, получим

$$\underline{U}_{nN} = \frac{G(\underline{U}_B + \underline{U}_C)}{2G} = -\frac{\underline{U}_A}{2}.$$

На векторной диаграмме (рис. 4.19) вектор \underline{U}_{nN} определяет точку n , которая делит вектор \underline{U}_{BC} пополам. Фазное напряжение \underline{U}_a увеличивается в 1,5 раза, а напряжения \underline{U}_b и \underline{U}_c уменьшаются в $2/\sqrt{3}$ раза, так как они становятся равными половине линейного напряжения. Ток в фазе a равен нулю, а токи в фазах b и c уменьшаются в $2/\sqrt{3}$ раза из-за уменьшения напряжений \underline{U}_b и \underline{U}_c .

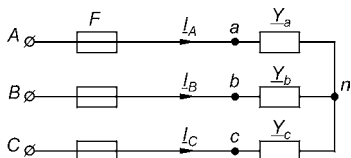


Рис. 4.18
Схема соединения фаз приемника звездой без нейтрального провода

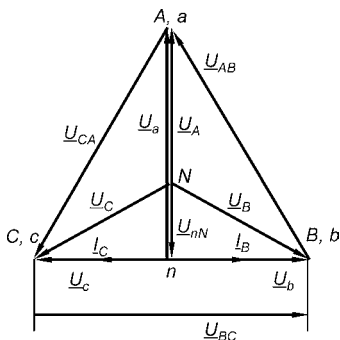


Рис. 4.19
Векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве линейного провода $A-a$ (соединение приемника звездой без нейтрального провода)

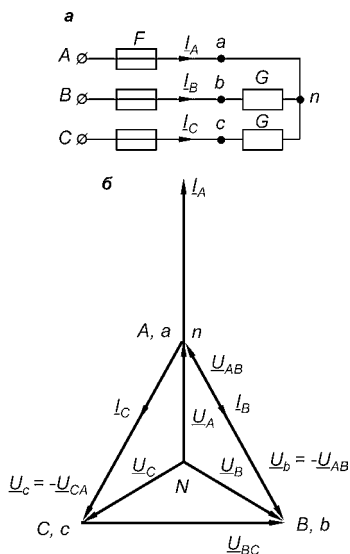


Рис. 4.20
Короткое замыкание фазы a ($Z_a = 0$) при соединении фаз приемника звездой без нейтрального провода
 a — схема; b — векторная диаграмма напряжений и токов.

Так как нагрузка активная, то токи совпадают по фазе с фазными напряжениями (углы $\varphi = 0$).

При коротком замыкании фазы a приемника (рис. 4.20а) ее проводимость $Y_a = \infty$ и в соответствии с (4.10) напряжение

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A Y_a}{Y_a} = \underline{U}_A,$$

так как проводимости других фаз пренебрежимо малы по сравнению с Y_a . Это означает, что потенциал точки n равен потенциалу точки a . На векторной диаграмме точка n совпадает с точкой a (рис. 4.20б). Фазное напряжение $U_a = 0$, а напряжения $\underline{U}_b = -\underline{U}_{AB}$ и $\underline{U}_c = -\underline{U}_{CA}$, т. е. увеличиваются до линейных напряжений.

По этой причине фазные токи I_B и I_C возрастают в $\sqrt{3}$ раза, совпадая по фазе со своими напряжениями. Ток в проводе $A-a$ находят из уравнения (4.7): $I_A = -(I_B + I_C)$. Как видно из диаграммы, ток I_A в $\sqrt{3}$ раза больше токов I_B и I_C и в три раза больше тока в исходном режиме.

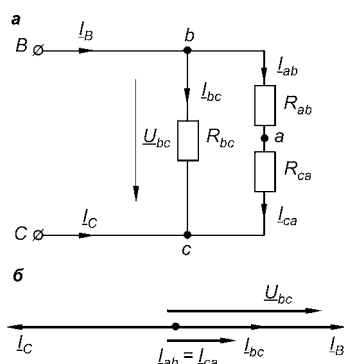
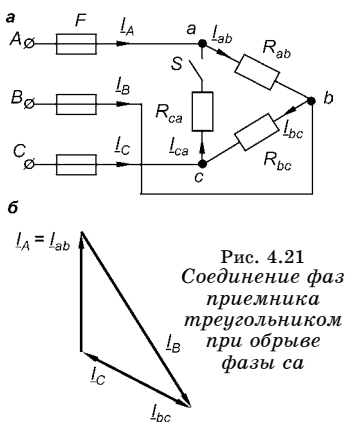
Соединение фаз приемника треугольником. При соединении треугольником фазное и линейное напряжения равны. Поэтому при заданных неизменных линейных напряжениях фазные напряжения на зажимах приемника останутся постоянными при любом сопротивлении фаз. Векторная диаграмма токов для общего случая несимметричной нагрузки приведена на рис. 4.14б.

На практике несимметричные режимы, обусловленные приемником, могут быть следствием нарушения его нормальной работы. Рассмотрим симметричную активную нагрузку, фазы которой соединены треугольником. При нормальной работе системы фазных и линейных токов симметричны (см. рис. 4.14а).

При обрыве фазы ca (выключатель S на рис. 4.21а разомкнут) фазный ток $I_{ca} = 0$. Другие фазные токи не изменились, так как не изменились сопротивления фаз приемника и напряжения на этих фазах. Линейный провод $A-a$ оказывается включенным последовательно с фазой ab , поэтому линейный ток $I_A = I_{ab}$. По этой же причине $I_C = -I_{bc}$. Таким образом, токи I_A и I_C по значению становятся равными фазным токам. Линейный ток $I_B = I_{bc} - I_{ab}$, т. е. определяется так же, как в исходном режиме, и поэтому остается неизменным. На рис. 4.21б приведена векторная диаграмма токов для случая обрыва фазы.

При обрыве провода $A-a$ (перегорание предохранителя) трехфазная цепь преобразуется в однофазную цепь, изображенную на рис. 4.22а. Фазы приемника образуют две параллельные ветви, к которым подведено напряжение \underline{U}_{bc} . Ток I_{bc} в ветви с R_{bc} остается неизменным, так как по-прежнему определяется тем же напряжением \underline{U}_{bc} . В ветвях с R_{ab} и R_{ca} , включенных последовательно, ток $I_{ab} = I_{ca}$ и совпадает по фазе с током I_{bc} , так как тоже определяется напряжением \underline{U}_{bc} . По значению он в два раза меньше тока I_{bc} , так как $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}$.

Линейный ток $I_B = I_{bc} + I_{ab}$ совпадает по фазе с током I_{bc} , а по значению в 1,5 раза больше тока I_{bc} . Ток I_C равен по значению току I_B , а по фазе ему противоположен. Векторная диаграмма токов такой однофазной цепи изображена на рис. 4.22б.



4.7. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

В трехфазной цепи полную, активную и реактивную фазные мощности определяют, как и в однофазных цепях:

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_\phi &= \underline{U}_\phi \underline{I}_\phi^* = S_\phi e^{j\varphi} = P_\phi + jQ_\phi, \\ S_\phi &= \sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2}, \\ P_\phi &= U_\phi I_\phi \cos\varphi, \\ Q_\phi &= U_\phi I_\phi \sin\varphi, \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

где \underline{I}_ϕ^* — сопряженный комплексный фазный ток.

Мощность трехфазного приемника или источника равна сумме фазных мощностей:

$$\left. \begin{aligned} \underline{S} &= \sum_{n=1}^3 \underline{S}_{\phi n} = \sum_{n=1}^3 P_{\phi n} + j \sum_{n=1}^3 Q_{\phi n} = P + jQ, \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}, \\ P &= \sum_{n=1}^3 P_{\phi n}, \quad Q = \sum_{n=1}^3 Q_{\phi n}. \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке фазные мощности равны, поэтому мощность трехфазной цепи равна утроенному значению фазной мощности. Мощность трехфазного приемника всегда удобнее вычислять через линейные напряжение и ток, так как линейные величины всегда легче измерять. Принимая во внимание, что при соединении фаз приемника звездой $U_\phi = U_\pi / \sqrt{3}$; $I_\phi = I_\pi$, а при соединении треугольником $U_\phi = U_\pi$; $I_\phi = I_\pi / \sqrt{3}$, формулы для расчета мощности имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \underline{S} &= 3\underline{S}_\phi, \quad S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_\pi I_\pi, \\ P &= 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi = \sqrt{3}U_\pi I_\pi \cos\varphi, \\ Q &= 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin\varphi = \sqrt{3}U_\pi I_\pi \sin\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Рассмотрим, как изменится мощность приемника при переключении его фаз со звезды в треугольник. Как было показано, мощность симметричного приемника независимо от схемы его соединения можно определить по формуле (4.13).

Если линейное напряжение источника питания $U_\pi = \text{const}$ (рис. 4.23), что обычно характерно для реальных условий, и сопротивление фаз приемника остается по-

стоянным ($Z_\phi = \text{const}$), то отношение мощности приемника при соединении его фаз треугольником (P_Δ) к мощности приемника при соединении его фаз звездой (P_Y) определяется отношением линейных токов:

$$\frac{P_\Delta}{P_Y} = \frac{I_{\Delta\Delta}}{I_{\Delta Y}},$$

где $I_{\Delta\Delta}$, $I_{\Delta Y}$ — линейные токи при соединении фаз приемника треугольником и звездой соответственно.

При соединении фаз приемника треугольником

$$I_{\Delta\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi\Delta}}{Z_\phi} = \frac{\sqrt{3}U_\Delta}{Z_\phi},$$

а при соединении фаз приемника звездой

$$I_{\Delta Y} = I_{\phi Y} = \frac{U_{\phi Y}}{Z_\phi} = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}Z_\phi}.$$

Тогда отношение линейных токов $I_{\Delta\Delta}/I_{\Delta Y} = 3$.

Таким образом, при неизменном линейном напряжении, переключая приемник со звезды в треугольник, его мощность увеличивают в три раза:

$$P_\Delta = 3P_Y.$$

Действительно, при соединении фаз приемника треугольником фазное напряжение становится равным линейному, т. е. увеличивается в $\sqrt{3}$ раза по сравнению с фазным напряжением при соединении фаз приемника звездой. Следствием этого является увеличение фазного тока $I_\phi = U_\phi/Z_\phi$ также в $\sqrt{3}$ раза. Фазная мощность увеличится в три раза, во столько же раз увеличится мощность трехфазного приемника. Этим свойством можно воспользоваться, если приемник допускает увеличение напряжения на его зажимах в $\sqrt{3}$ раза.

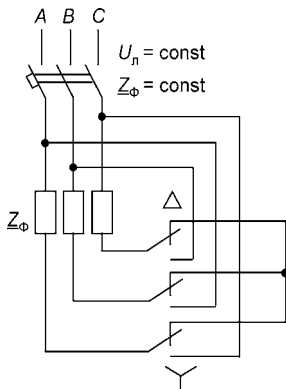


Рис. 4.23
Схема переключения
трехфазного приемника
со звезды в треугольник

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

5.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В предыдущих главах было показано, что если к цепи приложено постоянное напряжение U , то в цепи возникает постоянный ток $I = U/R$, а если к цепи приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то в цепи с постоянными параметрами возникает синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$.

Такие токи устанавливаются лишь через некоторое время после включения цепи или после изменения ее параметров и могут существовать все время, пока к ней приложено напряжение и параметры остаются неизменными. Эти токи называют *установившимися токами*, а соответствующие напряжения на отдельных участках цепи — *установившимися напряжениями*.

Каждому установившемуся режиму электрической цепи соответствует строго определенное энергетическое состояние, т. е. определенные значения энергии электрического поля конденсатора и магнитного поля индуктивной катушки:

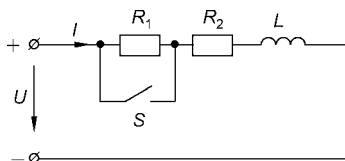
$$W_{\text{э}} = \frac{1}{2} C u^2; \quad W_{\text{м}} = \frac{1}{2} L i^2.$$

Любое изменение состояния электрической цепи (включение, отключение, изменение параметров цепи и т. п.) называют *коммутацией*. Будем считать, что процесс коммутации осуществляется мгновенно. Энергетическое же состояние цепи не может измениться мгновенно.

Пусть, например, в цепи (рис. 5.1) при разомкнутом выключателе S существует установившийся ток $I_1 = U/(R_1 + R_2)$, определяемый только сопротивлением R цепи.



Рис. 5.1
*Схема для анализа
 влияния изменения
 параметров цепи постоянного тока на процесс
 установления тока*



При замыкании выключателя S , т. е. при шунтировании резистора R_1 , установившийся ток в цепи $I_2 = U/R_2 > I_1$.

Если предположить, что ток в цепи изменяется мгновенно от I_1 до I_2 , то это будет означать, что в индуктивной катушке в этот момент времени индуцируется ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -L \frac{I_2 - I_1}{0} = \infty.$$

Но любая ЭДС самоиндукции препятствует изменению тока в цепи. Поэтому предположение о мгновенном изменении тока в цепи неверно. Только в идеальном случае, когда $L = 0$, можно рассматривать изменение тока как мгновенное.

В этом заключается **первый закон коммутации**:

||| *ток в цепи с индуктивностью не может измениться скачком.*

Согласно **второму закону коммутации**,

||| *напряжение на зажимах конденсатора или другого емкостного элемента не может измениться скачком.*

Индуктивные и емкостные элементы являются инерционными, вследствие чего для изменения энергетического состояния электрической цепи требуется некоторый промежуток времени, в течение которого происходит *переходный процесс*. Длительность переходного процесса, как будет показано далее, зависит от параметров цепи. Хотя такой процесс обычно длится несколько секунд или даже доли секунды, токи и напряжения в это время на отдельных участках цепи могут достигать больших значений, иногда опасных для электроустановок. Поэтому нужно уметь рассчитывать токи и напряжения переходных процессов и на основании этих расчетов разрабатывать меры защиты электрической цепи.

Как и любой динамический процесс в материальных системах, переходный процесс в электрических цепях описывают дифференциальными уравнениями. Режим линейных электрических цепей с постоянными параметрами R , L и C описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

Так, режим цепи синусоидального тока при последовательном соединении R , L и C и напряжении источника питания $u = U_m \sin \omega t$ описывается уравнением

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U_m \sin \omega t.$$

Полное решение такого неоднородного линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами ищут в виде

$$i = i' + i'',$$

где i' — частное решение данного неоднородного уравнения; i'' — общее решение однородного дифференциального уравнения.

Ток i' поддерживается в цепи напряжением источника питания и является *установившимся током*. Ток i'' находят при решении уравнений без свободного члена. Физически это означает, что приложенное к цепи напряжение равно нулю, т. е. цепь представляет замкнутый контур, состоящий из последовательно соединенных R , L и C .

Ток в такой цепи может поддерживаться только за счет запасов энергии в магнитном поле индуктивной катушки или в электрическом поле конденсатора. Так как эти запасы ограничены и при наличии тока i' в элементах с сопротивлением R происходит рассеяние энергии в виде теплоты, то через некоторое время этот ток становится равным нулю.

Ток i'' называют *свободным*, так как его определяют в свободном режиме цепи.

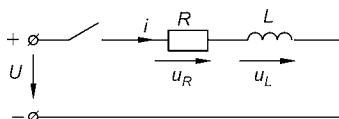
Таким образом, полное решение дифференциального уравнения позволяет определить ток i в цепи в переходном режиме или напряжение на элементах цепи $u = u' + u''$.



5.2. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ С R И L ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ЕЕ К ИСТОЧНИКУ ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ

Все катушки и обмотки электрических аппаратов и машин имеют сопротивление R и индуктивность L . Поэтому исследуемую электрическую цепь, изображенную на рис. 5.2, можно считать эквивалентной схемой индуктивной катушки или обмотки, включаемой на постоянное напряжение.

Рис. 5.2
*Схема подключения цепи
с последовательным соединением
элементов с R и L к источнику
постоянного напряжения*



В начальный момент времени тока в цепи нет и энергия магнитного поля индуктивной катушки равна нулю. После подключения цепи к источнику постоянного напряжения U в установившемся режиме в ней существует ток I и энергия магнитного поля $LI^2/2 > 0$. Следовательно, в то время, когда происходит изменение энергии магнитного поля индуктивной катушки (от 0 до $LI^2/2$), в цепи имеет место переходный процесс и существует переменный ток i .

Переходный процесс в такой цепи описывается дифференциальным уравнением (по второму закону Кирхгофа)

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U.$$

Ток в установившемся режиме $i' = I = U/R$. Свободный ток i'' находят, решая однородное дифференциальное уравнение

$$L \frac{di''}{dt} + Ri'' = 0. \quad (5.1)$$

Решение этого уравнения ищут в виде

$$i'' = Ae^{pt},$$

где коэффициент p — корень характеристического уравнения $Lp + R = 0$.

Таким образом, $p = -R/L$, а ток в переходном режиме

$$i = \frac{U}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}. \quad (5.2)$$

Постоянную интегрирования A определяем с учетом первого закона коммутации из начальных условий: при $t = 0$ ток в цепи равен нулю. Получаем $A = -U/R$.

В результате

$$i = I(1 - e^{-t/\tau}) = \frac{U}{R}(1 - e^{-t/\tau}). \quad (5.3)$$

Величина $\tau = L/R$ имеет размерность времени. Ее называют *постоянной времени* цепи. Она характеризует скорость протекания переходного процесса. Чем больше τ (больше L), тем дольше существует ток i'' и тем длительнее переходный процесс.

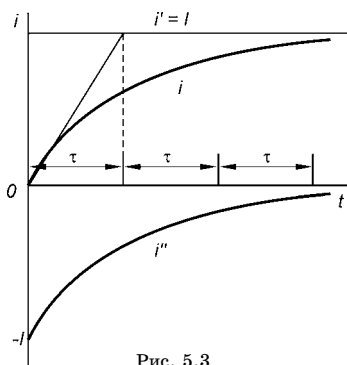


Рис. 5.3
Изменение токов в цепи с последовательным соединением элементов с R и L при включении на постоянное напряжение

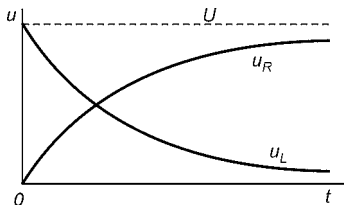


Рис. 5.4
Изменение напряжения на резисторе и индуктивной катушке при включении цепи на постоянное напряжение

Как видно из рис. 5.3, свободный ток i'' при $t = 0$ равен по значению установившемуся току I , но имеет обратное направление. С течением времени этот ток уменьшается до нуля. Общий ток в цепи изменяется от нуля до установившегося значения по экспоненциальному закону. При $t = \tau$ ток $i'' = -Ie^{-1}$.

Это означает, что постоянная времени цепи равна такому промежутку времени, в течение которого свободный ток уменьшается в e раз.

В моменты времени $t = k\tau$ значения свободного тока $i'' = Ie^{-k}$ и по отношению к значению установившегося тока соответственно составляют (%): 36,00 (при $t = \tau$); 13,50 (при $t = 2\tau$); 5,00 (3 τ); 1,80 (4 τ); 0,67 (5 τ); 0,25 (6 τ).

Из этих данных следует, что уже при $t = 5\tau$ ток в цепи

отличается от тока I менее чем на 1%, поэтому его можно считать установившимся.

Падение напряжения на резисторе $u_R = Ri$ изменяется по такому же закону, что и ток. Падение напряжения на индуктивной катушке

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{I}{\tau} e^{-t/\tau} = L \frac{IR}{L} e^{-t/\tau} = U e^{-t/\tau}, \quad (5.4)$$

т. е. убывает с течением времени от значения напряжения источника питания до нуля (рис. 5.4).

5.3. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПИ ПРИ ЗАРЯДКЕ И РАЗРЯДКЕ КОНДЕНСАТОРА

Рассмотрим схему (рис. 5.5), в которой путем включения переключателя S в положение 1 к конденсатору емкостью C подводят напряжение от источника постоянного тока, причем в момент включения напряжение на конденсаторе $U_C = 0$. На обкладках конденсатора начинают скапливаться заряды, и напряжение u_C увеличивается до значения, равного U . Это процесс зарядки конденсатора — процесс увеличения энергии электрического поля конденсатора, которая в конце процесса достигает значения $CU^2/2$.

Чтобы зарядить конденсатор до напряжения $u_C = U$, ему надо сообщить заряд $Q = CU$. Этот заряд не может быть сообщен мгновенно, так как для этого потребовался бы ток $i = dQ/dt = Q/0 = \infty$.

В действительности зарядный ток в цепи ограничен сопротивлением R и в первый момент не может быть больше U/R . Поэтому процесс зарядки конденсатора растянут во времени, и напряжение u_C на конденсаторе нарастает постепенно.

Для переходного процесса зарядки конденсатора, включенного по рассматриваемой схеме, можно записать

$$Ri + u_C = U. \quad (5.5)$$

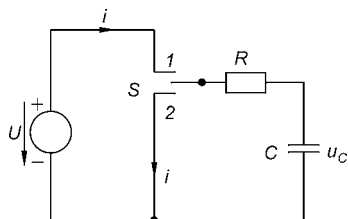


Рис. 5.5
Схема для анализа переходных процессов при зарядке и разрядке конденсатора

Ток в такой цепи

$$i = \frac{d(Cu_C)}{dt} = C \frac{du_C}{dt}. \quad (5.6)$$

Подставляя выражение (5.6) в формулу (5.5), получим

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U.$$

Решение этого дифференциального уравнения ищем в виде:

$$u_C = u_C' + u_C''.$$

Свободное напряжение u_C'' находят, решая однородное дифференциальное уравнение

$$RC \frac{du_C''}{dt} + u_C'' = 0, \quad (5.7)$$

которому соответствует характеристическое уравнение $RCp + 1 = 0$, откуда $p = -\frac{1}{RC}$. Тогда свободное напряжение

$$u_C'' = Ae^{pt} = Ae^{-t/(RC)} = Ae^{-t/\tau},$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени цепи.

Таким образом, напряжение на конденсаторе в переходном режиме

$$u_C = u_C' + Ae^{-t/\tau}, \quad (5.8)$$

а ток

$$i = i' + i'' = i' - \frac{A}{R} e^{-t/\tau}, \quad (5.9)$$

где

$$i' = C \frac{du_C'}{dt}; \quad i'' = C \frac{du_C''}{dt} = -\frac{A}{R} e^{-t/\tau}.$$

В уравнениях (5.8) и (5.9) постоянную A находят с учетом второго закона коммутации из начальных условий режима работы цепи, которые различны для процессов зарядки и разрядки конденсатора.

Зарядка конденсатора. Рассмотрим конденсатор, который до включения переключателя S в положение 1 (рис. 5.5) не был заряжен. По окончании процесса зарядки напряжение на конденсаторе равно напряжению U источника питания, что следует из уравнения (5.5), если учесть, что в установившемся режиме $i = i' = 0$. Таким образом, установившееся напряжение на конденсаторе $u_C' = U$. Постоянную A в уравнении (5.8) определяют, полагая, что при $t = 0$ напряжение $u_C = 0$. Тогда $A = -U$.



Итак, напряжение в переходном режиме при зарядке конденсатора изменяется по закону

$$u_C = U(1 - e^{-t/\tau}). \quad (5.10)$$

Для определения тока в цепи в (5.9) необходимо принять $i' = 0$ и $A = -U$, после чего получим

$$i = \frac{U}{R} e^{-t/\tau}. \quad (5.11)$$

На рис. 5.6 показано изменение тока в цепи и напряжения на конденсаторе при его зарядке. В начальный момент процесса зарядки ток в цепи ограничен только сопротивлением и при малом значении R может достигать больших значений $I_0 = U/R$. Переходный процесс, протекающий при зарядке конденсатора, используют в различных устройствах автоматики, например в электронных реле времени.

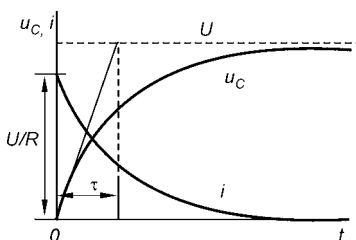


Рис. 5.6
Изменение напряжения на конденсаторе и тока в цепи при зарядке конденсатора

Постоянная времени $\tau = RC$ характеризует скорость зарядки конденсатора. Чем меньше R и C , тем быстрее заряжается конденсатор. Например, если емкость конденсатора $C = 10$ мкФ, а сопротивление цепи $R = 100$ Ом, то $\tau = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 0,001$ с; если увеличить R до 10^6 Ом, то $\tau = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6 = 10$ с.

Разрядка конденсатора. Если переключатель S включить в положение 2 (см. рис. 5.5), то конденсатор, заряженный до напряжения U_C , начнет разряжаться через резистор R . Энергия электрического поля конденсатора будет постепенно расходоваться на нагревание резистора и окружающей среды. По истечении некоторого времени установится режим, при котором напряжение на конденсаторе будет равно нулю (конденсатор полностью разряжен), а тока в цепи не будет.

Из уравнений (5.8) и (5.9) следует, что при разрядке конденсатора напряжение U_C на нем и ток в цепи будут изменяться во времени следующим образом:

$$u_C = U_C e^{-t/\tau}; \quad i = -\frac{U_C}{R} e^{-t/\tau},$$

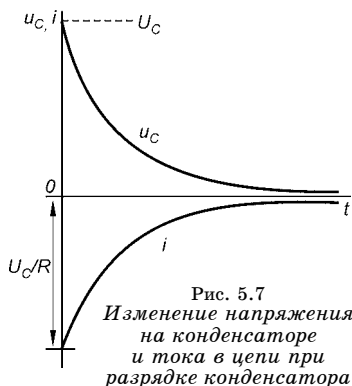


Рис. 5.7
Изменение напряжения
на конденсаторе
и тока в цепи при
разрядке конденсатора

так как в установившемся режиме $u_C' = 0$, $i' = 0$, а определяемая из начальных условий (при $t = 0$ $u_C = U_C$) постоянная интегрирования $A = U_C$.

Итак, напряжение и ток убывают по экспоненциальному закону (рис. 5.7). Ток в цепи отрицательный, т. е. направлен противоположно току во время процесса зарядки. Скорость разрядки

конденсатора определяется постоянной времени $\tau = RC$.

В начальный момент ток разрядки $I_0 = U_C/R$. Если бы ток оставался постоянным, то конденсатор полностью разрядился бы через промежуток времени

$$t_{\text{разр}} = \frac{Q}{I_0} = \frac{CU_C}{U_C/R} = RC = \tau.$$

Поэтому постоянную времени можно определить как промежуток времени, в течение которого конденсатор полностью зарядился (или разрядился) бы, если бы ток зарядки (или разрядки) оставался постоянным и равным начальному значению U/R (или U_C/R).

5.4. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ С R И L ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ЕЕ К ИСТОЧНИКУ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрим процессы, протекающие в цепи (см. рис. 5.2) при подключении ее к источнику синусоидального напряжения. В момент включения мгновенное значение синусоидального напряжения источника питания $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$. Тогда режим цепи описывается уравнением

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_m \sin(\omega t + \psi). \quad (5.12)$$

Ток переходного режима $i = i' + i''$. При этом установившееся значение тока, найденное как частное решение уравнения (5.12),

$$i' = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi), \quad (5.13)$$

где $I_m = U_m/Z$; $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$; $\varphi = \arctg(\omega L/R)$.

Свободный ток i'' находят, решая однородное дифференциальное уравнение (5.1):

$$i'' = Ae^{-t/\tau}.$$

Следовательно,

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{-t/\tau}. \quad (5.14)$$

Постоянная времени τ не зависит от напряжения источника питания и определяется параметрами цепи. В данном случае $\tau = L/R$.

До включения цепи ток в ней был равен нулю, поэтому для $t = 0$ уравнение (5.14) принимает вид

$$I_m \sin(\psi - \varphi) + A = 0,$$

откуда

$$A = -I_m \sin(\psi - \varphi).$$

Таким образом, ток в цепи в переходном режиме изменяется по закону

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}. \quad (5.15)$$

Установившийся ток изменяется по синусоидальному закону, а свободный ток уменьшается до нуля по экспоненциальному закону (рис. 5.8). В момент включения цепи мгновенные значения токов i' и i'' равны по значению, но противоположны по знаку.

В момент времени, когда токи i' и i'' совпадают по направлению, мгновенное значение тока в цепи i превосходит амплитуду установившегося тока I_m . Как видно из формулы (5.15), начальное значение свободного тока зависит от начальной фазы ψ напряжения. Если включение цепи происходит в момент, когда начальная фаза напряжения $\psi = \varphi \pm \pi/2$, то начальное значение свободного тока равно амплитуде

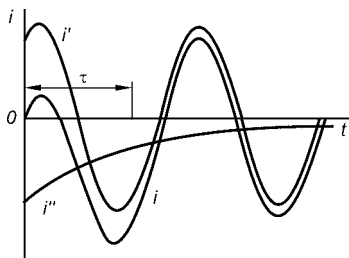


Рис. 5.8
Изменение токов в цепи с последовательным включением элементов с R и L при включении на синусоидальное напряжение

установившегося тока, т. е. имеет наибольшее из возможных значений. Ток в цепи в конце первого полупериода достигнет значения, превышающего амплитуду установившегося тока почти в два раза.

При включении цепи в момент, когда $\psi = \varphi$ или $\psi = \varphi \pm \pi$, свободный ток равен нулю, и в цепи сразу же устанавливается установившийся режим.

Таким образом, значение тока в переходном режиме зависит не только от параметров цепи R и L , но и от начальной фазы напряжения источника питания. Но в любом случае ток i в цепи в начальный момент времени равен нулю. Длительность переходного процесса определяется постоянной времени $\tau = L/R$. Чем больше τ , тем длительнее переходный процесс, тем больше значение тока i в конце первого полупериода.

5.5. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ С R И C ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ ЕЕ К ИСТОЧНИКУ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПЯЖЕНИЯ

Пусть к электрической цепи (рис. 5.9) подведено синусоидальное напряжение, мгновенное значение которого $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$, причем в момент включения напряжение на конденсаторе $u_C = 0$. По второму закону Кирхгофа для данной цепи можно записать $Ri + u_C = u$, где u_C — напряжение на конденсаторе. Принимая во внимание, что мгновенное значение тока в цепи

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{du_C}{dt},$$

имеем

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

Поскольку во время переходного режима напряжение на конденсаторе $u_C = u_C' + u_C''$, а свободное напряжение находят при решении однородного дифференциаль-

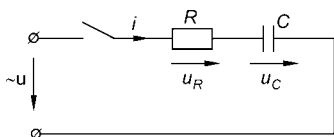


Рис. 5.9
Схема цепи с последовательным соединением элементов с R и C , подключенной к источнику синусоидального напряжения

ного уравнения (5.7) как $u_C'' = Ae^{-t/\tau}$, где $\tau = RC$ — постоянная времени цепи, получаем

$$u_C = u_C' + Ae^{-t/\tau}. \quad (5.16)$$

Для определения установившегося напряжения u_C' можно воспользоваться выражением (5.13) для установившегося тока в цепи при последовательном соединении элементов с R и L , в котором

$$I_m = U_m/Z; \quad Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{-1}{\omega CR}.$$

Тогда

$$u_C' = \frac{1}{C} \int i' dt = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi). \quad (5.17)$$

Так как до включения цепи конденсатор не был заряжен ($u_C = 0$ при $t = 0$), то из (5.16) и (5.17)

$$A = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\psi - \varphi).$$

Следовательно,

$$u_C'' = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau},$$

а напряжение на конденсаторе в переходном режиме

$$u_C = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{I_m}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}.$$

На рис. 5.10 показан характер изменения напряжений на конденсаторе, соответствующий рассмотренному случаю. В момент включения

$$u_C'' = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) = -u_C',$$

поэтому напряжение на конденсаторе при включении цепи равно нулю. Скорость протекания переходного процесса определяется постоянной времени $\tau = RC$.

Изменение напряжения на конденсаторе зависит от начальной фазы ψ . Если в момент включения $\psi = \varphi \pm \pi/2$, то $u_C = 0$ и на зажимах конденсатора сразу же устанавливается установившийся

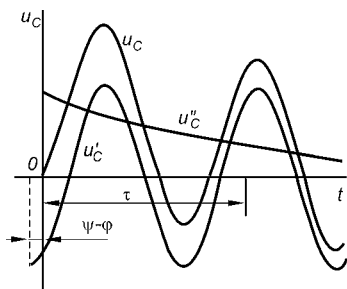


Рис. 5.10
Изменение напряжений на конденсаторе при включении цепи с последовательным соединением элементов с R и C на синусоидальное напряжение

режим. При $\psi = \varphi$ или $\psi = \varphi \pm \pi$ начальное значение u_C'' является максимальным и в конце первого полупериода при больших τ близко к двойному амплитудному значению установившегося напряжения.

Свободный ток

$$i'' = C \frac{du_C''}{dt} = -\frac{I_m}{\omega CR} \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau},$$

а ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{I_m}{\omega CR} \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}$.

В момент включения установившийся ток $i' = I_m \sin(\psi - \varphi)$ не равен свободному току $i'' = -\frac{I_m}{\omega CR} \cos(\psi - \varphi)$ ни по значению, ни по направлению.

При начальной фазе $\psi = \varphi \pm \pi/2$ свободный ток в момент включения цепи, как и свободное напряжение, равен нулю и в цепи сразу возникает установившийся ток, мгновенное значение ко-

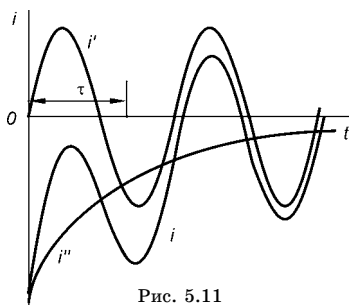


Рис. 5.11
Изменение тока в цепи с последовательным соединением элементов с R и C при включении на синусоидальное напряжение

торого равно амплитудному значению. Таким образом, в отличие от цепи с последовательным соединением R и L , в цепи с последовательным соединением R и C в начальный момент ток может иметь любое конечное значение, и только в частном случае, когда $1/(\omega CR) = 1$ и $\psi - \varphi = \pi/4 \pm \pi$, $\sin(\psi - \varphi) = \cos(\psi - \varphi)$ и ток $i = i' + i'' = 0$.

Если в момент включения цепи $\psi = \varphi$ (рис. 5.11) или $\psi = \varphi \pm \pi$, то установившийся ток начинает изменяться от нуля, а свободный ток имеет максимальное значение $I_m/(\omega CR) = U_{Cm}/R$.

Амплитуда установившегося в цепи тока

$$I_m = U_{Cm}/X_C = \omega C U_{Cm}.$$

Поэтому, если $X_C > R$, начальное значение свободного тока может превышать амплитудное в $X_C/R = 1/(\omega CR)$ раз. Это имеет место только при малых значениях C , т. е. при малых значениях постоянной времени. Вследствие этого большой свободный ток может существовать в цепи в течение короткого времени, значительно меньшего периода T .

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

6.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ЭДС, НАПРЯЖЕНИЯХ, ТОКАХ И МЕТОДАХ ИХ АНАЛИЗА

Для большинства электроприемников нормальный режим работы обеспечивается подачей синусоидального напряжения. В связи с этим ГОСТ 13109 установлены нормы допустимого отклонения периодических ЭДС, напряжения и тока от синусоидальной формы. Если эти отклонения незначительны, то для таких цепей применимы методы анализа, рассмотренные в предыдущих главах.

В реальных условиях в электроустановках различного назначения могут возникать несинусоидальные токи. Это может иметь место даже при подаче в цепь синусоидального напряжения. Например, включение в цепь нелинейных элементов, сопротивление которых зависит от напряжения и, следовательно, изменяется в течение одного периода T , может явиться причиной несинусоидальности токов в цепи.

Кроме того, принцип работы целого ряда электротехнических устройств (электросвязи, электронных и полупроводниковых приборов и др.) основан на использовании несинусоидальных напряжений специальной формы (см. рис. 2.1). Эти напряжения создаются специальными генераторами. Токи в цепях, обусловленные такими несинусоидальными напряжениями, будут также несинусоидальными, причем их изменение во времени может отличаться от изменения напряжения.

Таким образом, знание методов расчета и анализа электрических цепей с периодическими несинусоидальными ЭДС, напряжениями и токами необходимо не только при работе с цепями, в которых существуют вынужденные несинусоидальные процессы, но и для понимания принципа действия и областей применения различных

устройств автоматики, промышленной электроники и других устройств новой техники.

В реальных электрических цепях функции, описывающие несинусоидальные ЭДС, напряжения и токи, всегда удовлетворяют условиям Дирихле, т. е. за полный период имеют конечное число разрывов первого рода и конечное число максимумов и минимумов. Как известно, такую функцию можно разложить в гармонический ряд Фурье.

Представив периодические несинусоидальные ЭДС, напряжения или токи в виде суммы бесконечного числа синусоидальных ЭДС, напряжений или токов различной частоты, можно свести изучение процессов в цепях с несинусоидальными величинами к изучению процессов в цепях с синусоидальными величинами.

При разложении в ряд Фурье периодическая несинусоидальная ЭДС в общем случае имеет вид

$$e(\omega t) = E_0 + E_{1m}\sin(\omega t + \psi_1) + E_{2m}\sin(2\omega t + \psi_2) + E_{3m}\sin(3\omega t + \psi_3) + \dots + E_{km}\sin(k\omega t + \psi_k) + \dots \quad (6.1)$$

или

$$e(\omega t) = E_0 + \sum_{k=1}^{\infty} E_{km} \sin(k\omega t + \psi_k),$$

где $e(\omega t)$ — значение несинусоидальной ЭДС в момент времени t ; E_0 — постоянная составляющая ЭДС; $E_{1m}\sin(\omega t + \psi_1)$ — основная, или первая, гармоника, имеющая ту же частоту, что и несинусоидальная ЭДС; $E_{km}\sin(k\omega t + \psi_k)$ — гармоника высшего порядка (k -я гармоника), имеющая

частоту в k раз большую, чем основная гармоника; E_{1m} , E_{2m} , E_{3m} , ..., E_{km} — амплитуды гармоник первого, второго, третьего, ..., k -го порядков; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — угловая частота основной гармоники; ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , ..., ψ_k , ... — начальные фазы гармоник.

Амплитуды гармоник разного порядка зависят только от формы несинусоидальной кривой, а начальные фазы изменяются при изменении на-

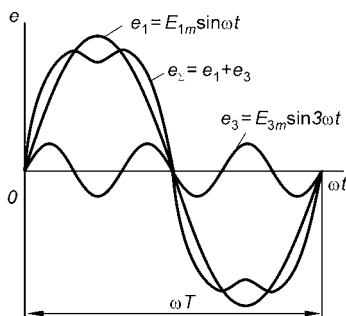


Рис. 6.1

Графическое изображение первой и третьей гармоник ЭДС при начальных фазах, равных нулю, и их суммы

чала отсчета времени. На рис. 6.1 изображены основная и третья гармоники ЭДС для условий, когда начальные фазы равны нулю ($\psi_1 = \psi_3 = 0$).

Для определения амплитуд гармоник целесообразно каждую из них представить в виде суммы двух гармоник, начальные фазы которых равны нулю:

$$E_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) = E_{km} \cos \psi_k \sin k\omega t + E_{km} \sin \psi_k \cos k\omega t = B_k \sin k\omega t + C_k \cos k\omega t, \quad (6.2)$$

где $B_k = E_{km} \cos \psi_k$, $C_k = E_{km} \sin \psi_k$.

Амплитуды гармонических составляющих (коэффициенты B_k и C_k) зависят от начальных фаз и поэтому изменяются при изменении начала отсчета времени.

С учетом (6.2) для ограниченного числа n членов ряда формула (6.1) примет вид

$$e(\omega t) = E_0 + \sum_{k=1}^n B_k \sin k\omega t + \sum_{k=1}^n C_k \cos k\omega t.$$

Здесь

$$E_0 = \frac{1}{T} \int_0^T e(\omega t) dt, \quad B_k = \frac{2}{T} \int_0^T e(\omega t) \sin k\omega t dt, \quad (6.3)$$

$$C_k = \frac{2}{T} \int_0^T e(\omega t) \cos k\omega t dt,$$

где $e(\omega t)$ — аналитическое выражение для несинусоидальной ЭДС.

Зная амплитуды двух слагаемых k -й гармоники, можно найти полную амплитуду этой гармоники и ее начальную фазу:

$$E_{km} = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}, \quad \psi_k = \arctg \frac{C_k}{B_k}. \quad (6.4)$$

Как видно из выражения (6.3), постоянная составляющая ЭДС E_0 является средним значением периодической несинусоидальной ЭДС.

Аналогично можно представить рядом Фурье и определить амплитуды и начальные фазы гармоник несинусоидальных напряжений и токов.

В практике расчета несинусоидальных процессов в электрических цепях часто приходится иметь дело с условиями, когда несинусоидальные величины заданы графически. Тогда коэффициенты (6.3) ряда определяют также графически, при этом интегрирование заменяют суммированием заданного числа слагаемых.

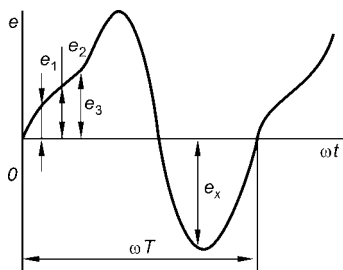


Рис. 6.2
Графический метод
определения гармоник
несинусоидальной ЭДС

Отрезок ωT оси абсцисс ωt , соответствующий одному периоду (рис. 6.2), разбивают на p равных промежутков. Каждому промежутку соответствует своя ордината $e(\omega t_n)$: $e(\omega t_1)$, $e(\omega t_2)$, ..., $e(\omega t_p)$. Эти ординаты удобно обозначить e_1 , e_2 , ..., e_p .

Постоянная составляющая E_0 в соответствии с формулой (6.3) определится как

алгебраическая сумма ординат кривой $e(\omega t)$, деленная на их число:

$$E_0 = \frac{1}{p} \sum_{n=1}^p e_n, \quad (6.5)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, p$ — номер ординаты (промежутка).

Таким образом, для определения E_0 необходимо измерить на графике p ординат e_n и произвести вычисление по формуле (6.5).

При определении коэффициентов B_k и C_k аргумент синуса и косинуса в формулах (6.2) и (6.3) в соответствии с вышеизложенным следует представить в виде

$$k\omega t = kn \frac{\omega T}{p}.$$

Тогда

$$B_k = \frac{2}{p} \sum_{n=1}^p e_n \sin\left(kn \frac{\omega T}{p}\right); \quad C_k = \frac{2}{p} \sum_{n=1}^p e_n \cos\left(kn \frac{\omega T}{p}\right).$$

Амплитуду E_{km} k -й гармоники ЭДС и ее начальную фазу ψ_k определяют расчетом по формулам (6.4). Точность расчета зависит от числа промежутков: чем больше p , тем точнее расчет.

Кроме того, для разложения периодических несинусоидальных зависимостей, заданных графически, на гармонические составляющие применяют специальные механические или электрические приборы, называемые *гармоническими анализаторами*.

Для практических целей всегда достаточно брать только несколько гармоник высшего порядка, причем несинусоидальную величину считают синусоидальной, если все ее ординаты отличаются от соответствующих ординат первой (основной) гармоники не более чем на 5% ее

амплитуды. При этом в разложении несинусоидальной величины могут полностью отсутствовать одна или несколько гармоник высшего порядка или целый ряд гармоник общего свойства (например, четные).

Если несинусоидальная величина $e(\omega t)$ удовлетворяет условию

$$e(\omega t) = -e(\omega t + \pi), \text{ или } e(\omega t) + e(\omega t + \pi) = 0, \quad (6.6)$$

то ее называют *симметричной* относительно оси абсцисс или просто симметричной (рис. 6.3). Из определения следует, что каждой положительной ординате соответствует отрицательная ордината того же значения, сдвинутая на полпериода по отношению к положительной ординате. Следовательно, постоянная составляющая E_0 в соответствии с формулой (6.1) будет равна нулю.

Симметричная несинусоидальная величина в точке ωt описывается равенством

$$e(\omega t) = E_{1m}\sin(\omega t + \psi_1) + E_{2m}\sin(2\omega t + \psi_2) + E_{3m}\sin(3\omega t + \psi_3) + \dots,$$

а в точке $\omega t + \pi$ — равенством

$$e(\omega t + \pi) = -E_{1m}\sin(\omega t + \psi_1) + E_{2m}\sin(2\omega t + \psi_2) - E_{3m}\sin(3\omega t + \psi_3) + \dots$$

Из условия (6.6)

$$(e(\omega t) + e(\omega t + \pi))/2 = E_{2m}\sin(2\omega t + \psi_2) + E_{4m}\sin(4\omega t + \psi_4) + \dots \equiv 0$$

для всех ωt из промежутка $[0; \omega T]$. Из этого тождества получаем

$$B_2\sin 2\omega t + C_2\cos 2\omega t + B_4\sin 4\omega t + C_4\cos 4\omega t + \dots \equiv 0,$$

где $\sqrt{B_{2n}^2 + C_{2n}^2} = E_{2n}$; $n = 1, 2, 3, \dots$.

На основании последнего тождества и линейной независимости системы функций $\{\sin 2\omega t, \cos 2\omega t, \sin 4\omega t, \cos 4\omega t, \dots\}$ заключаем, что $B_{2n} = C_{2n} = 0$, а следовательно, $E_{2n} = 0$.

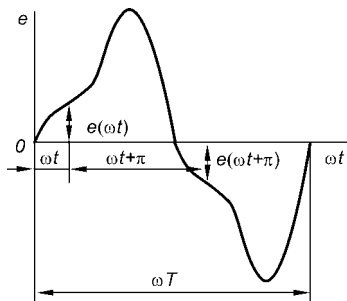


Рис. 6.3
Изменение несинусоидальной ЭДС, симметричной относительно оси абсцисс

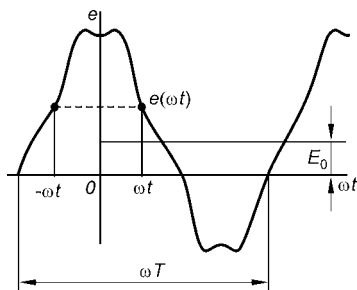


Рис. 6.4
График изменения четной
несинусоидальной ЭДС

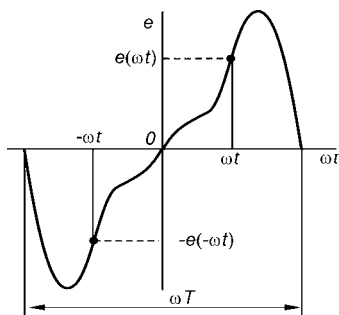


Рис. 6.5
График изменения нечетной
несинусоидальной ЭДС

Таким образом, все гармоники четного порядка равны нулю, т. е. симметричную несинусоидальную величину можно разложить только на гармоники нечетного порядка:

$$e(\omega t) = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + E_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots$$

Для четной несинусоидальной кривой, удовлетворяющей условию $e(\omega t) = e(-\omega t)$ и симметричной относительно оси ординат (рис. 6.4), из формулы (6.3) следует, что все коэффициенты B_k равны нулю и ряд имеет вид

$$e(\omega t) = E_0 + C_1 \cos \omega t + C_2 \cos 2\omega t + C_3 \cos 3\omega t + \dots,$$

причем постоянная составляющая E_0 определяется как полусумма наибольшей и наименьшей ординат.

Для нечетной функции, симметричной относительно начала координат и проходящей через него (рис. 6.5), для которой справедливо условие $e(\omega t) = -e(-\omega t)$, постоянная составляющая $E_0 = 0$, и из формулы (6.3) следует, что все коэффициенты C_k также равны нулю, и ряд записывают в виде

$$e(\omega t) = B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + \dots$$

6.2. ДЕЙСТВУЮЩИЕ И СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

При расчете электрических цепей, в которых действуют несинусоидальные ЭДС, напряжения и токи, чаще имеют дело не с мгновенными значениями этих величин, а с их действующими и средними значениями, тем более

что измерительные приборы тепловой, электромагнитной, электродинамической и электростатической систем, включенные в такие электрические цепи, показывают именно действующие значения измеряемых величин.

Действующее значение несинусоидальной ЭДС (аналогично, напряжения и тока) равно среднеквадратичному ее значению за время, равное периоду,

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}, \quad (6.7)$$

где e — мгновенное значение несинусоидальной ЭДС.

Представив несинусоидальную ЭДС в виде ряда Фурье $e = e_0 + e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_k + \dots$, где $e_k = E_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$, и подставив это выражение в (6.7), получим формулу для квадрата действующего значения:

$$\begin{aligned} E^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T (e_0 + e_1 + e_2 + \dots + e_k + \dots)^2 dt = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T e_k^2 dt + \sum_{\substack{q=0, s=0 \\ (q \neq s)}}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T e_q e_s dt = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T e_k^2 dt = \sum_{k=0}^{\infty} E_k^2 = E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_k^2 + \dots, \end{aligned}$$

так как при $q \neq s$

$$\int_0^T e_q e_s dt = 0.$$

Поэтому действующее значение несинусоидальной ЭДС

$$E = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} E_k^2} = \sqrt{E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + \dots}.$$

Аналогично, действующие значений несинусоидальных напряжения и тока

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}; \\ I &= \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Таким образом, действующее значение несинусоидальной величины равно корню квадратному из суммы квадратов постоянной составляющей и действующих значений

всех ее гармоник. При этом действующее значение постоянной составляющей равно самой постоянной составляющей, а действующее значение гармонических (синусоидальных) составляющих в $\sqrt{2}$ раз меньше их амплитуд.

Нередко для упрощения расчетов при отсутствии постоянных составляющих несинусоидальную величину заменяют эквивалентной синусоидальной.

Эквивалентной синусоидальной величиной называют такую величину, действующее значение которой равно действующему значению несинусоидальной величины.

Амплитуда эквивалентной синусоидальной ЭДС

$$E_m = \sqrt{2}E = \sqrt{2 \sum_{k=0}^{\infty} E_k^2},$$

а среднее значение за половину периода $E_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} E_m$.

6.3. АКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКЕ

Активную мощность цепи определяют как среднюю мощность за период. При несинусоидальном напряжении $u = u_0 + u_1 + u_2 + \dots + u_k + \dots$ и несинусоидальном токе $i = i_0 + i_1 + i_2 + \dots + i_k + \dots$ активная мощность

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (u_0 + u_1 + u_2 + \dots + u_k + \dots)(i_0 + i_1 + i_2 + \dots + i_k + \dots) dt = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_k i_k dt + \sum_{\substack{q=0, s=0 \\ (q \neq s)}}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_q i_s dt. \end{aligned}$$

Как уже известно, при $q \neq s$ $\int_0^T u_q i_s dt = 0$, следовательно,

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_k i_k dt.$$

Так как

$$P_k = \frac{1}{T} \int_0^T u_k i_k dt$$

есть активная мощность, создаваемая напряжением и током k -й гармоники, то для активной мощности при неси-



нусоидальном напряжении оказывается справедливым уравнение

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_k + \dots$$

Таким образом, активная мощность при несинусоидальных напряжении и токе равна сумме активных мощностей постоянной и всех гармонических составляющих напряжения и тока. Выражая активные мощности гармоник через действующие значения напряжения и тока и коэффициент мощности, получим

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_k I_k \cos \varphi_k + \dots$$

Следует заметить, что в общем случае формы кривых, соответствующих изменению во времени напряжения и тока, могут отличаться друг от друга, а иногда составляющая гармоника какого-либо порядка полностью отсутствует только в токе или только в напряжении. Тогда составляющая активной мощности этой гармоники равна нулю.

К электрическим цепям с несинусоидальными напряжением и током применимо понятие *полной мощности*, определяемой произведением действующих значений напряжения и тока:

$$S = UI.$$

Отношение активной мощности к полной мощности называют *коэффициентом мощности*:

$$\alpha = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}.$$

В отличие от электрических цепей синусоидального тока, где коэффициент мощности цепи с активным сопротивлением равен единице, в цепях несинусоидального напряжения и тока $\alpha < 1$ даже для цепи с активным сопротивлением, зависящим от частоты и тока. Допустим, что напряжение в цепи синусоидальное, а ток (при наличии активного нелинейного элемента) содержит основную и высшие гармоники. Тогда активная мощность $P = U_1 I_1 \cos \varphi_1$.

Действующее значение напряжения $U = U_1$, а действующее значение несинусоидального тока

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots} > I_1,$$

т. е. больше действующего значения его основной гармонической.

Выражая активную мощность через действующие значения напряжения и тока, получим $P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = UI \lambda \cos \varphi_1 = UI \alpha$, где $\lambda = I_1/I$ — коэффициент искажения.

Так как $\lambda < 1$, то коэффициент мощности $\alpha = \lambda \cos \varphi_1 < 1$ даже в том случае, если $\cos \varphi_1 = 1$. Из этого следует, что наличие высших гармоник в напряжении и токе почти всегда приводит к снижению коэффициента мощности.

При замене несинусоидальных напряжения и тока эквивалентными синусоидальными величинами сдвиг фаз между ними определяется коэффициентом мощности ($\varphi = \arccos \alpha$).

6.4. АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно включенных линейных элементов R , L и C . Цепь подключена к источнику с несинусоидальным напряжением $u = u_0 + u_1 + u_2 + \dots + u_k + \dots$, где u_0 — постоянная составляющая; $u_k = U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$ — гармоника k -го порядка.

Так как цепь линейная, то можно найти составляющие тока, создаваемые каждой составляющей напряжения, а суммарный ток найти сложением составляющих токов, используя принцип наложения. При этом мгновенные значения тока находят алгебраическим сложением мгновенных значений составляющих, а действующее значение — по формуле (6.8).

Постоянная составляющая I_0 несинусоидального тока может существовать только в том случае, если в цепи нет конденсатора. Гармоника тока k -го порядка

$$i_k = I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k),$$

причем амплитуда

$$I_{km} = \frac{U_{km}}{Z_k} = \frac{U_{km}}{\sqrt{R^2 + \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C}\right)^2}},$$

а сдвиг фаз

$$\varphi_k = \arctg \frac{k\omega L - \frac{1}{k\omega C}}{R}. \quad (6.9)$$



По принципу наложения $i = i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_k + \dots$, причем, как и напряжение u , ток в цепи несинусоидальный.

Полное сопротивление цепи для любой гармоники тока

$$Z_k = \sqrt{R^2 + \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C}\right)^2}$$

зависит от порядка гармоники k . Так как индуктивная составляющая реактивного сопротивления $X_k = k\omega L - 1/(k\omega C)$ увеличивается с увеличением порядка гармоники, а емкостная уменьшается, то за счет изменения X_k изменяется и полное сопротивление Z_k . Вследствие этого соотношение между напряжением и током соответствующих гармоник $U_k/I_k = Z_k$, определяемое полным сопротивлением, не одинаково для разных гармоник, а изменение во времени тока отличается от изменения во времени напряжения источника питания.

Сдвиг фаз между гармониками напряжения и тока k -го порядка, определяемый по формуле (6.9), также зависит от реактивного сопротивления и, следовательно, тоже не остается одинаковым для разных гармоник. При этом углы φ_k различаются не только по значению, но и по знаку.

Таким образом, расчет линейной электрической цепи при несинусоидальном напряжении источника питания проводят в следующем порядке:

- 1) разлагают периодическое несинусоидальное напряжение источника питания в ряд Фурье;
- 2) определяют реактивное сопротивление X_k , полное сопротивление Z_k и угол φ_k для каждой гармоники;
- 3) находят токи i_k , создаваемые каждой гармоникой напряжения;
- 4) находят ток i как сумму мгновенных значений токов i_0 и i_k , пользуясь принципом наложения;
- 5) находят действующее значение тока в цепи по формуле (6.8).

6.5.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТОКА ВО ВРЕМЕНИ

Предположим, что цепь состоит только из элемента с активным сопротивлением R (см. рис. 2.16а). Если сопротивление не зависит от частоты, что справедливо для проводов малого сечения, то полное сопротивление цепи

$Z = R$ и остается постоянным для всех гармоник. Вследствие этого изменение во времени тока в цепи подобно изменению во времени напряжения.

Цепь, состоящая только из элемента с индуктивностью L (см. рис. 2.17а), имеет полное сопротивление для гармоники k -го порядка $Z_k = X_k = k\omega L$, пропорциональное порядку гармоники. Токи первой и k -й гармоник: $I_{1m} = U_{1m}/(\omega L)$; $I_{km} = U_{km}/(k\omega L)$.

Из соотношения этих токов $I_{km}/I_{1m} = U_{km}/(kU_{1m})$ видно, что гармоника тока k -го порядка по отношению к основной гармонике составляет в k раз меньшую долю, чем гармоника напряжения k -го порядка по отношению к основной гармонике. Это означает, что чем выше порядок гармоники, тем меньший вклад она вносит в форму кривой, описывающей изменение во времени тока по сравнению с соответствующей гармоникой напряжения, и ток ближе к синусоидальному, чем напряжение. Индуктивность цепи способствует ослаблению высших гармоник тока и сглаживанию формы кривой.

Если цепь состоит из элемента с емкостью C (см. рис. 2.18а), то полное сопротивление цепи для гармоники k -го порядка $Z_k = X_k = 1/(k\omega C)$ обратно пропорционально порядку гармоники. Токи первой и k -й гармоник соответственно: $I_{1m} = \omega C U_{1m}$; $I_{km} = k\omega C U_{km}$.

Соотношение этих токов $I_{km}/I_{1m} = kU_{km}/U_{1m}$ показывает, что гармоника порядка k в k раз более резко выражена в токе, чем в напряжении. Ток больше отличается от синусоиды, чем напряжение. Это означает, что емкостный элемент цепи способствует усилению высших гармоник тока и еще большему отличию тока от синусоидального.

Для реальных электрических цепей, в которых последовательно с индуктивным или емкостным элементами включен элемент с активным сопротивлением, полученные выводы в качественном отношении не изменяются, в количественном же отношении сглаживающее действие индуктивности и искажающее влияние емкости уменьшаются.

Допустим, что цепь с последовательным соединением элементов с R , L и C настроена на резонанс напряжений для гармоники $k = q$, тогда для гармоники q выполнено условие

$$q\omega L = \frac{1}{q\omega C}. \quad (6.10)$$

Полное сопротивление для этой гармоники

$$Z_q = \sqrt{R^2 + \left(q\omega L - \frac{1}{q\omega C}\right)^2} = R,$$

т. е. достигает наименьшего значения. В токе гармоника $I_q = U_q/R$ выражена наиболее резко, что и характерно для режима резонанса напряжений.

Учитывая равенство (6.10), можно показать, что реактивное сопротивление для гармоники порядка $k = q^2$ по абсолютному значению равно реактивному сопротивлению для основной гармоники. Действительно,

$$X_{q^2} = q^2\omega L - \frac{1}{q^2\omega C} = \frac{1}{\omega C} - \omega L = \left|\omega L - \frac{1}{\omega C}\right| = |X_1|.$$

Характер зависимости реактивного сопротивления от порядка гармоники показан на рис. 6.6. Реактивное и полное сопротивления цепи для гармоник порядка $k < q^2$ меньше, чем для основной гармоники, поэтому эти гармоники тока выражены в токе сильнее, чем в напряжении, приложенном к цепи.

Рассмотренные характерные особенности влияния индуктивности и емкости на форму кривой, описывающей изменение во времени тока и напряжения, используются в различных устройствах.

6.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

В несинусоидальных напряжениях, действующих в электрических цепях, часто заметно выделяются гармоники определенного порядка (третья, пятая и т. д.). Чтобы исключить или уменьшить эти гармоники в токе, применяют *электрические фильтры*, или просто *фильтры*. Фильтры применяют и в тех случаях, когда нужно выделить в токе ту или иную гармонику. Электрический фильтр представляет собой последовательное или параллельное соединение индуктивной катушки и конденсатора, настроенных на резонанс, для которых справедливо равенство (6.10). Их включают последовательно или параллельно с электроприемником.

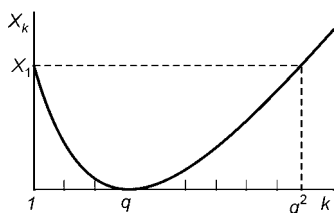


Рис. 6.6
Зависимость реактивного
сопротивления цепи
от порядка гармоники

Если из тока приемника с сопротивлением $Z_{\text{пр}}$ требуется исключить k -ю гармонику, то это можно сделать с помощью двух схем фильтров. На рис. 6.7а показана схема фильтра, состоящего из параллельно включенных L и C и включенного последовательно с приемником $Z_{\text{пр}}$. Если для контура фильтра выполнено условие резонанса тока для k -й гармоники

$$k^2 \omega^2 LC = 1, \quad (6.11)$$

то этот контур оказывает току k -й гармоники большое сопротивление. При последовательном соединении этого фильтра с приемником ток k -й гармоники в цепи значительно ослабляется по сравнению с током основной гармоники.

Ослабить k -ю гармонику тока в приемнике $Z_{\text{пр}}$ можно фильтром, состоящим из последовательно включенных L и C и включенным параллельно с приемником (рис. 6.7б). Если для фильтрующего контура выполнено равенство (6.11), то его сопротивление для k -й гармоники тока очень мало и этот ток замыкается почти полностью через фильтр. Таким образом, k -я гармоника тока в приемнике почти отсутствует.

Если надо уменьшить или устранить сразу несколько гармоник тока, то включают последовательно (рис. 6.8а) или параллельно (рис. 6.8б) с приемником несколько фильтров. Каждый фильтр настраивается на резонанс определенной гармоники тока.

Для выделения k -й гармоники напряжения на зажимах приемника $Z_{\text{пр}}$ применяют резонансные фильтры, изображенные на рис. 6.9. На схеме рис. 6.9а последовательно с приемником включены элементы с индуктивностью L и емкостью C , настроенные на резонанс напряжений для гармоники k -го порядка. Контур L — C для k -й гармоники тока имеет близкое к нулю сопротивление, а другим гармоникам тока оказывает большое сопротивление. Поэтому k -я гармоника напряжения $U_k = Z_{\text{пр}} I_k$ на приемнике выражена более сильно.

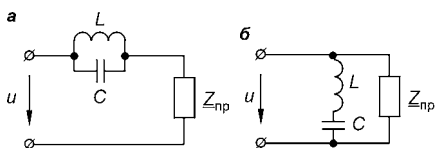


Рис. 6.7
Схемы простейших резонансных фильтров
а — последовательное соединение с приемником; б — параллельное соединение с приемником.

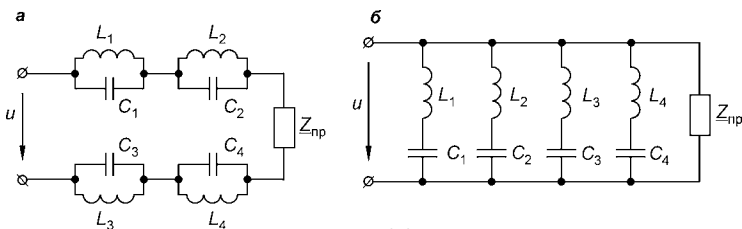


Рис. 6.8

Схемы цепей с несколькими резонансными фильтрами

а — включенными последовательно; б — включенными параллельно.

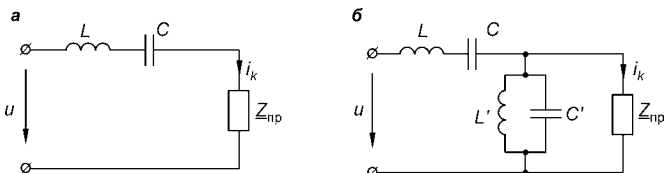


Рис. 6.9

Схемы резонансных фильтров для выделения гармоник напряжения

а — отдельной гармоники; б — полосы гармоник.

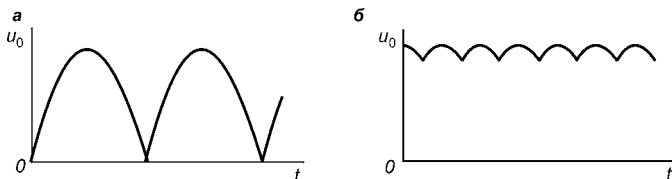


Рис. 6.10

Напряжение на выходе выпрямителя

а — без фильтров; б — с фильтрами.

Включение дополнительного резонансного контура из параллельно соединенных L' и C' параллельно с приемником $Z_{\text{пр}}$ (рис. 6.9б) способствует еще более качественному выделению k -й гармоники напряжения на приемнике, если контур $L'-C'$ настроен на резонанс тока для k -й гармоники. Так как сопротивление резонансных фильтров для гармоник, близких к резонансной, также незначительно (см. рис. 6.6), то реально фильтры, изображенные на рис. 6.9, пропускают некоторую полосу гармоник (частот) тока. Поэтому такие фильтры называют *полосовыми*. Для таких фильтров характерно то, что они не пропускают постоянную составляющую тока, поскольку в них имеется последовательно включенный конденсатор.

Электрические фильтры применяют также в цепях постоянного тока, где источниками постоянного напряжения

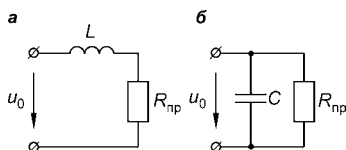


Рис. 6.11
*Схемы фильтров
 для сглаживания пульсации
 выпрямленного напряжения*
 а — с индуктивным элементом; б — с емкостным элементом.

являются выпрямительные устройства. Напряжение на зажимах таких устройств постоянное по направлению, но значительно изменяющееся по значению, т. е. напряжение с пульсациями (см. рис. 6.10а, б). Фильтры в таких электрических цепях предназначены для обеспечения максимальной проводимости постоянной составляющей тока и максимального сопротивления переменным (высшим гармоническим) составляющим.

Эти условия создаются, если последовательно с приемником включают большую индуктивность L (рис. 6.11а) или параллельно с приемником — большую емкость C (рис. 6.11б). Индуктивная катушка, имеющая незначительное активное сопротивление, практически не влияет на постоянную составляющую тока, и постоянное напряжение на приемнике $R_{\text{пр}}$ практически равно напряжению источника питания. Для высших гармоник тока индуктивность L создает большое сопротивление $k\omega L$, поэтому эти гармоники уменьшаются, а напряжение на приемнике имеет значительно меньшие пульсации, чем напряжение u_0 . Конденсатор с емкостью C , включенный параллельно приемнику (рис. 6.11б), не пропускает постоянную составляющую тока, но создает большую проводимость $k\omega C$ для высших гармоник, которые и замыкаются через конденсатор. Через приемник $R_{\text{пр}}$ замыкается в основном постоянная составляющая тока.

Фильтры (см. рис. 6.8б) широко применяют на выпрямительных подстанциях, питающих контактную сеть железных дорог, электрифицированных на постоянном токе. Так как сопротивление фильтрующих контуров много меньше сопротивления выпрямительного устройства, то высшие гармоники тока, замыкающиеся через фильтры, достигают больших значений и пульсация выпрямленного напряжения резко уменьшается. Напряжение на выходе выпрямительной подстанции становится практически постоянным.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

7.1. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитным полем называют одну из двух сторон электромагнитного поля, характеризующуюся воздействием на движущуюся электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду этой частицы и ее скорости. Магнитное поле создается движущимися зарядами (токами), и во всех без исключения случаях оно связано с электрическим током.

Магнитное поле описывают тремя векторами: *магнитной индукции \mathbf{B}* , *намагниченности \mathbf{M}* и *напряженности магнитного поля \mathbf{H}* .

Основной физической величиной, характеризующей магнитное поле в каждой его точке, является *магнитная индукция \mathbf{B}* , определяющая силу \mathbf{f} , действующую со стороны магнитного поля на движущуюся в нем со скоростью \mathbf{v} электрически заряженную частицу q (рис. 7.1):

$$\mathbf{f} = q \cdot [\mathbf{v}\mathbf{B}], \quad (7.1)$$

где $[\mathbf{v}\mathbf{B}]$ — векторное произведение векторов \mathbf{v} и \mathbf{B} .

Сила \mathbf{f} перпендикулярна векторам \mathbf{v} и \mathbf{B} . Численное значение силы в общем случае равно

$$f = qvB \sin(\mathbf{v}, \mathbf{B}), \quad (7.2)$$

а в частном случае, когда вектор скорости \mathbf{v} перпендикулярен вектору \mathbf{B} , все три вектора \mathbf{f} , \mathbf{v} , \mathbf{B} взаимно пер-

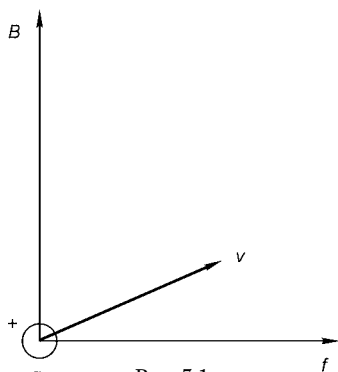


Рис. 7.1
Движение заряженной частицы в магнитном поле

пендикулярны и $f = qvB$, при этом численное значение магнитной индукции

$$B = \frac{f}{qv}, \quad (7.3)$$

где f , v и B — модули векторов. Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл).

Таким образом, в этом случае значение магнитной индукции равно отношению силы, действующей на заряженную частицу, к произведению заряда и скорости частицы.

Поместим в магнитное поле проводник с током I , имеющий длину l . Заряд q пройдет путь l за время t со скоростью $v = l/t$. При этом на проводник с током будет действовать сила

$$f = qvB \sin(\nu, B) = \frac{q}{t} l B \sin(l, B) = IlB \sin(l, B). \quad (7.4)$$

Если вектор магнитной индукции перпендикулярен проводнику с током, то действующая на этот проводник сила пропорциональна току в проводнике, длине проводника и магнитной индукции поля, т. е. $f = IlB$. В этом случае для определения направления силы можно воспользоваться известным из курса физики «правилом левой руки».

Магнитное поле принято геометрически изображать совокупностью магнитных линий. Линией магнитной индукции (напряженности магнитного поля) называют *замкнутую* (не имеющую ни начала, ни конца) ли-

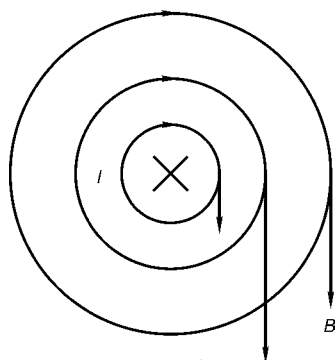


Рис. 7.2
Направление линий
магнитной индукции

по направлению с вектором магнитной индукции B одного и того же значения. Эти линии изображают со стрелками, указывающими направление вектора B . Направление линий магнитной индукции (напряженности магнитного поля) считают совпадающим с движением рукоятки правого винта (правило буравчика), если вворачивать его в направлении тока (рис. 7.2).

Как уже отмечалось, магнитное поле создается токами. В соответствии с современным представлением о строении вещества внутри любого вещества существуют элементарные токи, определяемые движением электронов по орбитам внутри атомов вещества и вращением вокруг своих осей. Каждый элементарный ток i_0 создает *магнитный момент* \mathbf{m}_0 , равный произведению тока i_0 на площадь S_0 поверхности, охватываемой этим током. Магнитный момент является векторной величиной, перпендикулярной площади S_0 (рис. 7.3). Направление вектора $\mathbf{m}_0 = i_0 \mathbf{s}_0$ согласуется с направлением тока i_0 правилом правого винта, здесь \mathbf{s}_0 — вектор, перпендикулярный площади S_0 , модуль которого численно равен этой площади.

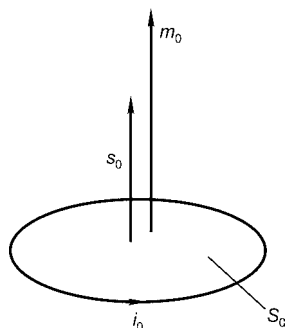


Рис. 7.3
Магнитный момент
элементарного тока

Элементарные токи в некотором объеме V вещества создают магнитный момент \mathbf{m} , равный геометрической сумме магнитных моментов \mathbf{m}_0 всех элементарных токов в данном объеме.

Намагниченностью \mathbf{M} называют векторную величину, характеризующую магнитное состояние вещества, равную пределу отношения магнитного момента, связанного с элементом объема вещества, к объему этого элемента, когда объем и все размеры этого элемента стремятся к нулю.

Следовательно, согласно определению для намагниченности в данной точке вещества справедливо соотношение

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{m}}{\Delta V} = \frac{d\mathbf{m}}{dV}, \quad (7.5)$$

а в однородно намагниченной среде можно считать, что намагниченность $\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}}{V}$.

Напряженностью магнитного поля называют векторную величину \mathbf{H} , равную геометрической разности магнитной индукции \mathbf{B} , деленной на магнитную постоянную μ_0 , и намагниченности \mathbf{M} , т. е.

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}. \quad (7.6)$$

Вектор \mathbf{H} напряженности магнитного поля характеризует магнитное поле в *вакууме*, создаваемое только токами в проводниках. Единицей измерения напряженности магнитного поля и намагниченности является ампер, деленный на метр (А/м).

Векторы \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{M} связаны соотношением

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 \mathbf{H} (1 + \mathbf{M}/\mathbf{H}) = \\ &= \mu_0 \mathbf{H} (1 + \chi) = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}, \end{aligned} \quad (7.7a)$$

где \mathbf{B} — вектор магнитной индукции *резльтирующего* магнитного поля, созданного как токами в проводниках (составляющая $\mu_0 \mathbf{H} = \mathbf{B}_0$), так и элементарными токами в среде (составляющая $\mu_0 \mathbf{M} = \mathbf{B}_{\text{внутр}}$); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная, характеризующая магнитные свойства вакуума; $\chi = \mathbf{M}/\mathbf{H}$ — магнитная восприимчивость, безразмерная величина, характеризующая свойство вещества намагничиваться в магнитном поле, в пустоте $\chi = 0$; $\mu_r = 1 + \chi$ — относительная магнитная проницаемость среды в сравнении с вакуумом; $\mu = \mu_0 \mu_r$ — абсолютная магнитная проницаемость, характеризующая магнитные свойства вещества, его способность к намагничиванию.

В вакууме и в воздушной среде связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля определяется выражением

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}. \quad (7.7б)$$

При анализе и расчете магнитных полей кроме названных векторных величин пользуются следующими законами и скалярными величинами.

Закон полного тока. Он гласит, что циркуляция вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру в любой среде равна сумме токов, охватываемых этим контуром, т. е.

$$\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_{k=1}^n I_k, \quad (7.8)$$

при этом положительными считают токи, если их направления связаны с направлением обхода контура правилом правого винта, и отрицательными, если наоборот (рис. 7.4).

В случае контура с w витками закон полного тока принимает вид

$$\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = wI.$$

Из закона полного тока следует, что при всяком изменении тока изменяется и созданное этим током магнитное поле, т. е. закон полного тока устанавливает неразрывную связь между током и возбуждаемым им магнитным полем.

Численное значение линейного интеграла $\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l}$ вдоль некоторого контура называют *магнитодвижущей силой* (МДС) и обозначают

буквой F . Из (7.8) следует, что $F = \sum_{k=1}^n I_k$, для катушки с w витками $F = wI$. Единица измерения МДС — ампер.

Численное значение линейного интеграла $\oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l}$ на участке между точками a и b называют *магнитным напряжением* на участке ab :

$$F_{ab} = U_{\text{м} ab} = \int_a^b \mathbf{H} d\mathbf{l}. \quad (7.9)$$

Магнитное напряжение $U_{\text{м} ab}$ на участке цепи с одинаковой напряженностью магнитного поля, называемое также *падением магнитного напряжения* на участке цепи или *разностью магнитных потенциалов* между точками a и b , равно

$$U_{\text{м} ab} = \int_a^b \mathbf{H} d\mathbf{l} = H_{ab} l_{ab}, \quad (7.10)$$

где l_{ab} — длина участка ab .

Элементарный поток $d\Phi_k$ вектора магнитной индукции \mathbf{B} сквозь малый участок поверхности с площадью dS , в пределах которой вектор магнитной индукции имеет одно и то же значение:

$$d\Phi_k = B dS \cos(\mathbf{B}, \mathbf{n}) = B_n dS = \mathbf{B} d\mathbf{s},$$

где \mathbf{n} — нормаль к площадке dS ; B_n — проекция вектора \mathbf{B} на направление нормали; $d\mathbf{s}$ — вектор, совпадающий

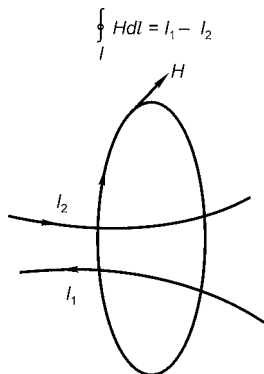


Рис. 7.4
Циркуляция вектора напряженности магнитного поля

с нормалью, модуль которого равен площадке dS поверхности; $\mathbf{B}ds$ — скалярное произведение векторов \mathbf{B} и $d\mathbf{s}$ (рис. 7.5).

Магнитный поток Φ — это поток вектора магнитной индукции \mathbf{B} через поверхность S , находящуюся в магнитном поле, равный алгебраической сумме всех элементарных потоков через элементарные площадки dS , на которые разбита поверхность S , в пределе равный интегралу:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B}ds. \quad (7.11)$$

Отсюда следует, что магнитная индукция является плотностью магнитного потока в данной точке поля. В однородном магнитном поле, когда $B = \text{const}$, и вектор \mathbf{B} перпендикулярен поверхности S , магнитный поток

$$\Phi = BS. \quad (7.12)$$

Магнитный поток является скалярной величиной. Единицей измерения магнитного потока является вебер (Вб), а единица измерения магнитной индукции тесла (Тл) равна

веберу, деленному на квадратный метр ($1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2$).

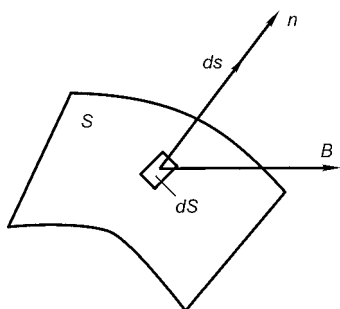


Рис. 7.5

Вычисление элементарного магнитного потока

Потокосцепление Ψ — это магнитный поток, равный алгебраической сумме потоков через отдельные поверхности какого-либо контура сложной формы. Например, для контура, показанного на рис. 7.6, потокосцепление Ψ контура равно сумме магнитных потоков через все заштрихованные элементы поверхности. В рассматриваемом случае между потокосцеплением контура и током в нем существует линейная зависимость, а именно

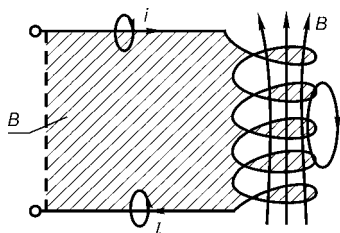


Рис. 7.6

Потокосцепление контура сложной формы

$$\Psi = Li. \quad (7.13)$$

Отношение потокосцепления Ψ к току i называют *индуктивностью*:

$$L = \frac{\Psi}{i}. \quad (7.14)$$

При допущении, что все линии магнитной индукции сцепляются со всеми w витками контура, потокосцепление

$$\Psi = w\Phi \text{ и } L = \frac{w\Phi}{i}.$$

Единица измерения потокосцепления — вебер (Вб), а индуктивности — генри (Гн).

7.2. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ферромагнитными материалами называют такие материалы, в которых собственное (внутреннее) магнитное поле может в сотни и тысячи раз превосходить вызвавшее его внешнее магнитное поле. Увеличение магнитного поля внутри ферромагнитного материала обусловлено тем, что под действием внешнего магнитного поля векторы намагниченности отдельных объемов вещества (доменов) ориентируются согласно с вектором напряженности внешнего магнитного поля H и суммируются. При некотором значении напряженности магнитного поля H все векторы намагниченности становятся параллельными вектору H . В этом случае наступает явление, называемое *насыщением* ферромагнитного материала, и дальнейшее усиление внешнего магнитного поля не приводит к увеличению внутреннего магнитного поля. Способность ферромагнитных материалов к намагничиванию оценивают абсолютной магнитной проницаемостью $\mu = \mu_0\mu_r$, причем $\mu \gg 1$ и $\mu_r \gg \mu_0$. К ферромагнитным материалам относятся железо, никель, кобальт и их сплавы.

К неферромагнитным материалам относятся *парамагнитные* и *диамагнитные* материалы, в которых внешнее магнитное поле практически не оказывает влияния на внутреннее магнитное поле и даже может его ослаблять. Так, у парамагнитных материалов относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1,000...1,001$, а у диамагнитных $\mu_r < 1$. К таким веществам относятся железо при температуре выше точки Кюри, металлы платиновой группы, натрий, калий, соли железа, дерево, пластмассы и др.

Основной характеристикой ферромагнитных материалов является зависимость магнитной индукции в материале от напряженности магнитного поля, определяемая

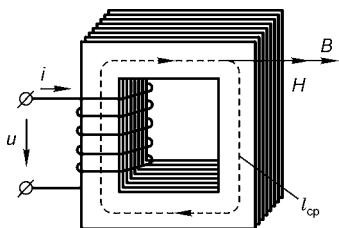


Рис. 7.7
Ферромагнитный
магнитопровод с катушкой

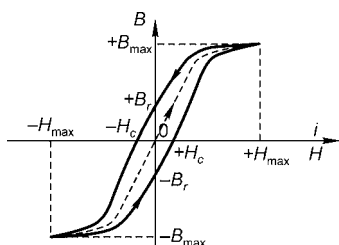


Рис. 7.8
Зависимость $B = f(H)$

--- : кривая первоначального намагничивания; — : петля гистерезиса.

топроводе. При этом магнитная индукция в магнитопроводе будет также увеличиваться (рис. 7.8, штриховая линия). При малых значениях H магнитная индукция в магнитопроводе увеличивается пропорционально увеличению H . В этой области значений H абсолютная магнитная проницаемость $\mu = B/H \gg \mu_0$. При некотором значении $+H_{\max}$ наступает насыщение магнитопровода, магнитная индукция принимает значение $+B_{\max}$, которое мало изменяется при дальнейшем увеличении H .

От точки насыщения $(+B_{\max})$ будем уменьшать ток i , а значит и H . Кривая уменьшения магнитной индукции не будет совпадать с кривой первоначального намагничивания, а пойдет выше. При токе $i = 0$ магнитная индукция $B_r \neq 0$. Если изменить направление тока в катушке, т. е. изменить направление напряженности магнитного поля на противоположное, то при некотором значении напряженности внешнего магнитного поля $-H_c$ магнитная индукция станет равной нулю. При дальнейшем увеличении тока снова будет достигнуто насыщение магнитопровода

уравнением (7.7а) и представляемая либо графически, либо в табличной форме.

Рассмотрим ферромагнитный магнитопровод с катушкой, состоящей из w витков (рис. 7.7). Будем считать, что магнитное поле в магнитопроводе однородное, векторы \mathbf{B} и \mathbf{H} совпадают по направлению. Если магнитопровод не намагничен, то при токе $i = 0$ магнитная индукция и напряженность магнитного поля равны нулю ($B = H = 0$).

Подключим катушку к источнику постоянного напряжения. С увеличением тока в катушке увеличиваются МДС $F = iw$ и напряженность магнитного поля $H = F/l_{cp}$, где l_{cp} — средняя длина магнитной линии в магни-

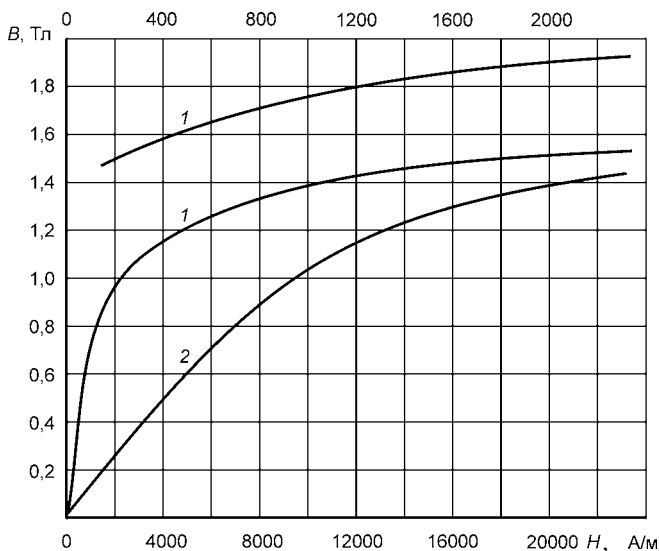


Рис. 7.9
Основные кривые намагничивания
1 — электротехническая сталь 1411; 2 — литая сталь.

при $-B_{\max}$ и напряженности $-H_{\max}$. Изменяя ток в катушке так, чтобы напряженность изменялась от $-H_{\max}$ до $+H_{\max}$, получим замкнутую кривую, называемую *петлей гистерезиса* (рис. 7.8). Магнитную индукцию $\pm B_r$, сохраняющуюся в магнитопроводе при уменьшении напряженности магнитного поля от $\pm H_c$ до нуля, называют *остаточной индукцией*, а напряженность H_c — *коэрцитивной силой*.

Наличие остаточной намагниченности в ферромагнитных материалах ($B_r \neq 0$) является основой для создания постоянных магнитов.

Если произвести несколько циклов перемагничивания с разными значениями H_{\max} и B_{\max} , то получим семейство петель гистерезиса и геометрическое место точек, соответствующих различным значениям H_{\max} , которое почти совпадет с первоначальной кривой намагничивания. Ее называют *основной кривой намагничивания* и используют при расчете магнитных цепей. На рис. 7.9 показаны основные кривые намагничивания листовой электротехнической стали 1411 и литой стали.

Ферромагнитные материалы отличаются друг от друга формой петли гистерезиса (см. рис. 7.10). Ферромагнитные

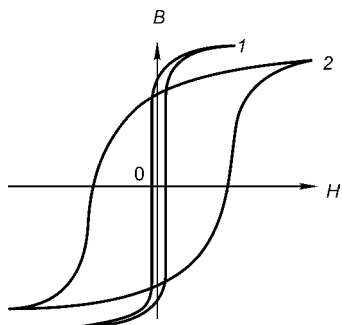


Рис. 7.10

Гистерезисные петли ферромагнитных материалов

1 — магнитно-мягких; 2 — магнитно-твердых.

материалы с относительно небольшой ($H_c < 4$ кА/м) коэрцитивной силой, т. е. с узкой петлей гистерезиса, называют *магнитно-мягкими* или *мягкими*. К ним относятся чистое железо, листовая электротехническая сталь и др. Их применяют для изготовления магнитопроводов, работающих в режиме перемагничивания для снижения потерь энергии на гистерезис.

Ферромагнитные материалы с большой ($H_c > 4$ кА/м)

коэрцитивной силой и остаточной магнитной индукцией, т. е. с широкой петлей гистерезиса, называют *магнитно-твердыми* или *жесткими*. К ним относятся сплавы железа с алюминием, никелем, кобальтом и др., их применяют для изготовления постоянных магнитов.

7.3.

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ И ИХ РАЗНОВИДНОСТИ

Магнитная цепь представляет собой совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий магнитодвижущей силы, магнитного потока и разности магнитных потенциалов.

На практике некоторый участок магнитной цепи может быть выполнен из неферромагнитного материала, например воздушный промежуток, воздушный зазор и др.

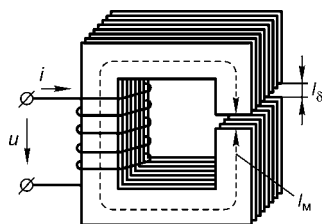


Рис. 7.11

Ферромагнитный магнитопровод с катушкой и воздушным зазором

Магнитные цепи подразделяют на *неразветвленные* и *разветвленные*. *Неразветвленная* магнитная цепь может быть выполнена только из ферромагнитного материала (см. рис. 7.7) или может иметь воздушный зазор (рис. 7.11). Магнитный поток Φ во всех сечениях такой магнитной цепи имеет одно и то же значение. При отсутствии

воздушного зазора и неизменном поперечном сечении магнитопровода магнитная индукция и напряженность магнитного поля одинаковы во всех точках магнитопровода.

При наличии воздушного зазора магнитная индукция также остается одинаковой в ферромагнитной части магнитной цепи и в воздушном зазоре и равной $B = \Phi/S$, где S — площадь поперечного сечения. Напряженность магнитного поля будет различной. В ферромагнитном магнитопровode она определяется по кривой намагничивания материала, из которого выполнен магнитопровод (см., например, рис. 7.9), а в воздушном зазоре — согласно уравнению (7.7б), т. е. $H_\delta = B/\mu_0$.

Разветвленная магнитная цепь может иметь два и более параллельных участка магнитопровода. Разветвленные магнитные цепи могут быть симметричными, в которых все параллельные участки магнитопровода имеют одинаковую длину и поперечное сечение, и несимметричными, в которых параллельные участки магнитопровода имеют разную длину (рис. 7.12а), разные сечения, имеют воздушные зазоры (рис. 7.12б). Если обмотку разместить на среднем участке магнитной цепи, представленной на рис. 7.12а, то магнитная цепь будет симметричной.

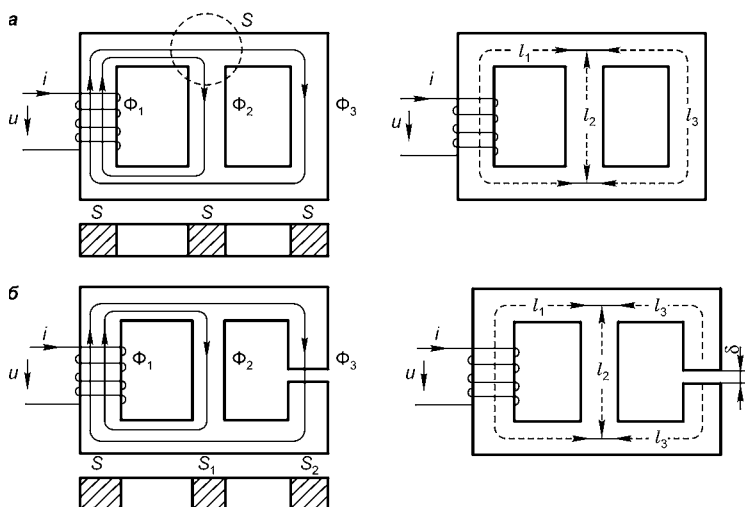


Рис. 7.12

Разветвленные магнитные цепи, поперечные сечения и расчетные длины участков

а — без воздушного зазора; б — с воздушным зазором.

7.4. МАГНИТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Падение магнитного напряжения U_m на участке магнитной цепи неизменного поперечного сечения при постоянной напряженности H в соответствии с (7.9) вычисляют по формуле

$$U_m = Hl,$$

где l — длина этого участка.

Используя формулы (7.7) связи между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля и (7.12) для магнитного потока, получим

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{\Phi}{\mu_0 \mu_r S},$$

а для магнитного напряжения (разности магнитных потенциалов) на участке l

$$U_m = Hl = \Phi \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} = R_m \Phi, \quad (7.15)$$

где

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \quad (7.16)$$

— магнитное сопротивление участка магнитной цепи.

Формула (7.15) по своей структуре совпадает с формулой (1.10) для электрической цепи, при этом магнитный поток Φ в магнитной цепи аналогичен электрическому току в электрической цепи.

Магнитное сопротивление R_m участка магнитной цепи, как и электрическое сопротивление R участка электрической цепи, пропорционально длине l участка магнитной цепи и обратно пропорционально площади поперечного сечения S и магнитной проницаемости μ ферромагнитного материала на участке l .

На основании закона полного тока с учетом формулы (7.15) можем записать, что

$$F = Hl = R_m \Phi, \quad \text{или} \quad \Phi = \frac{F}{R_m}. \quad (7.17)$$

Последнее выражение называют *законом Ома* для участка магнитной цепи: *магнитный поток равен магнито-*



движущей силе, деленной на магнитное сопротивление. Откуда следует, что чем больше магнитная проницаемость ферромагнитного материала магнитной цепи, тем меньше ее магнитное сопротивление и тем больший магнитный поток можно получить при заданном значении МДС.

В электрических машинах и других электротехнических устройствах большое значение имеют такие физические величины, как электродвижущая и механическая силы. Обе эти величины пропорциональны магнитному потоку. Чтобы получить достаточный магнитный поток при относительно незначительной магнитодвижущей силе в электрических машинах, электрических аппаратах и других электротехнических устройствах, основные элементы конструкции, образующие магнитную цепь, выполняют из ферромагнитных материалов с большой относительной магнитной проницаемостью.

Кроме усиления магнитного потока, введение ферромагнитных материалов в магнитную цепь преследует и другую цель, а именно: *сосредоточить магнитное поле в определенной области пространства и придать ему определенную конфигурацию.*

7.5. ЗАКОНЫ КИРХГОФА ДЛЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Из непрерывности магнитных силовых линий следует, что поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю, т. е.

$$\oint_s \mathbf{B} ds = \sum \Phi_k = 0. \quad (7.18)$$

Из уравнения (7.18) можно сделать вывод: *в неразветвленной магнитной цепи магнитный поток Φ во всех ее участках (в поперечных сечениях) одинаков, а в разветвленной цепи магнитный поток в участке, подходящем к месту разветвления магнитной цепи, равен сумме магнитных потоков в участках, отходящих от места разветвления.*

В этом отношении магнитный поток в магнитной цепи подобен току в электрической цепи. С учетом подобия можно говорить о том, что *в разветвленной магнитной цепи магнитный поток подчиняется первому закону Кирхгофа.* Однако необходимо помнить, что электрический ток

физически отличается от возникновения магнитного потока в магнитной цепи, поэтому можно говорить лишь об аналогии двух принципиально различных явлений. В целях использования аналогии между электрическими и магнитными цепями при расчете магнитных цепей принято говорить о *направлении магнитного потока в участках магнитной цепи*, а место разветвления участков магнитной цепи принято называть *узлом*.

Выражение

$$\sum \Phi_k = 0 \quad (7.19)$$

называют *первым законом Кирхгофа* для магнитной цепи. Из него следует, что *алгебраическая сумма магнитных потоков в участках магнитной цепи, сходящихся к одному узлу, равна нулю*.

При записи уравнений по этому закону необходимо задать направления магнитных потоков в участках магнитной цепи, примыкающих к узлу, считая их совпадающими с направлением магнитных силовых линий в этих участках. При этом магнитные потоки, направленные к узлу, берут со знаком «плюс», а направленные от узла — со знаком «минус».

Закон полного тока для магнитной цепи, в которой действует несколько МДС, записывают в форме $\oint_l H dl = \sum F$.

Линейный интеграл по контуру l можно представить в виде суммы криволинейных интегралов на однородных участках магнитной цепи. Каждый из них будет представлять магнитное напряжение по (7.9). В результате уравнение, описывающее закон полного тока, примет вид, аналогичный второму закону Кирхгофа в электрических цепях, а именно

$$\sum U_{mk} = \sum F_k, \text{ или } \sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^m F_k = \sum_{k=1}^m I_k w_k, \quad (7.20)$$

где n — количество однородных участков магнитной цепи, образующих замкнутый контур; m — количество источников МДС в этом же контуре.

Уравнение (7.20) называют *вторым законом Кирхгофа для магнитной цепи*. Из него следует, что *алгебраическая сумма магнитных напряжений на участках замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС вдоль этого контура*. Правила записи уравнений аналогичны



правилам записи подобных уравнений для электрических цепей (см. § 1.3).

Для магнитной цепи (см. рис. 7.12а) уравнение по первому закону Кирхгофа для верхнего узла имеет вид

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0, \quad \text{или} \quad \Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3.$$

Для контура, состоящего из левого и среднего участков цепи, при направлении обхода контура по часовой стрелке по второму закону Кирхгофа можем написать уравнение

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = I w,$$

где H_1 и H_2 — напряженности магнитного поля на участках цепи с длинами l_1 и l_2 , в которых существуют магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 соответственно.

Для левого и правого участков магнитной цепи с воздушным зазором (рис. 7.12б) при обходе контура по часовой стрелке уравнение примет вид

$$H_1 l_1 + H_3 l_3 + H_\delta \delta = I w,$$

где H_1 , H_3 и H_δ — напряженности магнитного поля в участках цепи с длинами l_1 , l_3 (исключая длину воздушного зазора δ) и δ соответственно.

7.6. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

Воспользовавшись формальными аналогиями между величинами, описывающими электрические и магнитные цепи, а именно: ЭДС E — МДС F , электрическое напряжение U — магнитное напряжение U_m , электрический ток I — магнитный поток Φ , электрическое сопротивление R — магнитное сопротивление R_m , магнитные цепи, изображенные на рис. 7.11 и 7.12, можно представить в виде соответствующих им схем замещения (см. рис. 7.13).

На схемах замещения участки цепей из ферромагнитных элементов представлены нелинейными магнитными сопротивлениями R_m , R_{m1} , R_{m2} , R_{m3} вследствие нелинейной зависимости магнитного потока от намагничивающей силы. Сопротивление воздушного зазора определяется магнитной постоянной μ_0 , длиной воздушного зазора δ и площадью S поперечного сечения (см. формулу (7.16)) и не

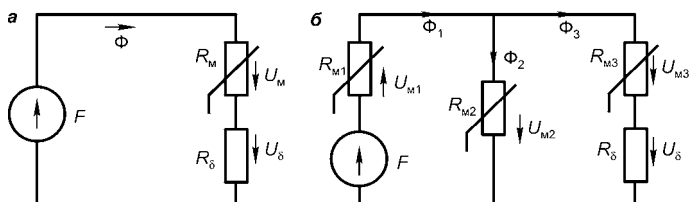


Рис. 7.13

Эквивалентные схемы замещения магнитных цепей

a — неразветвленной (рис. 7.11); *б* — разветвленной (рис. 7.12б).

зависит от магнитного потока, поэтому на схемах воздушный зазор изображен линейным элементом R_δ .

При анализе магнитных цепей с использованием схем замещения в полной мере можно пользоваться законом Ома и законами Кирхгофа для магнитных цепей. Применительно к схеме на рис. 7.13а по второму закону Кирхгофа можно написать

$$F = U_m + U_\delta.$$

7.7. ПОТОКИ РАССЕЯНИЯ В МАГНИТНЫХ ЦЕПЯХ

Магнитными потоками рассеяния называют такие потоки, которые сцеплены с одним или несколькими витками намагничивающей обмотки и замыкаются преимущественно по воздуху и лишь частично по магнитопроводу.

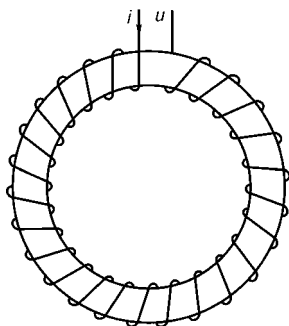


Рис. 7.14

Ферромагнитный тороид
с намагничивающей
обмоткой

Среди большого разнообразия магнитных цепей могут быть такие, в которых поток рассеяния практически отсутствует. Примером такой магнитной цепи может служить ферромагнитный тороид с намагничивающей обмоткой, витки которой, плотно прилегая друг к другу и тороиду, охватывают всю длину тороида (рис. 7.14). Основной магнитный поток замыкается по ферромагнитному сердечнику тороида и сцеплен со всеми витками обмот-

ки. При этом поток рассеяния оказывается незначительным и им можно пренебречь.

Потоки рассеяния увеличиваются, если увеличивается расстояние между обмоткой и ферромагнитным магнитопроводом (рис. 7.15) и по другим причинам. Эти потоки основную часть пути замыкаются по воздуху, т. е. по пути с большим магнитным сопротивлением и постоянной магнитной проницаемостью,

поэтому они значительно меньше основного магнитного потока. Так как магнитные линии потока рассеяния охватывают лишь отдельные витки или группы витков обмотки, то эти потоки характеризуют *потокосцеплением рассеяния* $\Psi_{\text{рас}}$. Поскольку магнитные линии потока рассеяния замыкаются преимущественно по воздуху, то принято считать, что потокосцепление $\Psi_{\text{рас}}$ пропорционально току, создавшему его, т. е.

$$\Psi_{\text{рас}} = L_{\text{рас}} i, \quad (7.21)$$

где $L_{\text{рас}}$ — индуктивность рассеяния обмотки.

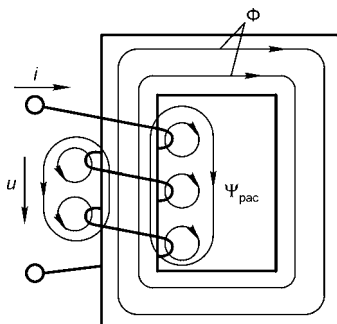


Рис. 7.15
Приближенная картина потоков рассеяния

7.8. РАСЧЕТ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

При расчете неразветвленной магнитной цепи (НМЦ) учитывают, что магнитный поток во всех сечениях магнитной цепи, включая воздушные зазоры, имеет одно и то же значение, т. е. не учитывают потоки рассеяния и так называемое выпучивание магнитных силовых линий в воздушном зазоре, для учета которого необходимо решать полевую задачу.

При этом известны геометрические размеры магнитопровода и воздушного зазора, материал, из которого изготовлен магнитопровод, и его основная кривая намагничивания $B = f(H)$. Для приближенного учета выпучивания магнитных силовых линий в зазоре площадь поперечного сечения воздушного зазора увеличивают на

10...15% относительно поперечного сечения участка магнитной цепи, примыкающего к воздушному зазору.

Обычно приходится решать одну из двух следующих задач.

1. Определить МДС для создания в НМЦ заданного магнитного потока Φ .

2. Определить магнитный поток Φ в цепи при заданной МДС.

Первую из них, наиболее простую, называют *прямой* задачей, а вторую — *обратной*.

Решение прямой задачи проводят, пользуясь следующим алгоритмом:

1. Разбивают магнитную цепь на n однородных участков с одинаковым сечением, включая воздушные зазоры, если они имеются.

2. Определяют средние длины этих участков l_k и их поперечные сечения S_k .

3. Рассчитывают магнитную индукцию $B_k = \Phi/S_k$ в каждом k -м участке магнитной цепи.

4. Находят напряженность магнитного поля H_k в каждом k -м участке магнитопровода по известным значениям B_k , пользуясь основной кривой намагничивания.

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре определяют на основании уравнения $B_\delta = \mu_0 H_\delta$ (см. (7.76)):

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{B_\delta}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot B_\delta.$$

5. Определяют МДС по второму закону Кирхгофа $F = Iw = \sum_{k=1}^n H_k l_k$. Так, для магнитной цепи (см. рис. 7.11), схема замещения которой изображена на рис. 7.13а, получим уравнение $F = Iw = H_c l_m + H_d l_d$.

6. Далее выбирают источник напряжения и в соответствии с ним определяют количество витков w и ток I в намагничивающей обмотке.

Решение обратной задачи сводится по существу к решению нескольких прямых задач при тех же допущениях, а именно:

1. Задаются несколькими значениями магнитного потока Φ_k .

2. Для каждого значения потока Φ_k , как и в предыдущем случае, находят значения B_k , H_k , $H_k l_k$ в каждом однородном участке магнитной цепи и определяют МДС

$$F_k = \sum_{k=1}^n H_k l_k, \text{ необходимую для создания } \Phi_k.$$

3. Строят вебер-амперную характеристику, под которой понимают зависимость магнитного потока от МДС, т. е. $\Phi_k = f(\sum H_k l_k)$, и по ней по заданному значению МДС определяют магнитный поток Φ .

Результаты расчета при этом удобно представить в табличной форме.

7.9. РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННЫХ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

При расчете разветвленных магнитных цепей пользуются законами Кирхгофа для магнитных цепей, по аналогии с разветвленными электрическими цепями. Если заданы МДС намагничивающих обмоток и геометрические размеры магнитопровода, то задача сводится к определению магнитных потоков в отдельных однородных участках магнитной цепи. Для решения поставленной задачи составляют систему из p уравнений, в которой $q - 1$ уравнений записывают по первому закону Кирхгофа и $n = p - (q - 1)$ уравнений — по второму закону Кирхгофа, где p — количество разветвленных участков (ветвей) в магнитной цепи, q — количество узлов и n — число независимых контуров. Правила записи уравнений аналогичны правилам, изложенным в § 1.3.

Решение системы этих уравнений осложняется нелинейной зависимостью между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H в ферромагнитных участках цепи (см. рис. 7.9) и сводится по сути дела к графическому методу, который применяется при расчете электрических цепей с нелинейными элементами (см. § 1.8).

Пусть нам известны геометрические размеры магнитопровода и основная кривая намагничивания ферромагнитного материала магнитопровода магнитной цепи, представленной на рис. 7.12а. Требуется составить систему уравнений для определения магнитных потоков в ветвях цепи.

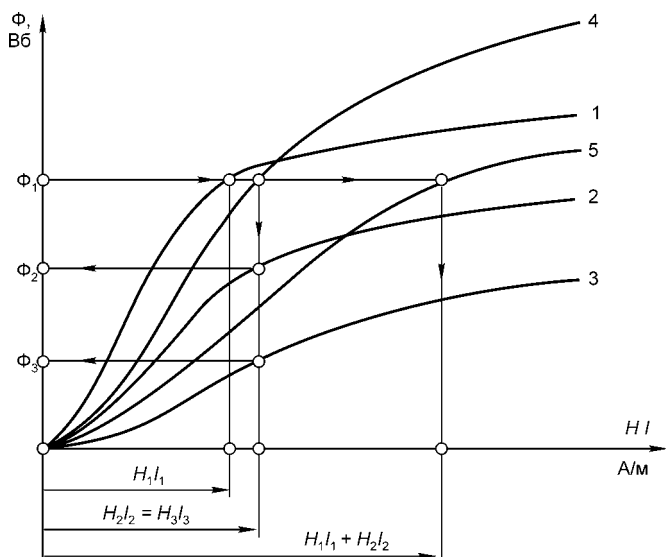


Рис. 7.16

К расчету разветвленной магнитной цепи

1 — $\Phi_1 = f(H_1 l_1)$; 2 — $\Phi_2 = f(H_2 l_2)$; 3 — $\Phi_3 = f(H_3 l_3)$; 4 — $\Phi_2 + \Phi_3 = f(H_2 l_2)$; 5 — $\Phi_1 = f(H_1 l_1 + H_2 l_2)$.

Для верхнего узла по первому закону Кирхгофа при указанных направлениях магнитного потока в ветвях можем записать

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0, \quad \text{или} \quad \Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3.$$

По второму закону Кирхгофа для левого и правого контуров при их обходе по часовой стрелке можем записать следующие уравнения:

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2, \quad 0 = H_3 l_3 - H_2 l_2.$$

Для расчета магнитной цепи необходимо для каждого ее однородного участка с длинами l_1 , l_2 , l_3 , задаваясь различными значениями магнитной индукции, построить кривые зависимости $\Phi_k = f(H_k l_k)$. При построении этих зависимостей нужно абсциссы соответствующей кривой намагничивания, т. е. H_k , умножить на длину l_k k -го участка, а ординаты, т. е. значения магнитной индукции B_k , умножить на площадь сечения S_k того же участка, чтобы получить значение магнитного потока Φ_k в нем (рис. 7.16, зависимости 1, 2, 3).

Пользуясь уравнением, записанным по первому закону Кирхгофа, с учетом того, что $H_3 l_3 = H_2 l_2$, складывают ординаты зависимостей $\Phi_2 = f(H_2 l_2)$ и $\Phi_3 = f(H_3 l_3)$ и находят зависимость $\Phi_2 + \Phi_3 = f(H_2 l_2)$. Затем к ее абсциссам прибавляют соответствующие абсциссы кривой $\Phi_1 = f(H_1 l_1)$ и получают кривую $\Phi_1 = f(H_1 l_1 + H_2 l_2)$. Теперь по заданному магнитному потоку Φ_1 можно найти соответствующую ему МДС $F = Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2$.

7.10.

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Постоянные магниты находят применение в электромашиностроении, приборостроении, радиотехнике и других отраслях промышленности. Их выполняют из ферромагнитных материалов с большой остаточной магнитной индукцией B_r и большой коэрцитивной силой H_c , характерных для магнитно-твердых материалов (см. рис. 7.10, 2).

Рассмотрим тороид, выполненный из магнитно-твердого материала (см. рис. 7.14). С помощью намотанной на него обмотки тороид намагничивают до насыщения. После отключения обмотки тороид оказывается намагниченным вследствие того, что магнитные моменты намагниченных областей сохраняют свою ориентацию, созданную внешним магнитным полем. Магнитный поток в сердечнике тороида определяется суммой всех магнитных моментов. Кривая размагничивания тороида представлена на рис. 7.17.

На рис. 7.18 представлен рассматриваемый тороид без обмотки и с удаленным участком магнитопровода, образующим воздушный зазор длиной δ . Оставшаяся часть тороида будет являться постоянным магнитом, создающим магнитное поле в воздушном зазоре. Наличие воздушного зазора с большим магнитным сопротивлением приводит к уменьшению магнитного потока после намагничивания цельного тороида. Магнитное поле в воздушном зазоре определяется магнитной индукцией B_δ и напряженностью H_δ , при этом $B_\delta = \mu_0 H_\delta$. Магнитное состояние ферромагнитного материала тороида определяется графической зависимостью $B = f(H)$ в области размагничивания (рис. 7.18б).

Найдем зависимость магнитной индукции B_m и напряженности магнитного поля H_m в теле тороида от

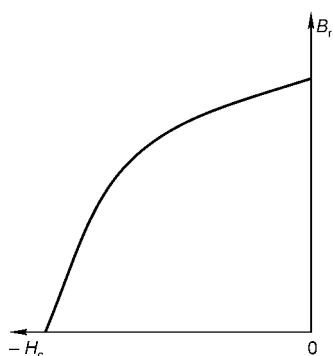


Рис. 7.17
Кривая
размагничивания тороида

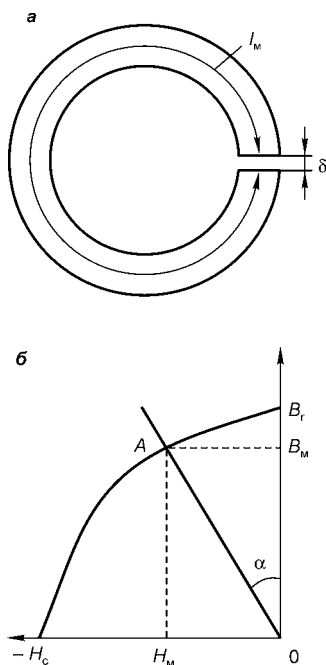


Рис. 7.18
Тороид с воздушным зазором
а — общий вид и размеры; б — зависимость $B = f(H)$.

длины воздушного зазора δ . При отсутствии обмотки с током по закону полного тока для контура, состоящего из магнитопровода со средней длиной l_m и воздушного зазора длиной δ , имеем

$$H_m l_m + H_\delta \delta = 0. \quad (7.22)$$

Так как магнитный поток в теле постоянного магнита и в воздушном зазоре один и тот же, можно написать

$$B_\delta S_\delta = B_m S_m, \quad (7.23)$$

где S_δ и S_m — площади поперечных сечений воздушного зазора и магнитопровода тороида соответственно. Чем больше длина зазора δ , тем больше выпучивание магнитных линий в зазоре и тем больше различие площадей S_δ и S_m .

Из формулы (7.22) следует связь между H_m и B_δ , а именно

$$H_m = -\frac{\delta}{l_m} H_\delta = -\frac{\delta}{l_m \mu_0} B_\delta. \quad (7.24)$$

С учетом (7.23) $B_\delta = \frac{S_m}{S_\delta} B_m$. Подставив это соотношение в (7.24), получим

$$H_m = -\frac{\delta}{l_m \mu_0} \cdot \frac{S_m}{S_\delta} B_m = -N_m B_m, \quad (7.25)$$

где $N_m = \frac{\delta}{l_m \mu_0} \cdot \frac{S_m}{S_\delta}$ — коэффициент размагничивания постоянного магнита.

При анализе формулы для N_m можно принять $S_m = S_\delta$, и тогда будет видно, что чем больше длина воздушного за-

зора по сравнению с длиной постоянного магнита, тем больше размагничивание. Для конкретного постоянного магнита коэффициент размагничивания является постоянным и, следовательно, зависимость $H_m(B_m)$ является линейной (рис. 7.18б).

Точка А пересечения кривой размагничивания ферромагнитного материала и линейной зависимости $H_m(B_m)$ показывает значения магнитной индукции B_m и напряженности магнитного поля H_m в магнитопроводе постоянного магнита при наличии воздушного зазора. Чем больше длина воздушного зазора, тем больше коэффициент размагничивания N_m , тем больше угол α (рис. 7.18б) и тем меньше магнитная индукция B_m ($B_m < B_r$) и магнитный поток.

7.11. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Подключим обмотку тороида с обмоткой намагничивания (см. рис. 7.14) к источнику электрической энергии. При этом напряжение u источника электрической энергии будет уравниваться падением напряжения iR на активном сопротивлении обмотки и индуцированной в обмотке ЭДС $e = -\frac{d\Psi}{dt}$, т. е.

$$u = iR - e = iR + \frac{d\Psi}{dt},$$

где Ψ — потокосцепление обмотки.

Работа источника энергии, совершаемая за время dt , будет равна

$$u i dt = i^2 R dt + i d\Psi. \quad (7.26)$$

Слагаемое $i^2 R dt$ в (7.26) представляет часть электрической энергии, которая за время dt преобразуется в тепловую энергию.

Слагаемое $i d\Psi$ представляет собой работу, которая связана с изменением потокосцепления Ψ , а по существу — энергию, запасенную в магнитном поле за время dt . При изменении потокосцепления от нуля до конечного значения Ψ_m полная энергия, запасенная в магнитном поле катушки, будет равна

$$W_m = \int_0^{\Psi_m} i d\Psi. \quad (7.27)$$

Для индуктивной катушки с неферромагнитным сердечником $\Psi = Li$ и $d\Psi = L di$. Поэтому

$$W_{\text{м}} = L \int_0^I i di = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Psi I}{2},$$

где I — некоторое установившееся значение тока.

Можно показать, что энергия магнитного поля, создаваемого системой n магнитосвязанных контуров с токами, в общем случае может быть найдена по формуле

$$W_{\text{м}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n i_k \Psi_k, \quad (7.28)$$

где Ψ_k — полное потокосцепление k -го контура, обусловленное токами во всех контурах.

Пусть тороидальный сердечник (см. рис. 7.14) имеет w плотно намотанных витков, средняя длина сердечника равна l , поперечное сечение S . На основании закона полного тока, учитывая, что напряженность $H = \text{const}$ вдоль сердечника, можем написать, что $Hl = iw$, откуда $i = Hl/w$. Поскольку $d\Phi = S dB$, то для приращения потокосцепления справедливо выражение $d\Psi = w d\Phi = wS dB$. При этом в соответствии с (7.27) для энергии магнитного поля может быть получено следующее выражение:

$$W_{\text{м}} = \int_0^{\Psi} i d\Psi = \frac{lwS}{w} \int_0^B H dB = V \int_0^B H dB,$$

где $V = lS$ — объем сердечника, занятый магнитным полем.

Разделив обе части последнего выражения на объем V сердечника тороида, получим выражение для объемной плотности энергии магнитного поля:

$$W'_{\text{м}} = \frac{W_{\text{м}}}{V} = \int_0^B H dB. \quad (7.29)$$

С учетом того, что $B = \mu H$ и $dB = \mu dH$, можем записать

$$W'_{\text{м}} = \mu \int_0^H H dH = \frac{\mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu} = \frac{BH}{2}. \quad (7.30)$$

Для неоднородной и анизотропной среды энергия магнитного поля в единице объема пространства, занятого полем, равна половине скалярного произведения векто-



ров B и H . Таким образом, если известно распределение плотности энергии магнитного поля в каком-либо объеме V пространства, энергия магнитного поля может быть найдена интегрированием по объему V , т. е. как

$$W_m = \int_V \frac{BH}{2} dV. \quad (7.31)$$

7.12. МЕХАНИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Как указывалось ранее (см. § 7.1), на проводник с током (часть контура с током), помещенный в магнитное поле, действует механическая сила, пропорциональная магнитной индукции поля, току в проводнике и его длине (формула (7.4)). Механические усилия испытывают и два параллельных проводника с токами, причем механические усилия стремятся либо сблизить эти проводники, когда токи в них направлены одинаково, либо удалить их друг от друга, если токи в них направлены в противоположные стороны. Такие механические усилия возникают не только в контуре с током, расположенном во внешнем магнитном поле, но и в уединенном контуре при взаимодействии тока в контуре с магнитным полем, созданным этим током. Покажем, что возникновение механических усилий в магнитном поле, называемых также электромагнитными силами, связано с изменением энергии магнитного поля.

Рассмотрим систему из n контуров с токами. Пусть на один из них, контур k , со стороны остальных контуров действует сила f , перемещающая этот контур на расстояние dg вдоль координаты g . Требуется выяснить, какая связь существует между силой f и изменением энергии магнитного поля dW_m системы.

На основании закона сохранения энергии для k -го контура можем написать уравнение, аналогичное уравнению (7.27), для работы, совершаемой источником энергии за время dt , т. е.

$$u_k i_k dt = i_k^2 R_k dt + i_k d\Psi_k.$$

В отличие от уравнения (7.27) здесь Ψ_k — полное потокоцепление k -го контура, зависящее не только от тока в этом контуре, но и от других контуров, магнитосвязанных с ним.

Записав аналогичные уравнения для всех n контуров и просуммировав их, получим

$$\sum_{k=1}^n u_k i_k dt = \sum_{k=1}^n i_k^2 R_k dt + \sum_{k=1}^n i_k d\Psi_k. \quad (7.32)$$

Слагаемое $\sum_{k=1}^n i_k d\Psi_k$ представляет собой ту часть энергии, которую получают все цепи от источников электрической энергии за вычетом тепловой энергии $\sum_{k=1}^n i_k^2 R_k dt$.

При перемещении какого-либо контура на расстояние dg изменяется энергия системы контуров W_M на dW_M и совершается работа $f dg$, где f — составляющая силы, совпадающая с направлением перемещения g .

Из закона сохранения энергии следует, что энергия, отдаваемая источниками за время dt , должна равняться сумме тепловой энергии, выделяющейся за это же время в сопротивлениях контуров, энергии, затраченной на совершение работы $f dg$, и приращения энергии магнитного поля dW_M , т. е.

$$\sum_{k=1}^n u_k i_k dt = \sum_{k=1}^n i_k^2 R_k dt + f dg + dW_M. \quad (7.33)$$

Из сравнения (7.32) и (7.33) следует, что

$$\sum_{k=1}^n i_k d\Psi_k = f dg + dW_M. \quad (7.34)$$

Это означает, что механическая работа и приращение энергии магнитного поля совершаются за счет той части энергии $\sum_{k=1}^n u_k i_k dt$ источников, которую последние отдают в цепи за вычетом тепловой энергии.

Из уравнения (7.34) получим выражение силы в общем случае:

$$f = \frac{\sum_{k=1}^n i_k d\Psi_k - dW_M}{dg}. \quad (7.35)$$

Если положить, что перемещение происходит при неизменном потокоцеплении контуров, т. е. $\Psi_k = \text{const}$, то

$$f = - \left. \frac{\partial W_M}{\partial g} \right|_{\Psi_k = \text{const}}. \quad (7.36)$$

Знак «минус» в (7.36) означает, что механическая работа совершается за счет убыли энергии магнитного поля.

Если положить, что перемещение происходит при неизменных токах в контурах, т. е. $i_k = \text{const}$, то

$$f = + \frac{\partial W_M}{\partial g} \bigg|_{i_k = \text{const}}. \quad (7.37)$$

В качестве иллюстрации рассмотрим уединенный контур с током. Учитывая известные соотношения

$$\Psi = Li \text{ и } W_M = \frac{Li^2}{2} = \frac{\Psi^2}{2L},$$

получим выражение для силы, стремящейся деформировать контур:

$$f = - \frac{\partial}{\partial g} \left(\frac{\Psi^2}{2L} \right) = + \frac{\Psi^2}{2L^2} \frac{\partial L}{\partial g} = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial g},$$

или $f = + \frac{\partial}{\partial g} \left(\frac{Li^2}{2} \right) = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial g}.$

Рассмотрим еще один пример. На рис. 7.19 представлен электромагнит постоянного тока. Сердечник 1 с намагничивающей обмоткой с числом витков w и якорь 2 электромагнита выполнены из магнитно-мягкого ненасыщенного ферромагнитного материала. Между сердечником и якорем имеется воздушный зазор δ . Площадь поперечного сечения сердечника и якоря обозначим через $S/2$, а площадь обоих воздушных зазоров — через S . Поскольку эта магнитная цепь является неразветвленной, то магнитный поток Φ , создаваемый намагничивающей обмоткой, во всех сечениях будет одинаков, и, следовательно, магнитные индукции в сердечнике B_c , в якоре B_y и в воздушном зазоре B_δ будут одинаковы, если пренебречь выпучиванием магнитных силовых линий поля в зазоре. Магнитное поле будет локализовано в участках магнитной цепи.

Сердечник и якорь ненасыщенны, поэтому напряженность магнитного поля в них

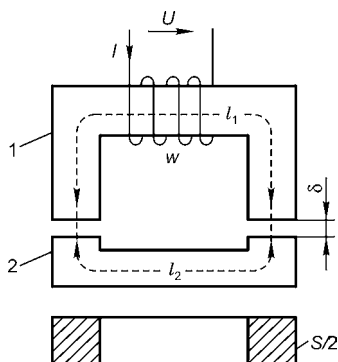


Рис. 7.19
Электромагнит
постоянного тока

в сотни и даже тысячи раз меньше напряженности магнитного поля в воздушном зазоре при одном и том же значении магнитной индукции. Поэтому можно считать, что магнитная энергия в сердечнике и якоре на два-три порядка меньше магнитной энергии в воздушном зазоре, если он не очень мал. Исходя из высказанных соображений, будем считать, что практически вся энергия магнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре, т. е. $W_M \approx W_{M\delta}$.

Плотность магнитной энергии в воздушном зазоре в соответствии с (7.30)

$$W'_{M\delta} = \frac{B^2}{2\mu_0}.$$

Зная объем воздушного зазора $V_\delta = S\delta$, занятый магнитным полем, находим энергию магнитного поля в зазоре:

$$W_M = W'_{M\delta} V_\delta = \frac{B^2}{2\mu_0} S\delta.$$

Чтобы определить силу, действующую на якорь, воспользуемся формулой (7.36), причем в качестве координаты g в данном случае используем длину δ . При этом для абсолютного значения силы получим

$$f = \left| -\frac{\partial W_M}{\partial g} \right| = \left| -\frac{\partial W_M}{\partial \delta} \right| = \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\frac{B^2}{2\mu_0} S\delta \right) = \frac{B^2}{2\mu_0} S. \quad (7.38)$$

Очевидно, что сила направлена в сторону уменьшения воздушного зазора за счет убыли энергии магнитного поля.

Определенная по формуле (7.38) сила является силой трогания якоря с места, т. е. силой, необходимой для преодоления сил сопротивления, обусловленных массой якоря, наличием противодействующих пружин и другими причинами.

Чаще всего при создании электротехнических устройств, в которых используются аналогичные магнитные цепи, прежде всего необходимо знать, какое механическое усилие должно действовать на якорь подобного электромагнитного устройства, и в соответствии с ним определить значение магнитной индукции в воздушном зазоре на основании (7.38), а именно

$$B_\delta = \sqrt{\frac{2f\mu_0}{S_\delta}}. \quad (7.39)$$



Чтобы получить значение магнитной индукции в теслах, в формуле (7.39) сила f должна быть выражена в ньютонах, площадь S_δ — в метрах квадратных, а $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

7.13. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Рассмотрим в качестве примера идеальную индуктивную катушку с ферромагнитным сердечником, т. е. катушку, в которой отсутствуют потоки рассеяния и активное сопротивление намагничивающей обмотки равно нулю. При подключении ее к источнику переменного напряжения в ферромагнитном магнитопроводе будет создаваться переменное магнитное поле. Ферромагнитный магнитопровод будет непрерывно перемагничиваться. Скорость перемагничивания пропорциональна частоте напряжения источника.

При синусоидальном напряжении, подведенном к катушке, магнитный поток Φ и магнитная индукция B в магнитопроводе также будут изменяться во времени по синусоидальному закону (рис. 7.20а). Изменение магнитной индукции в зависимости от МДС или напряженности магнитного поля определяется петлей гистерезиса

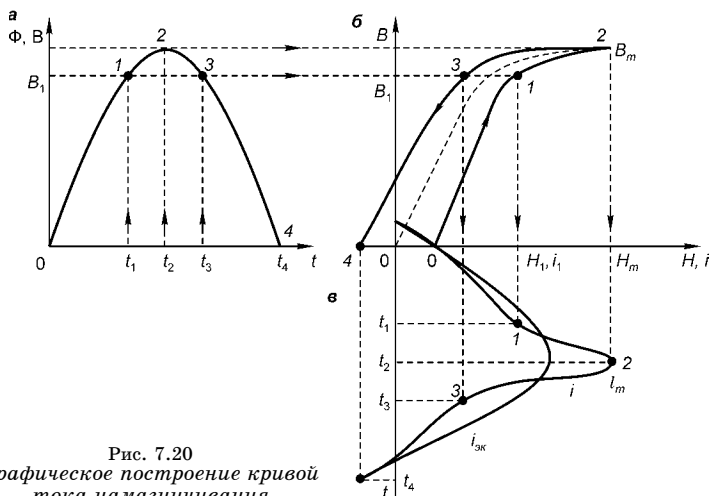


Рис. 7.20
Графическое построение кривой
тока намагничивания

(см. рис. 7.20б). На рис. 7.20в показана зависимость тока i в катушке в зависимости от времени $i(t)$, построенная на основании зависимостей $B(t)$ и $B(H)$. Рассмотрим в качестве примера нахождение мгновенного значения тока i_1 в момент времени t_1 (точка 1). Моменту времени t_1 соответствует значение магнитной индукции B_1 (точка 1 на рис. 7.20а). Переносим это значение индукции на рис. 7.20б до пересечения с восходящей линией петли гистерезиса (точка 1 на рис. 7.20б). Ось абсцисс на рис. 7.20б является осью ординат для зависимости $i(t)$ на рис. 7.20в, на которой откладываем значения тока i в катушке. Точку 1 на рис. 7.20в находим по значениям тока i_1 и момента времени t_1 . Аналогично определяют другие мгновенные значения тока (точки 2, 3, 4 и др.).

Зависимость тока $i(t)$ является несинусоидальной, что является одной из особенностей цепей с ферромагнитными элементами. Для упрощения расчетов цепей подобного рода несинусоидальный ток $i(t)$ принято заменять эквивалентной синусоидой $i_{\text{эк}}$ (рис. 7.20в) для того, чтобы можно было пользоваться комплексным методом расчета и векторными диаграммами. Действующее значение эквивалентной синусоиды принимают равным действующему значению несинусоидального тока, т. е.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt},$$
 а амплитудное значение эквивалентной синусоиды находят как $I_m = \sqrt{2} I$. Так как при $t = 0$ ток $i > 0$ (рис. 7.20в), то это означает, что эквивалентная синусоида тока опережает по фазе на угол δ синусоиду магнитной индукции (магнитного потока).

В § 2.9 было показано, что в цепи с идеальной индуктивной катушкой без ферромагнитного сердечника имеет место равенство $u + e = 0$, или $u = -e$, и, следовательно, $\underline{U} = -\underline{E}$.

При синусоидальном магнитном потоке $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ЭДС e изменяется по синусоидальному закону:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -w\omega \Phi_m \cos \omega t = E_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

т. е. ЭДС в катушке отстает по фазе от магнитного потока на $\frac{\pi}{2}$. На рис. 7.21 представлена векторная диаграмма идеальной индуктивной катушки с ферромагнитным

сердечником. За начальный вектор на диаграмме принят вектор магнитного потока Φ_m . Вектор ЭДС \underline{E} отстает от него по фазе на $\frac{\pi}{2}$, вектор напряжения $\underline{U} = -\underline{E}$. Вектор тока \underline{I} , как уже отмечалось, опережает по фазе на угол δ вектор магнитного потока.

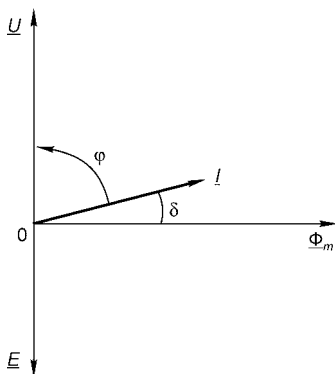


Рис. 7.21
Векторная диаграмма
идеальной индуктивной
катушки с ферромагнитным
сердечником

Итак, в отличие от идеальной индуктивной катушки без ферромагнитного сердечника, в которой ток отстает по фазе от напряжения на угол $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (см. § 2.9), в катушке с ферромагнитным сердечником намагничивающий ток имеет активную составляющую и сдвиг фаз $\varphi < \frac{\pi}{2}$, что вызвано наличием потерь энергии в ферромагнитном сердечнике, обусловленных гистерезисом и вихревыми токами (см. далее).

Мощность потерь энергии в магнитопроводе $P_{\pi} = UI \cos \varphi = UI \sin \delta$, где угол δ называют углом потерь, принято называть мощностью потерь в стали $P_{\pi c}$ или мощностью магнитных потерь $P_{\pi m}$.

7.14. МОЩНОСТЬ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Мощность потерь энергии на гистерезис. При периодическом перемагничивании ферромагнитного материала в нем происходит непрерывное изменение магнитных моментов элементарных объемов вещества, непрерывное вращение векторов намагниченности (см. § 7.1) и изменение магнитной полярности элементарных объемов вещества. Все эти процессы протекают с некоторой инерционностью и с выделением тепловой энергии, которая и представляет собой потери энергии в ферромагнитном материале, обусловленные гистерезисом.

При изменении напряженности магнитного поля изменяется и магнитная индукция. Элементарное изменение объемной плотности энергии магнитного поля в ферромагнетике $dW'_m = HdB$ пропорционально площади заштрихованного участка на рис. 7.22а.

Пусть магнитная индукция возрастает в соответствии с восходящей ветвью петли гистерезиса от $-B_r$ до $+B_m$ и совершается полный цикл перемагничивания. Энергия, запасенная в единице объема ферромагнетика, может быть найдена в соответствии с (7.29) таким образом:

$$W'_m = \oint H dB = \int_{-B_r}^{+B_m} H dB + \int_{+B_m}^{-B_r} H dB + \int_{-B_r}^{+B_m} H dB + \int_{+B_m}^{-B_r} H dB. \quad (7.40)$$

При увеличении магнитной индукции от $-B_r$ до $+B_m$ (первое слагаемое в (7.40)) в единице объема ферромагнетика запасается энергия, пропорциональная площади заштрихованной фигуры на рис. 7.22б.

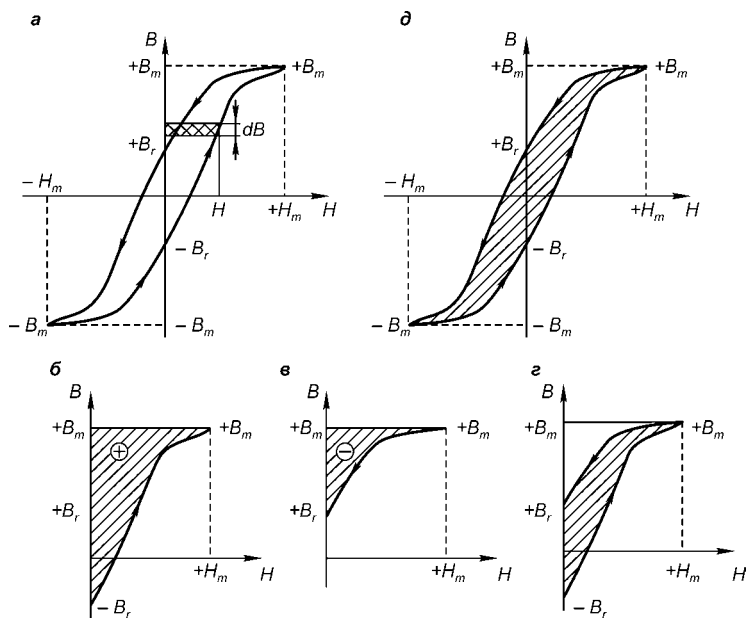


Рис. 7.22
К определению энергии магнитного поля
в ферромагнетике при изменении магнитной индукции

При уменьшении магнитной индукции от $+B_m$ до $+B_r$ (второе слагаемое в (7.40)) приращение $H dB < 0$, поэтому часть запасенной в магнитном поле энергии, пропорциональная площади фигуры на рис. 7.22в, возвращается источнику электрической энергии.

Сумма первых двух слагаемых в (7.40) будет равна энергии магнитного поля, запасенной за половину периода и пропорциональной половине площади петли гистерезиса (рис. 7.22г). Аналогично сумма третьего и четвертого слагаемых в (7.40) будет равна энергии, запасенной в магнитном поле за вторую половину периода.

В целом сумма всех слагаемых в (7.40) равна энергии в единице объема, пропорциональной площади петли гистерезиса (рис. 7.22д). Изменение энергии магнитного поля происходит за счет источника электрической энергии. При этом от источника электрической энергии потребуется такая же энергия для перемагничивания единицы объема ферромагнетика за один цикл изменения магнитной индукции от $+B_m$ до $-B_m$ и обратно.

Таким образом, площадь статической петли гистерезиса характеризует потери энергии в единице объема ферромагнитного вещества за период изменения напряженности (индукции) магнитного поля.

Мощность потерь энергии на гистерезис при периодическом перемагничивании магнитопровода пропорциональна $W'_m = \oint H dB$, частоте перемагничивания f и объему V магнитопровода:

$$P_{\text{гг}} = fV \oint H dB. \quad (7.41)$$

На практике для расчета мощности потерь на гистерезис пользуются удельной мощностью потерь, т. е. потерями на 1 кг массы:

$$p_{\text{гг}} = \sigma_r f B_m^n, \quad (7.42)$$

где σ_r — коэффициент, характеризующий качество ферромагнитного материала, чаще всего электротехнической стали; f — частота; B_m — амплитудное значение магнитной индукции, n — показатель степени, зависящий от значения B_m : при $B_m < 1$ Тл $n = 1,6$; при $B_m > 1$ Тл $n = 2$.

Из (7.41) следует, что для уменьшения потерь энергии на гистерезис для изготовления магнитопроводов электро-

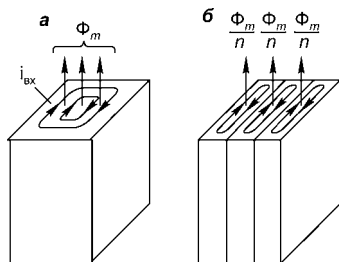


Рис. 7.23
Вихревые токи

а — в сплошном магнитопроводе;
б — в расслоенном магнитопроводе.

дет индуцироваться ЭДС $E \sim C_e f \Phi_m$, пропорциональная частоте f изменения магнитного потока и его амплитудному значению Φ_m . Под действием этой ЭДС в магнитопроводе будут возникать так называемые *вихревые токи* $i_{\text{вх}}$ (рис. 7.23а). Интенсивность вихревых токов зависит от частоты изменения и интенсивности магнитного поля, а также от электропроводности ферромагнитного материала. Если вихревые токи и сопротивления контуров заменить некими эквивалентными величинами $I_{\text{эк}}$ и $R_{\text{эк}}$, то мощность потерь энергии на вихревые токи можно представить как

$$P_{\text{пв}} = CR_{\text{эк}} I_{\text{эк}}^2, \text{ или } P_{\text{пв}} = C \frac{E^2}{R_{\text{эк}}}.$$

При этом в магнитопроводе выделяется тепловая энергия, в результате чего происходит нагрев магнитопровода.

Мощность потерь энергии от вихревых токов можно существенно уменьшить, если ферромагнитный сердечник изготовить из отдельных, изолированных друг от друга тонких листов электротехнической стали. При частоте 50 Гц для этого применяют листовую сталь толщиной 0,35 или 0,5 мм. При более высоких частотах применяют более тонкие листы. Так, если толщина листов будет в n раз меньше толщины сплошного сердечника (рис. 7.23б), то площадь поперечного сечения листа и ЭДС, индуцируемая в листе, будут в n раз меньше, нежели в сплошном сердечнике. При этом сопротивление контура для вихревого тока будет увеличиваться, и, следовательно, мощность потерь будет уменьшаться.

Для снижения потерь энергии от вихревых токов электротехническую сталь изготавливают с присадками крем-

технических устройств, предназначенных для работы в цепях переменного тока, нужно применять магнитно-мягкие ферромагнитные материалы с узкой петлей гистерезиса.

Мощность потерь энергии от вихревых токов. При изменении магнитного потока в материале магнитопровода, обладающем электропроводностью, согласно закону об электромагнитной индукции бу-

ния, что приводит к уменьшению удельной электропроводности ферромагнитного материала и, следовательно, снижению потерь.

Удельная мощность потерь на вихревые токи может быть рассчитана по формуле

$$p_{\text{пв}} = \sigma \gamma f^2 B_m^2 \Delta^2, \quad (7.43)$$

где σ — коэффициент, характеризующий качество электротехнической стали, γ — удельная электропроводность стали, Δ — толщина листа.

При расчетах электротехнических устройств переменного тока (трансформаторов, электрических машин переменного тока и др.) мощность потерь энергии в магнитопроводах, выполненных из электротехнической стали, обычно определяют из справочных таблиц, в которых приводится удельная мощность суммарных потерь от гистерезиса и вихревых токов $p_{\text{пс}} = p_{\text{пг}} + p_{\text{пв}}$ (Вт/кг) для различных сортов стали в зависимости от частоты f и амплитудного значения магнитной индукции B_m .

ТРАНСФОРМАТОРЫ

8.1.

НАЗНАЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформатором называют статическое устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Первые идеи создания трансформатора принадлежали талантливому русскому изобретателю П. Н. Яблочкову (1878 г.). Быстрое развитие трансформаторостроения началось тогда, когда М. О. Доливо-Добровольским была разработана трехфазная система тока (1889–1890). Им же была предложена конструкция трехфазного трансформатора.

Потребность в трансформаторах возникла прежде всего в связи с передачей электрической энергии на большие расстояния и ее распределением в местах потребления. Обычно приемники электроэнергии расположены на некотором расстоянии от электростанций. Иногда эти расстояния измеряются сотнями и тысячами километров. Генераторы электростанций вырабатывают электроэнергию напряжением не выше 10–24 кВ. Энергия большой мощности $S = \sqrt{3}UI$ при небольшом значении напряжения может быть передана только при большом значении тока. Для этого требуются провода больших сечений, иначе мощность потерь $P_{\text{п}} = 3I^2R_0L$ (R_0 — сопротивление 1 км линии передачи, Ом/км; L — длина линии, км) будет большой. Чем больше мощность S энергии и длина линии передачи, тем больше мощность потерь. При некоторых значениях мощности S и длины L передача электроэнергии становится экономически невыгодной.

Если ту же самую электроэнергию передавать при более высоком напряжении, то ток $I = S/(\sqrt{3}U)$ уменьшится. Такое изменение напряжения при практически неизменной передаваемой электроэнергии осуществляют с помощью трансформатора. Трансформаторы могут повышать напряжение генераторов электростанций до 35, 110, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ.

В местах потребления электроэнергии напряжение должно быть понижено до такого уровня, которое является номинальным для электроприемников (220, 380 В и т. д.). Для этой цели также используют трансформаторы.

Трансформаторы, используемые в системах передачи и распределения электрической энергии, называют *силовыми трансформаторами*. Их мощность достигает 1250 МВ·А.

Трансформаторы применяют в установках электросварки (сварочные трансформаторы), в металлургической промышленности (электропечные трансформаторы), в полупроводниковых преобразователях, с помощью которых осуществляют выпрямление переменного тока в постоянный и наоборот (выпрямительные трансформаторы), в системах измерения (измерительные трансформаторы), в радио- и телеустановках, в системах автоматического управления, связи и др. В этих случаях трансформаторы преобразуют напряжение одного уровня в напряжение другого уровня, которое требуется для питания данного элемента установки и отличается от напряжения источника питания.

Область применения трансформаторов очень широка, чем и объясняются их конструктивное разнообразие и большой диапазон мощностей (от долей вольт-ампера до сотен мегавольт-ампер).

8.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Электромагнитная схема трансформатора и примеры изображения трансформаторов на электрических схемах приведены на рис. 8.1а, б, в.

Основными элементами любого трансформатора являются стальной магнитопровод 1 и обмотки 2 и 3 (рис. 8.1а). Магнитопровод служит для размещения на нем обмоток и усиления индуктивной связи между обмотками. Поскольку магнитная проницаемость магнитопровода в сотни раз превышает магнитную проницаемость воздуха, то

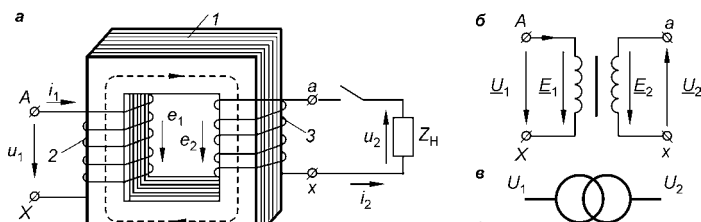


Рис. 8.1
Трансформатор

а — электромагнитная схема; *б, в* — условные изображения на электрических схемах.

магнитный поток, создаваемый токами в обмотках трансформатора, будет замыкаться в основном по магнитопроводу, что позволяет увеличить магнитный поток при прочих равных условиях и, следовательно, усилить индуктивную связь обмоток.

В зависимости от количества N обмоток трансформаторы бывают *двухобмоточными* ($N = 2$), *трехобмоточными* ($N = 3$) и *многообмоточными* ($N > 3$).

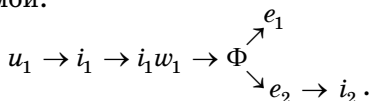
Первичной обмоткой трансформатора называют обмотку, к которой подводят электрическую энергию, а *вторичной* — обмотку, к которой подключают приемник электрической энергии. Величины, относящиеся к первичной или вторичной обмоткам, отмечают индексами 1 или 2 соответственно.

Обмотку, рассчитанную на более высокое напряжение, называют обмоткой *высшего напряжения* (ВН), а рассчитанную на более низкое напряжение — обмоткой *низшего напряжения* (НН). Выводы обмотки ВН однофазного трансформатора обозначают прописными латинскими буквами *A* и *X*, а обмотки НН — строчными латинскими буквами *a* и *x*.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Так, если к первичной обмотке подвести переменное напряжение u_1 , то в ней появится переменный ток i_1 . Ток i_1 создает переменную магнитодвижущую силу (МДС) $i_1 w_1$, которая, в свою очередь, создает переменный магнитный поток Φ , замыкающийся в основном по стальному магнитопроводу. Этот магнитный поток называют *основным* магнитным потоком. Основной магнитный поток сцепляется со всеми витками как первичной, так и вторичной обмоток трансформатора и, согласно закону электромагнитной индук-

ции, индуцирует в них переменные ЭДС e_1 и e_2 соответственно. Если теперь к зажимам вторичной обмотки подключить приемник электроэнергии, то под действием ЭДС e_2 в приемнике возникнет переменный ток i_2 .

Сказанное выше можно проиллюстрировать такой логической схемой:



Силовые трансформаторы эксплуатируются в современных электрических системах при напряжениях, изменяющихся во времени по синусоидальному закону. При этом основной магнитный поток также будет синусоидальным: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Этот магнитный поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции e_1 , а во вторичной обмотке — ЭДС взаимной индукции e_2 , равные

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \\ e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

где $E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m$ и $E_{2m} = \omega w_2 \Phi_m$ — амплитудные значения ЭДС.

Из формул (8.1) следует, что ЭДС e_1 и e_2 совпадают по фазе и каждая из них отстает по фазе от магнитного потока на $\pi/2$, поскольку обе ЭДС индуцируются одним и тем же магнитным потоком.

Действующие значения первичной и вторичной ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_m, \\ E_2 &= \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_2 \Phi_m. \end{aligned} \right\}$$

Поскольку ЭДС и магнитный поток изменяются во времени по синусоидальному закону, то можно записать выражения для комплексных ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_1 &= -j 4,44 f w_1 \underline{\Phi}_m, \\ \underline{E}_2 &= -j 4,44 f w_2 \underline{\Phi}_m, \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

где множитель $-j$ обусловлен сдвигом фаз между ЭДС и магнитным потоком.

Так как частота ЭДС одинакова и индуцируются они одним и тем же магнитным потоком, то первичная ЭДС отличается от вторичной только в том случае, если число витков w_1 и w_2 обмоток неодинаково. Чем больше число витков обмотки, тем большая ЭДС в ней индуцируется.

Отношение первичной ЭДС к вторичной, равное отношению чисел витков обмоток, называют *коэффициентом трансформации трансформатора*:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Коэффициент трансформации может быть как больше, так и меньше единицы.

Если необходимо повысить напряжение источника питания, то число витков вторичной обмотки делают больше числа витков первичной обмотки ($w_2 > w_1$). Такой трансформатор называют *повышающим*. Если это напряжение надо понизить, то делают $w_2 < w_1$. В этом случае трансформатор будет *понижающим*. Если требуется несколько различных значений вторичного напряжения, то на тот же магнитопровод наматывают несколько вторичных обмоток с различным числом витков.

||| При подключении первичной обмотки трансформатора к источнику переменного тока на зажимах вторичной обмотки индуцируется переменная ЭДС и вторичная обмотка становится источником питания, к которой можно присоединить какой-либо электроприемник.

Из принципа действия трансформатора следует, что трансформатор может работать только при переменном напряжении, так как при постоянном напряжении, подведенном к первичной обмотке, и, следовательно, при постоянном магнитном потоке в обмотках трансформатора не будут индуцироваться ЭДС.

8.3. УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРОВ

Ранее уже было отмечено, что основными конструктивными элементами трансформатора являются магнитопровод и обмотки.

Магнитопровод трансформаторов изготавливают из стальных листов толщиной 0,35...0,5 мм. В настоящее вре-

мя для этого применяют два вида электротехнической стали, обладающей высокой магнитной проницаемостью: горячекатаную сталь с высоким содержанием кремния или холоднокатаную сталь. Листы стали оксидируют или покрывают тонким (0,04...0,06 мм) слоем лака, поэтому при сборке магнитопровода из таких листов они оказываются изолированными друг от друга. Это позволяет уменьшить мощность потерь энергии в магнитопроводе от вихревых токов вследствие того, что при этом уменьшается площадь поперечного сечения листа, по которой замыкаются вихревые токи (рис. 8.2). Чем меньше толщина листа, тем меньше магнитный поток, сцепленный с листом, и, следовательно, тем меньше индуцированная в нем ЭДС E_v . Кроме того, уменьшение толщины листа и использование стали с повышенным содержанием кремния приводит к увеличению сопротивления вихревому току I_v . В результате вихревой ток и мощность потерь энергии на нагрев магнитопровода уменьшаются.

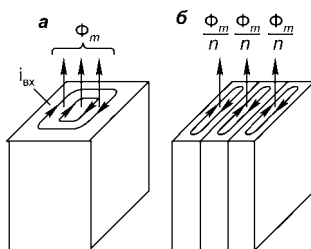


Рис. 8.2

Вихревые токи в магнитопроводе из стальных листов

По типу или конфигурации магнитопровода трансформаторы подразделяют на стержневые и броневые. В *стержневых трансформаторах* обмотки, насаженные на стержень магнитопровода, охватывают его (рис. 8.3а). В *броневых трансформаторах* магнитопровод частично охватывает обмотки и как бы «бронирует» их (рис. 8.3б). Часть магнитопровода, не охваченную обмотками, называют *ярмом*.

Трансформаторы большой и средней мощности обычно изготавливают стержневыми, так как они проще по конструкции, имеют лучшие условия для охлаждения

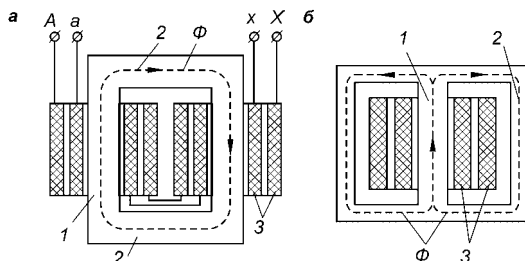


Рис. 8.3

Типы однофазных трансформаторов

а — стержневой; б — броневой; 1 — стержень; 2 — ярмо; 3 — обмотки.

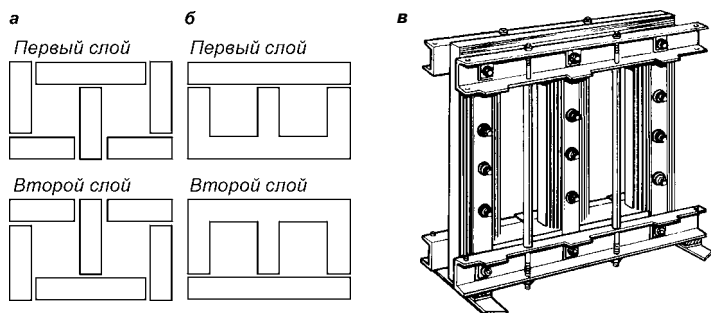


Рис. 8.4
Магнитопровод трансформатора
 а, б — схемы сборки; в — магнитопровод в сборе.

обмоток, что особенно важно в мощных трансформаторах, имеющих большие габариты. Магнитопровод таких трансформаторов набирают из отдельных пластин прямоугольной формы (рис. 8.4а). Для уменьшения магнитного сопротивления их набирают так, чтобы стыки пластин в двух соседних слоях были в разных местах. Аналогично выполняют магнитопроводы с двумя стержнями.

Трансформаторы малой мощности могут иметь магнитопровод, собранный из пластин, выполненных в форме буквы Ш, и прямоугольных полос (рис. 8.4б). На рис. 8.4в показан магнитопровод трехстержневого трансформатора в сборе. Стержни магнитопровода имеют квадратное или ступенчатое поперечное сечение (рис. 8.5), что позволяет при заданном значении магнитного потока или мощности уменьшить габариты обмотки, а значит, и всего трансформатора. Ядро обычно имеет квадратное сечение.

Магнитопровод броневого типа применяют для сухих трансформаторов малой мощности. Наружные броневые стержни этого магнитопровода частично защищают обмотки трансформатора от механических повреждений.

Магнитопроводы стержневых и броневых трансформаторов малой мощности можно навивать из узкой ленты электротехнической стали (рис. 8.6). Это позволяет уменьшить воздушные зазоры в магнитопроводе и снизить магнитное сопротивление, а следовательно, и ток холостого хода. В большинстве случаев ленточные магнитопроводы разрезают, чтобы на них легче было посадить заранее намотанные обмотки. Затем половинки магнитопроводов соединяют.

Рис. 8.5
*Поперечные сечения
 стержней трансформаторов*
 а — квадратное; б — ступенчатое.

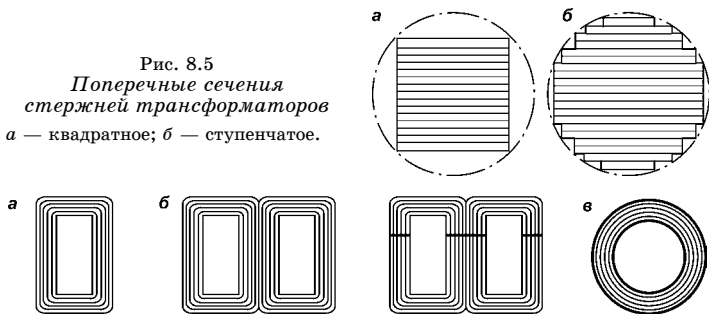


Рис. 8.6
Ленточные магнитопроводы
 а — стержневой; б — броневого; в — кольцевой.

В трансформаторах, работающих при высокой частоте, магнитопроводы изготовляют из порошковых материалов (пермаллой, ферриты).

Обмотки трансформаторов обычно выполняют из медного провода круглого или прямоугольного сечения. Для лучшей магнитной связи между обмотками их стремятся расположить как можно ближе друг к другу. Показанное на рис. 8.1а расположение обмоток на разных стержнях удобно для анализа принципа действия трансформатора. В действительности же обмотки (первичную и вторичную) располагают на одних и тех же стержнях, разделив каждую из них пополам (см. рис. 8.3а). Половинки обмоток соединяют последовательно или параллельно. Использование двух стержней позволяет приблизить обмотки к ним и тем самым при заданном числе витков уменьшить средний радиус обмоток и расход проводов. Обмотки изолируют как от стержня и ярма магнитопровода, так и друг от друга. В качестве изоляции применяют электротехнический картон, специальную бумагу или ткань, пропитанную лаком.

По расположению обмоток относительно друг друга различают *концентрические*, изготовленные в виде цилиндров (см. рис. 8.3), и *чередующиеся*, когда каждая из обмоток (1, 2 на рис. 8.7) состоит из нескольких частей (секций) в виде дисковых катушек,

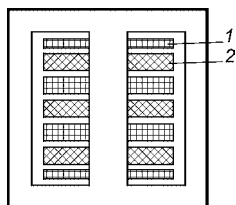


Рис. 8.7
*Чередующаяся
 (дисковая)
 обмотка броневого
 трансформатора*
 1 — обмотка низшего
 напряжения; 2 — об-
 мотка высшего напря-
 жения.

расположенных друг за другом по высоте стержня. В трансформаторах малой мощности обычно применяют concentрические обмотки, намотанные из провода круглого сечения. В трансформаторах средней мощности используют одно- или многослойные concentрические обмотки в виде цилиндров, выполненные из проводов прямоугольного сечения. В трансформаторах большой мощности concentрические обмотки состоят из последовательно соединенных дисковых спиральных катушек. Между ними есть горизонтальные каналы для охлаждающей жидкости. Чередующиеся обмотки применяют в основном в броне-вых трансформаторах. При этом ближе к ядру находится обмотка низшего напряжения.

По способу охлаждения трансформаторы делят на сухие и масляные. *Сухие* трансформаторы имеют естественное воздушное охлаждение, которое может быть использовано только для трансформаторов малой мощности. При

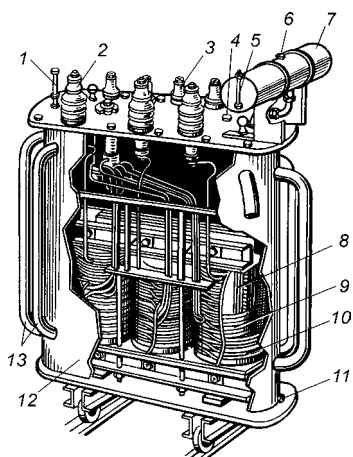


Рис. 8.8
Устройство
трехфазного масляного
трансформатора
средней мощности

1 — термометр; 2 — выводы обмотки ВН; 3 — выводы обмотки НН; 4, 6 — пробки для заливки масла; 5 — указатель уровня масла; 7 — расширитель; 8 — магнитопровод; 9 — обмотка НН; 10 — обмотка ВН; 11 — пробка для слива масла из бака; 12 — бак для масла; 13 — трубчатые радиаторы для охлаждения масла.

увеличении мощности увеличиваются интенсивность тепловыделения и нагрев обмоток. Чтобы обеспечить допустимую для изоляции температуру нагрева, применяют более интенсивные способы отвода теплоты. Для этого магнитопровод с обмотками помещают в специальный бак, заполненный трансформаторным маслом. Масло является одновременно и изолирующей, и охлаждающей средой. Интенсивность охлаждения обеспечивается как за счет большей по сравнению с воздухом теплопроводности, так и за счет того, что поверхность бака по сравнению с поверхностью трансформатора значительно больше. Этот способ охлаждения называют *естественным масляным охлаждением*.

У трансформаторов средней мощности для большей интенсивности охлаждения баки делают трубчатыми (рис. 8.8). Трубы, вваренные в стенки бака, образуют радиатор, в котором масло циркулирует за счет конвекции. В трансформаторах большой мощности применяют специальные вентиляторы для обдува трубок радиатора воздухом и даже систему *принудительного масляного охлаждения*, когда охлаждающее масло насосами прогоняется через специальные теплообменники, которые в свою очередь охлаждаются водой или воздухом.

При работе трансформатора токи в обмотках не остаются постоянными. С изменением тока изменяется степень нагрева масла и, следовательно, его объем. Чтобы при этом поверхность соприкосновения масла с воздухом и его увлажнение были минимальными, применяют так называемые *расширители* (7 на рис. 8.8), располагаемые выше бака трансформатора. На крышке бака трансформатора располагают изоляторы (2, 3) выводов обмоток, изготовленные из фарфора или стекла.

8.4.

УРАВНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРА

Кроме основного магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу и сцепленного с обеими обмотками, МДС первичной и вторичной обмоток создают так называемые *потоки рассеяния* $\Phi_{1\text{рас}}$ и $\Phi_{2\text{рас}}$, каждый из которых сцеплен только с той из обмоток, МДС которой он создан. У реальных трансформаторов обе обмотки размещают на одном стержне. Примерная картина распределения потоков рассеяния имеет вид, показанный на рис. 8.9. Хотя эти потоки невелики по сравнению с основным магнитным потоком, но пренебрегать ими нельзя.

Магнитные силовые линии потоков рассеяния замыкаются преимущественно по воздуху, поэтому индуктивности L_1 первичной и L_2 вторичной обмоток, обусловленные этими потоками, можно считать постоянными.

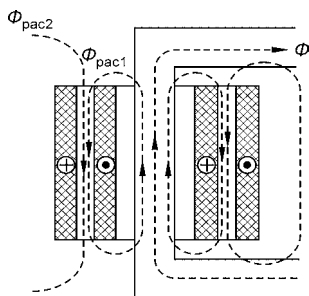


Рис. 8.9

Схема замыкания магнитных потоков рассеяния в трансформаторе с цилиндрическими обмотками

Если токи в обмотках изменяются во времени по синусоидальному закону, т. е. $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$ и $i_2 = I_{2m} \sin \omega t$, то потоки рассеяния также будут изменяться во времени, и в обмотках трансформатора при этом будут индуцироваться ЭДС самоиндукции, называемые *ЭДС рассеяния*:

$$\left. \begin{aligned} e_{1\text{pac}} &= -L_1 \frac{di_1}{dt} = -\omega L_1 I_{1m} \cos \omega t = \\ &= X_1 I_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = E_{1m\text{pac}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \\ e_{2\text{pac}} &= -L_2 \frac{di_2}{dt} = -\omega L_2 I_{2m} \cos \omega t = \\ &= X_2 I_{2m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = E_{2m\text{pac}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \right\}$$

где $E_{1m\text{pac}} = X_1 I_{1m}$ и $E_{2m\text{pac}} = X_2 I_{2m}$ — амплитудные значения этих ЭДС, а $X_1 = \omega L_1 = 2\pi f L_1$ и $X_2 = \omega L_2 = 2\pi f L_2$ — индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток соответственно, обусловленные потоками рассеяния.

Действующие значения ЭДС рассеяния

$$\begin{aligned} E_{1\text{pac}} &= \frac{E_{1m\text{pac}}}{\sqrt{2}} = \frac{X_1 I_{1m}}{\sqrt{2}} = X_1 I_1, \\ E_{2\text{pac}} &= \frac{E_{2m\text{pac}}}{\sqrt{2}} = \frac{X_2 I_{2m}}{\sqrt{2}} = X_2 I_2. \end{aligned}$$

Поскольку ЭДС рассеяния, как и токи в обмотках, изменяются по синусоидальному закону и, как видно из приведенных выше уравнений, отстают от них по фазе на $\pi/2$, то их можно записать в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_{1\text{pac}} &= -j\omega L_1 \underline{I}_1 = -jX_1 \underline{I}_1, \\ \underline{E}_{2\text{pac}} &= -j\omega L_2 \underline{I}_2 = -jX_2 \underline{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

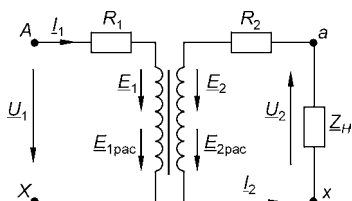


Рис. 8.10
Электрические схемы обмоток трансформатора

Зная устройство трансформатора и ЭДС, индуцируемые в его обмотках, нетрудно изобразить электрические схемы обмоток трансформатора (рис. 8.10). Здесь R_1 и R_2 — активные сопротивления обмоток, Z_H — комплексное сопротивление электроприемника, а вертикальная

линия между обмотками означает, что обмотки расположены на одном магнитопроводе.

При указанных на схеме (см. рис. 8.10) условных положительных направлениях токов, напряжений и ЭДС на основании второго закона Кирхгофа с учетом уравнений (7.3) можно написать уравнения напряжений для первичной и вторичной обмоток трансформатора в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 - \underline{E}_{1\text{рас}} + R_1 \underline{I}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 (R_1 + jX_1) = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1, \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2 + \underline{E}_{2\text{рас}} - R_2 \underline{I}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 (R_2 + jX_2) = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2, \end{aligned} \right\} \quad (8.4)$$

где $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ и $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ — комплексные сопротивления первичной и вторичной обмоток.

В силовых трансформаторах падения напряжений $Z_1 I_1$ и $Z_2 I_2$ в обмотках составляют не более нескольких процентов от напряжений U_1 и U_2 даже при номинальной нагрузке трансформатора, поэтому с некоторым приближением можно считать, что $U_1 \approx E_1$ и $U_2 \approx E_2$.

8.5. ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА

Холостым ходом трансформатора называют режим, когда его вторичная обмотка разомкнута, ток в ней $I_2 = 0$ (нагрузка отсутствует). В режиме холостого хода к первичной обмотке подведено напряжение u_1 , в ней существует ток холостого хода i_0 , а по магнитопроводу замыкается магнитный поток Φ , индуцирующий в первичной обмотке ЭДС e_1 и во вторичной — e_2 .

Ток холостого хода. Как было показано ранее, магнитный поток изменяется во времени по синусоидальному закону (см. рис. 8.11а). Изменение во времени тока i_0 , создающего этот поток, и самого потока Φ определяется петлей гистерезиса.

На рис. 8.11б показана только часть петли гистерезиса, соответствующая положительным значениям магнитного потока (стрелочками показаны восходящая и нисходящая ветви петли гистерезиса). Восходящая ветвь соответствует четверти периода, когда магнитный поток увеличивается, а нисходящая — четверти периода, когда магнитный поток уменьшается.

На рис. 8.11в показана зависимость тока холостого хода $i_0 = f(t)$ в течение полупериода, найденная графическим

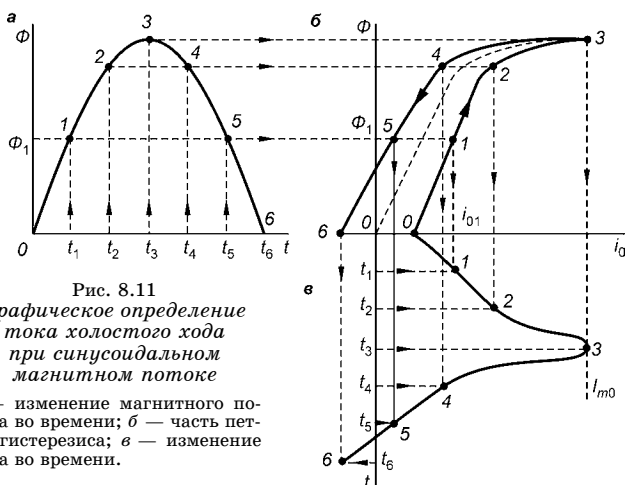


Рис. 8.11
Графическое определение
тока холостого хода
при синусоидальном
магнитном потоке
а — изменение магнитного пото-
ка во времени; б — часть пет-
ли гистерезиса; в — изменение
тока во времени.

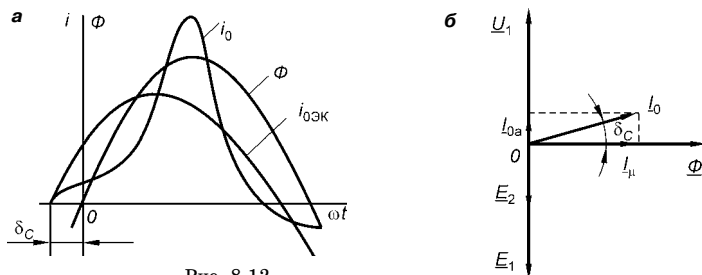


Рис. 8.12
Диаграммы для холостого хода трансформатора с
учетом потерь в стальном магнитопроводе

путем. В качестве примера покажем определение тока i_0 , соответствующее моменту времени t_1 (точка 1). Для момента времени t_1 на рис. 8.11а находим магнитный поток Φ_1 . Этому потоку на восходящей ветви петли гистерезиса в данный момент времени соответствует ток i_{01} зависимости $i_0(t)$. Аналогично находят остальные точки этой зависимости.

Как видно из рис. 8.11, ток холостого хода несинусоидален. На практике при расчетах трансформатора и анализе его работы несинусоидальный ток холостого хода заменяют эквивалентным синусоидальным током (рис. 8.12а), амплитудное значение которого равно $I_{0m} = \sqrt{2}I$, где

$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_0^2 dt}$ — действующее значение тока i_0 . Эквива-

лентный синусоидальный ток опережает по фазе синусоидальный магнитный поток на угол δ_c (см. рис. 8.12а).

Замена тока i_0 эквивалентным синусоидальным током позволяет на основании уравнений (8.4) построить векторную диаграмму трансформатора (рис. 8.12б), на которой за начальный вектор принят вектор магнитного потока Φ . Вектор тока I_0 опережает магнитный поток Φ на угол δ_c . Векторы ЭДС E_1 и E_2 отстают по фазе от вектора Φ на угол $\pi/2$. Поскольку падением напряжения $I_0 Z_1$ в первичной обмотке при холостом ходе можно пренебречь, то вектор напряжения $U_1 = -E_1$.

Из векторной диаграммы видно, что комплексный ток холостого хода I_0 кроме индуктивной составляющей I_{μ} , совпадающей по фазе с магнитным потоком и называемой *намагничивающим током*, имеет активную составляющую I_{0a} , совпадающую по фазе с напряжением U_1 . Эта составляющая тока определяет ту часть электроэнергии, которая преобразуется в тепловую энергию преимущественно в магнитопроводе вследствие явления гистерезиса и возникновения вихревых токов в нем при его *перемагничивании* переменным магнитным потоком. При этом вся тепловая энергия затрачивается на нагрев магнитопровода.

Мощность потерь энергии в режиме холостого хода, затрачиваемой на нагрев магнитопровода,

$$P_{п0} = U_1 I_{0a} = U_1 I_0 \sin \delta_c.$$

Так как эти потери пропорциональны $\sin \delta_c$, то угол δ_c называют углом потерь в стали магнитопровода. При выполнении магнитопровода из специальной электротехнической листовой стали этот угол равен $5...10^\circ$, а ток холостого хода практически равен намагничивающему току, т. е. $I_0 \approx I_{\mu}$.

В силовых трансформаторах малой мощности ток холостого хода не превышает 10% от номинального тока первичной обмотки, а у трансформаторов большой мощности он уменьшается до 2,5...3%. Хотя ток холостого хода невелик, его большая индуктивная составляющая снижает коэффициент мощности энергосистемы, а высшие гармоники неблагоприятно воздействуют на работу электрооборудования.

Ток I_0 и мощность потерь энергии $P_{п0}$ холостого хода являются важными эксплуатационными параметрами

трансформатора. Их указывают в каталогах на трансформаторы и в табличке, прикрепляемой к трансформатору, где, кроме этих параметров, указывают полную мощность трансформатора $S_{\text{ном}}$, номинальные напряжения $U_{1\text{ном}}$, $U_{2\text{ном}}$ и токи $I_{1\text{ном}}$, $I_{2\text{ном}}$ обмоток ВН и НН, КПД и др. Для определения тока холостого хода I_0 и мощности потери энергии $P_{\text{п0}}$ проводят опыт холостого хода.

Опыт холостого хода. Для проведения опыта холостого хода собирают электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 8.13. Подводимое к первичной обмотке напряжение U_1 изменяют от 0 до $1,1U_{1\text{ном}}$ с помощью регулятора напряжения или автотрансформатора (на схеме не показаны). Вторичная обмотка трансформатора разомкнута, к ее зажимам присоединен вольтметр V_2 для измерения напряжения U_2 . Измеряют напряжения U_1 и U_2 , ток холостого хода I_0 и активную мощность P_0 энергии, потребляемой трансформатором в режиме холостого хода.

По данным измерений строят зависимости I_0 и P_0 от U_1 (рис. 8.14), называемые *характеристиками холостого хода* трансформатора. Напряжение U_1 по значению практически равно ЭДС E_1 , т. е.

$U_1 = E_1 = 4,44f w_1 \Phi_m = c_e \Phi_m$. Зависимость $\Phi_m = f(I_0)$ описывает кривую намагничивания; следовательно, $I_0 = f(U_1)$ также имеет вид кривой намагничивания.

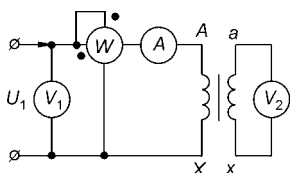


Рис. 8.13
Схема опыта холостого
хода трансформатора

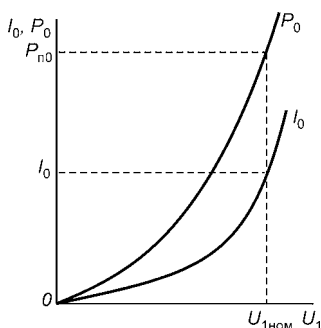


Рис. 8.14
Характеристики холостого
хода трансформатора

При холостом ходе ток $I_2 = 0$, а ток первичной обмотки $I_1 = I_0$ мал, поэтому мала и мощность потерь энергии, затрачиваемой на нагрев обмоток, и ими можно пренебречь. Следовательно, измеренная ваттметром мощность практически равна мощности потерь энергии в магнитопроводе, пропорциональной квадрату магнитного потока или напряжения U_1 , т. е. $P_0 = P_{\text{п0}} = cU_1^2$, и зависимость $P_0(U_1)$ имеет вид параболы.

Построенные характеристики позволяют определить значение тока холостого хода I_0 и мощность потерь холостого хода $P_{\text{п0}}$, соответствующие номинальному напряжению $U_{\text{ном}}$. Эти важнейшие параметры и указывают в паспортных данных трансформатора (ток холостого хода — в процентах от номинального тока первичной обмотки, а потери холостого хода — в киловаттах). По значению этих параметров можно судить о качестве стали магнитопровода и качестве его сборки. Кроме того, из опыта холостого хода можно определить коэффициент трансформации трансформатора: $k = E_1/E_2 = U_{10}/U_{20}$.

8.6. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

Как было показано выше, для первичной обмотки справедливо уравнение $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1$, причем падением напряжения $\underline{I}_1 \underline{Z}_1$ можно пренебречь и считать, что

$$\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1 = j4,44fw_1\Phi_m,$$

откуда при $\underline{U}_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$ получим, что

$$\Phi_m \approx \frac{\underline{U}_1}{j4,44fw_1} = \text{const}.$$

Это означает, что при напряжении $\underline{U}_1 = \text{const}$ и частоте $f = \text{const}$, что соответствует условиям эксплуатации трансформатора, основной магнитный поток, созданный МДС холостого хода, будет оставаться практически неизменным при любых значениях тока, а сумма напряжений \underline{U}_1 и ЭДС \underline{E}_1 — равной нулю:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 = 0. \quad (8.5)$$

Так как магнитным потоком Φ во вторичной обмотке индуцируется ЭДС \underline{E}_2 , то к ней можно присоединить электроприемник (нагрузку) $\underline{Z}_\text{н}$ (см. рис. 8.15). Под действием этой ЭДС в замкнутой цепи вторичной обмотки возникает ток \underline{I}_2 .

Первичная и вторичная обмотки имеют одинаковое направление намотки, и поэтому электрические потенциалы их начал совпадают по фазе. В первичной обмотке сама обмотка играет роль внешней цепи, и ток \underline{I}_1 в ней направлен от начала обмотки. В цепи вторичной обмотки внешней цепью является электроприемник, поэтому вторичный ток \underline{I}_2 следует направить от начала обмотки к электроприемнику.

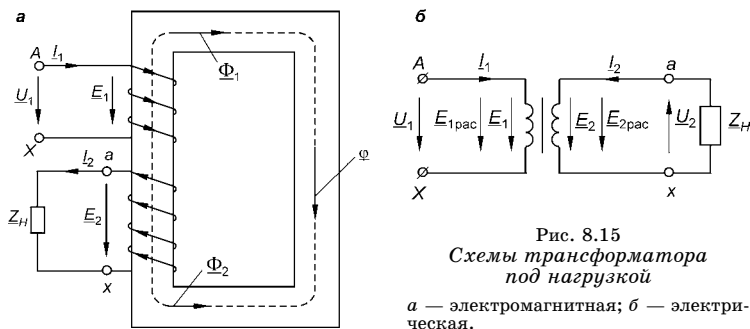


Рис. 8.15
Схемы трансформатора
под нагрузкой

a — электромагнитная; *б* — электрическая.

Вторичный ток I_2 создает МДС $I_2 w_2$, которая, в свою очередь, создает вторичный магнитный поток Φ_2 , который замыкается в основном по магнитопроводу (см. рис. 8.15*a*). Суммарный магнитный поток $\Phi + \Phi_2$ становится отличным от существовавшего до сих пор потока Φ , и в первичной обмотке будет индуцироваться другая ЭДС, равенство (8.5) нарушается. Теперь $U_1 + E_1 = \Delta E_1 \neq 0$. Вследствие этого в первичной обмотке возникает дополнительная составляющая тока $I_{1к}$, называемая компенсационным током. МДС $I_{1к} w_1$ создает магнитный поток Φ_1 , который равен потоку Φ_2 и направлен противоположно ему. В результате в магнитопроводу восстанавливается прежнее значение магнитного потока Φ , определяемое напряжением U_1 и частотой f .

Таким образом, чем больше ток I_2 , тем больше ток $I_{1к}$, и, следовательно, больше ток первичной обмотки I_1 и мощность $S_1 = U_1 I_1$. Так осуществляется передача электрической энергии от первичной обмотки ко вторичной, не связанной с ней электрически. Сначала электрическая энергия преобразуется в энергию магнитного поля, а затем энергия магнитного поля снова преобразуется в электрическую энергию.

8.7. УРАВНЕНИЯ МАГНИТОДВИЖУЩИХ СИЛ И ТОКОВ

В режиме нагрузки ток I_1 в первичной обмотке и ток I_2 во вторичной обмотке создают МДС $I_1 w_1$ и $I_2 w_2$ соответственно. Как было показано ранее, создаваемые этими МДС магнитные потоки, замыкаясь по магнитопроводу, складываются, и при любом значении токов I_1 и I_2

их сумма остается постоянной и равной потоку Φ . Этот же магнитный поток создается и в режиме холостого хода МДС $\underline{I}_0 w_1$. Из условия постоянства магнитного потока при $\underline{U}_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$ следует, что при тех же условиях сумма МДС первичной и вторичной обмоток всегда остается постоянной, равной $\underline{I}_0 w_1$, и уравнение МДС для трансформатора имеет вид

$$\underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2 = \underline{I}_0 w_1. \quad (8.6)$$

Разделив все члены уравнения (7.6) на w_1 , получим

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \underline{I}_0, \quad (8.7)$$

или

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0.$$

Из (8.7) получим уравнение, называемое *уравнением токов*:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2), \quad (8.8)$$

где $\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k} \underline{I}_2$ — составляющая тока \underline{I}_1 , обусловленная током \underline{I}_2 во вторичной обмотке. Ток \underline{I}'_2 называют также *приведенным вторичным током*.

В режиме холостого хода $\underline{I}_1 = \underline{I}_0$. В режиме нагрузки, как видно из (8.8), первичный ток имеет две составляющие: ток холостого хода \underline{I}_0 и приведенный вторичный ток \underline{I}'_2 с противоположным знаком. С увеличением тока нагрузки увеличивается и первичный ток.

Поскольку у мощных трансформаторов ток холостого хода составляет 2...3% от номинального первичного тока, то иногда током \underline{I}_0 пренебрегают и считают, что $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$, или $\underline{I}_1 = \underline{I}'_2$.

8.8. ПАРАМЕТРЫ ПРИВЕДЕННОЙ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ

Обычно число витков w_1 первичной обмотки трансформатора не равно числу витков w_2 вторичной обмотки. Это приводит к ряду затруднений при изучении режимов работы трансформаторов и при расчете электрических цепей, элементами которых они являются.

Во-первых, трансформаторы соединяют различные участки цепи электромагнитным путем, электрически

же эти участки остаются несвязанными. При $w_2 \neq w_1$ ЭДС E_1 и E_2 первичной и вторичной обмоток также не равны. Если в электрической цепи последовательно включены n трансформаторов, то при ее расчете приходится n раз изменять по значению ток и напряжение.

Во-вторых, при передаче электроэнергии происходит потеря напряжения в первичной и вторичной обмотках трансформатора. Так как номинальные напряжения и токи обмоток отличаются друг от друга в десятки раз и их активные и индуктивные сопротивления различны, то потери напряжения в обмотках также различаются в десятки раз. Поэтому суммирование потерь напряжения в обмотках (в вольтах) не имеет никакого физического смысла, хотя понятно, что на значение вторичного напряжения влияют как потери напряжения во вторичной обмотке, так и потери напряжения в первичной обмотке трансформатора. Чтобы преодолеть эти затруднения, обе обмотки трансформатора приводят к одному числу витков (обычно вторичную к первичной). Таким образом получают *приведенную вторичную обмотку*, имеющую w_1 витков. Так как число витков обеих обмоток становится одинаковым, то ЭДС обмоток будут равны и совпадают по фазе.

При приведении необходимо выполнить условие, чтобы энергетические параметры (мощность, мощность потерь энергии) приводимой обмотки не изменились и не повлияли на энергетические соотношения в трансформаторе. ЭДС, напряжение, ток и сопротивления приведенной обмотки обозначают теми же буквами, только со штрихом сверху:

$$E'_2, U'_2, I'_2, R'_2, X'_2, Z'_2.$$

Так как приведенная вторичная обмотка имеет w_1 витков, то ЭДС E'_2 в w_1/w_2 раз больше реальной ЭДС E_2 :

$$E'_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2} = kE_2 = E_1. \quad (8.9)$$

Таким образом, приведенная ЭДС в k раз больше реальной и всегда равна первичной ЭДС.

Приведенные напряжение и ЭДС рассеяния вторичной обмотки определяются аналогично:

$$U'_2 = kU_2, \quad E'_{2\text{рас}} = kE_{2\text{рас}}.$$



Исходя из условия равенства полных мощностей приведенной и реальной обмоток $E'_2 I'_2 = E_2 I_2$, получаем

$$I'_2 = \frac{E_2}{E'_2} I_2 = \frac{I_2}{k}. \quad (8.10)$$

Следовательно, приведенный ток в k раз отличается от реального тока во вторичной обмотке.

Из условия равенства потерь активной мощности в приведенной и реальной обмотках $I'^2_2 R'_2 = I^2_2 R_2$ трансформатора получаем выражение для приведенного активного сопротивления:

$$R'_2 = \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 R_2 = k^2 R_2. \quad (8.11)$$

Аналогичны соотношения для индуктивного и полного сопротивлений:

$$X'_2 = k^2 X_2, \quad Z'_n = k^2 Z_n.$$

Итак, приведенные сопротивления вторичной обмотки в k^2 раз отличаются от реальных сопротивлений.

Это равнозначно тому, что если приемник электрической энергии с сопротивлением Z подключить к источнику переменного напряжения через трансформатор с коэффициентом трансформации k , то его сопротивление по отношению к источнику энергии изменится в k^2 раз. Это свойство трансформаторов широко используют в радиотехнических устройствах для согласования внутреннего сопротивления источника энергии с сопротивлением приемника для получения согласованного режима работы.

8.9.

СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И УРАВНЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Схемой замещения трансформатора называют электрическую схему, эквивалентную действительной (см. рис. 8.15б), в которой все контуры электрически связаны друг с другом. Параметрами такой цепи являются параметры обмоток трансформатора и взаимно индуктивной связи.

Как было показано в § 8.4, магнитный поток рассеяния $\Phi_{1\text{рас}}$ индуцирует в первичной обмотке ЭДС рассеяния $\underline{E}_{1\text{рас}} = -jX_1 I_1$, которую можно представить как падение напряжения с обратным знаком: $\Delta \underline{U}_{1\text{рас}} = -\underline{E}_{1\text{рас}} = jX_1 I_1$,

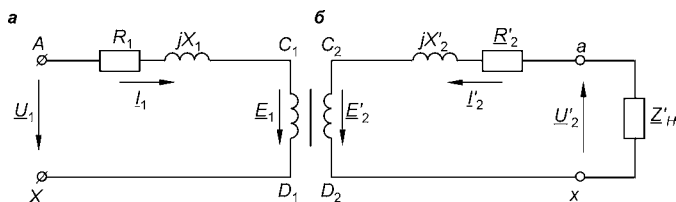


Рис. 8.16
Схемы замещения обмоток трансформатора
а — первичной; б — вторичной.

где X_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки, обусловленное потоком рассеяния.

Тогда первичная обмотка трансформатора, в отличие от изображенной на рис. 8.10, может быть изображена на схеме включенными последовательно элементом с активным сопротивлением R_1 , равным активному сопротивлению проводов обмотки, элементом с индуктивным сопротивлением X_1 и элементом C_1-D_1 , на зажимах которого основным магнитным потоком Φ индуцируется ЭДС E_1 (рис. 8.16а). К зажимам А-Х обмотки подводят напряжение \underline{U}_1 .

Аналогично можно изобразить схему приведенной вторичной обмотки.

Так как \underline{E}_1 и \underline{E}'_2 равны по модулю и совпадают по фазе, то точки C_1 и C_2 , D_1 и D_2 имеют соответственно равные потенциалы, и их можно объединить в одну точку (точки С и D на рис. 8.17а). В результате получаем схему электрической связанной цепи, которая является схемой замещения трансформатора. Сопротивление \underline{Z}_μ

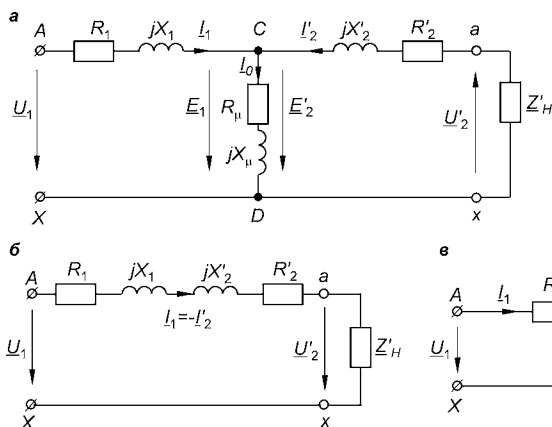


Рис. 8.17
Схемы замещения трансформатора
а — Т-образная с ветвью намагничивания; б, в — упрощенные.

ветви, на зажимах которой действуют ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}'_2 , является сопротивлением ветви намагничивания, по которой замыкается ток \underline{I}_0 , создающий магнитный поток Φ , индуцирующий эти ЭДС.

В режиме холостого хода, когда вторичная обмотка разомкнута и $\underline{I}'_2 = 0$, ток холостого хода \underline{I}_0 замыкается через последовательно включенные элементы с сопротивлениями R_1 , X_1 , R_μ и X_μ . Сопротивление цепи практически равно сопротивлению \underline{Z}_μ . Поэтому считают, что при холостом ходе $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1$. Мощность потерь энергии $\underline{I}_0^2 R_\mu$ в элементе R_μ равна мощности холостого хода, т. е. мощности потерь энергии в магнитопроводе трансформатора.

В режиме нагрузки, когда \underline{Z}'_n имеет конечное значение, для точки C по первому закону Кирхгофа можно написать уравнение токов (8.7). Как видно из рис. 8.17а, при изменении сопротивления нагрузки \underline{Z}'_n изменяется ток \underline{I}'_2 , что приводит к такому же изменению тока \underline{I}_1 .

Пользуясь схемой замещения (рис. 8.17а), на основании законов Кирхгофа можно написать уравнения напряжений и токов приведенного трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(R_1 + jX_1) = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1\underline{Z}_1, \\ \underline{U}'_2 &= \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2(R'_2 + jX'_2) = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2\underline{Z}'_2, \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2), \end{aligned} \right\} \quad (8.12)$$

где $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$, $\underline{Z}'_2 = R'_2 + jX'_2$ — комплексные электрические сопротивления первичной и приведенной вторичной обмоток соответственно, а их полные сопротивления равны $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$, $Z'_2 = \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}$.

Из этих уравнений следует, что подводимое к первичной обмотке напряжение \underline{U}_1 уравнивается основной ЭДС \underline{E}_1 , а также активным и индуктивным падениями напряжения на этой обмотке, а напряжение \underline{U}'_2 на зажимах вторичной обмотки трансформатора отличается от ЭДС на значение активного и индуктивного падений напряжения на вторичной обмотке.

При токах нагрузки трансформатора, близких к номинальным, током \underline{I}_0 в ветви намагничивания, равным току холостого хода, можно пренебречь, что позволяет упростить схему замещения (рис. 8.17а), заменив ее схемой, представленной на рис. 8.17б, в которой $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$.

Сложив активные и индуктивные сопротивления последовательно включенных элементов схемы (см. рис. 8.17б), получим упрощенную схему замещения трансформатора (рис. 8.17в), в которой активное сопротивление $R_k = R_1 + R'_2$, а индуктивное $X_k = X_1 + X'_2$.

8.10. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ПРИВЕДЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Векторную диаграмму строят на основании уравнений (8.12). За начальный вектор удобнее принять вектор магнитного потока Φ (рис. 8.18), так как он является общим для обеих обмоток. Под некоторым углом в сторону опережения по фазе проводят вектор тока холостого хода I_0 . Затем под углом $\pi/2$ в сторону отставания проводят векторы ЭДС E_1 и E'_2 , равные по значению.

Дальнейшее построение векторной диаграммы определяется характером нагрузки, т. е. соотношением между активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями нагрузки. При активно-индуктивном характере нагрузки вектор вторичного тока I'_2 , который одновременно является током нагрузки, проводят под углом ψ_2 к вектору ЭДС E'_2 (рис. 8.18а), причем

$$\psi_2 = \arctg \frac{X'_2 + X'_n}{R'_2 + R'_n},$$

где R'_n и X'_n — приведенные активное и индуктивное сопротивления нагрузки.

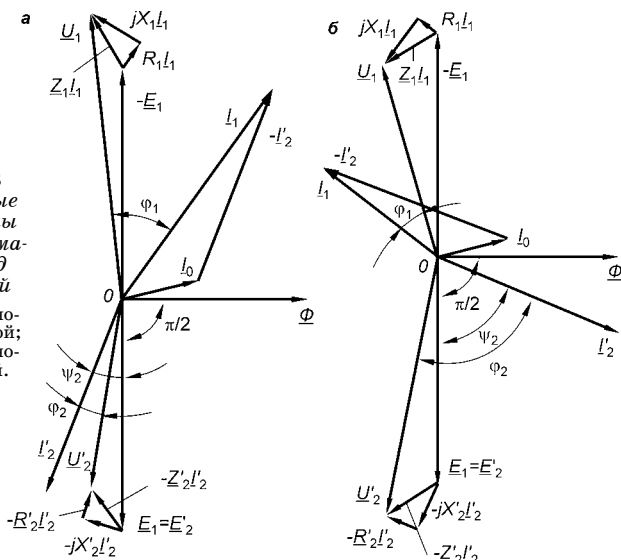
Вектор вторичного напряжения U'_2 находят из уравнения (8.12). Согласно этому уравнению, к вектору E'_2 необходимо прибавить векторы падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях вторичной обмотки (с обратными знаками).

Поскольку вектор $jX'_2 I'_2$ падения напряжения на индуктивном сопротивлении опережает вектор тока I'_2 на угол $\pi/2$, вектор $-jX'_2 I'_2$ с обратным знаком проводят в сторону отставания (рис. 8.18а). Затем от конца вектора $-jX'_2 I'_2$ проводят вектор $-R'_2 I'_2$, направленный противоположно вектору тока I'_2 . Вектор, соединяющий точку O с концом вектора $-R'_2 I'_2$, и будет вектором вторичного напряжения U'_2 . Он опережает ток I'_2 на угол φ_2 . Вектор первичного тока I_1 находят из уравнения токов (8.12).



Рис. 8.18
Векторные
диаграммы
трансформа-
тора под
нагрузкой

a — активно-
индуктивной;
б — активно-
емкостной.



К вектору тока холостого хода \underline{I}_0 прибавляют вектор приведенного вторичного тока $-\underline{I}'_2$.

Построение векторной диаграммы заканчивают построением вектора первичного напряжения \underline{U}_1 , который находят из уравнения (8.12). Для этого откладывают вектор ЭДС $-\underline{E}_1$, а к нему пристраивают вектор падения напряжения на активном сопротивлении R_1 первичной обмотки, параллельный вектору тока \underline{I}_1 , и вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении X_1 первичной обмотки, опережающий вектор тока на угол $\pi/2$. Замыкающий вектор и будет вектором \underline{U}_1 .

Как видно из диаграммы, угол φ_1 несколько больше, чем угол φ_2 . Это объясняется наличием индуктивной намагничивающей составляющей в токе холостого хода, а следовательно, и в первичном токе.

При построении векторных диаграмм для наглядности векторы падения напряжения строят в увеличенном масштабе, так как модули падений напряжения на сопротивлениях обмоток очень малы по сравнению с модулями ЭДС и напряжения на зажимах обмоток. У трансформаторов большой и средней мощности активное сопротивление обмоток и падение напряжения на нем соответственно много меньше индуктивного сопротивления и падения напряжения на нем.

У мощных трансформаторов ток холостого хода, как указывалось ранее, составляет 2...3% от номинального первичного тока. В режимах, близких к номинальному, такой незначительный ток практически не оказывает никакого влияния на первичный ток. В этом случае на векторной диаграмме можно не строить вектор тока холостого хода.

На рис. 8.18б построена векторная диаграмма трансформатора для случая активно-емкостной нагрузки. Вектор

тока \underline{I}'_2 откладывают под углом ψ_2 в сторону опережения вектора ЭДС \underline{E}'_2 . Остальное построение диаграммы проводят аналогично.

Если учесть, что $\underline{E}_1 = \underline{E}'_2$, то складывая первые два уравнения в системе (8.12), получим

$$\underline{U}_1 = -\underline{U}'_2 - R'_2 \underline{I}'_2 - jX'_2 \underline{I}'_2 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1. \quad (8.13)$$

Пренебрегая током холостого хода и принимая $\underline{I}'_2 = -\underline{I}_1$, уравнение (8.13) можно записать в виде

$$\underline{U}_1 = -\underline{U}'_2 + R_{\kappa} \underline{I}_1 + jX_{\kappa} \underline{I}_1, \quad (8.14)$$

где $R_{\kappa} = R_1 + R'_2$, $X_{\kappa} = X_1 + X'_2$.

Уравнение (8.14) является уравнением напряжений для трансформатора. По нему можно построить векторную диаграмму, измененную по сравнению с диаграммой, приведенной на рис. 8.18. Построение диаграммы удобно начать с вектора напряжения \underline{U}'_2 (рис. 8.19). В случае активно-индуктивной нагрузки вектор тока \underline{I}'_2 проводят под углом φ_2 в сторону отставания от вектора напряжения \underline{U}'_2 , причем $\varphi_2 = \arctg(X_{\text{н}}/R_{\text{н}})$. Вектор тока \underline{I}_1 равен и противоположен току \underline{I}'_2 . В итоге находят вектор первичного напряжения \underline{U}_1 .

Рис. 8.19
Векторная
диаграмма
упрощенной
схемы замещения
трансформатора

8.11.

КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Режимом короткого замыкания трансформатора называют такой режим, когда выводы вторичной обмотки замкнуты проводом с сопротивлением, равным нулю ($Z_{\text{н}} = 0$). Короткое замыкание трансформатора в услови-

ях эксплуатации создает аварийный режим, так как вторичный ток, а следовательно, и первичный увеличиваются в несколько раз по сравнению с номинальным. Поэтому в цепях с трансформаторами предусматривают защиту, которая при коротком замыкании автоматически отключает трансформатор.

Напряжение короткого замыкания. В лабораторных условиях можно провести испытательное короткое замыкание трансформатора, при котором накоротко замыкают зажимы вторичной обмотки, а к первичной подводят такое напряжение, при котором ток в первичной обмотке не превышает номинального значения ($I_K \leq I_{1\text{ном}}$). Напряжение U_K , при котором $I_1 = I_{1\text{ном}}$, называют напряжением испытательного короткого замыкания трансформатора или просто *напряжением короткого замыкания*. Это напряжение обычно выражают в процентах от номинального напряжения $U_{1\text{ном}}$ и обозначают u_K , причем

$$u_K = \frac{U_K}{U_{1\text{ном}}} 100\%.$$

Это значение u_K указывают в паспорте трансформатора и в каталогах на трансформаторы.

Напряжение короткого замыкания зависит от высшего напряжения обмоток трансформатора и увеличивается с его повышением. Так, например, при высшем напряжении 6...10 кВ $u_K = 5,5\%$, при 35 кВ $u_K = 6,5...7,5\%$, при 110 кВ $u_K = 10,5\%$ и т. д.

При напряжении U_K , составляющем 5...10% от номинального первичного напряжения, намагничивающий ток (ток холостого хода) уменьшается в 10...20 раз или еще более значительно. Поэтому в режиме короткого замыкания считают, что $\underline{I}_1 = -\underline{I}'_2$. Основной магнитный поток Φ также уменьшается в 10...20 раз, и потоки рассеяния обмоток становятся соизмеримыми с основным потоком.

Так как при коротком замыкании вторичной обмотки трансформатора напряжение на ее зажимах $U_2 = 0$, уравнение напряжения для нее принимает вид

$$\underline{E}'_2 = R'_2 \underline{I}'_2 + jX'_2 \underline{I}'_2,$$

а уравнение (8.14) записывают как

$$\underline{U}_K = R_K \underline{I}_1 + jX_K \underline{I}_1. \quad (8.15)$$

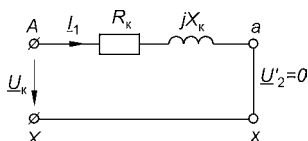


Рис. 8.20
Схема замещения трансформатора при коротком замыкании

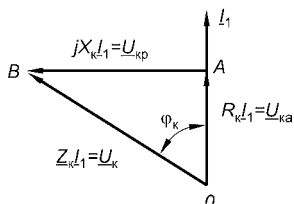


Рис. 8.21
Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании

маторов с номинальной мощностью 5...50 кВ·А $X_k/R_k = 1...2$; с номинальной мощностью 6300 кВ·А и более $X_k/R_k = 10$ и более. Поэтому считают, что у трансформаторов большой мощности $U_k = U_{кр}$, а полное сопротивление $Z_k = X_k$.

Опыт короткого замыкания. Этот опыт, как и опыт холостого хода, проводят для определения параметров трансформатора. Собирают электрическую цепь, соответствующую схеме (рис. 8.22), в которой вторичная обмотка замкнута накоротко металлической перемычкой или проводником с сопротивлением, близким к нулю. К первичной обмотке подводят такое напряжение, при котором ток в ней равен номинальному значению $I_{1ном}$. Измеряют напряжение U_k , ток $I_{1ном}$ и активную мощность P_k потребляемой энергии. В режиме короткого замыкания U_k очень мало, поэтому мощность потерь энергии в магнитопроводе $P_{п0} \sim U_1^2$ в сотни раз меньше, чем при номинальном напряжении. Таким образом, можно считать, что $P_{п0} = 0$, и измеряемая ваттметром мощность $P_{пк}$ — это мощность потерь энергии, затрачиваемой на

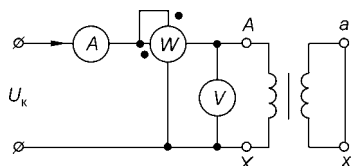


Рис. 8.22
Схема опыта короткого замыкания трансформатора

Этому уравнению соответствует схема замещения трансформатора, изображенная на рис. 8.20.

Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании, соответствующая уравнению (8.15) и схеме рис. 8.20, показана на рис. 8.21. Напряжение короткого замыкания U_k имеет активную $U_{ка}$ и реактивную $U_{кр}$ составляющие. Угол φ_k между векторами напряжения и тока зависит от соотношения между активной и реактивной индуктивной составляющими сопротивления трансформатора ($\varphi_k = \arctg(X_k/R_k)$). У трансформаторов с номинальной мощностью 5...50 кВ·А $X_k/R_k = 1...2$; с номинальной мощностью 6300 кВ·А и более $X_k/R_k = 10$ и более. Поэтому считают, что у трансформаторов большой мощности $U_k = U_{кр}$, а полное сопротивление $Z_k = X_k$.

Этому опыту соответствует схема замещения трансформатора, изображенная на рис. 8.20. Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании, соответствующая уравнению (8.15) и схеме рис. 8.20, показана на рис. 8.21. Напряжение короткого замыкания U_k имеет активную $U_{ка}$ и реактивную $U_{кр}$ составляющие. Угол φ_k между векторами напряжения и тока зависит от соотношения между активной и реактивной индуктивной составляющими сопротивления трансформатора ($\varphi_k = \arctg(X_k/R_k)$). У трансформаторов с номинальной мощностью 5...50 кВ·А $X_k/R_k = 1...2$; с номинальной мощностью 6300 кВ·А и более $X_k/R_k = 10$ и более. Поэтому считают, что у трансформаторов большой мощности $U_k = U_{кр}$, а полное сопротивление $Z_k = X_k$.

нагрев обмоток трансформатора. Поэтому можно считать, что мощность $P_{\text{пк}}$ соответствует электрическим потерям в обмотках трансформатора. Ее называют *электрическими потерями* или *потерями короткого замыкания*.

По данным измерений определяют следующие три параметра трансформатора:

1) напряжение короткого замыкания $u_k = (U_k/U_{\text{ном}}) \times 100\%$;

2) мощность потерь короткого замыкания $P_{\text{пк}}$ при $I_1 = I_{\text{ном}}$;

3) полное, активное и индуктивное сопротивления трансформатора:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{\text{ном}}}; \quad R_k = \frac{P_{\text{пк}}}{I_{\text{ном}}^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Зная сопротивления Z_k , R_k и X_k трансформатора, можно построить *треугольник напряжений короткого замыкания* (треугольник OAB на рис. 8.21), а также определить активную и индуктивную составляющие напряжения короткого замыкания: $U_{\text{ка}} = U_k \cos \varphi_k$; $U_{\text{кр}} = U_k \sin \varphi_k$.

8.12.

ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

При проведении расчетов электрической цепи с трансформатором согласно рис. 8.17а трансформатор может быть представлен в виде элемента с сопротивлением $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$, включенного последовательно с нагрузкой. Тогда, принимая во внимание, что действующее значение тока $I_1 = I'_2$ (см. рис. 8.17б), по второму закону Кирхгофа можно записать

$$\underline{U}_1 = \underline{U}'_2 + \underline{Z}_k I'_2.$$

Величина $\underline{Z}_k I'_2 = \underline{U}_1 - \underline{U}'_2$, представляющая векторную разность между напряжениями на первичной и вторичной обмотках, есть падение напряжения на трансформаторе. Хотя падение напряжения пропорционально току нагрузки, в общем случае оно не определяет количественно соотношения между значениями напряжений U_1 и U'_2 .

Для большинства эксплуатируемых электроустановок наиболее важно знать именно количественное изменение вторичного напряжения с ростом тока нагрузки по

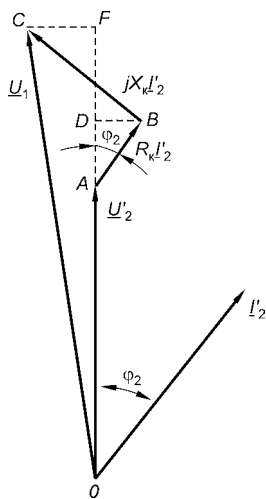


Рис. 8.23
Векторная диаграмма
для определения
потери напряжения
на трансформаторе

сравнению с напряжением U'_{20} при холостом ходе трансформатора. Алгебраическая разность между первичным и вторичным (приведенным) напряжениями является потерей напряжения на трансформаторе:

$$\Delta U = U_1 - U'_2 = U'_{20} - U'_2, \quad (8.16)$$

где принято, что $U'_{20} = E'_2 = E_1 = U_1$.

Для вычисления потери напряжения на трансформаторе необходимо воспользоваться векторной диаграммой, построенной на рис. 8.23 для такой цепи. Вектор напряжения \underline{U}_1 построен на основании уравнения $\underline{U}_1 = \underline{U}'_2 + R_k \underline{I}'_2 + jX_k \underline{I}'_2$.

Угол $\angle AOC$ между векторами напряжений \underline{U}_1 и \underline{U}'_2 очень мал, значительно меньше, чем изображено на рисунке, где векторы падений напряжений $R_k \underline{I}'_2$ и $jX_k \underline{I}'_2$ построены в увеличенном масштабе по сравнению с векторами напряжений \underline{U}_1 и \underline{U}'_2 . Вместо напряжения \underline{U}_1 можно взять его проекцию на продолжение вектора напряжения \underline{U}'_2 , т. е. считать $\underline{U}_1 = \underline{OF}$.

Тогда потеря напряжения в трансформаторе

$$\Delta U = U_1 - U'_2 = OF - OA = AD + DF.$$

Отрезки AD и DF можно определить из геометрических соотношений:

$$AD = R_k I'_2 \cos \varphi_2, \quad DF = X_k I'_2 \sin \varphi_2.$$

Таким образом,

$$\Delta U = I'_2 (R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2). \quad (8.17)$$

Потеря напряжения на трансформаторе зависит как от значения нагрузки (I'_2) и ее характера (φ_2), так и от сопротивлений обмоток трансформатора (R_k и X_k).

Ток I'_2 нагрузки трансформатора можно определить через номинальный ток $I'_{2\text{ном}}$, введя понятие коэффициента нагрузки трансформатора:

$$\beta = \frac{I'_2}{I'_{2\text{ном}}} = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}.$$

С учетом коэффициента нагрузки β формула (8.17) принимает вид

$$\Delta U = \beta I'_{2\text{ном}}(R_{\text{к}} \cos \varphi_2 + X_{\text{к}} \sin \varphi_2). \quad (8.18)$$

Потерю напряжения удобнее определять в относительных единицах или в процентах от номинального значения. Поделив обе части уравнения (8.18) на $U_{1\text{ном}}$, получим (%)

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_{1\text{ном}}} 100 = \beta (u_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \sin \varphi_2),$$

где $u_{\text{ка}} = u_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}} = \frac{R_{\text{к}} I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} 100\%$ — активная и $u_{\text{кр}} = u_{\text{к}} \sin \varphi_{\text{к}} = \frac{X_{\text{к}} I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} 100\%$ — реактивная составляющие напряжения $u_{\text{к}}$.

Как указывалось ранее, у трансформаторов большой мощности можно пренебрегать активной составляющей $u_{\text{ка}}$ и считать, что $u_{\text{к}} = u_{\text{кр}}$. В этом случае (%)

$$\Delta u = \beta u_{\text{к}} \sin \varphi_2.$$

||| Потеря напряжения на трансформаторе прямо пропорциональна напряжению короткого замыкания.

8.13. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА

||| Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки при постоянных значениях первичного напряжения и коэффициента мощности нагрузки: $U'_2 = f(I'_2)$ или $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$.

При холостом ходе трансформатора можно считать, что $U'_2 = U'_{20} = U_1$, поэтому (см. (8.16))

$$U'_2 = U'_{20} - \Delta U, \quad (8.19)$$

т. е. напряжение на вторичной обмотке отличается от напряжения при холостом ходе на значение потери напряжения в трансформаторе. Для уравнения (8.19) имеем (%)

$$u'_2 = u_2 = 100 - \Delta u.$$

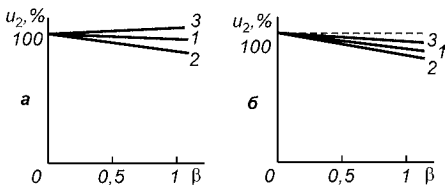
Для трансформаторов большой мощности (%)

$$u_2 = 100 - \beta u_{\text{к}} \sin \varphi_2. \quad (8.20)$$

Рис. 8.24

Внешние характеристики трансформатора

а — для трансформатора большой мощности; *б* — для трансформатора мощностью 1...10 кВ·А ($u_{\text{ка}} = 5\%$, $u_{\text{кр}} = 2,5\%$); 1 — $\cos\varphi_2 = 1$; 2 — $\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-индуктивная нагрузка); 3 — $\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-емкостная нагрузка).



На рис. 8.24*а* представлены внешние характеристики трансформатора для нескольких значений $\cos\varphi_2$. В силовых трансформаторах при $\cos\varphi_2 = 1$ будет $\sin\varphi_2 = 0$, и напряжение U_2 остается неизменным при всех значениях нагрузки. При активно-индуктивной нагрузке φ_2 положителен, и чем он больше, тем больше потери напряжения и тем значительнее снижение напряжения U_2 с ростом тока нагрузки. При активно-емкостной нагрузке φ_2 отрицателен и потеря напряжения $\Delta u = -\beta u_{\text{к}} \sin\varphi_2$ также отрицательна. Уравнение (8.20) принимает вид

$$u_2 = 100 + \beta u_{\text{к}} \sin\varphi_2,$$

откуда следует, что с ростом β , т. е. с ростом тока нагрузки, напряжение U_2 увеличивается по сравнению с U_{20} . В этом можно также убедиться, рассматривая векторную диаграмму (см. рис. 8.18*б*).

Для трансформаторов малой мощности нельзя пренебрегать активной составляющей напряжения короткого замыкания. В этом случае для определения потери напряжения нужно пользоваться уравнением, в котором все члены выражены в процентах:

$$u_2 = 100 - \beta(u_{\text{ка}} \cos\varphi_2 + u_{\text{кр}} \sin\varphi_2).$$

Наличие составляющей $u_{\text{ка}}$ обуславливает снижение напряжения U_2 при активной нагрузке ($\cos\varphi_2 = 1$) и уменьшение отклонения напряжения от номинального значения при наличии реактивной составляющей тока нагрузки (как индуктивной, так и емкостной).

Внешние характеристики трансформаторов являются практически прямыми линиями. Снижение напряжения при номинальной нагрузке в очень большой степени зависит от коэффициента мощности нагрузки и напряжения короткого замыкания, но не может превышать значения $u_{\text{к}}$.

8.14. МОЩНОСТЬ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Подводимая к трансформатору энергия определяется мощностью $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$, а энергия, отдаваемая трансформатором электроприемнику, определяется мощностью $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$. Разность $P_{\pi} = P_1 - P_2$ представляет собой мощность потерь в трансформаторе. В энергетическом отношении трансформатор является весьма совершенным аппаратом, и мощность потерь энергии в силовых трансформаторах составляет 1...5% от номинальной мощности трансформатора (чем больше мощность трансформатора, тем меньше мощность потерь в нем).

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (8.21)$$

Разность между значениями P_2 и P_1 , равная мощности потерь в трансформаторе, очень мала. Если для определения коэффициента полезного действия в формулу (8.21) подставлять показания ваттметров, измеряющих мощности P_1 и P_2 , то это может привести к большим ошибкам, так как точность показаний ваттметров находится в пределах разности между P_1 и P_2 (при определенных условиях можно получить даже значение КПД, превышающее 100%). Поэтому КПД трансформатора определяют косвенным путем по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{\pi}}{P_1} = 1 - \frac{P_{\pi}}{P_2 + P_{\pi}}. \quad (8.22)$$

Мощность потерь в трансформаторе складывается из мощности потерь $P_{\pi 0}$ в магнитопроводе и мощности потерь $P_{\pi \Sigma}$ в обмотках:

$$P_{\pi} = P_{\pi 0} + P_{\pi \Sigma}.$$

Мощность потерь $P_{\pi 0}$ пропорциональна квадрату магнитной индукции и, следовательно, квадрату первичного напряжения U_1 . При $U_{1 \text{ ном}} = \text{const}$, что соответствует нормальным условиям работы трансформатора, мощность $P_{\pi 0}$ постоянна и не зависит от тока нагрузки. Эту мощность определяют из опыта холостого хода или берут из паспорта трансформатора, или из каталога на трансформаторы,

где ее обозначают как P_0 в киловаттах. У большинства трансформаторов $P_{п0}$ составляет менее 1% от номинальной мощности.

Мощность потерь на нагрев обмоток $P_{пз} = I_2'^2 R_k = I_1^2 R_k$. Используя выражение для коэффициента нагрузки трансформатора

$$\beta = \frac{I_2'}{I_{2\text{ном}}} = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}} = \frac{P_2}{S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}, \quad (8.23)$$

откуда $I_1 = \beta I_{1\text{ном}}$, получим выражение для мощности потерь

$$P_{пз} = \beta^2 I_{1\text{ном}}^2 R_k = \beta^2 P_{\text{пк}},$$

где $P_{\text{пк}}$ — потери в обмотках, определяемые в опыте короткого замыкания при $I_{1\text{ном}}$, указываемые в паспорте трансформатора или в каталоге на трансформаторы, где этот вид потерь обозначен как P_k , а значение приведено в киловаттах. Таким образом,

$$P_{\text{п}} = P_{\text{п0}} + \beta^2 P_{\text{пк}}.$$

Из (8.23) получаем $P_2 = \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2$, и выражение (8.22) принимает вид

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{п0}} + \beta^2 P_{\text{пк}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{\text{п0}} + \beta^2 P_{\text{пк}}}. \quad (8.24)$$

По формуле (8.24) можно рассчитать КПД для любого значения нагрузки и $\cos \varphi_2$. Для определенного значения

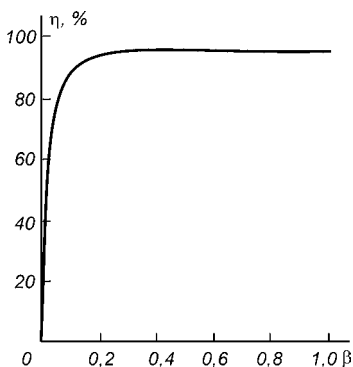


Рис. 8.25
Изменение КПД трансформатора в зависимости от нагрузки

строить зависимость $\eta = f(\beta)$. На рис. 8.25 эта зависимость построена для трансформатора, у которого $P_{\text{п0}}$ составляет 1%, а $P_{\text{пк}}$ — 3% от $S_{\text{ном}}$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$. Если нагрузка активная ($\cos \varphi_2 = 1$), КПД трансформатора будет несколько выше.

Так как мощность потерь в магнитопроводе $P_{\text{п0}}$ остается постоянной, а мощность потерь в обмотках $\beta^2 P_{\text{пк}}$ увеличивается пропорционально



квадрату коэффициента нагрузки, то из анализа выражения (8.24) можно сделать вывод, что КПД трансформатора достигает максимального значения η_{\max} при некотором значении коэффициента нагрузки β , который определяют из условия $d\eta/d\beta = 0$. Продифференцировав выражение (8.24), получим, что η максимален при условии $\beta^2 P_{\text{пк}} = P_{\text{п0}}$, т. е. при равенстве мощности потерь холостого хода и короткого замыкания, откуда оптимальный коэффициент нагрузки

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_{\text{п0}}}{P_{\text{пк}}}}. \quad (8.25)$$

Из зависимости $\eta = f(\beta)$ видно, что КПД трансформатора мало изменяется при $0,2 \leq \beta \leq 1$ и максимум в значениях КПД не является ярко выраженным. Для принятых исходных данных ($P_{\text{п0}} = 0,01S_{\text{ном}}$; $P_{\text{пк}} = 0,03S_{\text{ном}}$) из формулы (7.25) получаем

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{0,01}{0,03}} = 0,58.$$

Чем меньше разница между $P_{\text{п0}}$ и $P_{\text{пк}}$, тем ближе значение $\beta_{\text{опт}}$ к единице. Обычно трансформаторы изготавливают такими, чтобы $\beta_{\text{опт}}$ находилось в пределах 0,5...0,7, так как они в основном работают именно с такой нагрузкой. Увеличение $\beta_{\text{опт}}$ приводит к увеличению расхода проводникового материала.

У трансформаторов малой мощности номинальное значение КПД снижается до 70...90%, а трансформаторы мощностью несколько вольт-ампер могут иметь и более низкий КПД.

8.15. ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трехобмоточные трансформаторы являются самыми распространенными среди силовых многообмоточных трансформаторов. Одна обмотка является первичной, к ней подводят напряжение \underline{U}_1 от источника питания. Остальные обмотки — вторичные, к ним подключают нагрузку. На вторичных обмотках имеем различное напряжение.

По уровню напряжения различают обмотки высшего (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжения. Трехобмоточные трансформаторы применяют тогда, когда необходимо передавать электроэнергию на различные расстояния (чем больше расстояние передачи, тем большее

напряжение требуется), а также для связи электрических сетей различного напряжения.

Конструкции магнитопровода и обмоток трехобмоточного трансформатора ничем не отличаются от конструкций двухобмоточных трансформаторов. То же можно сказать и об их принципе действия и теории. Уравнения ЭДС обмоток остаются неизменными, а уравнение токов имеет вид

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2 - \underline{I}'_3,$$

где \underline{I}_0 — ток холостого хода; \underline{I}_1 — ток первичной обмотки; \underline{I}'_2 и \underline{I}'_3 — приведенные токи вторичных обмоток.

Трансформатор имеет три коэффициента трансформации:

$$k_{12} = w_1/w_2; k_{13} = w_1/w_3; k_{23} = w_2/w_3,$$

и три напряжения короткого замыкания: $u_{к12}$; $u_{к13}$; $u_{к23}$. Например, трансформатор с ВН 110 кВ имеет значения $u_{к\%}$, равные 10,5; 17,0 и 6,0%.

В схемах радио и телевидения, в устройствах автоматики и промышленной электроники находят применение многообмоточные трансформаторы малой мощности, предназначенные для питания электрических цепей различного напряжения (от нескольких вольт до сотен или тысяч вольт), а также для обеспечения условий их работы, при которых электрическая связь между цепями отсутствует.

8.16. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Магнитная система трехфазных трансформаторов имеет два конструктивных исполнения. На рис. 8.26а изображен трехфазный трансформатор, состоящий из трех однофазных. Такой трансформатор называют *трехфазным групповым*. Каждая из трех фаз имеет самостоятельный магнитопровод, поэтому электромагнитные процессы в каждой из фаз протекают самостоятельно, и вся изложенная ранее теория и полученные уравнения напряжений, МДС и токов для однофазного трансформатора справедливы и здесь (для каждой фазы в отдельности).

Трехстержневой трансформатор (рис. 8.26б) имеет связанную магнитную систему. Первичная и вторичные обмотки каждой фазы располагают на одном стержне. При симметричной трехфазной системе первичного на-

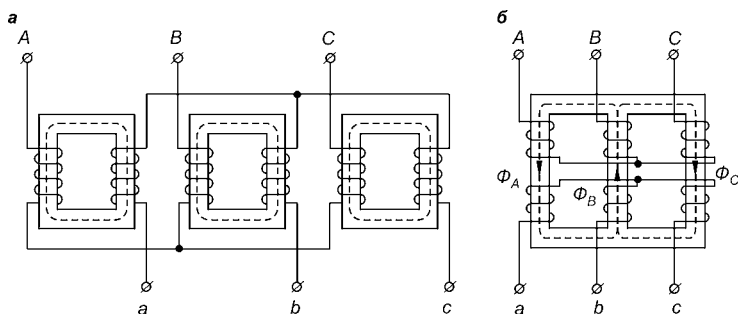


Рис. 8.26

Магнитная система трехфазного трансформатора

а — групповой трансформатор; б — трехстержневой трансформатор.

пряжения система фазных магнитных потоков также симметрична (рис. 8.27). Следовательно, в любой момент времени направление фазных магнитных потоков в стержнях таково, что их сумма равна нулю.

Магнитная система трехстержневого трансформатора в пространственном отношении несимметрична. Магнитный поток фазы B , расположенной на среднем стержне, замыкается через два крайних стержня, т. е. по двум параллельным кратчайшим путям. Магнитный поток фазы A (или C), расположенной на крайнем стержне, замыкается также по двум параллельным путям (через средний и другой крайний стержни). Но путь замыкания через крайний стержень длиннее, чем через средний, и поэтому общее магнитное сопротивление для потока крайней фазы больше, чем для потока средней фазы. Поэтому для создания симметричной системы фазных потоков требуются разные МДС фаз $I_0 w_1$: для средней фазы, имеющей меньшее магнитное сопротивление, требуемая МДС меньшая, чем для крайних фаз. Следствием этого является несимметричная система токов холостого хода, при которой ток I_{0B} меньше, чем токи I_{0A} и I_{0C} .

В режиме нагрузки несимметрия первичных токов незаметна, так как токи холостого хода относительно малы. Поэтому

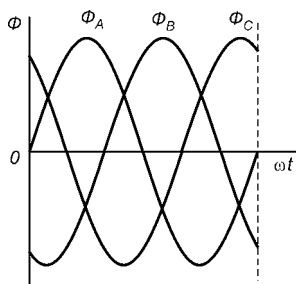


Рис. 8.27

Изменение во времени симметричной системы фазных магнитных потоков в сердечниках трансформатора

в режиме нагрузки можно считать, что все фазы трехстержневого трансформатора находятся в одинаковых условиях и все выводы теории однофазного трансформатора можно распространить на трехстержневой трансформатор. Однако следует заметить, что это распространяется только на фазные величины.

Трансформаторы малой и средней мощности изготавливают трехстержневыми, так как при одинаковой мощности требуется меньший расход материала на магнитопровод и, следовательно, трехстержневые трансформаторы дешевле групповых. Однако при больших мощностях трехстержневые трансформаторы не применяют, поскольку в этом случае возникают трудности в технологии их изготовления. Кроме того, такие трансформаторы очень громоздки, и их трудно транспортировать. Поэтому при больших мощностях используют групповые трансформаторы, которые к тому же имеют некоторое преимущество перед трехстержневыми по условиям резервирования (в качестве резерва у них достаточно иметь одну фазу).

8.17.

СХЕМЫ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Первичные и вторичные обмотки трехфазных трансформаторов (групповых и трехстержневых) соединяют звездой или треугольником. В некоторых случаях обмотки трансформаторов соединяют по схеме «зигзаг». При соединении обмоток звездой с выводом нейтральной точки это соединение обозначают знаком Y . Схемы соединения первичной и вторичной обмоток двухобмоточного трансформатора обозначают дробью, в числителе которой указывают схему соединения первичной обмотки, а в знаменателе — схему соединения вторичной обмотки, например Y/Y , Δ/Δ , Y/Δ . Схемы соединения обмоток трехобмоточных трансформаторов обозначают следующим образом: $Y/Y/\Delta$.

Обмотку высшего напряжения трансформатора с экономической точки зрения выгоднее соединять звездой, так как для получения заданного линейного напряжения $U_{\text{л}}$ требуется фазное напряжение $U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$ и, следовательно, меньшее число витков обмотки и меньший расход изоляционных материалов. Обмотка, соединенная треугольником, также имеет свои преимущества. Как было

показано ранее, ток холостого хода несинусоидален. При соединении обмоток звездой без нейтрального провода гармоники третьего порядка, совпадающие по фазе во всех фазных токах холостого хода, отсутствуют. Это приводит к искажению магнитных потоков и возникновению гармоник ЭДС третьего порядка. Напряжение вторичной обмотки становится несинусоидальным. При наличии обмотки, соединенной треугольником, под действием ЭДС третьего порядка в замкнутом треугольнике обмоток появится ток и падение напряжений ЭДС третьей гармоники. мотки, соединенной треугольниками. Поэтому у трансформатора одну из обмоток обычно соединяют звездой с нейтральной точкой, соединенной с землей.

Рис. 8.28
Электрические схемы
трехфазных трансформато-
ров при различных схемах
соединения обмоток
а — Y/Y ; б — Y/Δ .

При использовании трехфазных трансформаторов в сложных системах с большим числом трансформаций и при наличии параллельных ветвей с трансформаторами всегда необходимо знать сдвиг фаз между первичным и вторичным линейными напряжениями. Этот сдвиг характеризуется *группой соединения обмоток*.

Примем за условное положительное направление фазных ЭДС направление от конца к началу обмотки. Если направление намотки первичной и вторичной обмоток одинаково, фазные ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}_2 совпадают по фазе, как это было показано в § 8.2 (см. рис. 8.29). ЭДС E_1 и E_2

Рис. 8.29
Обмотки
трансформатора
с одинаковым
направлением намотки
a — обозначение выводов; *б* —
векторная диаграмма ЭДС.

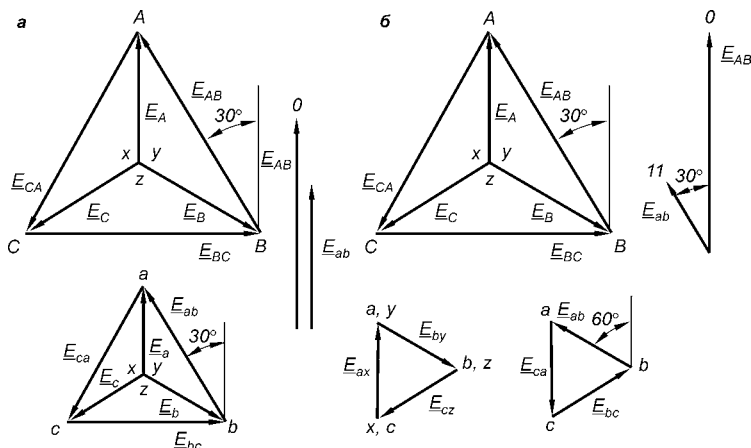
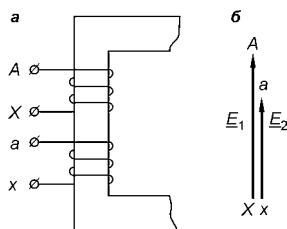


Рис. 8.30

Группы соединения обмоток трехфазного трансформатора
a — нулевая; *б* — одиннадцатая.

окажутся противоположными по фазе, если изменить направление намотки одной из обмоток или поменять местами ее начало и конец. Других взаимных положений векторов фазных ЭДС быть не может.

У трансформаторов нормального исполнения направление намотки и обозначение выводов обмоток таково, что фазные первичная и вторичная ЭДС совпадают по фазе. Тогда группа соединения обмоток зависит только от схем их соединения.

Группу соединения обмоток трехфазного трансформатора обозначают цифрой часового циферблата, на которую «указывает» вектор линейной вторичной ЭДС при условии, что вектор линейной первичной ЭДС «направлен» на ноль часов.

Для случая соединения первичной и вторичной обмоток звездой векторные диаграммы фазных и линей-

ных ЭДС изображены на рис. 8.30а. Сначала строят диаграмму фазных ЭДС (система ЭДС симметрична), диаграмму линейных ЭДС строят на основании формул (4.3). Из векторных диаграмм видно, что при совпадении по фазе фазных ЭДС линейные ЭДС первичной и вторичной обмоток также совпадают по фазе. Таким образом, если повернуть на 30° по часовой стрелке вектор первичной линейной ЭДС \underline{E}_{AB} и «направить» его на цифру 0 (или 12) часового циферблата, то вектор вторичной линейной ЭДС \underline{E}_{ab} после его поворота на 30° по часовой стрелке будет направлен также на 0. Это означает, что при соединении обеих обмоток звездой получили группу соединения 0. При соединении первичной и вторичной обмоток треугольником $\underline{E}_\Delta = \underline{E}_\Phi$; следовательно, группа соединения обмоток будет также нулевой. Итак, группа соединения 0 получается при одинаковой схеме соединения первичной и вторичной обмоток. Эту группу соединения обозначают $Y/Y - 0$, $\Delta/\Delta - 0$.

При соединении первичной обмотки звездой, а вторичной — треугольником (см. рис. 8.28б) получим другую группу соединения. Чтобы получить соединение вторичной обмотки треугольником, начало фазы a соединяют с концом фазы b и т. д. Векторная диаграмма ЭДС первичной обмотки остается той же, что и на рис. 8.30а.

На векторной диаграмме ЭДС вторичной обмотки, соединенной треугольником, фазная ЭДС $\underline{E}_{ax} = \underline{E}_a$ совпадает по фазе с фазной ЭДС \underline{E}_A , поэтому вектор \underline{E}_{ax} проводят параллельно вектору \underline{E}_A . ЭДС \underline{E}_{ax} направлена из точки x в точку a , соответственно обозначены начало и конец вектора \underline{E}_{ax} на рис. 8.30б. При соединении треугольником объединяют в одну точку начала и концы разных фаз: a и y , b и z , c и x . Потенциалы этих точек соответственно равны, и на векторной диаграмме конец вектора \underline{E}_{ax} обозначен двумя буквами a, y . Вектор ЭДС \underline{E}_{by} проводят из точки y параллельно вектору ЭДС \underline{E}_B . Аналогично проводят вектор ЭДС \underline{E}_{cz} .

Определяя группу соединения по вектору первичной линейной ЭДС \underline{E}_{AB} , необходимо иметь вектор линейной ЭДС \underline{E}_{ab} . Из векторной диаграммы для первичной обмотки видно, что вектор линейной ЭДС всегда направлен из точки, обозначающей второй индекс, в точку, обозначающую

первый индекс. Следовательно, ЭДС \underline{E}_{ab} направлена от точки b к точке a . На векторной диаграмме (см. рис. 8.30б) построены линейные ЭДС вторичной обмотки: \underline{E}_{ab} , \underline{E}_{bc} и \underline{E}_{ca} . После поворота вектора ЭДС \underline{E}_{AB} на 30° по часовой стрелке «совмещаем» его с цифрой 0 на часовом циферблате. Вектор вторичной ЭДС \underline{E}_{ab} после поворота тоже на 30° по часовой стрелке будет «направлен» на число 11, так как угол между векторами \underline{E}_{AB} и \underline{E}_{ab} составляет 30° . Таким образом, при соединении первичной обмотки звездой, а вторичной — треугольником получили группу соединения 11 (Y/ Δ — 11).

Согласно ГОСТ 11677, выпускаются двухобмоточные силовые трансформаторы со схемами и группами соединения Y/Y — 0, Y/ Δ — 11, Y/ Δ — 11, трехобмоточные трансформаторы со схемами и группами соединения Y/ Δ / Δ — 11 — 11, Y/Y/ Δ — 0 — 11. Трансформаторы со схемой соединения Y/Y — 0 выпускаются с нижним напряжением 0,4 и 0,66 кВ и высшим напряжением до 35 кВ мощностью до 2500 кВ·А. Трансформаторы с более высоким напряжением и большей мощности выпускаются только 11-й группы.

8.18. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

При некоторых условиях может оказаться, что для питания электроприемников мощности одного трансформатора недостаточно, тогда применяют два или более параллельно включенных трансформатора. Такое положение создается, если суммарная мощность приемников, подключенных к вторичной обмотке трансформато-

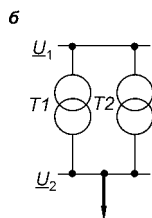
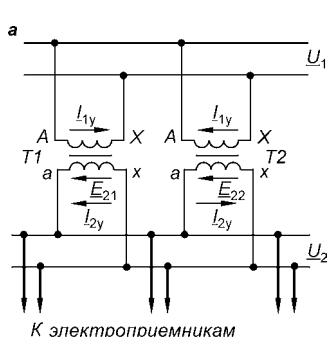


Рис. 8.31
Схемы включения двух
однофазных трансформаторов
на параллельную работу
а — двухлинейная; б — однолинейная.

ра, больше мощности трансформатора, или если для питания приемников требуется большая надежность, не обеспечиваемая одним трансформатором. В больших энергосистемах по линиям передачи высокого напряжения передается электроэнергия, мощность которой чаще всего превышает мощность одного трансформатора, и на такую линию работают несколько трансформаторов.

В подобных случаях трансформаторы включают параллельно (рис. 8.31). При параллельной работе к первичным обмоткам всех трансформаторов (двух или более) подводят одно и то же напряжение \underline{U}_1 . Вторичные обмотки всех трансформаторов подключают к одним и тем же общим шинам, к которым и подключают нагрузку.

Для нормальной работы в режиме параллельного соединения трансформаторы должны удовлетворять следующим условиям:

- 1) коэффициенты трансформации всех трансформаторов должны быть равны, т. е. $k_1 = k_2 = k_3 = \dots = k_n$;
- 2) напряжения короткого замыкания всех трансформаторов должны быть равны, т. е. $u_{к1} = u_{к2} = u_{к3} = \dots = u_{кn}$;
- 3) трехфазные трансформаторы должны иметь одинаковую группу соединения обмоток.

Так как первичные обмотки трансформаторов подключены к одному источнику с напряжением \underline{U}_1 , то при холостом ходе для равенства вторичных напряжений всех трансформаторов необходимо, чтобы были равны их вторичные ЭДС. Это имеет место только при равенстве коэффициентов трансформации. Если у трансформатора $T1$ (рис. 8.31а) коэффициент трансформации больше, чем у трансформатора $T2$, то $E_{21} > E_{22}$. В замкнутом контуре вторичных обмоток трансформаторов под действием ЭДС $\Delta E_2 = E_{21} - E_{22} \neq 0$ возникнет *уравнительный ток* \underline{I}_{2y} , который будет трансформироваться в первичные обмотки. Значение этого тока зависит также от сопротивления обмоток трансформаторов, а фаза тока — от составляющих полных сопротивлений трансформаторов (рис. 8.32). Уравнительный ток в обмотках не является током нагрузки, он нагревает обмотки и снижает полезную

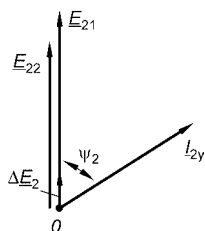


Рис. 8.32
Векторная
диаграмма
вторичных ЭДС
и уравнительного
тока параллельно
работающих
однофазных
трансформаторов

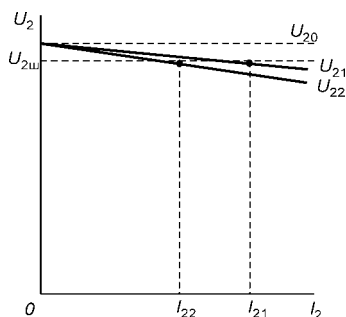


Рис. 8.33
Внешние характеристики
параллельно работающих
трансформаторов и распреде-
ление нагрузки между ними

мощность трансформатора. Считается допустимым для практики отклонение значения коэффициентов трансформации друг от друга на 0,5%.

В режиме нагрузки вторичное напряжение U_2 каждого трансформатора зависит от его внешней характеристики (рис. 8.33). При этом отклонение напряжения U_2 от напряжения холостого хода U_{20} , равного для всех параллельно работающих трансфор-

маторов, пропорционально напряжению короткого замыкания u_k трансформатора. Если трансформаторы имеют разные напряжения u_k , то наклон их внешних характеристик будет разный. На рис. 8.33 представлены внешние характеристики трансформаторов, у которых $u_{k2} > u_{k1}$.

Так как вторичные обмотки обоих трансформаторов подключают к общим шинам, то напряжения на их вторичных обмотках будут всегда одинаковы и равны напряжению на шинах $U_{2ш}$. При некоторой нагрузке напряжение $U_{2ш}$ будет иметь значение, соответствующее штриховой линии на рис. 8.33, точки пересечения которой с внешними характеристиками трансформаторов являются рабочими точками для данного режима. Абсциссы этих точек определяют ток нагрузки каждого трансформатора, причем $I_{22} < I_{21}$.

Таким образом, трансформаторы с разными u_k загружаются по-разному: трансформатор с меньшим u_k загружается большим током, чем трансформатор с большим u_k . При увеличении мощности приемников увеличивается нагрузка на оба трансформатора. Однако когда нагрузка трансформатора $T1$ достигнет номинального значения, нагрузка трансформатора $T2$ будет еще далека от номинальной. Полностью мощность трансформатора $T2$ не может быть использована, так как трансформатор $T1$ окажется перегруженным. Поэтому включаемые на параллельную работу трансформаторы должны иметь равные значения u_k . Допускается отклонение от среднеарифметического значения не более чем на $\pm 10\%$.

Третье условие является абсолютно жестким. Если трансформаторы принадлежат к разным группам соединения обмоток, то между векторами линейных вторичных ЭДС (следовательно, и напряжений) сдвиг фаз будет отличаться от 0° , а их векторная разность не будет равна нулю. На рис. 8.34 показана векторная диаграмма линейных вторичных ЭДС трансформаторов, принадлежащих к нулевой и одиннадцатой группам соединения обмоток. Возникающая ЭДС $\Delta \underline{E}_2 = \underline{E}_{21} - \underline{E}_{22}$ настолько велика, что создаваемый ею уравнивающий ток превышает номинальный ток в несколько раз и режим оказывается аварийным.

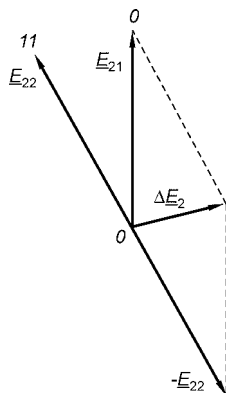


Рис. 8.34
Векторная диаграмма вторичных линейных ЭДС параллельно работающих трехфазных трансформаторов нулевой и одиннадцатой групп соединения обмоток

8.19. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Автотрансформаторы, как и трансформаторы, применяются для преобразования напряжения при передаче электрической энергии. Они отличаются от трансформаторов тем, что у них обмотка НН является частью обмотки ВН. В автотрансформаторах первичная и вторичная обмотки имеют как магнитную, так и электрическую связь.

Автотрансформаторы бывают однофазные и трехфазные, повышающие и понижающие (см. рис. 8.35). Их принцип действия ничем не отличается от принципа действия трансформатора. Под коэффициентом трансформации автотрансформатора по аналогии с трансформатором понимают

$$k_{AT} = \frac{E_{AX}}{E_{ax}} = \frac{w_{AX}}{w_{ax}},$$

где w_{AX} и w_{ax} — числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно.

Если пренебречь падением напряжения на обмотках автотрансформатора, то можно написать $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_{AX}}{E_{ax}}$, следовательно, напряжение на зажимах вторичной обмотки равно $U_2 = U_{ax} \approx U_1/k_{AT}$.

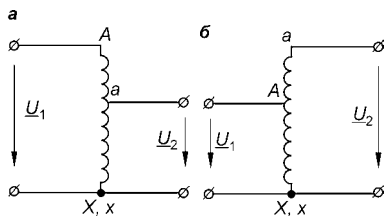


Рис. 8.35
Электрические схемы
автотрансформаторов
а — понижающего; б — повышающего.

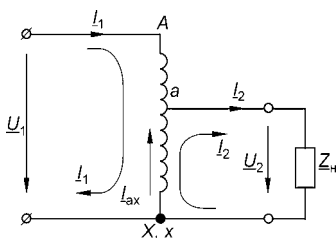


Рис. 8.36
Схема автотрансформатора
в режиме нагрузки

В режиме нагрузки (рис. 8.36) во вторичной цепи возникает ток I_2 , а в первичной — ток I_1 . Первичная и вторичная мощности автотрансформатора из-за незначительности потерь равны, т. е. $S_1 = S_2$, или $U_1 I_1 = U_2 I_2$, откуда можно найти ток в приемнике:

$$I_2 = I_1 \frac{U_1}{U_2} = k_{AT} I_1.$$

Ток в общей части обмотки автотрансформатора в соответствии с первым законом Кирхгофа равен $I_{ax} = I_2 - I_1$. Поскольку токи I_2 и I_1 находятся практически в противофазе, то аналогичное уравнение можно написать и для действующих значений этих токов:

$$I_{ax} = I_2 - I_1 = k_{AT} I_1 - I_1 = (k_{AT} - 1) I_1. \quad (8.26)$$

Как следует из (8.26), чем ближе коэффициент трансформации k_{AT} к единице, тем меньше ток I_{ax} , тем меньшее сечение провода можно взять для изготовления общей части обмоток, тем легче и дешевле будет автотрансформатор, тем экономически выгоднее их применение. В силовых установках применяют автотрансформаторы с $k_{AT} = 1,25 \dots 3$.

Потери мощности в стали магнитопровода автотрансформатора такие же, как у трансформатора. Потери на нагрев обмоток у автотрансформатора меньше, так как обмотка только одна и при этом ток I_{ax} в общих витках мал. Поэтому КПД автотрансформаторов больше, чем обычных трансформаторов.

К недостаткам автотрансформаторов следует отнести более тяжелые условия короткого замыкания, так как сопротивление автотрансформатора меньше, а ток короткого замыкания больше, чем у трансформатора, а также возможность попадания высокого напряжения в сеть

низшего напряжения при межвитковом коротком замыкании внутри автотрансформатора.

Трехфазные автотрансформаторы применяют для связи энергосистем, уровни напряжения которых мало отличаются друг от друга (110, 220, 330, 500 кВ). Автотрансформаторы используют также для пуска асинхронных и синхронных электродвигателей. Однофазные автотрансформаторы малой мощности нашли широкое применение в устройствах связи и автоматики. В лабораторной практике автотрансформаторы часто применяют для плавного изменения напряжения в широких пределах.

8.20. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Измерительные трансформаторы. В электроустановках переменного тока большой мощности и напряжением выше 1 кВ непосредственное включение электроизмерительных приборов невозможно, так как номинальные значения напряжения и тока приборов не соответствуют номинальным значениям напряжения и тока электроустановок. Для расширения пределов измерения приборов и для изоляции их от цепей высокого напряжения применяют измерительные трансформаторы: трансформаторы тока и трансформаторы напряжения.

Кроме измерительных приборов к вторичным обмоткам измерительных трансформаторов подключают обмотки других аппаратов. Мощность измерительных трансформаторов составляет от пяти до нескольких сотен вольт-ампер.

Трансформатор тока используют для расширения пределов измерения амперметров и последовательных обмоток ваттметров, счетчиков энергии и фазометров. Его первичную обмотку включают последовательно в ту цепь, ток в которой надо измерить (рис. 8.37а). Эта обмотка обычно состоит из одного или нескольких витков, ее выводы обозначают L_1 и L_2 (первыми буквами слова «линия»). К зажимам вторичной обмотки подключают амперметр или

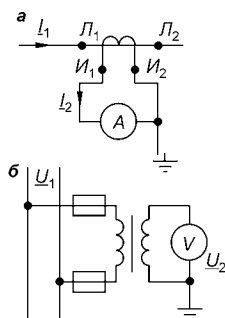


Рис. 8.37
Схемы включения измерительных трансформаторов

а — трансформатор тока;
б — трансформатор напряжения.

последовательные обмотки ваттметра, счетчика и фазометра. Чтобы ток во вторичной обмотке был меньше измеряемого первичного тока, число витков вторичной обмотки делают большим. Выводы вторичной обмотки обозначают I_1 и I_2 (первыми буквами слов «измерительный прибор»). Вторичную обмотку и металлические части кожуха заземляют. Это вызвано требованиями техники безопасности для защиты обслуживающего персонала от возможного поражения током высокого напряжения при пробое изоляции между первичной и вторичной обмотками.

Подключаемые ко вторичной обмотке приборы обычно имеют небольшое сопротивление. Поэтому для трансформатора тока нормальным режимом является режим короткого замыкания, при котором можно считать $I_2 = I_1/k_I$ ($k_I = w_2/w_1$). При отключении или замене прибора вторичная обмотка трансформатора тока должна быть обязательно закорочена. Для трансформаторов тока, как и для силовых трансформаторов, справедливо уравнение МДС $\underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2 = \underline{I}_0 w_1 \approx 0$. В отличие от силовых трансформаторов, у трансформаторов тока МДС первичной обмотки $\underline{I}_1 w_1$ не зависит от МДС вторичной обмотки $\underline{I}_2 w_2$, а определяется током в цепи, в которую она включена. Если разомкнуть цепь вторичной обмотки, то $\underline{I}_2 w_2 = 0$ и результирующая МДС будет равна $\underline{I}_1 w_1$, которая во много раз может превышать МДС $\underline{I}_0 w_1 \approx 0$. Поэтому если не замкнуты накоротко зажимы вторичной цепи, то МДС первичной обмотки $\underline{I}_1 w_1$ не будет скомпенсирована, магнитный поток и потери в магнитопроводе увеличатся настолько, что трансформатор может сгореть. Кроме того, возросший магнитный поток индуцирует на зажимах вторичной обмотки, имеющей большое число витков, значительную ЭДС (сотни и даже тысячи вольт).

Трансформаторы тока имеют стандартные номинальные первичные токи от 5 до 15 000 А при номинальном вторичном токе 5 А (у некоторых трансформаторов при токе 1 А). Поэтому ко вторичной обмотке следует присоединять приборы, номинальный ток которых равен 5 А. При соблюдении этого условия цену деления прибора определяют по номинальному первичному току трансформатора тока.

Некоторые типы лабораторных трансформаторов тока изготавливают на несколько значений номинальных первичных токов, в том числе и на токи, меньшие 5 А. Это необхо-



димо тогда, когда измеряемые токи настолько малы, что не могут быть измерены прибором, предел измерения которого равен 5 А. В этом случае трансформаторы работают как повышающие, т. е. измеряемый ток увеличивается с их помощью.

Трансформаторы напряжения применяют в сетях высокого напряжения для измерения напряжения и частоты.

К вторичной обмотке подключают вольтметры, частотомеры и параллельные обмотки ваттметров, счетчиков и фазометров, т. е. обмотки, имеющие большое сопротивление. Поэтому для трансформаторов напряжения нормальным режимом является режим холостого хода.

Трансформаторы напряжения конструктивно мало отличаются от обычных силовых трансформаторов. Они имеют небольшую мощность и включаются в сеть так же, как обычные трансформаторы (см. рис. 8.37б). Вторичная обмотка заземлена. Коэффициент трансформации выбирают таким, чтобы вторичное напряжение было равно 100 В.

При включении через измерительные трансформаторы измерительных приборов, у которых различаются начала и концы обмоток, нужно следить, чтобы начала обмоток приборов (генераторные зажимы) были присоединены к зажиму I_1 трансформатора тока и зажиму a трансформатора напряжения (рис. 8.38). Тогда направление тока в обмотках приборов будет таким, как при прямом включении приборов, и показание приборов будет правильным.

Сварочные трансформаторы. В конструктивном отношении имеется большое разнообразие сварочных трансформаторов. В значительной степени это определяется видом сварки (дуговая, стыковая, шовная, точечная).

При дуговой сварке вольт-амперная характеристика электрической дуги имеет вид, показанный на рис. 8.39 (кривая 1). Вольт-амперная (или внешняя) характеристика трансформатора, т. е. источника питания дуги, должна иметь точки пересечения с вольт-амперной характеристикой дуги, чтобы ее горение было устойчивым. Следовательно, сварочный трансформатор должен иметь крутопадающую внешнюю

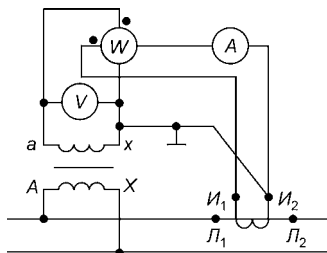


Рис. 8.38

Схема включения измерительных приборов через измерительные трансформаторы

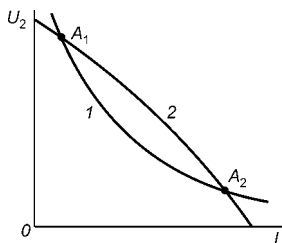


Рис. 8.39
Вольт-амперная характеристика электрической дуги (1) и внешняя характеристика сварочного трансформатора (2)

характеристику (кривая 2). Зажигание дуги происходит в точке A_1 при напряжении 60...70 В, а устойчивое горение дуги — в точке A_2 при напряжении 12...30 В и при большом токе.

Для получения крутопадающей внешней характеристики можно использовать включенную последовательно с вторичной обмоткой индуктивную катушку с большим индуктивным сопротивлением (реактор) или обеспечить большие магнитные потоки рассеяния (большое X_K) в самом трансформаторе. В качестве примера на рис. 8.40 показаны принципиальные схемы сварочных трансформаторов, в которых использованы указанные способы получения необходимых внешних характеристик. При изменении воздушного зазора d меняется индуктивное сопротивление реактора или самого трансформатора и соответственно наклон внешней характеристики. Плавное регулирование путем изменения зазора d и регулирование ступенями путем изменения числа витков применяются и в варианте а, и в варианте б.

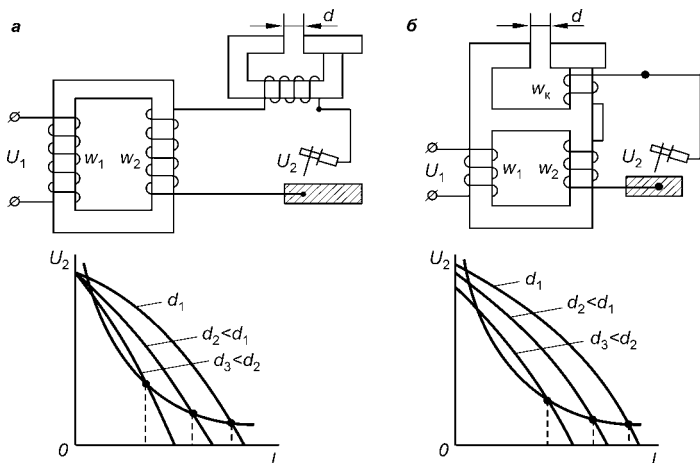


Рис. 8.40
Принципиальные схемы сварочных трансформаторов и их внешние характеристики

а — с внешней индуктивностью (реактором); б — с реактивной катушкой на одном сердечнике со вторичной обмоткой.

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

||| *Измерение — это нахождение значения физической*
||| *величины опытным путем с помощью специальных*
||| *технических средств.*

Технические средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации, функционально связанных с измеряемыми физическими величинами, в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, называют *электроизмерительными приборами*.

Электроизмерительные приборы, показания которых являются непрерывными функциями изменения измеряемых величин, называют *аналоговыми*. Измерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме, называют *цифровыми*.

Если электроизмерительный прибор допускает только считывание показаний, то его называют *показывающим*, а если возможны и считывание, и регистрация (или только регистрация) показаний, то прибор называют *регистрирующим*. Если прибор может записать показания в форме диаграммы, то его называют *самопишущим*.

В практике часто применяют *интегрирующие* приборы, в которых значения измеряемой величины суммируются по времени или по другой независимой переменной. Из интегрирующих приборов всем хорошо известен счетчик электрической энергии.

Электроизмерительные приборы подразделяют на приборы *непосредственной оценки*, в которых подвижная

часть измерительного механизма реагирует на значение измеряемой величины, и приборы *сравнения*, в которых измеряемая величина сравнивается с величиной, значение которой известно. Примером приборов сравнения являются измерительные мосты, потенциометры.

9.2. ПОГРЕШНОСТИ ПРИБОРОВ

Действительное значение измеряемой величины может отличаться от полученного из опыта значения. Это может быть обусловлено несовершенством технологии изготовления прибора, конструктивными недостатками, неправильной градуировкой, влиянием различных внешних факторов.

Разность Δ между показанием прибора X и истинным значением X_0 измеряемой величины называют *абсолютной погрешностью* измерительного прибора:

$$\Delta = X - X_0.$$

Относительную погрешность измерения δ определяют обычно в процентах к истинному значению X_0 , но так как отклонения X от X_0 сравнительно малы, то

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X_0} 100 \% \approx \pm \frac{\Delta}{X} 100 \% .$$

Оценить качество прибора по значению абсолютной и относительной погрешностей измерений невозможно, так как показание прибора X во время измерения может принимать любые значения в пределах от 0 до X_N , где X_N — нормирующее значение прибора, т. е. верхний предел его диапазона измерений или арифметическая сумма двух верхних значений диапазона (если нулевая отметка находится внутри диапазона измерений).

Поэтому было введено понятие *приведенной погрешности*, под которой понимают отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению прибора:

$$\gamma_{\text{пр}} = \pm \frac{\Delta}{X_N} 100 \% .$$

Максимальное значение приведенной погрешности, выраженное в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta_{\text{max}}}{X_N} 100 \% ,$$

называют *классом точности* прибора.

9.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

В соответствии с ГОСТ 22261 «Приборы электроизмерительные. Общие технические требования» приборы классифицируют по следующим признакам.

1. *По виду измеряемой величины*, когда классификацию производят по наименованию единицы измеряемой величины. На шкале прибора пишут полное его наименование или начальную латинскую букву единицы измеряемой величины, например: амперметр — А, вольтметр — V, ваттметр — W и т. д.

Для многофункциональных приборов эти обозначения указывают у переключающих устройств и сочетают с наименованием прибора, например «вольтамперметр». К условной букве наименования прибора может быть добавлено обозначение кратности основной единицы: миллиампер — mA, киловольт — kV, мегаватт — MW и т. д.

2. *По физическому принципу действия измерительного механизма прибора*. Такая классификация определяется способом преобразования электрической величины в механическое действие подвижной части прибора (см. табл. 9.1).

В ряде приборов используют преобразовательные устройства в комплекте с обычным измерительным механизмом. Например, для измерения переменного тока магнитоэлектрическим прибором используют выпрямитель с полупроводниковым элементом. В конце табл. 9.1 приведены примеры обозначения приборов со встроенными преобразователями.

3. *По роду тока*. Эта классификация позволяет определить, в цепях какого тока можно применять данный прибор. Это обозначают условными знаками на шкале прибора, приведенными в табл. 9.2.

На приборах переменного тока указывают номинальное значение частоты или диапазон частот, при которых их применяют, например, 20–50–120 Гц; 45–550 Гц; при этом подчеркнутое значение является номинальным для данного прибора.

Если на приборе не указан диапазон рабочих частот, то он предназначен для измерений в установках с частотой 50 Гц.

Классификация электроизмерительных приборов по физическому принципу действия измерительного механизма

Тип прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический логометр с подвижными рамками	
Магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
Электромагнитный	
Электромагнитный логометр	
Электродинамический	
Электродинамический логометр	
Ферродинамический	
Ферродинамический логометр	
Индукционный	
Электростатический	
Вибрационный (язычковый)	
Термоэлектрический	
Термоэлектрический с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	
Выпрямительный с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	

Таблица 9.2

Классификация электроизмерительных приборов по роду тока

Род тока	Условное обозначение
Постоянный	
Переменный (однофазная система)	
Постоянный и переменный	
Трёхфазная система (общее обозначение)	
Трёхфазная система (при несимметричной нагрузке фаз)	

4. *По классу точности.* Класс точности прибора обозначают числом, равным допускаемой приведенной погрешности, выраженной в процентах. Выпускают приборы следующих классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Для счетчиков активной энергии шкала классов точности несколько другая: 0,5; 1,0; 2,0; 2,5. Цифру, обозначающую класс точности, указывают на шкале прибора.

Класс точности прибора определяет основную погрешность прибора, которая обусловлена его конструкцией, технологией изготовления и имеет место при нормальных условиях эксплуатации (определенные диапазоны температуры и влажности, отсутствие внешних электрического и магнитного полей и вибрации, правильная установка и т. д.). Если условия эксплуатации отличаются от нормальных, то возникают дополнительные погрешности, которые могут иметь как отрицательное, так и положительное значение и которые влияют на точность измерения.

Класс точности прибора является его обобщенной метрологической характеристикой. Но истинная точность измерения определяется не только классом точности, так как, согласно определению класса точности, допускаемая абсолютная погрешность данного прибора

$$\Delta_{\max} = \frac{\gamma}{100} X_N$$

одинакова для всех точек шкалы (где γ — максимальная приведенная погрешность, X_N — нормирующее значение). Следовательно, допускаемая относительная погрешность меньше в точках шкалы, ближайших к нормирующему значению. Поэтому при использовании многодиапазонных приборов нормирующее значение надо выбирать так, чтобы прибор давал наибольшие показания.

5. *По типу устройства отсчета.* Устройство отсчета прибора состоит из шкалы и указателя. Шкалы могут быть или проградуированные в единицах измеряемой величины (их применяют в приборах с одним диапазоном), или же условные, которые имеют 75, 100 или 150 делений (их применяют в приборах с несколькими диапазонами измерений).

В качестве указателя применяют стрелки (копьевидные, ножевидные, нитевидные) или световое пятно с чертой. Во избежание параллакса, вызываемого неправильным положением глаза наблюдателя относительно шкалы

Классификация электроизмерительных приборов

Условия эксплуатации	Параметры окружающей среды	Группа	
		А	
		работают в закрытых сухих отапливаемых помещениях	
Рабочие	Температура, °С	+10...+35	
	Относительная влажность*	80 (+30)	
Предельные	Температура, °С	–40...+60	
	Относительная влажность*	95 (+30)**	

* Относительную влажность приводят в процентах при заданной (указанной в скобках) температуре (°С).

и стрелки, шкалу дополняют зеркалом. При измерении необходимо добиться такого положения глаза, чтобы стрелка совпала со своим отражением в зеркале. Такую шкалу применяют в переносных приборах с классом точности не ниже 1,0.

6. По исполнению в зависимости от условий эксплуатации. Класс прибора определяется пятью группами по диапазону рабочих температур и относительной влажности (табл. 9.3). Предельные значения определяют условия при хранении и перевозке.

Группу прибора указывают на шкале соответствующей буквой. Группа А знака на шкале не имеет. В пределах диапазона рабочих температур дополнительная погрешность лежит в пределах класса точности приборов.

7. По устойчивости к механическим воздействиям приборы подразделяют на группы в зависимости от значения максимального ускорения при тряске или вибрации (м/с^2): обыкновенные с повышенной прочностью (ОП), нечувствительные к вибрации (ВН), вибропрочные (ВП), нечувствительные к тряске (ТН), тряскопрочные (ТП) и ударопрочные (У).

Обыкновенные с повышенной механической прочностью приборы для всех классов точности от 0,5 до 4,0 выдерживают ускорение до 15 м/с^2 (самопишущие приборы — до 10 м/с^2) и выпускают для одного заданного ускорения. Переносные приборы выпускают по трем группам: обыкновенные с повышенной прочностью, вибропрочные и тряскопрочные.



по исполнению в зависимости от условий эксплуатации

приборов				
	Б	В1	В2	В3
	работают в закрытых неотапливаемых помещениях	работают в полевых, морских условиях и в передвижных установках		
	−30...+40	−40...+50	−50...+60	−50...+80
	90 (+30)	95 (+35)	95 (+35)	98 (+40)
	−40...+60	−50...+60	−60...+65	−60...+80
	95 (+30)	95 (+60)	95 (+60)	98 (+60)

** В упаковке

8. По степени защиты от внешних магнитных и электрических полей приборы делят на категории I и II. От воздействия внешних полей приборы защищают экранированием измерительного механизма.

9.4. ОБЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ

Опоры. Подвижную часть измерительного механизма в приборе всегда располагают вертикально или горизонтально. Так как на щитах и пультах управления для удобства наблюдения приборы устанавливают под некоторым углом наклона к горизонтали, то опорную их часть выполняют с учетом этого угла наклона. Это приводит к снижению класса точности таких приборов до 1,0. В зависимости от установки выполняют и опорную часть.

Для приборов, у которых подвижная часть укреплена на оси, важную роль играют опорные подпятники и керны (наконечники) осей (см. рис. 9.1а–г). В подпятниках цилиндрической формы с коническим кратером применяют либо опорные камни (обычно агат, корунд), либо бронзу (в приборах классов 1,5; 2,5 и 4,0). Подпятник с пружинящей опорой используют для переносных приборов, опору с шариковыми подшипниками (3–4 шарика) — для приборов с высокой степенью тряскоустойчивости.

Ось прибора обычно изготавливают из стали серебрянки, немагнитной или нержавеющей стали. Наконечник

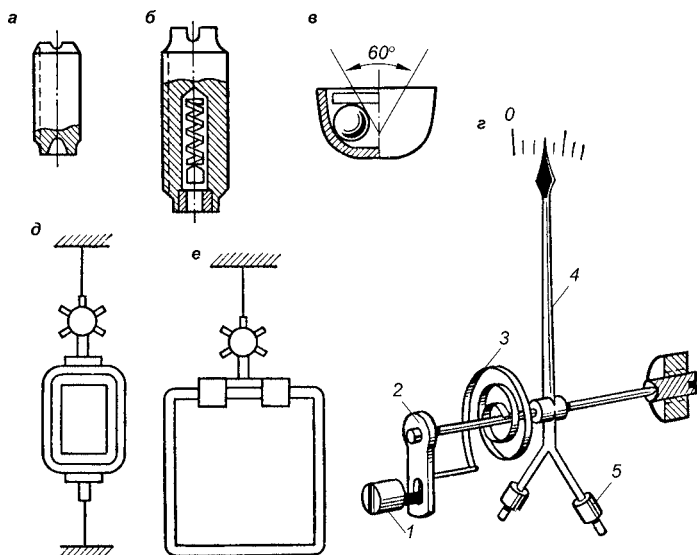


Рис. 9.1

Крепление подвижных частей измерительных механизмов и конструкция общих узлов приборов с использованием

а — подпятника с завальцованным опорным камнем; б — подпятника с пружинящей опорой; в — подпятника с шариковыми подшипниками; г — спиральных пружин и корректора; д — растяжек; е — подвеса.

оси конический, в некоторых конструкциях в торцовую часть оси запрессовывают керн из специальных твердых сплавов (рис. 9.1г).

Большое распространение получили приборы на растяжках и на подвесе (рис. 9.1д, е). Приборы на подвесе снабжают уровнем. Растяжки употребляют и на щитовых приборах.

В большинстве конструкций приборов растяжки являются одновременно и токоподводами к вращающимся элементам прибора (для магнитоэлектрических и электродинамических систем).

Пружина. Спиральную пружину (3 на рис. 9.1г) изготовляют из немагнитных сплавов (бронза). Одним концом ее крепят к оси подвижной части прибора, а другим — к одной из деталей корпуса. Пружина создает момент, направленный противоположно вращающему моменту, под действием которого поворачивается ось подвижной части. Чем больше угол поворота оси, тем больше момент упругих сил пружины.

Корректор. Для установки стрелки 4 (рис. 9.1з) на нулевую отметку шкалы при отключенном состоянии прибора необходимо провести корректировку упругого действия спиральной пружины или растяжек. Стрелка может смещаться при изменении температуры окружающей среды, из-за старения материала пружины и др. Угол отклонения от начального положения обычно невелик, поэтому в приборе предусмотрена возможность перемещения указателя на $\pm 6\%$ от длины шкалы. Корректировку производят поворотом специального цилиндра 1 с эксцентрично насаженным штифтом, который входит в паз пружинодержателя 2. Этот цилиндр называют *корректором* (рис. 9.1з). При повороте корректора происходит закручивание или ослабление спиральной пружины, а следовательно, перемещение стрелки прибора.

В приборах с растяжками (подвесом) винт корректора поворачивает обойму растяжки (подвеса) и перемещает стрелку или зеркало, закрепленные на растяжке (подвесе). В приборах со световым указателем корректирование нуля производят поворотом всего измерительного механизма, который закреплен в специальной обойме на основании корпуса.

Успокоитель. Для большинства приборов при выводе из равновесия подвижной части измерительного механизма стрелка должна достигать установившегося положения не более чем через 4 с. Для этого в приборах устанавливают успокоители.

В настоящее время наиболее широко применяют магнитоиндукционные успокоители, представляющие собой группу цилиндрических постоянных магнитов 1 (рис. 9.2), вставленных в пластину из мягкой стали и совместно с ней залитые алюминиевым сплавом. На оси подвижной части прибора закрепляют алюминиевое крыло 2.

При повороте оси магнитное поле постоянных магнитов индуцирует в алюминиевом крыле ЭДС, пропорциональную угловой скорости вращения оси. Под действием ЭДС в крыле возникает

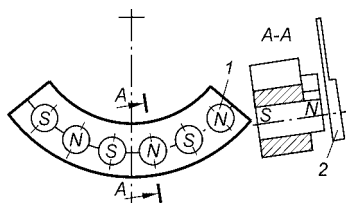


Рис. 9.2
Конструкция магнитоиндукционного успокоителя

ток i , а взаимодействие магнитного потока Φ и тока i создает успокаивающий момент M_{yc} , который всегда направлен в сторону, противоположную направлению вращения оси.

В магнитоэлектрических приборах используют успокоительный эффект от перемещения в поле постоянных магнитов алюминиевой рамки, на которой размещена обмотка.

Уравновешивающие грузы. Для того чтобы центр тяжести подвижной части прибора совпадал с осью вращения, на специальных держателях, жестко связанных со стрелкой и осью, устанавливают противовесы 5 (см. рис. 9.1г) — грузики с внутренней нарезкой. Изменение центра тяжести подвижной системы производят перемещением противовесов на нарезной части держателей. Уравновешенная система сохраняет положение стрелки на нулевой отметке при любых положениях прибора.



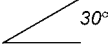


Знаки на шкалах и щитках приборов. Основные технические и эксплуатационные характеристики прибора показывают условными знаками на лицевой стороне прибора. Если их невозможно разместить со стороны шкалы, они выносятся на табличку, устанавливаемую на крышке прибора или боковых поверхностях корпуса. Например, узкопрофильные приборы имеют на шкале только знак измеряемой величины.

В соответствии со стандартом для электроизмерительных приборов на лицевой стороне должны быть указаны с помощью условных знаков:

- 1) наименование прибора (А, или амперметр; V, или вольтметр; W, или ваттметр, и т. д.);
- 2) знак системы прибора (см. табл. 9.1);
- 3) обозначение рода тока и числа фаз (см. табл. 9.2);
- 4) класс точности прибора; например, 1,5;
- 5) ГОСТ, которому соответствует данный прибор;
- 6) класс прибора по условиям эксплуатации (см. табл. 9.3);
- 7) категория защищенности от влияния внешних магнитных и электрических полей;
- 8) рабочее положение прибора (табл. 9.4);
- 9) испытательное напряжение прочности электрической изоляции токоведущих частей прибора относительно его корпуса (табл. 9.4);



Условные обозначения технических и эксплуатационных характеристик прибора на его шкале

Технические и эксплуатационные характеристики	Условные обозначения
Горизонтальное положение шкалы	
Вертикальное положение шкалы	
Наклонное положение шкалы (под определенным углом к горизонту; например, 30°)	
Направление ориентировки прибора в земном магнитном поле	
Измерительная цепь изолирована от корпуса на испытательное напряжение, например, 2 кВ	

10) номинальная частота или диапазон частот, в которых может работать прибор (если она отличается от промышленной частоты 50 Гц); например, 500 Гц;

11) шифр (или тип) прибора, например, ЭЗ30 и т. д.;

12) год выпуска и заводской номер;

13) марка завода-изготовителя.

9.5.

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Момент вращения в магнитоэлектрических приборах создается в результате воздействия магнитного поля постоянного магнита на проводники с током. Подвижная часть может выполняться или в виде рамки с обмоткой, или в виде постоянного магнита, закрепленного на оси. Более распространена конструкция с подвижной рамкой.

Приборы с подвижным магнитом имеют более низкие классы точности и изготавливают как указательные (класс 4,0 и ниже) для транспортных средств (автомобили, тракторы и т. д.).

На рис. 9.3 приведена принципиальная схема прибора с подвижной рамкой. Рамка 1 с обмоткой помещается в зазоре 3 между магнитом 4, расположенным внутри рамки, и магнитным ярмом 5. Так как воздушный зазор вдоль окружности магнита постоянен, то магнитная индукция B в зазоре также постоянна. Если в обмотке с числом

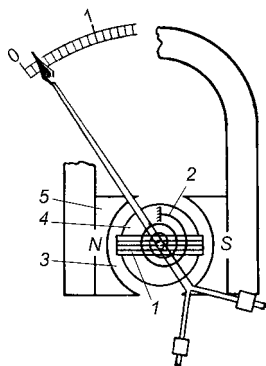


Рис. 9.3
Принципиальная схема
магнитоэлектрического
прибора с магнитом,
расположенным
внутри рамки

витков w существует ток I , то создается вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = BwIS_p = w\Phi I, \quad (9.1)$$

где S_p — площадь рамки в плоскости радиуса вращения; $\Phi = BS_p$ — магнитный поток.

Под действием вращающего момента рамка поворачивается на угол α и закручивает пружину 2. Противодействующий момент, создаваемый пружиной,

$$M_{\text{пр}} = m\alpha, \quad (9.2)$$

где m — удельный противодействующий момент.

При некотором значении тока I в обмотке рамки, учитывая, что $\Phi = \text{const}$ и $w = \text{const}$, вращающий момент $M_{\text{вр}} = \text{const}$. Следовательно, при некотором угле поворота рамки противодействующий момент пружины будет равен вращающему моменту: $M_{\text{пр}} = M_{\text{вр}}$, или $m\alpha = w\Phi I = kI$, где $w\Phi = k = \text{const}$. Тогда

$$\alpha = \frac{kI}{m} = cI, \quad (9.3)$$

где $c = k/m = \text{const}$.

Угол поворота стрелки прибора — это угол поворота рамки, поэтому из выражения (9.3) видно, что шкала такого прибора равномерная.

Величина $c = \alpha/I$ получила название *чувствительности прибора*. Повышение чувствительности может быть получено за счет увеличения магнитной индукции B и произведения $S_p w$ и уменьшения m . Уменьшить удельный момент можно, переходя к использованию светового указателя и растяжек.

Магнитную индукцию в воздушном зазоре увеличивают за счет применения постоянных магнитов из сплавов, содержащих никель, алюминий и кобальт и обеспечивающих индукцию в зазоре 0,2...0,3 Тл. Увеличить произведение $S_p w$ можно в основном только за счет изменения w , так как увеличение площади рамки увеличивает размеры всех остальных элементов и ухудшает весовые характеристики подвижной части.

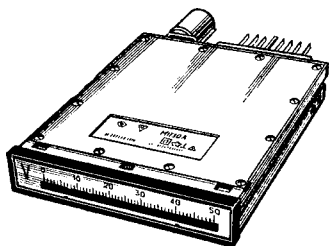


Рис. 9.4
Узкопрофильный
магнитоэлектрический прибор

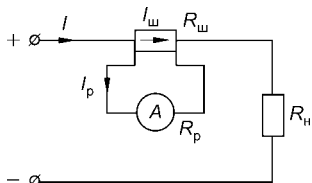


Рис. 9.5
Схема подключения шунта
к магнитоэлектрическому
прибору

Магнитоэлектрические приборы пригодны только для измерения в цепях постоянного тока. При включении их в цепь переменного тока применяют преобразовательные устройства (выпрямители, термоэлектрические преобразователи и т. д.).

Широкое распространение получили узкопрофильные магнитоэлектрические приборы со световым указателем для установки их на щитах и пультах (рис. 9.4). Они занимают в 5...10 раз меньшую площадь и имеют дополнительные информационные возможности за счет изменения при выходе измеряемой величины за устанавливаемые пределы цвета указателей или за счет появления сигнала от фотоконтактного устройства. Корпус прибора плоский, литой, высотой 30 мм.

Обмотку рамки измерительного механизма рассчитывают на токи до 100 мА, если прибор используют как амперметр, и до 10 мА, если как вольтметр. Большие токи вызвали бы увеличение сечения проводов обмотки рамки (обычно диаметр проводов не превышает 0,2 мм), а следовательно, массы и момента инерции подвижной части прибора. Пределы измерения по току в магнитоэлектрических приборах расширяют с помощью шунтов, а по напряжению — с помощью добавочных резисторов.

При измерении тока I , который в n раз больше тока I_p в рамке прибора, сопротивление шунта $R_{ш}$ (рис. 9.5) рассчитывают из условия равенства падений напряжения:

$$R_p I_p = R_{ш} I_{ш}, \quad (9.4)$$

где R_p — сопротивление обмотки рамки; $I_{ш} = I - I_p$ — ток в шунте.

Так как измеряемый ток $I = nI_p$, то с учетом (9.4) получим

$$\frac{R_{\text{ш}}}{R_p} = \frac{I_p}{I_{\text{ш}}} = \frac{I_p}{nI_p - I_p} = \frac{1}{n - 1},$$

откуда

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_p}{n - 1}. \quad (9.5)$$

Например, для измерения тока $I = 5 \text{ А}$ прибором $I_p = 5 \text{ мА}$ при сопротивлении $R_p = 10 \text{ Ом}$ требуется $R_{\text{ш}} \approx 0,01 \text{ Ом}$.

Шунты встраивают в прибор (в один и тот же корпус с измерительным механизмом) или выполняют отдельными от прибора. Изготавливают шунты из манганина, обладающего малым температурным коэффициентом электрического сопротивления.

Наружные шунты имеют две пары зажимов: одна пара для присоединения электрической цепи, в которой требуется измерить ток, вторая — для присоединения прибора. Присоединение производят калиброванными проводами, так как их сопротивление входит в сопротивление прибора R_p . При расчете сопротивления наружных шунтов под сопротивлением R_p в (9.5) надо понимать сопротивление прибора, а под n — число, показывающее, во сколько раз надо расширить предел измерения амперметра.

На рис. 9.6 показан миллиамперметр магнитоэлектрической системы со встроенными шунтами с диапазоном измерения 15, 30, 75, 150 мА.

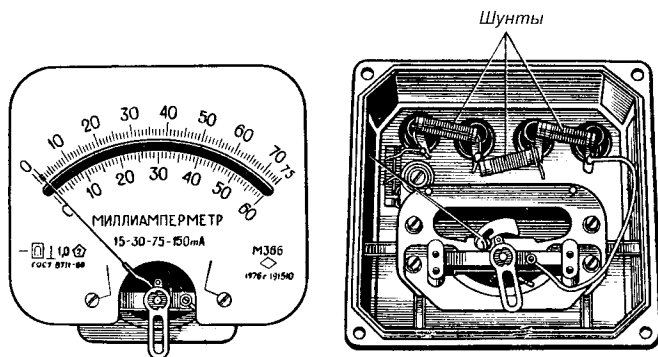
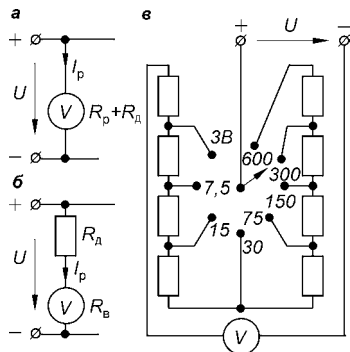


Рис. 9.6
Многодиапазонный магнитоэлектрический амперметр
с встроенными шунтами

Рис. 9.7
Типы вольтметров
магнитоэлектрической
системы

a — с внутренним добавочным резистором; *б* — с внешним добавочным резистором; *в* — многодиапазонный с внутренними добавочными резисторами.



При изготовлении вольтметра магнитоэлектрической системы последовательно с обмоткой рамки включают добавочный резистор с большим сопротивлением R_d , чтобы ток I_p в обмотке рамки при подключении вольтметра к участку цепи, на котором измеряют напряжение (рис. 9.7*a*), не превышал 10 мА. При этом $I_p = U/(R_p + R_d) = kU$, а с учетом (9.3), если $I = I_p$,

$$\alpha = cI_p = ckU = c'U.$$

Таким образом, стрелка прибора отклоняется на угол, пропорциональный напряжению, и шкалу прибора можно отградуировать в вольтах.

Когда необходимо расширить в n раз предел измерения вольтметра, применяют наружные добавочные резисторы (рис. 9.7*б*). Значения сопротивления добавочного резистора вычисляют по формуле

$$R_d = (n - 1)R_v,$$

где R_v — сопротивление внутренней измерительной цепи вольтметра.

Верхний предел измерения многодиапазонного вольтметра можно расширить, изменяя сопротивление R_d с помощью переключателя (рис. 9.7*в*).

Для компенсации изменения сопротивления обмотки рамки под действием температуры во всех приборах используют специальные резисторы, выполненные из материалов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

Влияние внешних магнитных полей на магнитоэлектрические приборы весьма незначительно, так как из-

мерительная рамка экранирована магнитной системой прибора. Такие приборы благодаря своим качествам — равномерности шкалы, высокой чувствительности (до 10^{-11} А и 10^{-7} В), точности отсчета, простоте расширения диапазона измерений, малому собственному потреблению энергии — нашли широкое применение для измерения не только постоянных токов и напряжений, но и переменных токов (со встроенными преобразователями).

9.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Электромагнитные приборы действуют по принципу перемещения подвижного сердечника из ферромагнитного материала под влиянием магнитного поля неподвижной катушки. Сердечник укреплен на одной оси со стрелкой указателя. Распространены две конструкции: приборы с плоской катушкой (рис. 9.8) и приборы с круглой катушкой (рис. 9.9).

В первой конструкции лепесток 2 из ферромагнитного материала (мягкой стали или специального сплава), эксцентрично насаженный на ось со стрелкой, втягивается магнитным полем неподвижной катушки 1, которое образуется током в катушке.

Во второй конструкции имеется два ферромагнитных элемента 3, 4, размещенных внутри неподвижной круглой катушки 5. Элемент 3 прикреплен к внутренней поверхности катушки и является неподвижным, а элемент 4

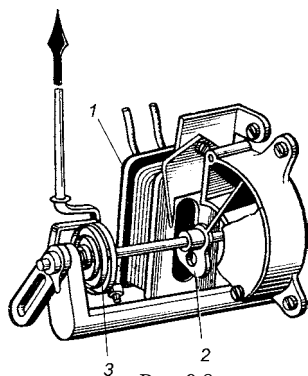


Рис. 9.8
Конструктивная схема
электромагнитного прибора
с плоской катушкой

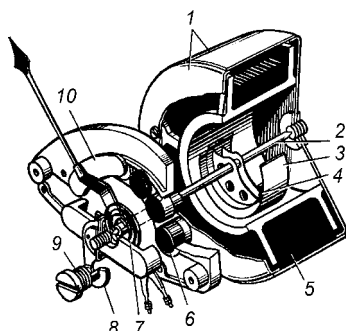


Рис. 9.9
Конструктивная схема
электромагнитного прибора
с круглой катушкой

жестко связан с осью 2 прибора. При наличии тока в катушке оба элемента одноименно намагничиваются и стремятся оттолкнуться, как два магнита одинаковой полярности. В результате такого взаимодействия подвижный элемент поворачивается вместе с осью. В приборах обеих конструкций противодействующий момент создается спиральной пружиной (3 на рис. 9.8, 7 на рис. 9.9). Успокоители (6, 10) в таких магнитных системах бывают воздушные и магнитоиндукционные.

Вращающий момент в электромагнитных приборах может быть определен исходя из изменения энергии магнитного поля катушки прибора при изменении в ней тока I и ее индуктивности L при перемещении сердечника. Как известно, энергия магнитного поля

$$W_{\text{м}} = LI^2/2,$$

а механическая энергия, вызванная перемещением сердечника,

$$W_{\text{мх}} = M_{\text{вр}}\alpha.$$

При вращении оси

$$M_{\text{вр}}d\alpha = I^2dL/2,$$

откуда

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}.$$

В режиме установившегося отклонения при создании противодействующего момента пружинами $M_{\text{пр}} = M_{\text{вр}}$,

т. е. с учетом (9.2), $m\alpha = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$, откуда

$$\alpha = \frac{1}{2m} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (9.6)$$

Из выражения (9.6) видно, что знак угла отклонения стрелки прибора не зависит от направления тока в катушке. Следовательно, приборы пригодны для измерения в цепях постоянного и переменного токов. В цепи переменного тока они измеряют действующее значение тока или напряжения.

Шкала прибора, как это видно из (9.6), неравномерная. Меняя форму сердечника и его расположение в катушке, можно получить почти равномерную шкалу начиная с 20% верхнего предела диапазона измерений.

При меньших значениях измеряемой величины электромагнитные приборы недостаточно чувствительны и эта часть шкалы считается нерабочей.

Конструктивная особенность электромагнитного прибора позволяет изготовить амперметры этой системы на токи 200...300 А для прямого включения в цепь. Действительно, неподвижная катушка может быть выполнена из провода любого сечения. Амперметр на 150...300 А выполняют с катушкой в виде одного витка из медной шины. Вольтметры электромагнитной системы изготавливают на напряжение до 660 В, катушку выполняют из большого числа витков медной проволоки небольшого сечения, а для компенсации температурной погрешности включают добавочные резисторы из манганина.

Ввиду относительно слабого собственного магнитного поля на показания электромагнитных приборов весьма значительное влияние оказывают внешние магнитные поля. Для снижения их влияния измерительный механизм защищают стальным экраном (1 на рис. 9.9). В приборе имеется корректор (8, 9).

Встречаются конструкции, в которых устанавливают две неподвижные катушки с самостоятельными сердечниками, насаженными на одну ось, так называемые *астатические приборы* (рис. 9.10). Здесь обе обмотки включены последовательно, но так, что их потоки Φ_1 и Φ_2 направлены встречно, а моменты, создаваемые этими потоками и действующие на подвижную часть прибора, согласны. При такой конструкции внешний магнитный поток $\Phi_{вн}$ в одной катушке усиливает, а в другой уменьшает вращающий момент прибора на равные значения. Этим исключается влияние внешнего магнитного поля.

Астатические приборы изготавливают для классов точности 0,5 и 1,0 и только переносного исполнения (лабораторные, испытательные комплекты). Простота конструкции, невысокая стоимость, пригодность для постоянного и переменного токов, большая перегрузочная способность, возможность

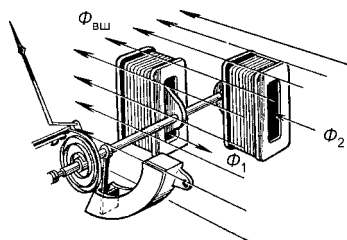


Рис. 9.10
Конструктивная
схема астатического
электромагнитного прибора

непосредственного включения амперметров на большие токи привели к широкому распространению этих приборов в промышленных установках.

Недостатками электромагнитных приборов можно считать неравномерность шкалы, низкую чувствительность, сравнительно большое собственное потребление (амперметры — до 5 В·А, вольтметры — до 10 В·А), чувствительность к влиянию внешних магнитных полей.

9.7. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Электродинамические приборы имеют две катушки (рис. 9.11). Неподвижную катушку 1 выполняют из двух частей, между которыми проходит ось. На оси укреплена подвижная катушка 2. Противодействующий момент создается двумя пружинами (на рисунке не показаны). Через них осуществляют и присоединение подвижной катушки к цепи.

При включении прибора в измерительную цепь токи в катушках создают два магнитных поля. Эти поля стремятся повернуть подвижную катушку в положение, при котором электромагнитная энергия всего механизма была бы максимальной. Энергия электродинамического прибора

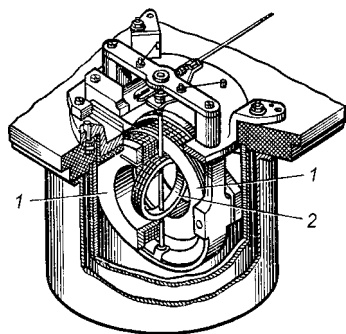


Рис. 9.11
Конструктивная схема
электродинамического прибора

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M_{12} I_1 I_2,$$

где L_1 и L_2 — индуктивности неподвижной и подвижной катушек; M_{12} — взаимная индуктивность катушек; I_1 и I_2 — токи в подвижной и неподвижной катушках.

При любом взаимном положении катушек их индуктивности постоянны, а взаимная индуктивность изменяется при перемещении подвижной катушки. Так как при конкретном измерении токи I_1 и I_2 неизменны, то вращающий момент

$$M_{\text{вп}} = \frac{dW_{\text{м}}}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (9.7)$$

При равновесии системы созданный пружинами противодействующий момент $M_{\text{пр}} = M_{\text{вп}}$. Тогда

$$m\alpha = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (9.8)$$

В общем случае производная $dM_{12}/d\alpha$ не является постоянной величиной, но подбором конструкции катушек и их начального взаимного расположения можно добиться ее постоянства ($dM_{12}/d\alpha = c'$) на значительном участке дуги поворота подвижной катушки. Из (9.8) получаем

$$\alpha = c' I_1 I_2 / m = c I_1 I_2.$$

Приборы электродинамической системы применяют для измерения в цепях переменного и постоянного токов, так как направление вращающего момента не изменяется при изменении направления обоих токов. При измерении переменного тока выражение (9.7) справедливо для мгновенных значений токов i_1 и i_2 , а мгновенное значение вращающего момента будет равно

$$M_{\text{вп } t} = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}.$$

Подвижная часть электродинамического прибора в силу инерционности не может следовать за изменениями вращающего момента $M_{\text{вп } t}$, и угол отклонения α пропорционален среднему значению $M_{\text{вп}}$ за период T :

$$M_{\text{вп}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} dt.$$

При $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$ и $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi)$, где ψ — угол сдвига по фазе между токами i_1 и i_2 , получаем

$$M_{\text{вп}} = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cos \psi,$$

где I_1 и I_2 — действующие значения токов i_1 и i_2 соответственно. Следовательно,

$$\alpha = \frac{c' I_1 I_2 \cos \psi}{m} = c'' I_1 I_2 \cos \psi. \quad (9.9)$$

При $\psi = \text{const}$

$$\alpha = c I_1 I_2, \quad (9.10)$$

где $c = \frac{c' \cos \psi}{m} = \frac{1}{m} \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cos \psi$.

В зависимости от способа взаимного включения катушек электродинамический прибор может быть использован как амперметр, вольтметр, ваттметр или фазометр.

При использовании электродинамического прибора в качестве амперметра на токи выше 0,5 А катушки нельзя включать последовательно из-за трудности подвода больших токов к подвижной катушке, так как подсоединение подвижной катушки к цепи осуществляют через спиральные пружины, создающие противодействующий момент. В этом случае обе обмотки катушек соединяют параллельно (рис. 9.12а). Условно обмотка неподвижной катушки показана толстой линией, обмотка подвижной катушки — тонкой линией. Измеряемый ток $I = I_1 + I_2$. Ток I_1 в обмотке неподвижной катушки может быть выражен как $I_1 = k_1 I$, а ток I_2 в обмотке подвижной катушки — как $I_2 = k_2 I$. Из выражения (9.10) получим

$$\alpha = c I_1 I_2 = c k_1 k_2 I^2 = c' I^2.$$

Благодаря различным конструктивным приемам (форме катушек, их расположению) оказывается возможным получить линейную шкалу для электродинамического амперметра начиная с 20% от верхнего предела измерения.

Совпадения по фазе переменных токов в обмотках подвижной и неподвижной катушек ($\psi = 0$) достигают включением последовательно с катушками элементов с активным и индуктивным сопротивлениями: $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ и $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$.

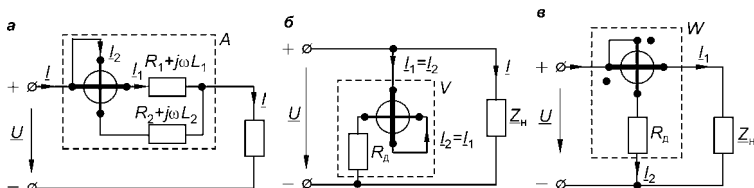


Рис. 9.12

Схемы включения электродинамических приборов

а — амперметра; б — вольтметра; в — ваттметра.

При использовании электродинамического прибора в качестве вольтметра обе обмотки прибора включают последовательно друг с другом и с добавочным резистором R_d (рис. 9.12б). Тогда

$$I_1 = I_2 = U / (R_1 + R_2 + R_d),$$

где R_1 и R_2 — сопротивления обмоток подвижной и неподвижной катушек соответственно. В результате из (9.10) имеем

$$\alpha = cU^2 / (R_1 + R_2 + R_d)^2 = c'U^2.$$

При использовании электродинамического прибора в качестве ваттметра обмотку неподвижной катушки включают в цепь последовательно (тогда $I_1 = I$), а обмотку подвижной катушки, соединенную последовательно с добавочным резистором R_d , — параллельно зажимам приемника (тогда $I_2 = U / (R_2 + R_d)$). Реактивное сопротивление этой цепи очень мало и поэтому $R_2 + R_d \approx Z_2$. Можно считать, что практически ток I_2 совпадает по фазе с напряжением U на зажимах приемника. Из (9.9) имеем

$$\alpha = \frac{c''IU \cos \psi}{R_2 + R_d}.$$

Учитывая, что угол ψ равен в этом случае углу сдвига фаз между током \underline{I} и напряжением \underline{U} , т. е. $\psi = \varphi$, получим

$$\alpha = \frac{c''IU \cos \psi}{R_2 + R_d} = c'IU \cos \varphi = c'P. \quad (9.11)$$

Из уравнения (9.11) видно, что шкала электродинамического ваттметра равномерная.

Зажимы последовательной обмотки обозначают буквой I или числом ампер, равным предельному (номинальному) значению тока $I_{\text{ном}}$ обмотки. Зажимы параллельной обмотки, включаемой так же, как вольтметр, обозначают буквой U или числом вольт, равным предельному (номинальному) значению напряжения $U_{\text{ном}}$ обмотки.

Направление отклонения подвижной системы прибора зависит от взаимного направления токов в обеих обмотках. Поэтому для правильного включения обмоток их зажимы маркируют. У так называемых «генераторных» зажимов обмоток (зажимов, к которым следует

присоединять провода со стороны источника питания) ставят знак * (звездочка). На электрических схемах эти зажимы обмоток обозначают точками.

На рис. 9.12в показано такое включение обмоток ваттметра и направление токов в них, которое обеспечивает правильное направление движения стрелки прибора.

При угле сдвига фаз $\varphi > 90^\circ$ (что возможно в некоторых случаях измерений) $\cos\varphi$ отрицателен и, следовательно, отклонение стрелки прибора также должно быть отрицательным. Чтобы иметь возможность измерить такие отрицательные мощности, в ваттметрах устанавливают переключатель для изменения направления тока в обмотке подвижной катушки. Положение переключателя отмечено знаками плюс и минус. Измеренное значение нужно записывать с соответствующим знаком по положению переключателя.

Электродинамические приборы имеют специальный экран, защищающий их от воздействия внешних магнитных полей.

Для изменения верхнего предела измерения на неподвижной катушке имеется секционированная обмотка. Обычно используют две секции, которые в зависимости от того, последовательно или параллельно они соединены, позволяют изменять предел измерения по току в два раза (2,5 и 5 А или 5 и 10 А).

Для изменения верхнего предела измерения по напряжению добавочный резистор, включенный последовательно с обмоткой подвижной катушки, также секционируют. Обычно это делают в конструкциях лабораторных приборов.

Для самопишущих приборов и приборов, в которых требуются большие вращающие моменты, используют ферродинамические измерительные механизмы (рис. 9.13). В этих приборах обмотку неподвижной катушки 1 размещают на стальном магнитопроводе 2, выполненном из листовой электротехнической стали или из специального сплава (пермаллоя), обладающего малыми потерями на

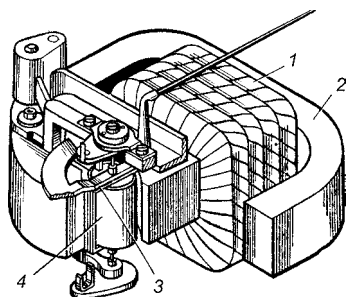


Рис. 9.13
Конструктивная схема
ферродинамического прибора

гистерезис и вихревые токи. Подвижная катушка вращается около неподвижного стального сердечника 4, помещенного в соосную расточку магнитопровода. Стороны обмотки (рамки) 3 подвижной части находятся в зазоре между магнитопроводом и неподвижным стальным сердечником, где магнитное поле достигает значительно больших значений, чем магнитное поле, создаваемое в воздухе неподвижной катушкой электродинамического прибора.

9.8. ИНДУКЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Принцип действия индукционных приборов основан на взаимодействии бегущего магнитного поля с вихревыми токами, индуцируемыми этим же полем в проводящем подвижном диске.

Бегущее поле создается двумя магнитными потоками, сдвинутыми на некоторый угол по фазе и в пространстве. Можно создать индукционные приборы любого назначения — амперметры, вольтметры, ваттметры и др. На практике наибольшее распространение получили индукционные счетчики электрической энергии (рис. 9.14).

Приведенная конструкция (трехпоточная) счетчика состоит из двух электромагнитов 1 и 2 и подвижного алюминиевого диска 5. Диск укреплен на оси, которая связана с помощью червячной передачи со счетным механизмом. Диск вращается в зазоре электромагнитов. Магнитный поток Φ_I электромагнита 1 U-образной формы создается током I

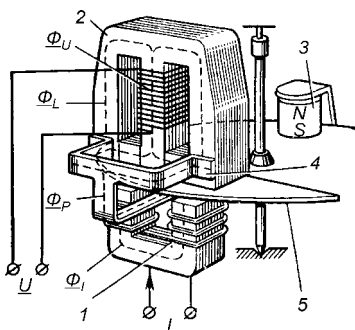


Рис. 9.14
Конструктивная схема
индукционного счетчика
электрической энергии

приемника электрической энергии, так как его обмотка включена последовательно в цепь нагрузки. Поток Φ_I дважды пересекает диск и незначительно отстает по фазе от образующего его тока I . Поэтому можно считать, что значение потока Φ_I в первом приближении пропорционально току I : $\Phi_I = kI$.

Электромагнит 2 имеет Т-образный вид. На его среднем стержне расположена

обмотка, включенная параллельно приемнику электрической энергии, и ток в ней пропорционален напряжению сети U . Обмотка состоит из большого числа витков и создает магнитный поток Φ_U , значение которого пропорционально напряжению U . Так как реактивное сопротивление этой обмотки большое, можно считать, что ее полное сопротивление $Z_U \approx X_U$, и ток I_U в обмотке сдвинут по фазе относительно напряжения U почти на $\pi/2$. Поток Φ_U , как видно из рисунка, делится на две части: рабочий поток Φ_p и потоки Φ_L , которые замыкаются помимо диска по боковым ветвям магнитопровода 2. Таким образом, $\Phi_U = \Phi_p + 2\Phi_L$.

Рабочий поток Φ_p проходит по среднему стержню магнитопровода и пересекает диск, замыкаясь через противоположную скобу 4, средняя часть которой находится под центральным стержнем магнитопровода 2. При такой конструкции под диском находятся три полюса (два от U-образного магнита и один от Т-образного магнита). Потоки Φ_L определяют сдвиг по фазе между потоками Φ_p и Φ_I . Вихревые токи, индуцируемые в диске магнитными потоками, пропорциональны магнитным потокам и частоте. Магнитный поток Φ_p индуцирует в диске вихревой ток $I_{в.р} = k_1 f \Phi_p$, а поток Φ_L — ток $I_{в.л} = k_2 f \Phi_L$ (f — частота тока сети).

Среднее за период значение электромагнитной силы, возникающей при взаимодействии магнитного потока и вихревого тока и действующей на диск,

$$F = \Phi I \cos \gamma,$$

где γ — сдвиг фаз между потоком Φ и током I .

Взаимодействие между индуцируемым током в диске и созданным им потоком, например, между $I_{в.л}$ и Φ_L , не создает электромагнитной силы, так как $\gamma = \pi/2$ и $\cos \gamma = 0$. Электромагнитные силы создаются только в результате взаимодействия магнитного потока Φ_p с током $I_{в.л}$ и потока Φ_L с током $I_{в.р}$. Общий вращающий момент

$$M_{вр} = c_1 \Phi_p I_{в.л} \cos \gamma_1 + c_2 \Phi_L I_{в.р} \cos \gamma_2.$$

Путем несложных преобразований получим

$$M_{вр} = c f \Phi_I \Phi_p \sin \psi,$$

где ψ — угол между потоками Φ_I и Φ_p .

Так как $\Phi_I = kI$, $\Phi_p = k'U$ и $\sin\psi = \cos\varphi$ (последнее можно получить с помощью векторной диаграммы), выражение для $M_{\text{вр}}$ принимает вид

$$M_{\text{вр}} = c_P UI \cos\varphi = c_P P.$$

Противодействующий момент $M_{\text{пр}}$ создается постоянным магнитом 3, в поле которого вращается диск, и является тормозным моментом, пропорциональным частоте вращения диска. Постоянный магнитный поток Φ индуцирует во вращающемся диске ЭДС $E_{\text{в}} = -\Phi d\alpha/dt$, под действием которой в нем возникает вихревой ток $I_{\text{в}} = E_{\text{в}}/R_{\text{д}}$, где $R_{\text{д}}$ — сопротивление диска. Взаимодействие постоянного магнитного потока Φ с вихревым током $I_{\text{в}}$ создает тормозной момент

$$M_{\text{т}} = \Phi I_{\text{в}} = \frac{\Phi^2}{R_{\text{д}}} \frac{d\alpha}{dt} = c_{\text{т}} \frac{d\alpha}{dt}.$$

Когда моменты равны, т. е. $M_{\text{т}} = M_{\text{вр}}$, частота вращения диска постоянна (установившийся режим). Для этих условий

$$c_P P = c_{\text{т}} \frac{d\alpha}{dt}, \text{ или } P = \frac{c_{\text{т}}}{c_P} \frac{d\alpha}{dt}.$$

Проинтегрировав это выражение за период времени $T = t_2 - t_1$, получим

$$\int_{t_1}^{t_2} P dt = \frac{c_{\text{т}}}{c_P} \int_{t_1}^{t_2} d\alpha.$$

Левая часть этого равенства определяет электрическую энергию, следовательно, и правая часть тоже определяет электрическую энергию:

$$W = \frac{c_{\text{т}}}{c_P} \int_{t_1}^{t_2} d\alpha = \frac{c_{\text{т}}}{c_P} 2\pi N,$$

где N — число оборотов диска за промежуток времени $t_2 - t_1$.

Таким образом, число оборотов диска пропорционально расходу электроэнергии. Величину $c_{\text{т}}/c_P 2\pi$ называют *постоянной счетчика*. Она показывает, какому количеству киловатт-часов электроэнергии соответствует один оборот диска. Червячная передача счетного механизма учитывает постоянную счетчика, и счетный механизм непосредственно отсчитывает энергию в киловатт-часах.



Поскольку индуцируемые токи во вращающемся элементе (диске) зависят от частоты сети f , ее изменение сказывается на правильности показаний счетчика.

Для трехфазных систем выпускают счетчики, состоящие из трех и двух однофазных систем (для четырех- и трехпроводной сети). В этом случае вращающийся элемент является общим и счетный механизм показывает потребление электроэнергии трехфазным электроприемником.

Индукционные счетчики весьма надежны в эксплуатации.

9.9. ЛОГОМЕТРЫ

Во всех приборах, кроме счетчика энергии, равновесие подвижной части определялось равенствами вращающего момента с противодействующим моментом, который возникал при действии механических сил (спиральной пружины, растяжки, подвеса). В приборах типа логометров равновесие подвижной части устанавливается в результате взаимодействия двух электромагнитных моментов. При наличии токов в двух подвижных элементах (обмотках) равновесие подвижной части зависит только от отношения этих токов.

Логометры по неподвижной части не отличаются от других типов приборов, поэтому они могут быть по схеме устройства магнитоэлектрическими, электродинамическими и др. (рис. 9.15).

Конструкция магнитоэлектрического логометра предусматривает неравномерность магнитного потока в зазоре 2 между полюсными наконечниками постоянного магнита 1 и сердечником из мягкой стали (рис. 9.15). Эта неравномерность достигается приданием особой формы при расточке наконечников или сердечника. Положение жестко связанных катушек, укрепленных на одной оси, зависит от двух вращающих моментов. Равенство моментов определяется значением токов в обмотках катушек и углом поворота (значением магнитной индукции в зазоре). На рис. 9.15 показан

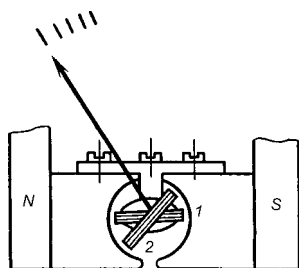


Рис. 9.15
Конструктивная схема
магнитоэлектрического
логометра

логометр с эллипсоидальным сердечником. Даже при равных токах в обмотках ($I_1 = I_2$) одна катушка находится в более узком зазоре, где магнитная индукция поля B_1 большая, другая — в более широком зазоре, где магнитная индукция $B_2 < B_1$. Следовательно, вращающие моменты не одинаковы. Они направлены навстречу друг другу, и установившемуся равновесию подвижной части соответствует $M_{вр1} = M_{вр2}$.

Так как вращающий момент зависит от магнитной индукции $B(\alpha)$, которая изменяется с изменением угла поворота α , то в соответствии с (9.1) имеем

$$M_{вр1} = c_1 I_1 B_1(\alpha); \quad M_{вр2} = c_2 I_2 B_2(\alpha).$$

Равенство вращающих моментов будет достигаться при следующем соотношении токов в обмотках:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{c_2 B_2(\alpha)}{c_1 B_1(\alpha)} = c \frac{B_2(\alpha)}{B_1(\alpha)}.$$

Следовательно,

$$\alpha = f(I_1/I_2). \quad (9.12)$$

При отсутствии токов в катушках подвижная часть может занимать любое положение, а при наличии токов, как это видно из (9.12), угол поворота зависит от соотношения токов.

Магнитоэлектрические логометры широко используют в качестве *омметров*. Отношение токов в двух сравниваемых ветвях с сопротивлением R_0 (прибора) и R_x (измеряемого сопротивления) при одинаковых напряжениях U определяется углом поворота α , зависящим от сопротивлений этих ветвей:

$$\alpha = f(R_x/R_0). \quad (9.13)$$

Из (9.13) следует, что показание прибора не зависит от значения напряжения. Поэтому в омметрах в качестве источника энергии используют генераторы постоянного тока с ручным приводом, несмотря на то что при вращении вручную якоря генератора возникают значительные колебания ЭДС.

Для определения сопротивления изоляции в электрических установках используют так называемые *мегаомметры* (рис. 9.16).

Токи в рамках соответственно

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_x}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2 + R_d},$$

поэтому согласно (9.12)

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_2 + R_d}{R_1 + R_x}\right). \quad (9.14)$$

Из уравнения (9.14) видно, что шкала мегаомметра неравномерная. При $R_x = 0$ угол α максимален и поэтому нулевая отметка шкалы находится справа, а при сопротивлении $R_x = \infty$ $\alpha = 0$ и стрелка прибора остается в крайнем левом положении.

В электродинамических и ферродинамических логометрах подвижная система также состоит из двух катушек с токами I_1 и I_2 (рис. 9.17). Последовательно с подвижной катушкой 1 включают такую индуктивность L , чтобы ток I_1 был сдвинут по фазе относительно напряжения сети \underline{U} практически на угол $\pi/2$ (рис. 9.17б). Последовательно с катушкой 2 включают такой резистор R , чтобы ток I_2 совпадал с напряжением \underline{U} (индуктивностью подвижных катушек в связи с ее малостью пренебрегают). Магнитный поток Φ неподвижной катушки 3 совпадает по фазе с током нагрузки \underline{I} , так как обмотка этой катушки включена последовательно с нагрузкой.

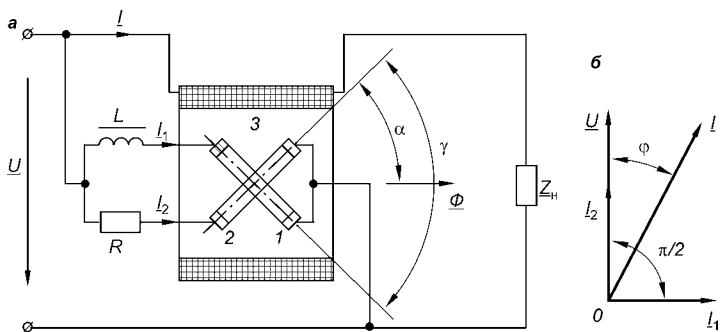


Рис. 9.17
Электродинамический логометр

a — принципиальная схема включения логометра при использовании его как фазометра; *б* — векторная диаграмма токов логометра-фазометра.

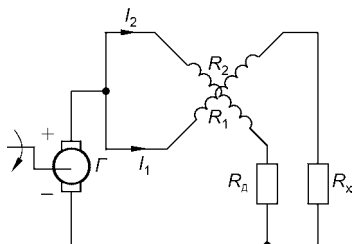


Рис. 9.16
Принципиальная схема
мегаомметра

При сдвиге плоскостей рамок подвижных катушек относительно друг друга на угол γ и плоскости рамки подвижной катушки 2 относительно осевой линии магнитного потока Φ на угол α (рис. 9.17а) получаем

$$\begin{aligned} M_{\text{вр1}} &= c_1 I_1 I \cos((\pi/2) - \varphi) \cos \alpha, \\ M_{\text{вр2}} &= c_2 I_2 I \cos \varphi \cos(\gamma - \alpha). \end{aligned} \quad (9.15)$$

Вращающие моменты всегда направлены навстречу друг другу, а их значение зависит от углов φ и α . При заданном значении угла φ равенство моментов $M_{\text{вр1}} = M_{\text{вр2}}$ и установившееся положение подвижной системы наступает при некотором значении угла α . Из равенства моментов (9.15) имеем

$$\frac{c_2 I_2}{c_1 I_1} \frac{\cos \varphi}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} = \frac{\cos \alpha}{\cos(\gamma - \alpha)}.$$

Обеспечив конструктивным решением $c_1 = c_2$, $\gamma = \pi/2$ и $I_1 = I_2$, получим, что $\alpha = \varphi$, т. е. пространственный угол α подвижной части прибора равен сдвигу фаз φ . На принципе действия логометра основаны фазометры электродинамической и ферродинамической систем — приборы, измеряющие сдвиг фаз между напряжением \underline{U} и током \underline{I} в цепи.

9.10. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

Регистрирующие приборы, предназначенные для непрерывной записи электрических величин, делятся на две группы: *самопишущие приборы* и *осциллографы*. Последние в свою очередь подразделяются на *электро-механические* и *электронные*. Безынерционность электронного луча дает возможность наблюдать за изменением мгновенных значений электрических величин во время переходных процессов в электрических цепях, происходящих с частотой до 10^8 Гц и протекающих в течение времени, равного тысячным и миллионным долям секунды.

Электромеханические осциллографы используют для записи мгновенных значений, изменяющихся с частотой не выше 10^4 Гц. Измерительным механизмом в них являются зеркальные магнитоэлектрические гальвано-



метры с весьма малой инерционностью. Отраженный от зеркала луч света падает на кинолентку или светочувствительную бумагу, которая движется со скоростью 1...5000 мм/с. Обычно эти осциллографы имеют несколько гальванометров, что позволяет производить регистрацию нескольких электромагнитных величин одновременно.

Самопишущие приборы с непрерывной или точечной записью являются обычными (по принципу действия) электромеханическими приборами с дополнительным устройством для записи и лентопротяжным механизмом. Непрерывную запись чаще всего производят с помощью пера, помещенного на конце стрелки (рис. 9.18). Существуют и другие конструкции записывающих устройств. Перемещение пера на диаграммной бумаге вызывает момент трения, для преодоления которого требуется увеличенный вращающий момент измерительного механизма. Самопишущие приборы поэтому чаще всего выполняются с ферродинамическим или магнитоэлектрическим измерительным механизмом.

Запись ведется на бумажную ленту с прямоугольной или криволинейной системой координат или бумажный диск. Скорость перемещения ленты определяется частотой изменения записываемой величины и необходимой продолжительностью записи. Большие потребности практики в записи мощности, тока, напряжения и других величин могут быть удовлетворены диапазоном скоростей перемещения ленты от 5 до 14400 мм/ч. При скорости 60 мм/ч бумажный рулон обеспечивает запись в течение 7–8 суток.

Бумажная лента приводится в движение синхронным двигателем малой мощности, который при постоянной частоте напряжения сети 50 Гц в зависимости от числа пар полюсов поддерживает постоянную частоту вращения 3000 или реже 1500 об/мин. Частота вращения регулируется до 2 об/мин с помощью редуктора.

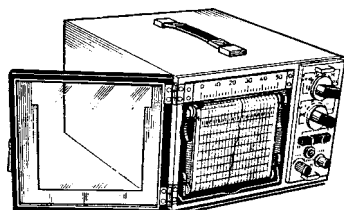


Рис. 9.18
Самопишущий прибор
для записи процессов
на бумажной ленте

В некоторых самопишущих приборах полевого и переносного типов привод лентопротяжного механизма осуществляется от мощного часового устройства. Самопишущие приборы с дисковой диаграммой чаще всего имеют часовой привод. Класс точности этих приборов не превышает 1,5.

Для наблюдения за большим количеством процессов используют специальные информационно-измерительные системы, в которых значения измеренных величин выводятся на ленту печатающего устройства, где указываются время, номер объекта измерения и измеряемая величина (датчиками обычно служат электромеханические приборы).

9.11. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

Электронные измерительные приборы нашли широкое применение наряду с электромеханическими приборами. В отличие от электромеханических приборов они обладают высокой чувствительностью, большим входным сопротивлением и, следовательно, малым потреблением энергии из цепи, в которой производят измерения, и широким диапазоном частот (практически от нуля до нескольких сотен мегагерц).

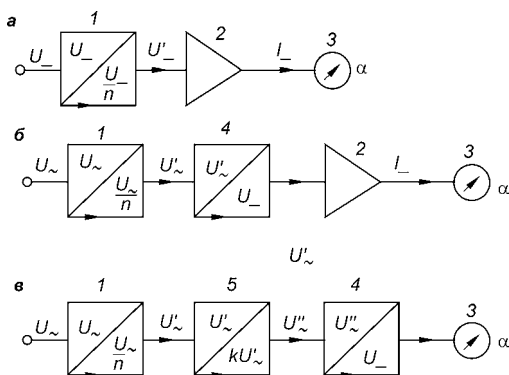
Электронные измерительные приборы разделяют на две группы: аналоговые (стрелочные) и цифровые. К группе электронных аналоговых приборов относят измерительные приборы, в которых наряду с электронной измерительной цепью, осуществляющей преобразование входного сигнала, используют магнитоэлектрические приборы в качестве устройств отсчета.

У показывающих приборов со стрелочным указателем есть общий недостаток — субъективность измерений, так как невозможно точно определить положение стрелки на шкале прибора. Этот недостаток устранен в цифровых измерительных приборах с цифровыми индикаторами. Цифровые измерительные приборы широко применяют для измерения частоты, интервалов времени, напряжения и т. д.

Промышленность выпускает электронные аналоговые вольтметры, предназначенные для измерения в цепях

Рис. 9.19
Структурные
схемы
электронных
вольтметров

а — вольтметр постоянного напряжения;
б — вольтметр переменного напряжения с выпрямителем на входе;
в — вольтметр переменного напряжения с усилителем переменного напряжения на входе.



постоянного и переменного тока, универсальные вольтметры, частотомеры, фазометры, приборы для измерения параметров электрической цепи (R , L , C) и др. В зависимости от электронной измерительной цепи вольтметры переменного тока подразделяют также на вольтметры средних, действующих и амплитудных значений. Ниже приводятся лишь краткие сведения об электронных вольтметрах.

Электронные вольтметры подразделяют на несколько групп: вольтметры постоянного тока (типа В2), вольтметры переменного тока (типа В3) и универсальные вольтметры (типа В7), предназначенные для измерений в цепях постоянного и переменного тока. На рис. 9.19 приведены структурные схемы аналоговых электронных вольтметров постоянного и переменного напряжения.

Электронный вольтметр постоянного напряжения. Измеряемое напряжение подают на входное устройство 1 (рис. 9.19*а*), представляющее многоступенчатый высокоомный резистивный делитель напряжения. С делителя напряжения ослабленный входной сигнал поступает на усилитель постоянного тока 2, где это напряжение усиливается и затем преобразуется в постоянный ток, пропорциональный входному напряжению. С выхода усилителя постоянного тока сигнал поступает на измерительный прибор 3 (обычно микроамперметр на 50...100 мкА).

Электронные вольтметры переменного напряжения основаны на принципе преобразования переменного напряжения в пропорциональное ему постоянное напряжение, которое и измеряют магнитоэлектрическим прибором.

Их выполняют в соответствии со структурными схемами, представленными на рис. 9.19б, в. В обеих схемах измеряемое входное напряжение подают на вход делителя напряжения 1, обеспечивающего большое входное сопротивление прибора.

В схеме на рис. 9.19б ослабленное входное напряжение поступает на вход детектора 4, где происходит его преобразование в постоянное напряжение, которое затем преобразуется так же, как и в вольтметрах постоянного напряжения (см. рис. 9.19а). В схеме на рис. 9.19в ослабленное входное напряжение подают на вход усилителя 5 переменного напряжения, а затем усиленный сигнал поступает на вход детектора 4 и с него на измерительный прибор 3.

Вольтметры, выполненные по схеме на рис. 9.19б, обладают очень широким частотным диапазоном (до 1000 МГц), но относительно низкой чувствительностью (до 0,5 В). Вольтметры, выполненные по схеме с усилителем напряжения (см. рис. 9.19в), наоборот, обладают более узким диапазоном частот (до 30 МГц), но очень высокой чувствительностью. Нижний предел измеряемых напряжений практически не ограничен и достигает десятых долей микровольта.

Электронный цифровой вольтметр. Основным элементом цифровых электронных измерительных приборов является аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Это устройство предназначено для преобразования напряжения в пропорциональное ему число. На рис. 9.20 показана упрощенная структурная схема и временные диаграммы работы отдельных устройств цифрового вольтметра постоянного напряжения с время-импульсным АЦП.

Измеряемое напряжение $U_{\text{вх}}$ подают на один из входов устройства сравнения УС. На другой вход УС подают напряжение $U_{\text{гпн}}$, формируемое генератором пилообразного напряжения ГПН и изменяющееся во времени по линейному закону, т. е. $U_{\text{гпн}} = kt$, где k — коэффициент, называемый крутизной преобразования и равный скорости изменения напряжения $U_{\text{гпн}}$. Высокочастотный образцовый генератор импульсов ГИ генерирует прямоугольные импульсы напряжения $U_{\text{ги}}$ с частотой $f_{\text{ги}}$, подаваемые на вход селектора.

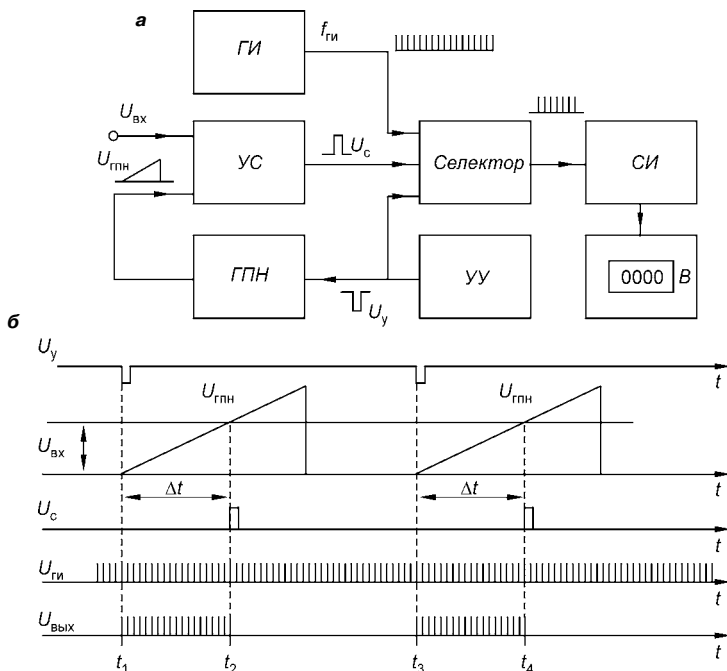


Рис. 9.20
Цифровой электронный вольтметр постоянного напряжения
а — структурная схема; б — временные диаграммы напряжений.

Устройство управления УУ, на выходе которого формируются отрицательные импульсы напряжения U_y , следующие с частотой f_y , синхронизирует совместную работу всех блоков цифрового вольтметра. В момент времени t_1 импульсы управления U_y одновременно подаются на вход селектора и вход генератора пилообразного напряжения ГПН. При этом ГПН запускается, и на его выходе напряжение $U_{гпн}$ начинает увеличиваться, а селектор соединяет ГИ со счетчиком импульсов СИ. В момент времени t_2 , когда $U_{гпн}$ становится равным измеряемому напряжению $U_{вх}$, на выходе УС формируется положительный импульс напряжения U_c , подаваемый на вход селектора, который отключает ГИ от СИ.

Поскольку за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ напряжение $U_{гпн}$ увеличивается до значения, равного $U_{вх}$, то можно записать, что $U_{вх} = k\Delta t$. Отсюда следует, что при заданной частоте $f_{гн}$ и $k = \text{const}$ промежуток времени Δt ,

в течение которого СИ соединен с ГИ, с одной стороны, пропорционален напряжению $U_{\text{вх}}$, т. е.

$$\Delta t = \frac{U_{\text{вх}}}{k},$$

а с другой стороны,

$$\Delta t = \frac{N}{f_{\text{ги}}},$$

где N — количество импульсов, поступающих на вход СИ за этот промежуток времени. Следовательно, количество импульсов N оказывается пропорциональным измеряемому напряжению, т. е.

$$N = f_{\text{ги}} \Delta t = f_{\text{ги}} \frac{U_{\text{вх}}}{k}.$$

В интервале $t_2 \dots t_3$ сигнал в виде цифрового кода передается на цифровой индикатор. В момент времени t_3 происходит сброс показаний цифрового индикатора и цикл повторяется.

Чтобы обеспечить высокую чувствительность прибора, необходимо иметь ГПН с относительно небольшой крутизной преобразования k и ГИ очень высокой частоты. Тогда даже малым значениям измеряемого напряжения $U_{\text{вх}}$ будет соответствовать большое количество импульсов N , за счет чего и обеспечивается высокая чувствительность этих приборов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

10.1. ИЗМЕРЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Включение электроизмерительных приборов в электрическую цепь не должно изменять ее параметров. Однако это невозможно, так как любой измерительный прибор потребляет энергию, которая расходуется на приведение в движение измерительного механизма, а также на нагрев обмоток и других токопроводящих деталей прибора.

В цепях постоянного тока для измерения тока и напряжения чаще применяют приборы магнитоэлектрической системы и реже электромагнитной и электродинамической систем. Для измерения мощности и энергии в основном применяют приборы электродинамической системы.

Для измерения тока амперметр включают в цепь последовательно. Чтобы он оказывал меньшее влияние на параметры цепи, сопротивление его должно быть небольшим.

При измерении токов свыше 10 А применяют приборы с наружным шунтом, падение напряжения на котором составляет 75 мВ и который присоединяют к амперметру калиброванными проводами (см. рис. 9.5).

Для измерения напряжения на каком-либо участке цепи вольтметр включают параллельно этому участку. Чтобы не произошло заметного изменения параметров цепи и увеличения тока в ее неразветвленной части, сопротивление вольтметра должно быть большим. Для расширения пределов измерения прибора последовательно с вольтметром включают добавочный резистор R_d (см. рис. 9.7б).

10.2. ИЗМЕРЕНИЯ В ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Измерения тока и напряжения в цепях синусоидального тока мало чем отличаются от измерений в цепях постоянного тока. Как уже указывалось, верхний предел измерения амперметров можно увеличить с помощью специальных шунтов. С этой же целью для амперметров применяют трансформаторы тока, а для вольтметра — трансформаторы напряжения (рис. 10.1). Схему с использованием измерительных трансформаторов напряжения применяют при измерениях в сетях напряжением выше 1 кВ.

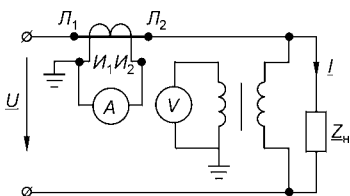


Рис. 10.1
Схема включения амперметра
и вольтметра в однофазную
цепь синусоидального тока
с помощью измерительных
трансформаторов

Таблица 10.1

**Классы точности измерительных трансформаторов, шунтов
и добавочных резисторов, соответствующие классу точности
измерительного прибора**

Класс точности измерительного прибора	Класс точности шунта или добавочного резистора	Класс точности измерительного трансформатора
0,5	0,2	0,2
1,0	0,5	0,5
1,5	0,5	0,5
2,5	0,5	1,0

При применении измерительных трансформаторов необходимо следить, чтобы их нагрузка не превосходила номинальных значений, указанных в паспорте. Для обеспечения более высокой точности измерения выбирают измерительные трансформаторы с классом точности выше, чем класс измерительных приборов (табл. 10.1).

Для измерения активной мощности используют однофазные ваттметры (обычно электродинамической системы). Схема включения обмоток ваттметра показана на рис. 9.12в.

Измеренная им мощность

$$P = c_w n,$$

где $c_w = (U_{\text{ном}} I_{\text{ном}})/N$ — цена деления шкалы ваттметра, Вт/дел; N — число делений всей шкалы прибора; n — число делений шкалы прибора, отсчитанное указателем.

Если напряжение сети или на зажимах приемника превышает номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ параллельной обмотки ваттметра, то последовательно с ней включают наружный добавочный резистор R_d (рис. 10.2), и цена деления ваттметра

$$c_w = \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}{N} \left(1 + \frac{R_U}{R_d} \right),$$

где R_U — сопротивление параллельной обмотки ваттметра.

При включении обмоток ваттметра через измерительные трансформаторы (рис. 10.3) цену деления ваттметра определяют с учетом коэффициентов трансформации k_I трансформатора тока и k_U трансформатора напряжения:

$$c_w = \frac{U_{\text{ном}} k_U I_{\text{ном}} k_I}{N}.$$

При этом надо следить за правильным включением начал и концов обмоток трансформаторов и генераторных зажимов обмоток ваттметра (J_1 и J_2 — зажимы первичной, а I_1 и I_2 — зажимы вторичной обмоток трансформатора тока).

Коэффициент мощности цепи можно вычислить по показаниям ваттметра, амперметра и вольтметра по формуле $\cos \varphi = P/S$, а также измерить с помощью фазометра. Схемы включения фазометра такие же, как схемы включения ваттметра.

По таким же схемам включают счетчик активной энергии.

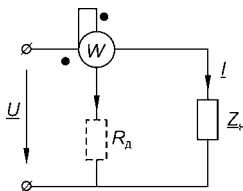


Рис. 10.2
Схема включения однофазного ваттметра с наружным добавочным резистором

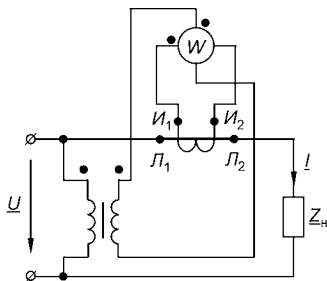


Рис. 10.3
Схема включения однофазного ваттметра с помощью измерительных трансформаторов

10.3. ИЗМЕРЕНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Схемы включения амперметра и вольтметра для измерения токов и напряжений в трехфазных цепях те же, что и для измерения в однофазных цепях.

Схема включения ваттметров для измерения мощности определяется схемой сети (трех- или четырехпроводная), схемой соединения фаз приемника (звезда или треугольник) и характером нагрузки (симметричная или несимметричная).

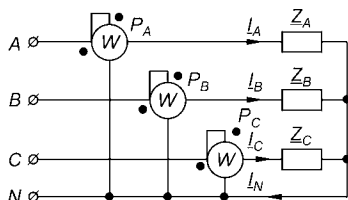


Рис. 10.4
Схема включения
однофазных ваттметров
для измерения активной
мощности в четырехпро-
водной цепи

При *несимметричной* нагрузке активную мощность измеряют тремя ваттметрами (рис. 10.4), каждый из которых измеряет мощность одной фазы — *фазную мощность*. Для этого ваттметры включают так, чтобы через последовательные обмотки замыкались фазные токи, а на параллельные обмотки были поданы фазные напряжения. Тогда фазные мощности $P_A = U_A I_A \cos \varphi_A$, $P_B = U_B I_B \cos \varphi_B$, $P_C = U_C I_C \cos \varphi_C$, а мощность трехфазного приемника равна сумме фазных мощностей:

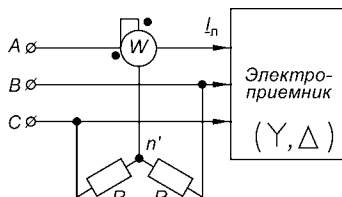
$$P = P_A + P_B + P_C.$$

Измерение мощности тремя ваттметрами возможно при любых условиях.

При *симметричной* нагрузке фазные мощности равны, поэтому в этом случае можно, измерив одним ваттметром мощность одной фазы P_ϕ , найти мощность трехфазного приемника как $P = 3P_\phi$. Схема включения ваттметра в этом случае аналогична схеме включения любого из ваттметров на рис. 10.4.

У большинства стационарных симметричных электроприемников имеется только три зажима для присоединения его к трехфазной трехпроводной сети. В этих случаях применяют схему включения ваттметра с *искусственной нейтральной точкой* (рис. 10.5). Искусственную нейтральную точку n' создают, включая звездой параллельную

Рис. 10.5
Схема включения
ваттметра в трехпровод-
ную цепь с искусственной
нейтральной точкой



обмотку ваттметра с сопротивлением R_U и два резистора с сопротивлением $R = R_U$. При соединении приемника звездой $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$ и, так как на параллельную обмотку ваттметра подано фазное напряжение, ваттметр измеряет фазную мощность. Соединение приемника треугольником всегда может быть преобразовано в эквивалентную звезду. Следовательно, для получения искомой трехфазной мощности показание ваттметра надо умножать на три или отградуировать шкалу прибора с учетом этого сомножителя.

Мощность трехфазного приемника при любой схеме соединения фаз, при симметричной и несимметричной нагрузках, в трехпроводной цепи может быть измерена с помощью двух ваттметров. Мгновенное значение мощности трехфазного приемника

$$p = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C.$$

Поскольку для трехпроводной цепи

$$i_A + i_B + i_C = 0, \quad (10.1)$$

а следовательно, $i_B = -(i_A + i_C)$, то мгновенное значение мощности

$$p = (u_A - u_B)i_A + (u_C - u_B)i_C.$$

Так как разность фазных напряжений является линейным напряжением, т. е. $u_A - u_B = u_{AB}$; $u_C - u_B = u_{CB}$, то

$$p = u_{AB} i_A + u_{CB} i_C = p' + p''.$$

Среднее значение мощности синусоидального тока (активная мощность P) равно произведению действующих значений напряжения и тока, определяющих мгновенное значение мощности, и косинуса угла между их векторами. Поэтому средние значения мощности

$$P' = U_{AB} I_A \cos \alpha,$$

$$P'' = U_{CB} I_C \cos \beta,$$

где $\alpha = \angle(\underline{U}_{AB}, \underline{I}_A)$, $\beta = \angle(\underline{U}_{CB}, \underline{I}_C)$, а мощность трехфазного приемника

$$P = P' + P'' = U_{AB}I_A \cos \alpha + U_{CB}I_C \cos \beta. \quad (10.2)$$

Это выражение показывает, что для измерения мощности трехфазного приемника достаточно иметь два ваттметра, которые должны быть включены так, чтобы в их последовательных обмотках существовали токи I_A и I_C , а на параллельные обмотки были поданы напряжения U_{AB} и U_{CB} соответственно (рис. 10.6).

В общем случае последовательные обмотки могут быть включены в любые два линейных провода, но концы параллельных обмоток всегда подключают к свободному проводу.

При симметричной нагрузке, когда $I_A = I_B = I_C$ и $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$, углы α и β в формуле (10.2) можно выразить через угол φ . Для этого рассмотрим векторную диаграмму напряжений и токов (рис. 10.7), из которой можно определить, что $\alpha = \varphi + 30^\circ$; $\beta = \varphi - 30^\circ$. Тогда показания ваттметров

$$P' = U_{AB}I_A \cos(\varphi + 30^\circ); P'' = U_{CB}I_C \cos(\varphi - 30^\circ). \quad (10.3)$$

Так как угол φ изменяется в пределах от -90° до 90° , то, как следует из (10.3), значения P' и P'' могут быть как положительными, так и отрицательными даже при симметричной нагрузке. Значения P' и P'' равны друг другу только при активной нагрузке ($\varphi = 0$), когда $P' = P'' = 0,5P$. При активно-индуктивной нагрузке, когда $\varphi = 60^\circ$, $P' = 0$, а мощность трехфазного приемника

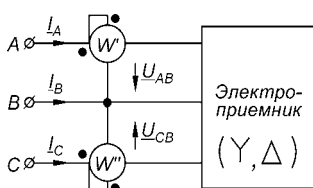


Рис. 10.6
Схема включения
двух ваттметров для
измерения мощности
трехфазного приемника
в трехпроводной цепи

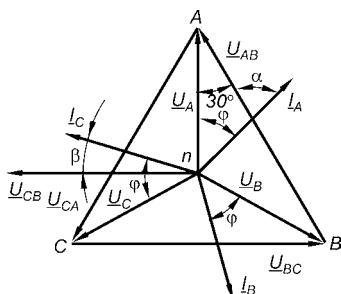


Рис. 10.7
Векторная диаграмма
напряжений и токов
при симметричной нагрузке

$P = P''$. При дальнейшем увеличении угла φ значение мощности P' становится отрицательным и мощность трехфазного приемника $P = P' + (-P')$. При активно-емкостной нагрузке $P'' = 0$, если $\varphi = -60^\circ$, а при дальнейшем увеличении емкостной составляющей тока значение мощности P'' становится отрицательным.

Отметим, что отрицательные значения одной из мощностей (P' или P'') могут иметь место и при несимметричной нагрузке. Поэтому при суммировании мощностей P' и P'' надо всегда учитывать их знак.

Так как уравнение (10.1) справедливо только для трехпроводной цепи, то при наличии нейтрального провода, в котором в общем случае ток $I_N > 0$, нельзя применять схему измерения мощности двумя ваттметрами.

Реактивную мощность трехфазного приемника можно также измерить ваттметром. Реактивная мощность фазы

$$Q_\Phi = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi = U_\Phi I_\Phi \cos \gamma = U_\Phi I_{\text{рф}},$$

где $\gamma = 90^\circ - \varphi$; $I_{\text{рф}}$ — реактивная составляющая фазного тока.

При измерении активной мощности отклонение стрелки ваттметра пропорционально произведению напряжения и активной составляющей тока, т. е. составляющих напряжения и тока, совпадающих по фазе. Исходя из этого, можно сказать, что если на обмотку напряжения ваттметра подать напряжение, совпадающее по фазе с реактивной составляющей тока, то отклонение стрелки ваттметра будет пропорционально реактивной мощности.

Из векторной диаграммы напряжений и токов при симметричной нагрузке (рис. 10.8) видно, что реактивная составляющая $I_{\text{рА}}$ фазного тока I_A совпадает по фазе с линейным напряжением U_{BC} . Поэтому если включить ваттметр так, как показано на рис. 10.9, то его показание

$$Q' = U_{BC} I_{\text{рА}} = U_\text{л} I_\text{л} \sin \varphi.$$

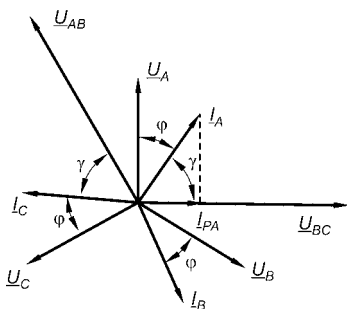


Рис. 10.8
Векторная диаграмма напряжений и токов, поясняющая возможность использования ваттметров для измерения реактивной мощности трехфазного приемника

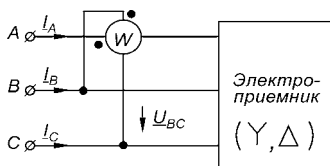


Рис. 10.9
Схема включения
ваттметра
для измерения
реактивной мощности
трехфазного приемника

Получаем, что Q' в $\sqrt{3}$ раз меньше реактивной мощности $Q = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi$ трехфазного симметричного приемника. Следовательно, для определения реактивной мощности трехфазного приемника показание прибора надо умножить на $\sqrt{3}$.

При несимметричной нагрузке требуется включить три ваттметра по аналогичной схеме. Тогда

$$Q = \frac{Q'_A + Q'_B + Q'_C}{\sqrt{3}},$$

где Q'_A , Q'_B , Q'_C — показания ваттметров, последовательные обмотки которых включены в фазы A , B и C соответственно.

Для измерения электрической энергии применяют счетчики, схемы включения которых те же, что схемы включения ваттметров.

10.4. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Сопротивление R различных элементов электрических цепей изменяется в очень широком диапазоне. Условно сопротивления можно разделить на малые (до 1 Ом), средние (от 1 Ом до 100 кОм) и большие (более 100 кОм). Для измерения сопротивлений используют следующие методы: косвенный метод (с помощью амперметра и вольтметра), метод непосредственной оценки (с помощью омметра), метод сравнения (с помощью мостов и потенциометров).

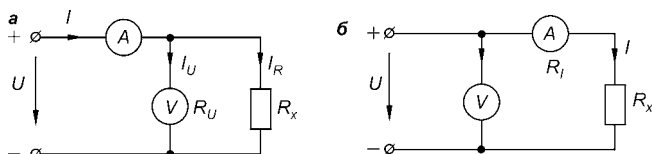


Рис. 10.10
Схема измерения сопротивления косвенным методом
 a — для малых сопротивлений; $б$ — для средних сопротивлений.

В *косвенном методе* вольтметром измеряют напряжение U на резисторе, а амперметром — ток в резисторе и вычисляют сопротивление:

$$R_x = U/I, \quad (10.4)$$

при этом схема включения приборов зависит от значения измеряемого сопротивления. При малых значениях сопротивления, соизмеримых с сопротивлением амперметра, измерения производят по схеме рис. 10.10а. Если ток I_U в обмотке вольтметра с сопротивлением R_U много меньше тока I в цепи ($I_U \leq 0,01I$), то ошибка в определении R_x по формуле (10.4) не превысит 1%. Более точное значение R_x находят по формуле

$$R_x = \frac{U}{I - I_U}.$$

Схему (рис. 10.10б) применяют при измерении больших сопротивлений ($R_x \gg R_I$, где R_I — сопротивление обмотки амперметра). Если $R_I I \leq 0,01U$, то ошибка в вычислении сопротивления R_x по (10.4) не превысит 1%. Точное значение сопротивления вычисляют по формуле

$$R_x = \frac{U - R_I I}{I} = \frac{U}{I} - R_I.$$

Для *непосредственного* измерения сопротивлений применяют *омметры* — приборы, у которых шкала проградуирована в омах. Обычно омметры — это приборы, объединяющие в одном корпусе миллиамперметр магнитоэлектрической системы (или магнитоэлектрический логометр), источник питания (сухой гальванический элемент) и ограничивающий ток добавочный резистор R_d (рис. 10.11).

При замкнутом ключе K регулируют напряжение U источника питания так, чтобы стрелку прибора установить на нулевую отметку шкалы прибора, которая находится в правом краю шкалы, при этом ток в приборе — I_0 . При размыкании ключа K ток в приборе

$$I = \frac{U}{R_{\text{И}} + R_d + R_x} < I_0,$$

где $R_{\text{И}}$ — сопротивление измерительного механизма И . С уменьшением тока в приборе стрелка

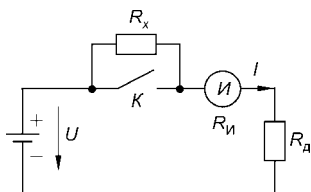


Рис. 10.11
Схема омметра

отклоняется влево. Так как $U = \text{const}$ и $R_{\text{и}} + R_{\text{д}} = \text{const}$, то значение тока в приборе зависит только от R_x . Шкала прибора, отградуированная в омах, неравномерная. Значению $R_x = \infty$ соответствует левый край шкалы.

Для измерения больших сопротивлений (сопротивления изоляции электрических машин, аппаратов, приборов и электрической сети напряжением до 1 кВ) применяют омметры с магнитоэлектрическим логометром (мегаомметры, описанные ранее).

В *методе сравнения* для измерения сопротивлений применяют *мосты постоянного тока* (рис. 10.12). Мосты изготавливаются в виде переносных приборов. В одно

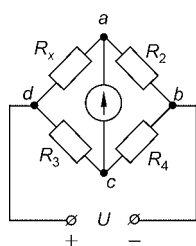


Рис. 10.12
Схема
одинарного моста
постоянного тока

плечо моста включают резистор, сопротивление которого необходимо измерить. Как известно, мост будет уравновешенным, если потенциалы точек a и c одинаковы и ток в магнитоэлектрическом гальванометре, включенном в одну из диагоналей моста, будет равен нулю. При этом

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}.$$

При любом значении измеряемого сопротивления R_x этого равенства можно добиться путем изменения сопротивления других плеч моста. Если же сопротивления плеч моста не регулируются, а шкала гальванометра отградуирована в омах, то мост является *неуравновешенным*.

10.5. ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

На практике часто возникает необходимость измерять неэлектрические величины. С этой целью широко используют электрические приборы, причем разновидностей электрических приборов для измерения неэлектрических величин значительно больше, чем для измерения электрических величин.

Любой электрический прибор, предназначенный для измерения неэлектрической величины, имеет *преобразователь*, с помощью которого неэлектрическая величина

(температура, давление и др.) преобразуется в электрическую величину (ЭДС, сопротивление и др.). В качестве электрического измерительного устройства преобразованной величины применяют магнитоэлектрический милливольтметр, цифровой измерительный прибор и др. При этом шкалу устройства отсчета электроизмерительного прибора градуируют в единицах измеряемой неэлектрической величины.

Измерительные преобразователи разнообразны по принципу действия. В *индуктивных* преобразователях используют зависимость индуктивности обмоток от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов их магнитной цепи. *Емкостные* преобразователи основаны на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения его обкладок. В *пьезоэлектрических* преобразователях используют эффект появления электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварца, сегнетовой соли и др.) под влиянием механических напряжений.

Для примера рассмотрим некоторые виды измерительных преобразователей. Простейшим примером такого преобразователя является *термопара* (рис. 10.13а). ЭДС термопары является функцией температуры. В качестве электрического измерительного устройства используют милливольтметр. При этом милливольтметр может иметь шкалу, отградуированную в градусах. В ряде случаев функциональную зависимость между температурой и ЭДС термопары задают в табличной или графической форме.

В *индукционных* преобразователях используют закон электромагнитной индукции. Наибольшее применение они получили в приборах для измерения угловой скорости, линейных и угловых перемещений и ускорений. Если необходимо измерить скорость перемещения или ускорение некоторой детали, то к ней прикрепляют катушку 2 (рис. 10.13б). Катушка пересекает магнитный поток в кольцевом зазоре магнитопровода 3, создаваемый

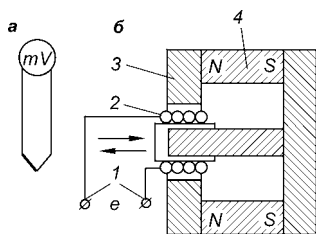


Рис. 10.13
Измерительные преобразователи

а — термопара; б — индукционный преобразователь.

цилиндрическим постоянным магнитом 4, и в ней индуцируется ЭДС

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt},$$

пропорциональная скорости перемещения. Подключив к зажимам 1 вольтметр, можно определить скорость перемещения. Если вместо вольтметра использовать электрическое интегрирующее или дифференцирующее устройство, получим амплитуду линейного перемещения или ускорение соответственно.

Следует отметить, что электроизмерительные приборы, используемые для измерения неэлектрических величин, имеют ряд преимуществ перед неэлектрическими приборами. Прежде всего следует отметить их низкую инерционность, т. е. возможность быстро реагировать на изменение измеряемой величины, широкий диапазон измерений соответствующей величины, возможность их включения в электрические цепи, а поэтому использование их при дистанционном и автоматическом управлении технологическими процессами и т. д.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

11.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические машины постоянного тока (МПТ) по своему назначению делятся на *электрические генераторы* (или просто генераторы), преобразующие механическую энергию в электрическую при постоянном напряжении (генераторы являются источниками электрической энергии), и *электрические двигатели* (электродвигатели), преобразующие электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию. Эта механическая энергия используется для приведения во вращение какого-либо исполнительного механизма (станка, лебедки, колес трамвая, электропоезда и т. д.).

Первой электрической машиной был электродвигатель постоянного тока (двигатель Б. С. Якоби (1838 г.)).

Кроме того, существуют некоторые специальные виды машин, например машины, предназначенные для преобразования электроэнергии постоянного тока в электро-энергию переменного тока или наоборот; микромашины, используемые в системах автоматического регулирования, в измерительных и счетно-решающих устройствах в качестве датчиков (например, датчиков скорости) и др.

Электротехнической промышленностью выпускают-ся машины постоянного тока различной мощности и на-пряжения. Условно их можно подразделить на следую-щие группы по мощности:

- 1) микромашины, мощность которых измеряется от долей ватта до 500 Вт;
- 2) машины малой мощности — от 500 Вт до 10 кВт;
- 3) машины средней мощности — от 10 кВт до несколь-ких сотен киловатт;

4) машины большой мощности — свыше нескольких сотен киловатт.

Напряжение машин постоянного тока изменяется от 6...12 В для используемых на автотранспорте до 30 кВ для используемых в радиотехнических установках.

Большое применение находят машины постоянного тока мощностью до 200 кВт на напряжение 110...440 В с частотой вращения 550...2870 об/мин. Микромашины имеют частоты вращения от нескольких оборотов до 30 000 об/мин.

В промышленности, на транспорте и в сельском хозяйстве наиболее широко используют электродвигатели. Генераторы применяют для питания устройств связи, радиотехнических установок и т. д. В последние годы в качестве источников постоянного тока все шире применяют более экономичные и простые в эксплуатации статические полупроводниковые преобразователи.

11.2.

УСТРОЙСТВО МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В процессе технического прогресса в электромашиностроении конструктивный вид машин постоянного тока изменяется, хотя основные детали остаются теми же. Общий вид МПТ, выпускаемых промышленностью, показан на рис. 11.1. Основными частями машины являются статор, якорь с коллектором и щеточное устройство.

Статор является неподвижной частью машины. Его изготавливают в виде полого цилиндра (6 на рис. 11.1) в машинах относительно небольшой мощности или в виде многогранника в крупных машинах. Материалом для изготовления статора служит литая электротехническая сталь

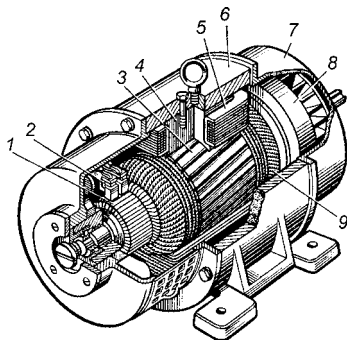


Рис. 11.1
Внешний вид МПТ
средней мощности

1 — коллектор; 2 — щетки;
3 — сердечник якоря; 4 —
сердечник главного полюса;
5 — катушка возбуждения
главного полюса; 6 — ста-
тор; 7 — подшипниковый
щит; 8 — вентилятор; 9 —
обмотка якоря.

с высокой магнитной проницаемостью. Статор служит для крепления к нему отдельных деталей машины, таких как главные и добавочные полюсы, подшипниковые щиты, щеточное устройство, а также для защиты отдельных узлов машины от механических повреждений, и является частью магнитопровода, по которой замыкается основной магнитный поток, создаваемый главными полюсами.

Главный полюс (рис. 11.2а, б, в) состоит из сердечника 2 с полюсным наконечником 1 и катушек возбуждения 7, причем на сердечнике могут располагаться несколько катушек возбуждения. По технологическим соображениям сердечник главного полюса набирают из листов электротехнической стали. Листы не изолируют друг от друга, как в трансформаторах и машинах переменного тока, и стягивают с помощью шпилек 4. В машинах малой и средней мощности в сердечнике делают резьбовые отверстия, и главные полюсы в сборе крепят к внутренней поверхности статора с помощью болтов 3. В крупных машинах для крепления главных полюсов в их сердечники закладывают специальные стержни 5 с резьбовыми отверстиями.

Катушки возбуждения всех главных полюсов соединяют между собой таким образом, чтобы полярность полюсов чередовалась (см. рис. 11.3). Совокупность всех соединенных катушек возбуждения образует *обмотку возбуждения*, которую подключают к источнику постоянного напряжения. Назначение главных полюсов — создание основного магнитного потока. Магнитные силовые линии этого потока замыкаются в основном по участкам магнитной цепи с высокой магнитной проницаемостью (рис. 11.3).

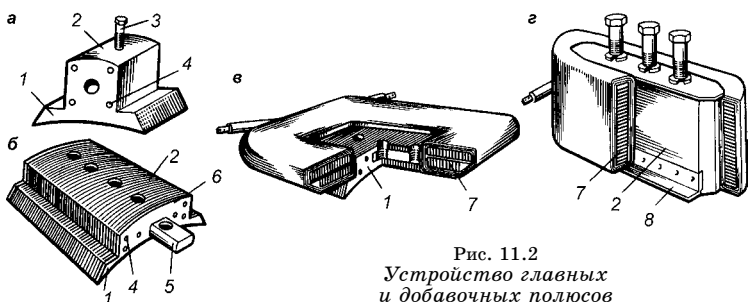


Рис. 11.2
Устройство главных
и добавочных полюсов

а, б — сердечник главного полюса; в — катушка возбуждения главного полюса; г — добавочный полюс в сборе. 1 — полюсный наконечник; 2 — сердечник; 3 — болт; 4 — шпилька; 5 — установочная рейка; 6 — нажимные щетки; 7 — катушка возбуждения; 8 — опорный угольник.

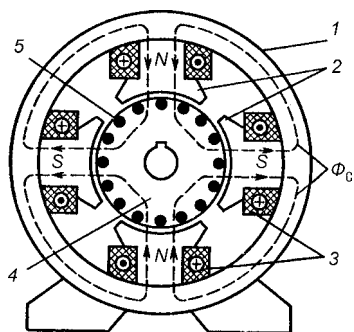


Рис. 11.3
Магнитная цепь
машины постоянного тока
с четырьмя полюсами

1 — статор; 2 — сердечники главных полюсов; 3 — обмотка возбуждения; 4 — сердечник якоря; 5 — проводники обмотки якоря.

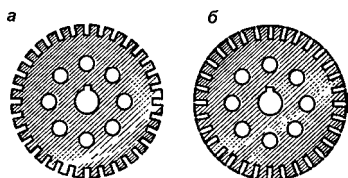


Рис. 11.4
Листы, из которых набирают
сердечник якоря

а — с открытыми пазы; б — с полузакрытыми пазы.

петлевых обмотках или волны в волновых обмотках. Несколько секций, изолированных друг от друга, объединяют в катушки, которые и укладывают в пазы сердечника якоря. На рис. 11.5 показан внешний вид катушек петлевой и волновой обмоток якоря и схемы соединения секций в них. Расстояние между сторонами катушек (секций) называют *шагом обмотки*. Его делают примерно равным *полюсному делению* τ , под которым понимают длину дуги якоря, приходящуюся на один полюс, т. е. $\tau = \pi D_{\text{я}} / 2p$, где $D_{\text{я}}$ — наружный диаметр якоря, $2p$ — количество главных полюсов. При этом стороны секций обмотки якоря находятся под главными полюсами различной полярности, и поэтому все проводники обмотки якоря являются активными. Секции обмотки якоря соединяют между собой посредством коллекторных пластин и образуют

Добавочные полюсы выполняют аналогично главным полюсам за исключением того, что их сердечники делают массивными, а обмотку возбуждения включают последовательно с обмоткой якоря (рис. 11.2г). Добавочные полюсы устанавливают в МПТ средней и большой мощности для улучшения коммутации в них, о чем будет сказано позднее.

Якорь. Основными частями якоря являются его сердечник с обмоткой и коллектор, насаженные на вал машины. Сердечник якоря набирают из изолированных листов электротехнической стали (рис. 11.4), на наружной поверхности которых имеются пазы для укладки в них обмотки якоря.

Обмотку якоря барабанного типа выполняют из секций, которые имеют вид петли в

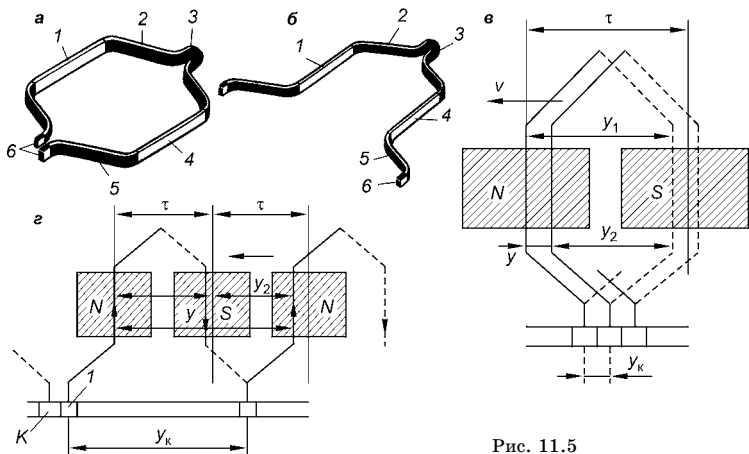


Рис. 11.5
Элементы обмоток якоря

а — катушка петлевой обмотки; *б* — катушка волновой обмотки; *в* — схема соединения секций в петлевой обмотке; *г* — схема соединения секций в волновой обмотке. 1, 4 — пазовые (активные) части секций; 2, 5 — лобовые части; 3 — головка секции (катушки); 6 — выводы секций.

обмотку якоря, у которой нет ни начала, ни конца. В современных машинах обмотку якоря делают двухслойной, при этом активную сторону 1 катушки укладывают в верхней части одного паза, а другую активную сторону 4 — в нижней части другого паза. Эти пазы находятся друг от друга на расстоянии, равном шагу обмотки.

Коллектор (см. рис. 11.6) является неотъемлемой частью якоря и представляет собой цилиндрическое тело, набранное из медных клинообразных коллекторных пластин 4, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками 5. В машинах постоянного тока средней и большой мощности применяют коллектор с металлическим корпусом (рис. 11.6а) как более надежный, в машинах небольшой мощности — коллектор на пластмассовом корпусе (рис. 11.6б). К коллекторным пластинам припаивают проводники обмотки якоря.

Коллектор служит для преобразования переменной ЭДС в проводниках обмотки якоря в постоянную ЭДС на щетках в режиме генератора или преобразования постоянного тока, подводимого из сети к щеткам двигателя, в переменный ток в проводниках обмотки якоря.

Щеточное устройство (см. рис. 11.7) предназначено для осуществления электрического скользящего контакта между

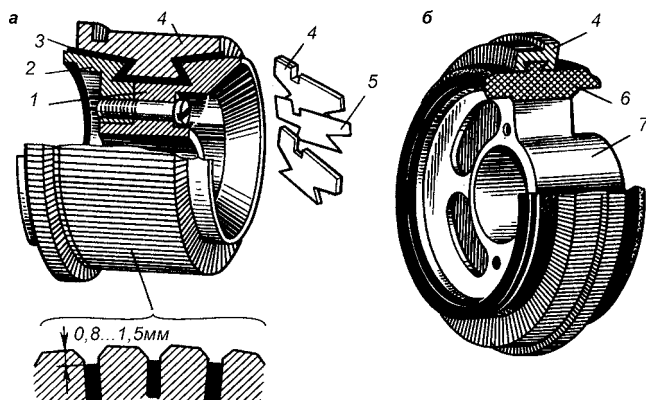


Рис. 11.6

Устройство коллектора машины постоянного тока

а — с металлическим корпусом; *б* — с пластмассовым корпусом. 1 — корпус; 2 — нажимной фланец; 3 — изоляционные манжеты; 4 — коллекторные пластины; 5 — изоляционные миканитовые прокладки; 6 — пластмасса; 7 — втулка.

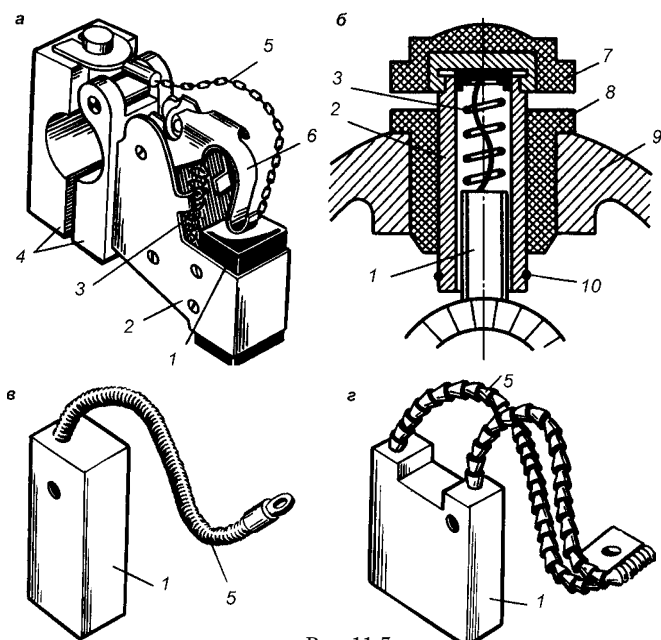


Рис. 11.7

Щеточное устройство

а, б — щеткодержатели; *в, г* — щетки. 1 — щетка; 2 — щеткодержатель; 3 — пружина; 4 — зажимы для крепления к щеточному пальцу; 5 — щеточный канатик; 6 — нажимной палец; 7 — колпак; 8 — изоляционная втулка; 9 — подшипниковый щит; 10 — зажим для выводного проводника.

вращающимся якорем и внешней электрической цепью. Основными элементами этого устройства являются токопроводящие щетки 1. Материалом для щеток служит композиция, выполненная на основе графита, содержание которого в композиции снижает коэффициент трения и, следовательно, мощность потерь на трение и их износ. Промышленность выпускает угольно-графитные, графитные, электрографитированные, медно-графитные, бронзо-графитные и серебряно-графитные щетки, но при этом для каждой конкретной МПТ нужно применять только такие щетки, которые рекомендованы заводом-изготовителем.

Щетки устанавливают в специальные металлические или пластмассовые обоймы 2, называемые *щеткодержателями*. Последние располагают на изолированных стержнях, установленных на траверсе, прикрепленной к подшипниковому щиту со стороны коллектора (на рисунке не показаны). Необходимое давление на щетку осуществляют с помощью пружин 3.

Для подключения щетки к внешней цепи имеются один или два токопроводящих канатика 5 с наконечниками. Назначение остальных элементов щеточного устройства очевидно из рисунка.

Щетки, как правило, устанавливают на *геометрической нейтральной*, под которой понимают линию, проходящую через ось вращения якоря точно посередине между главными полюсами *N* и *S* машины.

На рис. 11.8 показана простейшая однослойная петлевая обмотка якоря барабанного типа. Сплошными линиями показано соединение секций друг с другом со стороны коллектора, а штриховыми — лобовые соединения проводников с противоположной стороны. От точек соединения секций делают отпайки к коллекторным пластинам. Направление ЭДС в проводниках обмотки показано на рисунке: «+» — направление от читателя, точка «•» — направление на читателя.

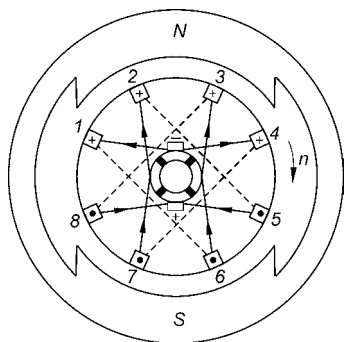


Рис. 11.8
Простейшая обмотка якоря барабанного типа

Как видно из рисунка, обмотка якоря не имеет ни начала, ни конца, о чем уже говорилось ранее. Щетки делят обмотку якоря на параллельные ветви. На рис. 11.8 обмотка якоря имеет две параллельные ветви: первая образована проводниками пазов 1, 6, 3, 8, вторая — проводниками пазов 4, 7, 2, 5. При вращении якоря сочетание пазов, проводники которых образуют параллельную ветвь, все время изменяется, но всегда параллельная ветвь образуется проводниками пазов, занимающих постоянное положение в пространстве.

11.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Принцип действия генератора. Работа генератора основана на использовании закона электромагнитной индукции.

На рис. 11.9 показана электромагнитная схема простейшего генератора постоянного тока. Обмотка якоря состоит из одного витка (секции), концы которого присоединены к различным полукольцам (коллекторным пластинам), изолированным друг от друга. Эти полукольца образуют *коллектор*, который вращается вместе с обмоткой якоря. По коллектору скользят неподвижные щетки. Магнитное поле создается постоянными магнитами (главными полюсами).

При вращении витка в магнитном поле с помощью приводного двигателя в проводниках витка согласно закону электромагнитной индукции индуцируется ЭДС

$$e_{\text{пр}} = Blv,$$

где B — магнитная индукция; l — длина проводника; v — его линейная скорость.

Когда плоскость витка совпадает с плоскостью осевой линии полюсов (виток расположен вертикально), в проводниках индуцируется максимальное значение ЭДС. Когда виток занимает горизонтальное положение, ЭДС в проводниках равна нулю.

Направление ЭДС в проводнике определяют по правилу правой руки (на рис. 11.9 оно показано стрелками). Когда при вращении витка проводник переходит под другой полюс, направление ЭДС в нем меняется на противоположное, т. е. в секции индуцируется переменная ЭДС. Но так

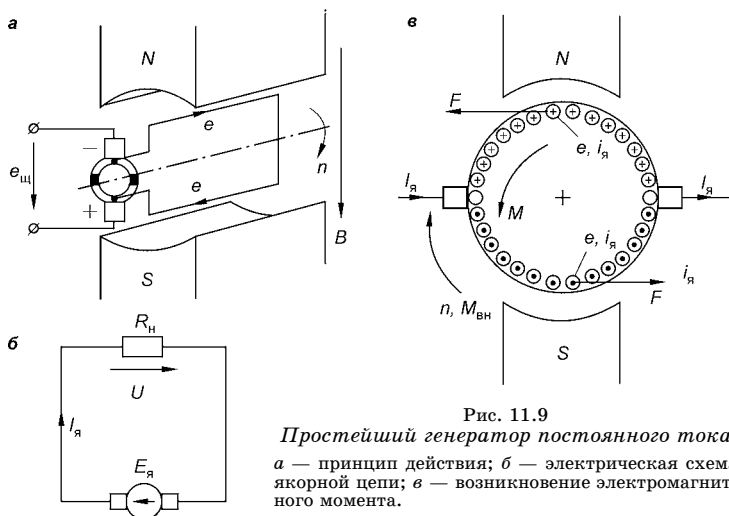


Рис. 11.9
Простейший генератор постоянного тока
 а — принцип действия; б — электрическая схема
 якорной цепи; в — возникновение электромагнитного
 момента.

как вместе с витком вращается коллектор, а щетки неподвижны, то с верхней щеткой всегда будет соединен проводник, находящийся под северным полюсом, ЭДС в котором направлена от щетки. В результате полярность щеток остается неизменной, а следовательно, остается неизменным направление ЭДС на щетках $e_{щ}$ (см. рис. 11.10, кривая 1). Это происходит благодаря наличию коллектора. Следовательно, в генераторе коллектор является механическим выпрямителем. ЭДС на щетках равна $e_{щ} = 2e_{пр} = 2Blv$, так как по контуру секции ЭДС проводников складываются. Хотя ЭДС простейшего генератора не изменяется по направлению, значение ее изменяется, принимая за один оборот витка два раза максимальное и два раза нулевое значения. ЭДС с такой большой пульсацией является непригодной для большинства приемников постоянного тока, и в строгом смысле слова ее нельзя назвать постоянной.

Для уменьшения пульсации обмотку якоря выполняют из большого числа витков (секций), а коллектор — из большого числа коллекторных пластин. Так, на рис. 11.8 показана машина с четырьмя секциями в обмотке якоря. В момент времени, для которого изображено положение обмотки якоря, это секции, сторонами которых являются проводники (1–6), (3–8), (4–7) и (2–5). Обмотка якоря имеет две параллельные ветви, первая образована проводниками пазов 1, 6, 3, 8 (секции (1–6)

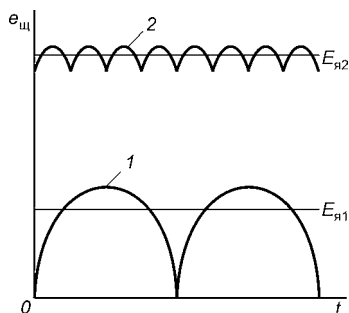


Рис. 11.10
Изменение во времени ЭДС
в простейших генераторах
постоянного тока

1 — для генератора рис. 11.9; 2 —
для генератора рис. 11.8.

и (3–8)), вторая — проводниками пазов 4, 7, 2, 5 (секции (4–7) и (2–5)). При вращении якоря сочетание пазов, проводники которых образуют параллельную ветвь, все время изменяется, но всегда параллельная ветвь образуется проводниками пазов, занимающих постоянное положение в пространстве.

В каждой секции индуцируется такая же ЭДС, как и в генераторе, показанном на рис. 11.9. ЭДС на щетках

равна сумме ЭДС во всех проводниках параллельной ветви обмотки якоря, так как все проводники в параллельной ветви включены последовательно:

$$e_{\text{щ}} = e_1 + e_6 + e_3 + e_8 = e_4 + e_7 + e_2 + e_5.$$

Изменение во времени ЭДС на щетках для такого генератора показано на рис. 11.10 (кривая 2). Видно, что пульсации ЭДС обмотки якоря заметно уменьшаются. При увеличении числа витков и коллекторных пластин можно получить практически постоянную ЭДС обмотки якоря. Эту ЭДС называют *ЭДС якоря* и обозначают $E_{\text{я}}$.

Если к щеткам генератора подключить приемник электрической энергии, то под действием ЭДС якоря в приемнике и в обмотке якоря появится ток. Изменение тока во времени будет аналогично изменению ЭДС: в обмотке якоря он будет изменяться как по значению, так и по направлению, т. е. будет переменным, а в приемнике — только по значению, аналогично кривым 1 и 2 на рис. 11.10. Направление тока в проводниках обмотки якоря будет совпадать с направлением индуцированной в них ЭДС.

Для цепи обмотки якоря (рис. 11.9б) по второму закону Кирхгофа получаем уравнение, называемое *уравнением напряжения генератора*:

$$U + R_{\text{я}} I_{\text{я}} = E_{\text{я}}, \text{ или } U = E_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}, \quad (11.1)$$

где $R_{\text{я}}$ — суммарное сопротивление обмоток якоря, добавочных полюсов, компенсационной обмотки, если она есть,

и щеточного контакта (на схеме не показано), далее называемое *сопротивлением якоря*.

При наличии тока в проводниках якоря на них будут действовать силы, пропорциональные току $i_{\text{я}}$ в проводниках, магнитной индукции B в месте расположения проводника и его активной длине l , а именно $F = Bi_{\text{я}}l$. Направление силы, действующей на проводник, можно определить по правилу левой руки (см. рис. 10.9б). При этом момент $M = NFD_{\text{я}}/2$, создаваемый всеми N проводниками обмотки якоря и называемый *электромагнитным*, оказывается направленным встречно внешнему моменту $M_{\text{вн}}$, создаваемому приводным двигателем, т. е. является моментом сопротивления. Чем больше ток в обмотке якоря, тем больше момент сопротивления и тем больший внешний момент и, следовательно, механическую энергию необходимо подвести к валу при постоянной частоте вращения якоря.

Принцип действия двигателя. Конструктивно двигатель постоянного тока имеет такое же устройство, как и генератор. Если к обмотке возбуждения и щеткам неподвижного якоря подвести постоянное напряжение от внешнего источника, то в проводниках обмотки якоря появится ток.

При вращении якоря благодаря коллектору подводимый постоянный ток меняет направление в проводниках обмотки якоря, когда они переходят из одной параллельной ветви в другую, т. е. попадают в пространство под другим полюсом. Таким образом, направление тока в проводниках обмотки якоря, находящихся под данным полюсом, остается все время неизменным (рис. 11.11а).

На рис. 11.11а под каждым полюсом условно показаны только по одному проводнику обмотки якоря, в которых указаны как направление тока $i_{\text{я}}$, так и индуцированных

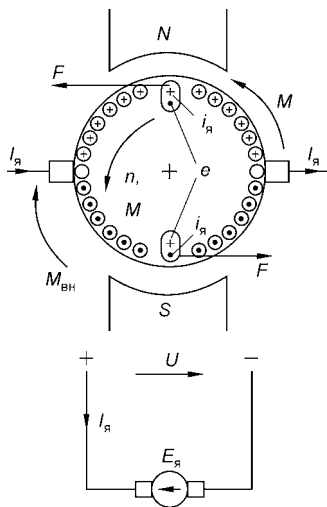


Рис. 11.11
Двигатель
постоянного тока

а — принцип действия; б — схема
якорной цепи.

ЭДС в них. Как и в генераторе, проводники с током, находящиеся в магнитном поле, будут создавать электромагнитный момент M . При указанном на рисунке направлении тока в обмотке якоря и полярности полюсов электромагнитный момент направлен против часовой стрелки. Если этот момент окажется больше тормозного момента $M_{\text{вн}}$, приложенного к валу, то под действием электромагнитного момента якорь начнет вращаться в направлении силы F . Поэтому при работе МПТ в режиме двигателя электромагнитный момент называют *вращающим* моментом. Отсюда следует, что для изменения направления вращения якоря достаточно изменить либо полярность полюсов, т. е. направление тока в обмотке возбуждения, либо направление тока в обмотке якоря.

При вращении якоря в магнитном поле в проводниках его обмотки индуцируется ЭДС, направление которой, как и в генераторе, определяют по правилу правой руки (см. рис. 11.11а). Видно, что ЭДС якоря двигателя направлена противоположно току в нем. Поэтому ЭДС якоря двигателя называют *противо-ЭДС*.

Для цепи обмотки якоря двигателя (рис. 11.11б) по второму закону Кирхгофа получаем *уравнение напряжения двигателя*:

$$U - R_{\text{я}}I_{\text{я}} = E_{\text{я}}, \text{ или } U = E_{\text{я}} + R_{\text{я}}I_{\text{я}}, \quad (11.2)$$

где $R_{\text{я}}$ — сопротивление якоря.

Это уравнение показывает, что приложенное к якорю напряжение уравновешивается противо-ЭДС якоря и падением напряжения на его обмотке. Так как у двигателя $I_{\text{я}} > 0$, то $U > E_{\text{я}}$. Но эта разность невелика (не превышает 8...10%), так как сопротивление обмотки якоря очень мало.

Из рассмотрения принципа действия генератора и двигателя следует, что машина постоянного тока является обратимой машиной, т. е. она может работать как генератор электрической энергии, если к ее валу подводится механический вращающий момент, и как двигатель, если к ее обмоткам подводится электрическая энергия.

При работе двигателя в установившемся режиме (при $n = \text{const}$) вращающий и тормозной моменты равны по значению (по направлению они взаимно противоположны). При холостом ходе двигателя тормозным моментом является *момент холостого хода* M_0 , обусловленный тре-



нием в подшипниках, щеток о коллектор, вращающегося якоря о воздух, мощностью потерь энергии в стальном магнитопроводе. Момент холостого хода составляет 2...6% от номинального момента $M_{\text{ном}}$. Таким образом, при холостом ходе $M = M_0$.

В режиме нагрузки уравнение равновесия моментов, как условие устойчивого режима двигателя, принимает вид

$$M = M_0 + M_2 \text{ или } M - (M_0 + M_2) = 0, \quad (11.3)$$

где M_2 — тормозной момент на валу двигателя, создаваемый приводимым во вращение механизмом.

В переходных режимах (разгон, изменение нагрузки, остановка) уравнение моментов имеет вид

$$M = M_0 + M_2 + M_j \text{ или } M - (M_0 + M_2) = M_j, \quad (11.4)$$

где $M_j = 2\pi J \frac{dn}{dt}$ — динамический (неуравновешенный) момент инерции якоря и вращающегося с ним исполнительного механизма, J — момент инерции вращающихся масс, n — частота вращения.

В зависимости от соотношения между вращающим моментом M и тормозным моментом $M_0 + M_2$ динамический момент может быть как положительным, так и отрицательным. Если $M_j > 0$, то частота вращения возрастает, так как вращающий момент превышает тормозной момент. И наоборот, при $M_j < 0$ частота вращения уменьшается.

11.4. ЭДС ЯКОРЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ

ЭДС якоря. При вращении якоря со скоростью v в каждом k -м проводнике обмотки якоря индуцируется ЭДС e_k , равная $B_k l v$, где B_k — магнитная индукция в месте расположения проводника, а l — его активная длина.

Как уже отмечалось, щетки делят обмотку якоря на $2a$ параллельных ветвей, поэтому если известно общее число проводников N в обмотке якоря, то число проводников в параллельной ветви $N_a = N/(2a)$. Направление индуцированных ЭДС во всех проводниках параллельной ветви одинаково. Все проводники в ветви соединены последовательно, следовательно, ЭДС якоря E_a может быть найдена как арифметическая сумма ЭДС, индуцированных во всех N_a проводниках, т. е.

$$E_{\text{я}} = \sum_{k=1}^{N_a} e_k = \sum_{k=1}^{N/(2a)} B_k l v = l v \sum_{k=1}^{N/(2a)} B_k.$$

При вращении якоря число проводников в параллельной ветви не меняется, и при достаточно большом количестве пазов якоря и числе проводников в обмотке якоря места положения проводников, образующих параллельную ветвь, остаются неизменными в пространстве между полюсами. Это позволяет сумму магнитных индукций

$$\sum_{k=1}^{N/(2a)} B_k$$

заменить произведением среднего значения $B_{\text{ср}}$ магнитной индукции в воздушном зазоре под главным полюсом на число слагаемых:

$$\sum_{k=1}^{N/(2a)} B_k = B_{\text{ср}} \frac{N}{2a},$$

при этом $B_{\text{ср}} = \Phi/(\tau l)$, где Φ — магнитный поток полюса, τ — полюсное деление.

Тогда

$$E_{\text{я}} = l v B_{\text{ср}} \frac{N}{2a} = l v \frac{\Phi}{\tau l} \frac{N}{2a}.$$

Если учесть, что полюсное деление $\tau = \pi D_{\text{я}}/(2p)$, где $D_{\text{я}}$ — диаметр якоря; p — число пар полюсов, то можно найти длину окружности якоря $\pi D_{\text{я}} = 2p\tau$, поэтому, воспользовавшись известным соотношением между линейной скоростью и частотой вращения: $v = \pi D_{\text{я}} n/60$, получим $v = 2p\tau n/60$, где n — частота вращения (в оборотах в минуту).

С учетом приведенных соотношений уравнение для ЭДС якоря примет вид

$$E_{\text{я}} = \frac{pN}{60a} n \Phi = c_e n \Phi, \quad (11.5)$$

где коэффициент $c_e = pN/(60a) = \text{const}$, так как для конкретной машины значения p , N и a являются постоянными. В формуле (11.5) магнитный поток выражен в веберах, а ЭДС — в вольтах.

Итак, для изменения ЭДС якоря генератора необходимо изменить либо магнитный поток путем изменения тока возбуждения, либо частоту вращения двигателя, вращающего якорь генератора.

Электромагнитный момент. Электромагнитный момент машины постоянного тока создается электромагнитными силами, действующими на все проводники обмотки якоря. На каждый k -й проводник обмотки якоря действует сила $F_k = B_k l i_{\text{я}}$, где, как и ранее, B_k — магнитная индукция в месте расположения проводника; l — длина проводника; $i_{\text{я}} = I_{\text{я}}/(2a)$ — ток в нем, $2a$ — число параллельных ветвей в обмотке якоря. Эта сила создает вращающий момент $M_k = F_k D_{\text{я}}/2$, где $D_{\text{я}}$ — диаметр якоря.

Так как магнитная проницаемость стали сердечника якоря во много раз больше проницаемости воздуха, то можно считать, что вектор магнитной индукции в воздушном зазоре в любой точке поверхности сердечника имеет всего одну составляющую, нормальную к этой поверхности. Поэтому сила, действующая на каждый проводник с током, будет направлена по касательной к поверхности якоря. Следовательно, электромагнитный момент, создаваемый всеми N проводниками обмотки якоря, будет равен алгебраической сумме моментов M_k всех проводников, т. е.

$$M = \sum_{k=1}^N M_k = \frac{I_{\text{я}}}{2a} \frac{D_{\text{я}}}{2} l \sum_{k=1}^N B_k,$$

При достаточно большом числе проводников в обмотке якоря можно считать, что

$$\sum_{k=1}^N B_k = N B_{\text{ср}} = N \frac{\Phi}{\tau l}.$$

Тогда

$$M = \frac{I_{\text{я}}}{2a} \frac{D_{\text{я}}}{2} l N B_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{я}}}{2a} \frac{D_{\text{я}}}{2} N \frac{\Phi}{\tau}.$$

С учетом того, что $D_{\text{я}} = 2\tau/\pi$, выражение для электромагнитного момента примет вид

$$M = \frac{Np}{2\pi a} I_{\text{я}} \Phi = c_M I_{\text{я}} \Phi, \quad (11.6)$$

где $c_M = Np/(2\pi a)$ — постоянная величина.

Таким образом, электромагнитный момент двигателя постоянного тока пропорционален току якоря и магнитному потоку. Электромагнитный момент (11.6) в генераторах является моментом сопротивления (тормозным моментом), а в двигателях — вращающим моментом.

11.5. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

Магнитный поток в машине создается всеми ее обмотками, в которых имеется ток. В режиме холостого хода в обмотке якоря генератора тока нет, а в обмотке якоря двигателя ток холостого хода имеет небольшое значение. Поэтому в машине существует только основной магнитный поток Φ_0 , создаваемый обмоткой возбуждения главных полюсов и симметричный относительно их осевой линии (рис. 11.12а).

На рис. 11.12а (коллектор не показан) щетки установлены на геометрической нейтрали. Когда к обмотке якоря генератора присоединен электроприемник с сопротивлением R_n (нагрузка) или когда на вал двигателя действует тормозной момент, ток якоря I_a создает магнитный поток якоря Φ_a (рис. 11.12б). Магнитный поток якоря направлен по линии, на которой расположены щетки. Так как щетки расположены на геометрической нейтрали, то поток якоря направлен перпендикулярно основному магнитному потоку, и поэтому его называют *поперечным магнитным потоком*.

Влияние магнитного потока якоря на основной магнитный поток называют *реакцией якоря*. В генераторе постоянного тока под «сбегающим» краем полюса магнитные потоки складываются, под «набегающим» вычитаются, у двигателя — наоборот. Таким образом, под одним краем полюса результирующий магнитный поток Φ увеличивается по сравнению с основным магнитным потоком, под другим краем полюса — уменьшается.

В результате распределение магнитной индукции в воздушном зазоре под полюсом становится несимметричным по отношению к осевой линии полюсов (рис. 11.12в). При этом магнитная индукция будет принимать нулевые значения уже не на линии геометрической нейтрали, а вне ее. Линию, проходящую через центр якоря и точки на его поверхности, в которых магнитная индукция равна нулю, называют *физической нейтралью*. Ее положение зависит от тока якоря, причем она поворачивается на угол $\alpha(I_a)$ по отношению к геометрической нейтрали у генераторов в направлении вращения, у двигателей — наоборот. При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической нейтралью. В результате реакции якоря в провод-

никах якоря, находящихся в точках повышенной магнитной индукции, индуцируется большая ЭДС, что приводит к увеличению разности потенциалов между соседними пластинами коллектора и может явиться одной из причин увеличения искрения под щетками и возникновения «кругового огня» на коллекторе.

Если магнитная цепь машины является насыщенной, то реакция якоря приводит к уменьшению основного магнитного потока и, следовательно, к уменьшению ЭДС якоря, так как $E_{\text{я}} = c_e n \Phi$. Это связано с тем, что в машинах с насыщенной магнитной цепью увеличение магнитного потока на $\Delta\Phi$ под одним краем полюса будет меньше, чем уменьшение на $\Delta\Phi$ под другим краем полюса (рис. 11.13).

Отрицательное влияние реакции якоря можно уменьшить, сдвигая щетки на физическую нейтраль. При этом поток якоря поворачивается на угол α и встречный поток под набегающим краем полюса генератора уменьшается. Сдвиг щеток осуществляют у генератора по направлению вращения якоря, а у двигателя — против направления вращения якоря. Так как угол α меняется с изменением тока

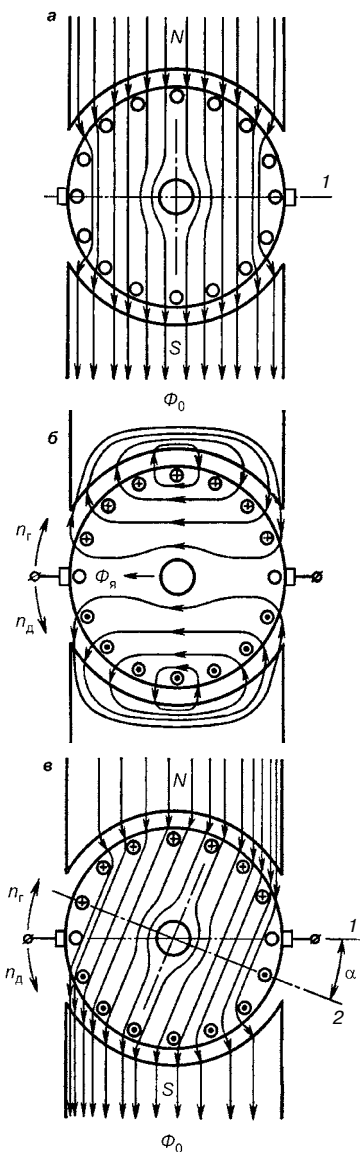


Рис. 11.12

Магнитные потоки в машине постоянного тока

а — магнитный поток полюсов; б — магнитный поток обмотки якоря; в — результирующий магнитный поток. 1 — геометрическая нейтраль; 2 — физическая нейтраль.

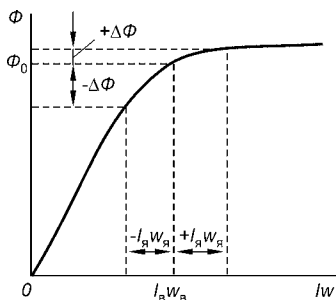


Рис. 11.13
Влияние реакции якоря
на результирующий
магнитный поток
($I_я W_я$ — МДС обмотки
возбуждения; $I_я W_я$ — МДС
обмотки якоря)

якоря $I_я$, то на практике щетки сдвигают относительно геометрической нейтрали, как правило, на угол, соответствующий средней нагрузке машины.

В машинах средней и большой мощности для снижения влияния реакции якоря применяют компенсационную обмотку. В таких машинах в полюсных наконечниках главных полюсов делают пазы (как в сердечнике якоря), в которые и укладывают компенсационную обмотку. Ее включают последовательно с обмоткой якоря таким образом, что магнитный поток, создаваемый этой обмоткой и пропорциональный току якоря, был направлен встречно магнитному потоку якоря и компенсировал его. При этом результирующий магнитный поток в воздушном зазоре останется практически неизменным.

11.6. ПОНЯТИЕ О КОММУТАЦИИ

Под *коммутацией* (от лат. *commutatio* — изменение) в машинах постоянного тока понимают явления, вызванные изменением направления тока в проводниках обмотки якоря при переходе их из одной параллельной ветви в другую, т. е. при пересечении линии, на которой расположены щетки. Рассмотрим явление коммутации на примере кольцевого якоря. На рис. 11.14 показана развертка части обмотки якоря, состоящей из четырех проводников, части коллектора (две коллекторные пластины) и щетки. Проводники 2 и 3 образуют коммутируемый виток, который на рис. 11.14а показан в положении, которое он занимал до коммутации, на рис. 11.14б — в период коммутации, а на рис. 11.14в — после коммутации. Коллектор и обмотка якоря вращаются в указанном стрелкой направлении с частотой вращения n ; щет-

ка неподвижна и в простейшем случае перекрывает только две коллекторные пластины, хотя в действительности щетка перекрывает сразу несколько коллекторных пластин, что усложняет процесс коммутации.

В момент времени до коммутации ток якоря $I_{\text{я}}$ замыкается через щетку, правую коллекторную пластину и разделяется между параллельными ветвями обмотки якоря пополам. Проводники 1, 2, 3 и проводник 4 образуют разные параллельные ветви. После коммутации проводники 2 и 3 перешли в другую параллельную ветвь и направление тока в них изменилось на противоположное. Это изменение произошло за время, равное периоду коммутации $T_{\text{к}}$, т. е. за время, которое требуется, чтобы щетка перешла с правой пластины на соседнюю левую.

Один из моментов периода коммутации показан на рис. 11.14б. Коммутируемый виток оказывается замкнутым накоротко коллекторными пластинами и щеткой. Так как за период коммутации происходит изменение направления тока в витке 2–3, то это означает, что в витке существует переменный ток, создающий переменный магнитный поток. Этот магнитный поток индуцирует в коммутируемом витке ЭДС самоиндукции e_L . Согласно принципу Ленца ЭДС самоиндукции стремится поддержать в проводнике ток прежнего направления. Следовательно, направление e_L совпадает с направлением тока в витке до коммутации.

Под действием ЭДС самоиндукции в короткозамкнутом витке 2–3 возникает большой дополнительный ток $i_{\text{д}}$,

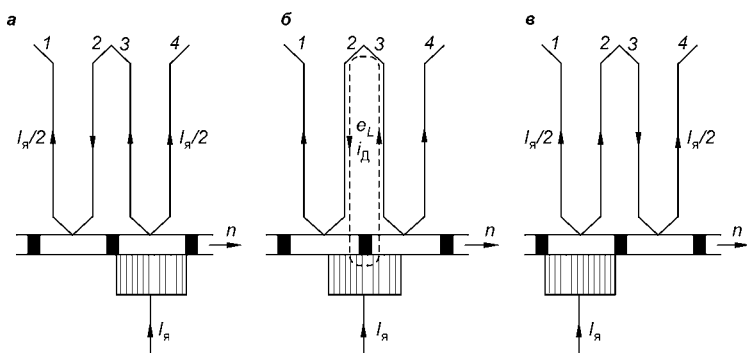


Рис. 11.14
Схема процесса коммутации тока

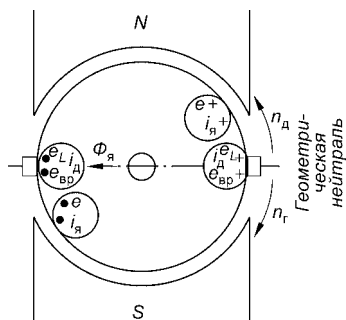


Рис. 11.15
Направление ЭДС
в коммутируемом витке

так как сопротивление контура мало. В месте контакта щетки с левой пластиной ток i_d направлен противоположно току якоря, а в месте контакта щетки с правой пластиной направление этих токов совпадает. Чем ближе к окончанию периода коммутации, тем меньше площадь контакта щетки с правой пластиной и тем больше плотность тока. По окончании периода коммутации контакт щетки с правой

пластиной разрывается и образуется электрическая дуга. Чем больше ток i_d , тем мощнее электрическая дуга.

Если щетки расположены на геометрической нейтрали, то в коммутируемом витке магнитным потоком якоря индуцируется ЭДС вращения $e_{вр}$. На рис. 11.15 в увеличенном масштабе показаны проводники коммутируемого витка, расположенные на геометрической нейтрали, и направление ЭДС самоиндукции e_L для генератора, совпадающее с направлением тока якоря в этом проводнике до коммутации. Направление $e_{вр}$ определяют по правилу правой руки, при этом оно всегда совпадает с направлением e_L . В результате ток i_d еще больше увеличивается. Возникающая электрическая дуга между щеткой и коллекторной пластиной может повредить поверхность коллектора, в результате чего ухудшается контакт между щеткой и коллектором, что в свою очередь приводит к увеличению искрения под щеткой.

В машинах небольшой мощности для улучшения условий коммутации щетки сдвигают в сторону физической нейтрали. Если щетки расположены на физической нейтрали, то коммутируемый виток не пересекает никакого внешнего магнитного потока и ЭДС вращения в нем не индуцируется. Если сдвинуть щетки за физическую нейтраль, как показано на рис. 11.16, то в коммутируемом витке результирующий магнитный поток будет индуцировать ЭДС e_k , направление которой противоположно направлению ЭДС самоиндукции e_L . Таким образом, будет скомпенсирована не только ЭДС вращения, но и ЭДС

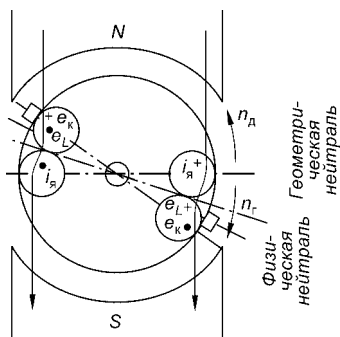


Рис. 11.16

Направление ЭДС в коммутируемом витке при сдвиге щеток за физическую нейтраль

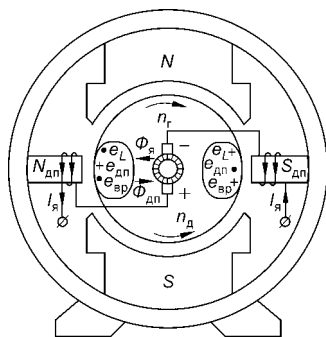


Рис. 11.17

Схема включения обмоток добавочных полюсов

самоиндукции (частично или полностью). Как указывалось ранее, угол сдвига физической нейтральной все время меняется, и поэтому щетки обычно устанавливают со сдвигом на некоторый средний угол по отношению к ней.

Уменьшение ЭДС в коммутируемом витке приводит к уменьшению тока $i_{\text{д}}$ и ослаблению электрического разряда между щеткой и коллекторной пластиной.

В машинах постоянного тока мощностью 1 кВт и выше для улучшения условий коммутации устанавливают добавочные полюсы ($N_{\text{дп}}$ и $S_{\text{дп}}$ на рис. 11.17). Добавочный полюс располагают по геометрической нейтральной. У генераторов одноименный добавочный полюс располагают за основным полюсом по ходу вращения якоря, а у двигателя — наоборот. Обмотки добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы создаваемый ими поток $\Phi_{\text{дп}}$ был направлен навстречу потоку якоря $\Phi_{\text{я}}$. Так как оба эти потока создаются одним током (током якоря), то можно подобрать число витков обмотки добавочных полюсов и воздушный зазор между ними и якорем такими, чтобы потоки были равны по значению при любом токе якоря. Поток добавочных полюсов всегда будет компенсировать поток якоря, и, таким образом, ЭДС вращения в коммутируемом витке будет отсутствовать. Добавочные полюсы обычно делают такими, чтобы их поток индуцировал в коммутируемом витке ЭДС, равную сумме $e_L + e_{\text{вр}}$. Тогда в момент отрыва щетки от правой коллекторной пластины (см. рис. 11.14б) электрическая дуга не возникает.

11.7. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В основу классификации генераторов постоянного тока положен вид источника питания обмотки возбуждения. Различают:

1. *Генераторы с независимым возбуждением.* Обмотка возбуждения питается от постороннего источника (аккумулятора или другого источника постоянного тока). У генераторов малой мощности (десятки ватт) основной магнитный поток может создаваться постоянными магнитами.

2. *Генераторы с самовозбуждением.* В таких генераторах источником электрической энергии для его обмотки возбуждения является сам генератор. В зависимости от схемы соединения обмоток якоря и возбуждения по отношению к внешней цепи бывают:

а) генераторы *параллельного* возбуждения, у которых обмотка возбуждения включена параллельно с обмоткой якоря (шунтовые генераторы);

б) генераторы *последовательного* возбуждения, у которых эти обмотки включены последовательно (серийные генераторы);

в) генераторы *смешанного* возбуждения, у которых одна обмотка возбуждения включена параллельно обмотке якоря, а вторая — последовательно (компаундные генераторы).

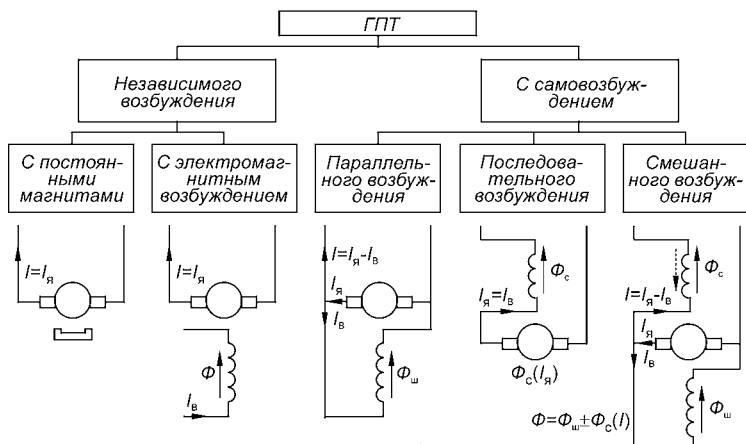


Рис. 11.18
Классификация генераторов
постоянного тока по способам возбуждения

Сказанное выше иллюстрируется структурной схемой, представленной на рис. 11.18.

Как видно из рис. 11.18, в ГПТ последовательного возбуждения магнитный поток пропорционален току нагрузки, что является существенным недостатком генератора. В генераторе смешанного возбуждения результирующий магнитный поток создается двумя обмотками: параллельной ($\Phi_{\text{ш}}$) и последовательной ($\Phi_{\text{с}}$), при этом, если магнитные потоки складываются, т. е. $\Phi = \Phi_{\text{ш}} + \Phi_{\text{с}}(I)$, то такое включение обмоток возбуждения называют *согласным*, а если магнитные потоки вычитаются, т. е. $\Phi = \Phi_{\text{ш}} - \Phi_{\text{с}}(I)$, то *встречным*. В ГПТ, как правило, применяют согласное включение обмоток, встречное включение применяют только в специальных ГПТ, например в сварочных генераторах.

Номинальный режим генератора постоянного тока определяется номинальной мощностью $P_{\text{ном}}$; номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$ на зажимах обмотки якоря; номинальным током $I_{\text{ном}}$; номинальной частотой вращения якоря и номинальным КПД. Эти величины обычно указывают в паспорте генератора.

Номинальный ток возбуждения в паспорте не указывают, его значение составляет обычно $(0,03 \dots 0,05)I_{\text{ном}}$. Поэтому в генераторах независимого, параллельного и смешанного возбуждения для создания основного магнитного потока обмотка возбуждения должна иметь большое число витков.

Двигатели постоянного тока по способу включения обмоток возбуждения и обмотки якоря аналогично генераторам подразделяют на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Однако следует заметить, что двигателей с самовозбуждением (в отличие от генераторов) не бывает, так как они являются приемниками электрической энергии, поэтому как обмотку якоря, так и обмотку возбуждения подключают к внешнему источнику постоянного напряжения.

11.8.

ГЕНЕРАТОР НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В генераторе независимого возбуждения (см. рис. 11.19) мощность энергии, потребляемой обмоткой возбуждения, составляет 3...5% от номинальной мощности. Работа генератора во всех режимах полностью определяется

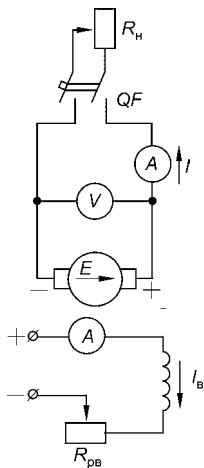


Рис. 11.19
Схема генератора
независимого
возбуждения

характеристикой холостого хода, внешней и регулировочной характеристиками.

Характеристика холостого хода — это зависимость ЭДС якоря $E_{\text{я}}$ от тока возбуждения $I_{\text{в}}$, когда нагрузка отсутствует, а частота вращения якоря n постоянна:

$$E_{\text{я}} = f(I_{\text{в}}) \text{ при } I = 0, n = \text{const},$$

где I — ток нагрузки (у генератора независимого возбуждения ток нагрузки равен току якоря).

В режиме холостого хода $E_{\text{я}} = c_e n \Phi_0$, так как результирующий поток Φ равен основному потоку Φ_0 . Учитывая, что $n = \text{const}$, получим

$$E_{\text{я}} = c'_e \Phi,$$

где $c'_e = c_e n = \text{const}$.

Таким образом, ЭДС якоря линейно зависит от магнитного потока Φ_0 , который создается током возбуждения $I_{\text{в}}$. Зависимость между потоком и током возбуждения определяется характеристикой намагничивания. Следовательно, и зависимость $E_{\text{я}} = f(I_{\text{в}})$ также имеет вид характеристики намагничивания (рис. 11.20). Если полюсы генератора предварительно намагничены, то они сохраняют остаточную намагниченность, поэтому в машине при токе $I_{\text{в}} = 0$ имеется незначительный магнитный поток $\Phi_{\text{ост}}$, называемый *остаточным магнитным потоком*. По этой причине при токе $I_{\text{в}} = 0$ в обмотке вращающегося якоря индуцируется небольшая остаточная ЭДС $E_{\text{ост}}$, что несколько изменяет вид характеристики в начале координат (штриховая линия на рис. 11.20). Номинальному значению ЭДС $E_{\text{яном}} = U_{\text{ном}}$ соответствует ток возбуждения $I_{\text{в0}}$;

Внешняя характеристика — это зависимость напряжения U на зажимах якоря от тока нагрузки I при постоянном токе возбуждения $I_{\text{в}}$ и постоянной частоте вращения якоря n :

$$U = f(I) \text{ при } I_{\text{в}} = \text{const}, n = \text{const}.$$

Нагрузкой генератора является электроприемник с сопротивлением $R_{\text{н}}$, (см. рис. 11.19). Ток нагрузки генера-

тора изменяют путем изменения сопротивления R_n электроприемника после подключения его к якору (включают автоматический выключатель QF), ток возбуждения поддерживают постоянным с помощью реостата $R_{рв}$.

Согласно уравнению (11.1), с увеличением тока нагрузки, равного току якоря, напряжение на якоре уменьшается из-за увеличения потери напряжения $R_{я}I_{я}$ в обмотке якоря и уменьшения результирующего магнитного потока Φ за счет увеличения магнитного потока якоря $\Phi_{я}$, т. е. вследствие реакции якоря, что приводит к уменьшению ЭДС якоря $E_{я}$. Это можно продемонстрировать такой схемой:

$$R_n \downarrow \Rightarrow I = I_{я} \uparrow \Rightarrow \begin{cases} 1. R_{я}I_{я} \uparrow \Rightarrow U \downarrow, \\ 2. \Phi_{я} \uparrow \Rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow E_{я} \downarrow \Rightarrow U \downarrow. \end{cases}$$

При малых токах нагрузки, когда реакция якоря еще не влияет на ЭДС якоря, внешняя характеристика — это прямая линия с отрицательным углом наклона, а при больших токах нагрузки, когда начинает проявляться реакция якоря, к потере напряжения на обмотке якоря начинает добавляться уменьшение ЭДС якоря, характеристика идет более круто (рис. 11.21). При уменьшении сопротивления нагрузки R_n до нуля ток I увеличивается до значения тока короткого замыкания ($I_k = E_{я}/R_{я}$), превышающего номинальное в десятки раз. Это аварийный режим генератора, поэтому имеются устройства защиты, отключающие нагрузку при больших токах.

Изменение напряжения при номинальной нагрузке

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} 100 = 5...12\%.$$

Регулировочная характеристика показывает, как надо изменять ток возбуждения при

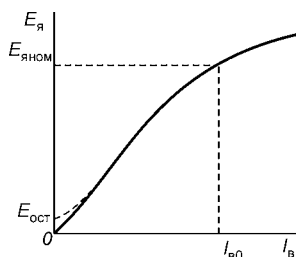


Рис. 11.20
Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

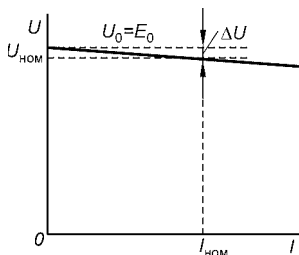


Рис. 11.21
Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

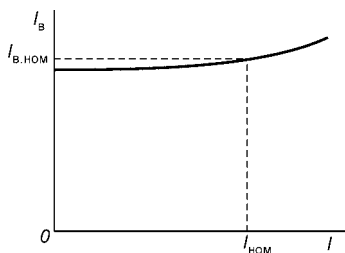


Рис. 11.22
Регулировочная
характеристика генератора
независимого возбуждения

изменении тока нагрузки, чтобы при постоянной частоте вращения якоря напряжение на нем оставалось постоянным, равным номинальному значению:

$$I_B = f(I) \text{ при } n = \text{const}, \\ U_{\text{ном}} = \text{const}.$$

Так как при постоянном токе возбуждения с увеличением тока нагрузки напря-

жение на якоре уменьшается, то для поддержания его постоянным надо увеличивать ЭДС якоря $E_{\text{я}}$, увеличивая магнитный поток путем увеличения тока возбуждения (рис. 11.22). При этом номинальной нагрузке генератора ($I_{\text{ном}}$ и $U_{\text{ном}}$) соответствует номинальный ток возбуждения $I_{B, \text{ном}} > I_{B0}$.

Регулировочная характеристика имеет большое практическое значение.

11.9.

ГЕНЕРАТОР ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Генератор параллельного возбуждения является генератором с самовозбуждением, его схема приведена на рис. 11.23.

Процесс самовозбуждения генератора основан на явлении остаточного намагничивания ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь машины. При изготовлении генераторов магнитные полюсы специально намагничивают, и в машине всегда существует небольшой *остаточный магнитный поток* $\Phi_{\text{ост}}$, значение которого составляет 2...3% от номинального основного потока.

Самовозбуждение генератора осуществляют на холостом ходу (выключатель QF отключен). При выключенном выключателе S в обмотке вращающегося якоря генератора индуцируется небольшая остаточная ЭДС $E_{\text{ост}} = c_e n \Phi_{\text{ост}}$. Если включить выключатель S , то под действием $E_{\text{ост}}$ в цепи обмотки возбуждения возникает ток возбуждения

$$I_{B, \text{ост}} = \frac{E_{\text{ост}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{рв}}}, \quad (11.7)$$

где $R_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения. Теперь обмотка возбуждения создает дополнительный магнитный поток полюсов $\Delta\Phi_0$. Если этот поток совпадает по направлению с остаточным, то увеличиваются результирующий магнитный поток и соответственно ЭДС якоря.

Вследствие этого возрастают ток возбуждения (согласно формуле (11.7)), дополнительный магнитный и суммарный поток, ЭДС якоря и т. д. Поскольку зависимость ЭДС якоря от тока возбуждения при постоянной частоте вращения имеет вид характеристики намагничивания (1 на рис. 11.24), увеличение ЭДС якоря в процессе самовозбуждения происходит аналогично.

Напряжение на зажимах цепи возбуждения $U_{\text{в}} = (R_{\text{в}} + R_{\text{рв}})I_{\text{в}}$ при $R_{\text{рв}} = \text{const}$ изменяется по линейному закону при изменении тока возбуждения $I_{\text{в}}$ (линия 2 на рис. 11.24). В точке А это напряжение становится равным ЭДС якоря. Дальнейший рост ЭДС якоря невозможен, так как при увеличении тока возбуждения свыше $I_{\text{вА}}$ уравнение напряжения генератора (11.1) не выполняется. Таким образом, точка А является графическим решением системы двух уравнений: $E_{\text{я}} = f(I_{\text{в}})$ и $U_{\text{в}} = f(I_{\text{в}})$.

Чтобы произошло самовозбуждение генератора, в нем должен быть остаточный магнитный поток полюсов $\Phi_{\text{ост}}$; дополнительный магнитный поток полюсов $\Delta\Phi_0$, создаваемый током возбуждения, должен совпасть по направлению с потоком $\Phi_{\text{ост}}$; сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического: $R_{\text{в}} + R_{\text{рв}} < R_{\text{кр}}$.

Критическое значение сопротивления цепи возбуждения определяют по значению сопротивления регулируемого реостата, при котором угол α наклона линии 2 становится таким, что линия 2 становится касательной к кривой 1 в ее начале (линия 3 на рисунке). При критическом значении сопротивления цепи возбуждения

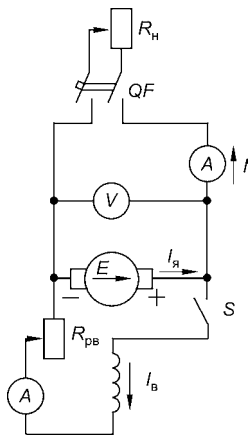


Рис. 11.23
Схема генератора
параллельного
возбуждения

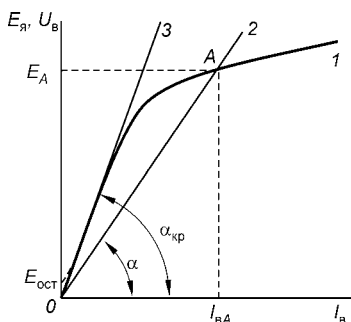


Рис. 11.24
Графическое решение системы уравнений для определения установившегося значения ЭДС якоря при самовозбуждении генератора

1 — $E_{\text{я}} = f(I_{\text{в}})$; 2, 3 — $U_{\text{в}} = f(I_{\text{в}})$.

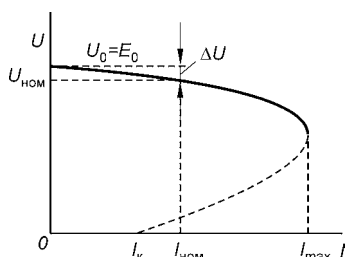


Рис. 11.25
Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

с увеличением тока I напряжение U уменьшается. Это обусловлено как теми же причинами, что и в генераторе независимого возбуждения, так и тем, что ток возбуждения уменьшается с уменьшением напряжения по первым двум причинам:

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{рв}}}.$$

В результате основной магнитный поток Φ_0 становится меньше. ЭДС $E_{\text{я}}$ также уменьшается (как из-за потока реакции якоря, так и из-за основного магнитного потока), и при токе нагрузки $I = I_{\text{ном}}$ изменение напряжения составляет 8...15%, что несколько больше, чем у генератора независимого возбуждения.

происходит незначительное увеличение ЭДС якоря при включении выключателя S . Возбуждения генератора до номинального значения ЭДС якоря не происходит. В этом случае необходимо уменьшать сопротивление $R_{\text{рв}}$.

Характеристика холостого хода генератора $E_{\text{я}} = f(I_{\text{в}})$ при $n = \text{const}$ и $I = 0$ была описана в предыдущем параграфе (рис. 11.24, кривая 1).

Внешняя характеристика представляет собой зависимость $U = f(I)$ при $n = \text{const}$, $R_{\text{рв}} = \text{const}$. В генераторе параллельного возбуждения ток $I_{\text{я}}$ обмотки якоря не равен току нагрузки I , так как $I_{\text{я}} = I + I_{\text{в}}$, но, поскольку $I_{\text{в}}$ очень мал, им можно пренебречь и считать, что $I_{\text{я}} = I$. Поэтому вид внешней характеристики генератора (рис. 11.25) определяется уравнением $U = E_{\text{я}} - R_{\text{я}}I$, из которого видно, что с увеличением тока I напряжение U уменьшается.

Процессы, происходящие в генераторе при его нагрузке, можно проиллюстрировать следующей схемой:

$$R_{\text{н}} \downarrow \Rightarrow I = I_{\text{я}} \uparrow = I + I_{\text{в}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} 1. R_{\text{я}I_{\text{я}}} \uparrow \Rightarrow U \downarrow, \\ 2. \Phi_{\text{я}} \uparrow \Rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow E_{\text{я}} \downarrow \Rightarrow U \downarrow, \\ 3. I_{\text{в}} = U / (R_{\text{в}} + R_{\text{рв}}) \downarrow \Rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow E_{\text{я}} \downarrow \Rightarrow U \downarrow. \end{cases}$$

Если ток нагрузки увеличивать до значений, больших $I_{\text{ном}}$, за счет уменьшения сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$, то результирующий магнитный поток уменьшается как из-за реакции якоря, так и из-за тока возбуждения. Генератор размагничивается настолько, что дальнейшее уменьшение сопротивления $R_{\text{н}}$ не приводит к увеличению тока I . Наоборот, ток уменьшается при дальнейшем уменьшении напряжения, значение которого стремится к нулю (что соответствует короткому замыканию обмотки якоря). Ток короткого замыкания $I_{\text{к}}$ может быть меньше $I_{\text{ном}}$. Ток нагрузки I , соответствующий точке перегиба внешней характеристики, обычно в 2...2,5 раза превышает $I_{\text{ном}}$.

Регулировочная характеристика $I_{\text{в}} = f(I)$ при $n = \text{const}$, $U = \text{const}$ генератора параллельного возбуждения на графике проходит несколько выше регулировочной характеристики генератора независимого возбуждения из-за большего изменения напряжения (см. рис. 11.22).

11.10. ГЕНЕРАТОР СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Схема включения генератора смешанного возбуждения представлена на рис. 11.26.

По последовательной обмотке возбуждения замыкается ток нагрузки I , поэтому эту обмотку выполняют из провода большого сечения и с небольшим числом витков. При холостом ходе генератора последовательная обмотка не создает магнитного потока. В режиме нагрузки ее магнитный поток увеличивается с ростом нагрузки.

Характеристика холостого хода $E_{\text{я}} = f(I_{\text{в}})$ при $n = \text{const}$, $I = 0$ аналогична характеристике генератора параллельного возбуждения, так как в режиме холостого хода последовательная обмотка возбуждения не участвует в создании магнитного потока.

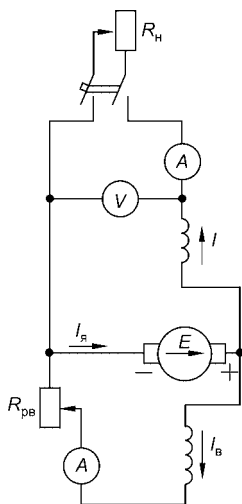


Рис. 11.26
Схема генератора
смешанного
возбуждения

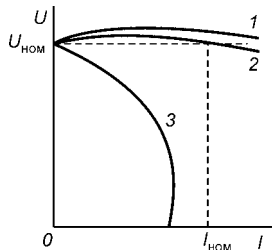


Рис. 11.27
Внешние характери-
стики генератора смешан-
ного возбуждения

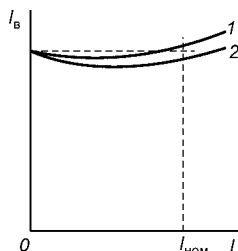


Рис. 11.28
Регулировочные харак-
теристики генератора
смешанного возбуждения

Вид *внешней характеристики* зависит от способа включения последовательной и параллельной обмоток возбуждения. При согласном включении обмоток с увеличением тока нагрузки увеличивается магнитный поток последовательной обмотки возбуждения, а следовательно, и результирующий магнитный поток. Это приводит к увеличению ЭДС якоря и напряжения. При некотором значении тока нагрузки рост результирующего потока прекращается, так как магнитная цепь насыщается, поэтому напряжение уменьшается из-за потери напряжения в обмотке якоря и последовательной обмотке возбуждения, а также вследствие реакции якоря.

Уравнение (11.1), описывающее внешнюю характеристику для генератора смешанного возбуждения при согласном включении обмоток возбуждения, принимает вид

$$U = c_e n (\Phi_{\text{ш}} + \Phi_{\text{с}}) - R_{\text{я}} I_{\text{я}} - R_{\text{с}} I,$$

где $R_{\text{с}}$ — сопротивление последовательной обмотки возбуждения.

Соотношение магнитных потоков, создаваемых обмотками возбуждения, может быть различным. В соответствии с этим будут различными внешние характеристики генераторов. Число витков последовательной обмотки можно подобрать таким, что напряжение генератора будет номинальным или при номинальном токе нагрузки (кривая 2 на рис. 11.27), или при большем его значении (кривая 1).

При встречном включении обмоток возбуждения последовательная обмотка возбуждения создает поток, направленный навстречу потоку параллельной обмотки. Поэтому с увеличением тока нагрузки результирующий магнитный поток резко уменьшается, и машина размагничивается очень быстро. Внешняя характеристика при этом похожа на внешнюю характеристику генератора параллельного возбуждения, у которого точка перегиба соответствует току, значительно меньшему номинального значения (кривая 3). Такое включение обмоток возбуждения применяют только для специальных генераторов.

В соответствии с семейством внешних характеристик генератор имеет семейство *регулирующих характеристик* (рис. 11.28, 1, 2). При встречном включении обмоток возбуждения регулировочная характеристика не имеет практического значения, так как такое включение применяют для того, чтобы при незначительном изменении тока иметь значительные изменения напряжения, поэтому регулировочная характеристика, соответствующая внешней характеристике 3 (рис. 11.27), на рисунке не показана.

11.11. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Эксплуатационные свойства двигателей постоянного тока оценивают обычно по их механическим и рабочим характеристикам, основными из которых являются механические характеристики.

Механической характеристикой двигателя называют зависимость частоты вращения якоря от момента сопротивления (тормозного момента) на валу при постоянных напряжении сети и сопротивлении в цепи возбуждения, т. е. зависимость $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ и $R_{\text{рв}} = \text{const}$.

Под *рабочими характеристиками* понимают зависимости частоты вращения якоря n , тока I и мощности P_1 энергии, потребляемых двигателем из сети, развиваемого им вращающего момента M и КПД η от механической мощности P_2 на валу при тех же условиях.

Анализ этих характеристик проводят, пользуясь уравнениями для напряжения U (11.2), ЭДС якоря $E_{\text{я}}$ (11.5), электромагнитного момента M (11.6) и уравнениями

движения (11.3) и (11.4) в установившемся и переходном режимах работы двигателя.

Так, для установившегося режима на основании уравнений (11.3) и (11.6) можно записать, что

$$M = c_M I_{\text{я}} \Phi = M_0 + M_2,$$

откуда следует уравнение для тока якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{M_0 + M_2}{c_M \Phi} = I_{\text{я}0} + \frac{M_2}{c_M \Phi}, \quad (11.8)$$

где $I_{\text{я}0} = \frac{M_0}{c_M \Phi}$ — ток якоря в режиме холостого хода, а

второе слагаемое — его нагрузочная составляющая.

Из формулы (11.8) следует важный вывод:

Ток якоря в установившемся режиме зависит только от тормозного момента на валу и магнитного потока двигателя.

Отсюда также видно, что в режиме холостого хода ток якоря не может быть равным нулю в отличие от генератора, что следует и из принципа действия двигателя.

При анализе характеристик двигателя может оказаться полезным уравнение для тока якоря, которое можно получить из уравнения напряжения (11.2). В общем виде оно может быть записано следующим образом:

$$U = E_{\text{я}} + (R_{\text{я}} + R_{\text{яд}}) I_{\text{я}} = c_e n \Phi + (R_{\text{я}} + R_{\text{яд}}) I_{\text{я}}, \quad (11.9)$$

где $R_{\text{яд}}$ — сопротивление добавочных элементов, включенных последовательно с якорем, в качестве которых могут быть использованы пусковой $R_{\text{п}}$ или регулировочный $R_{\text{ря}}$ реостаты. Это может быть и сопротивление $R_{\text{с}}$ последовательной обмотки возбуждения. Тогда уравнение для тока якоря примет вид

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{яд}}} = \frac{U - c_e n \Phi}{R_{\text{я}} + R_{\text{яд}}}. \quad (11.10)$$

Уравнение для частоты вращения двигателя в установившемся режиме работы следует из уравнения (11.9):

$$n = \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\text{яд}}) I_{\text{я}}}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} \left(1 - \frac{(R_{\text{я}} + R_{\text{яд}}) I_{\text{я}}}{U} \right). \quad (11.11)$$

Подставив в последнее уравнение выражение для тока из (11.8), получим уравнение

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{я} + R_{яд}}{c_e c_m \Phi^2} (M_0 + M_2) = n_0 - \frac{R_{я} + R_{яд}}{c_e c_m \Phi^2} M_2, \quad (11.12)$$

где $n_0 = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{я} + R_{яд}}{c_e c_m \Phi^2} M_0 \cong \frac{U}{c_e \Phi}$ — частота вращения двигателя в режиме холостого хода.

При постоянных напряжении U и сопротивлении $R_{я} + R_{яд}$ якорной цепи уравнение (11.12) является уравнением механической характеристики, вид которой зависит от того, как изменяется магнитный поток с изменением нагрузки. Поэтому двигатели с различными способами возбуждения имеют различные механические характеристики.

Полезная механическая мощность двигателя также зависит от полезного момента на валу:

$$P_2 = 2\pi n M_2. \quad (11.13)$$

Из приведенных уравнений следует, что при номинальном напряжении двигателя его характеристики в первую очередь зависят от тормозного момента на валу и магнитного потока.

Общим свойством двигателей постоянного тока является *свойство саморегулирования*, под которым понимают свойство двигателя автоматически переходить от одного устойчивого режима работы к другому при изменении тормозного момента на валу.

Переходный процесс при изменении режима работы двигателя происходит следующим образом. Пусть двигатель работал при номинальном напряжении и постоянном токе возбуждения (постоянном магнитном потоке). Тормозной момент на валу имел значение $M'_т = M_0 + M'_2$, при этом двигатель развивал равный ему вращающий момент $M' = M'_т$, а соответствующие этому режиму ток якоря и частота вращения имели значения $I'_я$ и n' согласно уравнениям (11.8) и (11.12). Пусть в какой-то момент времени тормозной момент увеличился до значения $M''_т = M_0 + M''_2$, при этом вращающий момент стал меньше тормозного: $M' < M''_т$. Согласно уравнению (11.4) появляется отрицательный динамический момент

$$M_j = M' - M''_T = 2\pi J \frac{dn}{dt} < 0$$

и частота вращения начнет уменьшаться, что приведет к уменьшению ЭДС якоря $E_{я} = c_e n \Phi$. При этом согласно уравнениям (11.10) и (11.6) ток якоря и, следовательно, вращающий момент будут увеличиваться до тех пор, пока не наступит новое равновесие моментов, когда вращающий момент достигнет значения $M'' = M''_T = c_M \Phi I''_{я} > M'$. При этом ток якоря и частота вращения примут новые установившиеся значения $I''_{я} > I'_{я}$ и $n'' < n'$, соответствующие тормозному моменту $M'' = M''_T$.

В более лаконичной форме сказанное можно проиллюстрировать такой схемой:

$$\begin{array}{c} M''_T > M'_T \\ \uparrow \\ M' = M'_T \quad M' < M''_T \Rightarrow M_j = 2\pi J \frac{dn}{dt} < 0 \Rightarrow \\ I_{я} = I'_{я}, n = n' \\ \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow E_{я} \downarrow \Rightarrow I_{я} \uparrow \Rightarrow \\ \Rightarrow M = c_M \Phi I_{я} \uparrow \text{ до } M = M'' = M''_T, \\ \text{при котором } I_{я} = I''_{я} > I'_{я} \text{ и } n = n'' < n' \end{array}$$

Аналогично можно проанализировать и процессы, происходящие в двигателе при уменьшении нагрузки, изменении тока возбуждения или сопротивления в цепи якоря.

11.12. ПУСК ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При подключении электродвигателя постоянного тока к сети с напряжением U , когда частота его вращения $n = 0$ и ЭДС якоря $E_{я} = 0$, из уравнения (11.2) можно найти *пусковой ток якоря* — ток якоря в момент пуска двигателя:

$$I_{яп} = U/R_{я}.$$

Так как на обмотку якоря подают номинальное напряжение, а ее сопротивление очень мало, пусковой ток якоря может в 10...20 раз превышать номинальное значение. Такой большой ток может привести к повреждению обмотки якоря, чрезмерному искрению под щетками и повреждению поверхности коллектора. Кроме того, возникает очень большой пусковой момент, создающий ударную нагрузку на вал и передачу, связывающую двигатель



с рабочим механизмом, что может привести к ее поломке. Поэтому для защиты двигателей от подобных аварийных режимов устанавливают максимальную токовую защиту, например, плавкие предохранители или автоматические выключатели.

Ограничить пусковой ток можно двумя способами:

1) осуществить пуск при пониженном напряжении, для чего необходимо иметь регулируемый источник постоянного напряжения;

2) увеличить сопротивление якорной цепи, включив последовательно с обмоткой якоря пусковой реостат R_{Π} (рис. 11.29).

Первый способ пуска называют *безреостатным*, а второй — *реостатным*.

При реостатном пуске пусковой ток якоря $I_{яп} = U / (R_{я} + R_{\Pi})$. Сопротивление пускового реостата выбирают таким, чтобы пусковой ток $I_{\Pi} = I_{яп} + I_{в}$ двигателя не превышал более чем в 1,5...2,0 раза его номинальное значение, т. е. $I_{\Pi} \leq (1,5...2,0)I_{ном}$.

Когда двигатель начинает вращаться, частота вращения n и ЭДС якоря будут увеличиваться. При наличии пускового реостата R_{Π} в якорной цепи уравнение (11.10) имеет вид

$$I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R_{я} + R_{\Pi}} = \frac{U - c_e n \Phi}{R_{я} + R_{\Pi}},$$

из которого следует, что по мере разгона двигателя ток якоря будет уменьшаться. Поэтому в процессе пуска сопротивление пускового реостата постепенно уменьшают, но так, чтобы пусковой ток не превышал его номинального значения более чем в полтора-два раза. По окончании разгона двигателя пусковой реостат должен быть выведен полностью, так как он не рассчитан на длительный режим работы при больших значениях тока.

При пуске двигателя для получения наибольшего пускового момента необходимо иметь наибольший магнитный поток (ток возбуждения), так как согласно (11.6)

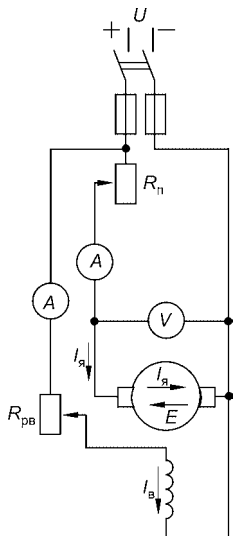


Рис. 11.29
Схема для реостатного пуска двигателя параллельного возбуждения

вращающий момент пропорционален магнитному потоку. Поэтому сопротивление цепи возбуждения $R_{рв}$ при пуске следует делать минимальным, чтобы ток возбуждения и, следовательно, магнитный поток машины были максимальными. При этом пусковой вращающий момент достигает максимального значения, в результате чего двигатель быстрее разгоняется и сокращается время пуска.

11.13. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

В случае, когда в цепь якоря включен регулировочный реостат с сопротивлением $R_{ря}$, уравнение (11.11) принимает вид

$$n = \frac{U - (R_{я} + R_{ря}) I_{я}}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} \left(1 - \frac{(R_{я} + R_{ря}) I_{я}}{U} \right).$$

Отсюда следует, что частота вращения двигателя постоянного тока пропорциональна подводимому к двигателю напряжению, обратно пропорциональна магнитному потоку и зависит от сопротивления якорной цепи. Таким образом, регулировать частоту вращения двигателя можно следующими способами:

- 1) изменять напряжение источника питания U при $\Phi = \text{const}$ и $R_{ря} = \text{const}$;
- 2) изменять магнитный поток Φ машины путем изменения тока возбуждения при $U = \text{const}$ и $R_{ря} = \text{const}$;
- 3) изменять сопротивление цепи якоря, т. е. сопротивление регулировочного реостата $R_{ря}$ при $\Phi = \text{const}$ и $U = \text{const}$.

Рассмотрим эти способы регулирования частоты вращения при неизменном тормозном моменте на валу двигателя ($M_t = M_0 + M_2 = \text{const}$).

Способ первый. Если увеличить напряжение, то согласно уравнению (11.10) ток якоря $I_{я} = (U - E_{я}) / (R_{я} + R_{ря})$ сразу же увеличится, так как частота вращения и, следовательно, ЭДС якоря $E_{я} = c_e n \Phi$ мгновенно измениться не могут вследствие того, что якорь обладает моментом инерции. Увеличение тока якоря приводит к увеличению вращающего момента M . Таким образом, как только увеличили напряжение, сразу же увеличивается вращающий момент и при неизменном тормозном моменте нарушает-



ся равенство моментов. Под действием вращающего момента $M > (M_0 + M_2)$ начнется постепенное увеличение частоты вращения. Следствием этого является увеличение ЭДС якоря, уменьшение тока якоря и вращающего момента. Начинается переходный процесс, во время которого изменяются $I_{я}$, $E_{я}$, M и n (рис. 11.30). При некоторой частоте вращения $n' > n$ наступит равенство моментов $M = M_0 + M_2$, которому будет соответствовать новый установившийся режим. Ток якоря в новом режиме останется равным току в исходном режиме, так как $M = \text{const}$.

При уменьшении напряжения переходный процесс протекает в обратном порядке и частота вращения двигателя уменьшается.

Этот способ требует наличия регулируемого источника постоянного напряжения, в качестве которого может быть использован генератор постоянного тока или полупроводниковый управляемый выпрямитель, наличие которых позволяет наряду с регулированием частоты вращения осуществлять безреостатный пуск двигателя.

Способ второй. При увеличении тока возбуждения увеличиваются магнитный поток и ЭДС якоря, а ток якоря уменьшается (рис. 11.31).

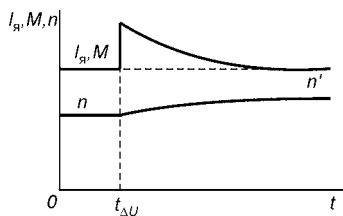


Рис. 11.30
Переходный процесс
в двигателе при увеличении
напряжения сети
($t_{\Delta U}$ — момент увеличения
напряжения)

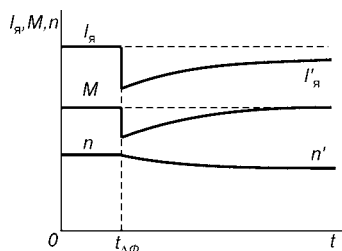


Рис. 11.31
Переходный процесс
в двигателе при увеличении
магнитного потока
($t_{\Delta \Phi}$ — момент увеличения
потока)

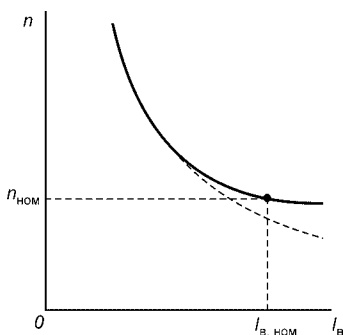


Рис. 11.32
Изменение частоты вращения
двигателя параллельного
возбуждения в зависимости
от тока возбуждения
при холостом ходе

Вращающий момент M также уменьшается, поскольку изменение тока якоря, обусловленное изменением магнитного потока, всегда более значительно, чем изменение магнитного потока, так как U и $E_{\text{я}}$ близки по значению. Поскольку вращающий момент становится меньше тормозного, частота вращения начинает постепенно уменьшаться. Как следствие этого, уменьшается ЭДС якоря, увеличиваются его ток и вращающий момент. Когда вращающий момент достигает значения тормозного момента, т. е. прежнего значения, устанавливаются новые значения частоты вращения $n' < n$ и тока якоря $I'_{\text{я}} < I_{\text{я}}$, так как вращающий момент достигает прежнего значения при увеличенном значении магнитного потока. При уменьшении тока возбуждения частота вращения двигателя увеличивается (см. рис. 11.32).

Способ третий. Регулировать частоту вращения двигателя можно с помощью регулировочного реостата $R_{\text{ря}}$, включаемого последовательно с обмоткой якоря (рис. 11.33).

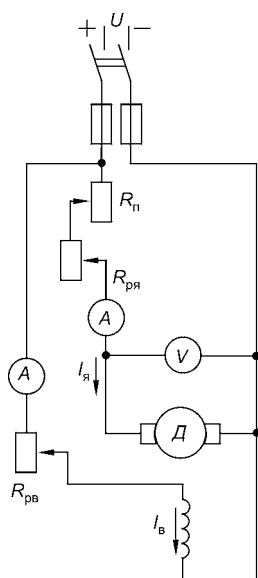


Рис. 11.33
Схема двигателя
параллельного возбуждения с регулировочным реостатом $R_{\text{ря}}$ в цепи якоря

Если при постоянных напряжении U сети, магнитном потоке Φ и тормозном моменте изменять сопротивление регулировочного реостата, то в двигателе будут происходить следующие процессы. Пусть до некоторого момента времени при сопротивлении $R_{\text{ря}1}$ ток якоря и частота вращения имели значения $I_{\text{я}}$ и n . При увеличении сопротивления до $R_{\text{ря}2} > R_{\text{ря}1}$ ток якоря в первый момент уменьшится до значения $I'_{\text{я}} = (U - E_{\text{я}})/(R_{\text{я}} + R_{\text{ря}2})$, так как якорь обладает моментом инерции и частота вращения и ЭДС якоря $E_{\text{я}} = c_e n \Phi$ мгновенно измениться не могут. Уменьшение тока якоря в свою очередь приведет к уменьшению вращающего момента, и он станет меньше тормозного $M' < M_{\text{т}}$, согласно уравнению (11.4) появится отрицательный динамический момент

$$M_j = 2\pi J \frac{dn}{dt} < 0,$$

и частота вращения начнет уменьшаться, что приведет к уменьшению ЭДС якоря $E_{\text{я}} = c_e n \Phi$. При этом согласно уравнениям (11.6) и (11.10) ток якоря и, следовательно, вращающий момент будут увеличиваться до тех пор, пока вращающий момент не достигнет значения $M = M_{\text{т}}$. В конце переходного процесса ток якоря примет прежнее значение, соответствующее тормозному моменту $M_{\text{т}}$, а частота вращения уменьшится.

Рассмотренный переходный процесс можно проиллюстрировать такой схемой:

$$\begin{array}{c}
 R_{\text{ря}2} > R_{\text{ря}1} \\
 \uparrow \\
 \frac{R_{\text{ря}1}}{I_{\text{я}}, n} \quad I_{\text{я}} \downarrow = I'_{\text{я}} \Rightarrow M \downarrow = c_M \Phi I'_{\text{я}} \Rightarrow M < M_{\text{т}} \Rightarrow \\
 \Rightarrow M_j = 2\pi J \frac{dn}{dt} < 0 \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow E_{\text{я}} \downarrow \Rightarrow \\
 \Rightarrow I_{\text{я}} \uparrow \Rightarrow M \uparrow = c_M \Phi I_{\text{я}} \text{ до } M = M_{\text{т}}, \\
 \text{при котором } I'_{\text{я}} = I_{\text{я}} \text{ и } n' < n
 \end{array}$$

Следовательно, увеличение сопротивления якорной цепи при постоянных напряжении U сети и магнитном потоке Φ приводит к снижению частоты вращения двигателя, однако такой способ регулирования частоты вращения является неэкономичным, так как часть электрической энергии, потребляемой двигателем из сети, преобразуется в тепловую энергию в реостате и рассеивается в окружающую среду.

Таким образом, частота вращения двигателя постоянного тока регулируется легко и в широких пределах. Этим и определяется область применения двигателей постоянного тока.

11.14. ДВИГАТЕЛЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В двигателе параллельного возбуждения (рис. 11.33) обмотка возбуждения включена на напряжение сети, т. е. параллельно обмотке якоря. Ток возбуждения составляет 3...5% от номинального значения тока двигателя. После пуска двигателя пусковой реостат $R_{\text{п}}$ полностью выведен, и к якорю двигателя подводится напряжение сети.

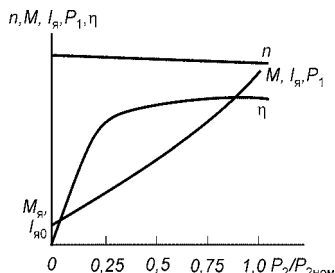


Рис. 11.34
Рабочие характеристики
двигателя параллельного
возбуждения

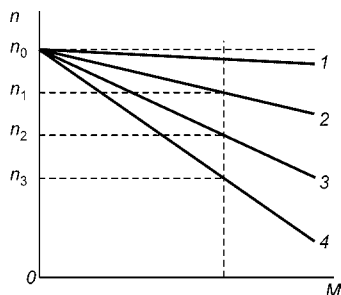


Рис. 11.35
Механические характери-
стики двигателя параллельного
возбуждения для различных
сопротивлений $R_{ря}$ регуляро-
вочного реостата

1 — $R_{ря} = 0$; 2 — $R_{ря1} > 0$; 3 — $R_{ря2} > R_{ря1}$; 4 — $R_{ря3} > R_{ря2}$.

образом изменяется подводимая к двигателю из сети электрическая мощность $P_1 = U(I_{я} + I_{в})$. КПД двигателя изменяется так же, как и у всех электрических машин.

Механические характеристики двигателя — это зависимость $n = f(M)$ при $U_{ном} = \text{const}$, $I_{в} = \text{const}$. Если при постоянных напряжении U сети и магнитном потоке Φ изменять тормозной момент M_2 , то будут изменяться вращающий момент M и ток якоря $I_{я}$, а зависимость $n = f(M)$ будет линейной (рис. 11.35). Двигатель имеет семейство механических характеристик. Характеристику 1 при $R_{ря} = 0$ называют естественной, а все остальные — искусственными. Чем больше сопротивление $R_{ря}$ регулировочного реостата, тем в более широких пределах

Рабочие характеристики двигателя, как уже говорилось, — это зависимости частоты вращения n , вращающего момента M , тока якоря $I_{я}$, потребляемой мощности P_1 и КПД η от мощности P_2 на валу двигателя при $U = U_{ном} = \text{const}$, $I_{в} = \text{const}$ (рис. 11.34).

Как следует из (11.11), при указанных условиях частота вращения n изменяется незначительно, так как сопротивление обмотки якоря $R_{я}$ очень мало. Поэтому характеристика $n = f(P_2)$ близка к горизонтальной линии. Вращающий момент $M = M_0 + M_2$ с ростом P_2 изменяется почти линейно (зависимость M от P_2 несколько круче, так как частота вращения несколько уменьшается). При $I_{в} = \text{const}$ магнитный поток можно считать постоянным и ток якоря изменяется так же, как и вращающий момент $M = c_M I_{я} \Phi = c'_M I_{я}$. Таким же

изменяется частота вращения двигателя при изменении нагрузки. При $R_{\text{ря}} = 0$ изменение момента от нуля до номинального значения приводит к незначительному снижению частоты вращения (на 3...8%). Такую характеристику называют *жесткой*.

11.15. ДВИГАТЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Схема такого двигателя приведена на рис. 11.36. Его обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря, поэтому ток возбуждения равен току якоря ($I_{\text{в}} = I_{\text{я}}$). Обмотку возбуждения делают из небольшого числа витков провода большого сечения, чтобы ее сопротивление было небольшим. Для двигателя последовательного возбуждения режим холостого хода недопустим, так как при токе якоря, близком к нулю, ток возбуждения и магнитный поток также близки к нулю, частота вращения двигателя увеличивается в несколько раз по сравнению с номинальной, что может привести к механическому разрушению якоря — говорят, что двигатель «идет вразнос».

По той же причине двигатель всегда пускают при нагрузке не менее 25% от номинального значения. С исполнительным механизмом двигатель должен иметь жесткое соединение (муфта, редуктор), ременная передача с таким двигателем не допускается. Если двигатель по каким-либо причинам оказывается без нагрузки, то его нужно отключить от сети, что обеспечивается устройствами защиты.

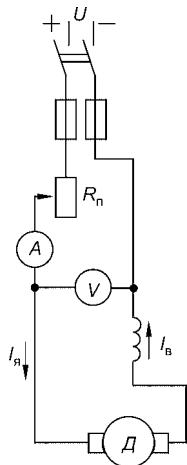


Рис. 11.36
Схема двигателя последовательного возбуждения

Рабочие характеристики двигателя представлены на рис. 11.37. Зависимость $\eta = f(P_2)$ — типичная для электрических машин. В пределах $0,25P_{2\text{ном}} \leq P_2 \leq P_{2\text{ном}}$ КПД изменяется мало.

Мощность электрической энергии, потребляемой двигателем из сети, равна $P_1 = P_2/\eta$, поэтому с учетом характера изменения КПД зависимость $P_1 = f(P_2)$ близка к линейной (несколько вогнута). С другой стороны, $P_1 = UI_{\text{я}}$,

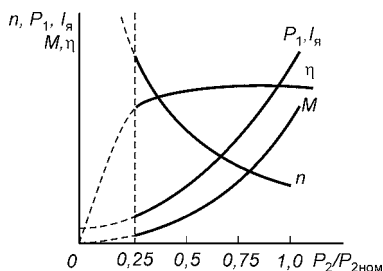


Рис. 11.37
Рабочие характеристики
двигателя последовательного
возбуждения

откуда следует, что при $U = \text{const}$ зависимость $I_{\text{я}} = f(P_2)$ имеет такой же вид, что и $P_1 = f(P_2)$.

Для двигателя последовательного возбуждения формула (11.11) принимает вид

$$n = \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\text{с}}) I_{\text{я}}}{c_e \Phi},$$

так как последовательно с обмоткой якоря включена

обмотка возбуждения.

При малых токах возбуждения магнитный поток пропорционален току якоря ($\Phi = c_{\Phi} I_{\text{я}}$), так как $I_{\text{в}} = I_{\text{я}}$. Тогда

$$n = \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\text{с}}) I_{\text{я}}}{c_e \Phi} = \frac{c_1}{I_{\text{я}}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{с}}}{c'_e}, \quad (11.14)$$

где $c_1 = \frac{U}{c_e c_{\Phi}}$, $c'_e = c_e c_{\Phi}$ — постоянные коэффициенты.

Из (11.14) следует, что при ненасыщенном магнитопроводе зависимость $n = f(I_{\text{я}})$ имеет вид гиперболы. При больших токах якоря наступает насыщение магнитопровода, магнитный поток и частота вращения остаются почти постоянными. Так как между током $I_{\text{я}}$ и мощностью P_2 зависимость близка к линейной, то рабочая характеристика $n = f(P_2)$ имеет вид, показанный на рис. 11.37 и описанный ранее.

Для двигателей последовательного возбуждения характерны заметное снижение частоты вращения с увеличением нагрузки и возрастание ее при малых нагрузках.

Вращающий момент двигателя при ненасыщенном магнитопроводе

$$M = c'_M I_{\text{я}}^2 = c'_M \left(\frac{P_1}{U} \right)^2 = \frac{c'_M}{U^2} \left(\frac{P_2}{\eta} \right)^2. \quad (11.15)$$

Принимая КПД постоянным в пределах $0,25 P_{2\text{ном}} \leq P_2 \leq P_{2\text{ном}}$, получаем $M = c''_M P_2^2$, где $c''_M = \frac{c'_M}{(U\eta)^2}$ — постоянный коэффициент.

В указанных пределах изменения мощности P_2 зависимость $M = f(P_2)$ имеет вид параболы. При больших

нагрузках с ростом тока якоря наступает насыщение магнитопровода машины и зависимость $M = f(P_2)$ приближается постепенно к линейной зависимости.

Двигатель не может работать при $P_2 < 0,25P_{2\text{ном}}$, поэтому характеристики в этой области показаны штриховыми линиями, а характеристики $I_{\text{я}} = f(P_2)$ и $M = f(P_2)$ выходят не из начала координат.

Для построения *механической характеристики* воспользуемся выражением (11.15), откуда

$$I_{\text{я}} = \sqrt{\frac{M}{c'_M}} = \sqrt{\frac{M_0}{c'_M} + \frac{M_2}{c'_M}}.$$

Подставив это соотношение в (11.14), получим

$$n = \frac{c_1 \sqrt{c'_M}}{\sqrt{M}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{с}}}{c'_e}.$$

Механическая характеристика двигателя $n = f(M)$ при $U_{\text{ном}} = \text{const}$ имеет вид, похожий на гиперболу, причем с учетом насыщения магнитопровода при больших токах якоря (больших моментах) частота вращения мало меняется (рис. 11.38). Такую характеристику называют *мягкой*.

Следует отметить, что для регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения можно применять шунтирование обмоток возбуждения и якоря (рис. 11.39). Для этого параллельно обмоткам возбуждения и якоря включают релостаты $R_{\text{шв}}$ и $R_{\text{шя}}$ соответственно. В исходном режиме (выключатели $S1$ и $S2$ отключены) ток сети I , ток якоря $I_{\text{я}}$

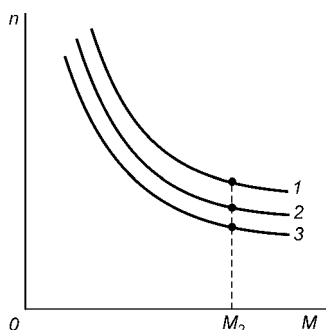


Рис. 11.38

Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

1 — при шунтировании обмотки возбуждения; 2 — естественная; 3 — при шунтировании обмотки якоря.

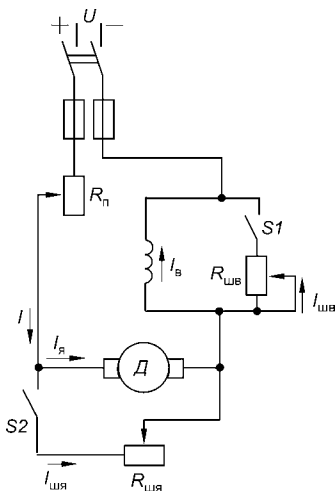


Рис. 11.39

Схема шунтирования обмоток двигателя последовательного возбуждения

и ток возбуждения $I_{\text{в}}$ — один и тот же ток ($I = I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$). Падение напряжения на обмотке возбуждения очень мало, поэтому можно считать, что $U_{\text{я}} = U = \text{const}$.

При шунтировании обмотки возбуждения (включен $S1$) уменьшаются ток возбуждения, магнитный поток и ЭДС якоря, а следовательно, увеличивается ток якоря, так как

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{с}}}.$$

Изменение вращающего момента M определяется током якоря; следовательно, он увеличивается, что приводит к увеличению частоты вращения двигателя. При каком-то увеличенном значении частоты вращения (см. рис. 11.38) наступит равенство моментов, но новое значение тока якоря больше исходного. Так как шунтирование обмотки производят при неизменном тормозном моменте, то мощность на валу двигателя $P_2 = M_2\Omega$, где Ω — угловая скорость вращения, и мощность $P_1 = UI = UI_{\text{я}}$ энергии, потребляемой двигателем из сети, увеличиваются, а КПД двигателя $\eta = P_2/P_1$ остается приблизительно тем же.

При шунтировании обмотки якоря (включен $S2$, отключен $S1$) увеличиваются ток сети I , так как реостат $R_{\text{шя}}$ включен на напряжение U , и ток возбуждения $I_{\text{в}} = I$, что приводит к увеличению магнитного потока и ЭДС якоря. Ток якоря и вращающий момент уменьшаются, а следовательно, уменьшается и частота вращения. При некотором пониженном значении частоты вращения (3 на рис. 11.38), но при большем значении тока I наступит равенство моментов. Следовательно, мощность $P_2 = M_2\Omega$ уменьшается, а мощность $P_1 = UI$ увеличивается, что приводит к уменьшению КПД, поэтому этот способ регулирования частоты вращения является неэкономичным и применяется редко.

При перегрузках двигателя, когда частота вращения снижается, вращающий момент двигателя резко увеличивается. При этом если момент увеличивается в k раз, то ток якоря и мощность потребляемой из сети энергии увеличиваются только в \sqrt{k} раз. У двигателя параллельного возбуждения, у которого $\Phi = \text{const}$, в этих условиях ток якоря и мощность потребляемой из сети энергии увеличиваются в k раз.

При сравнении рабочих и механических характеристик двигателей постоянного тока параллельного и пос-



последовательного возбуждения можно сделать следующие выводы.

1. Двигатели последовательного возбуждения имеют большой пусковой момент, поэтому их применяют в устройствах, требующих пуска под нагрузкой (например, краны, электровозы, трамваи и троллейбусы).

2. Двигатели последовательного возбуждения не создают таких больших толчков тока для питающей сети при резких увеличениях тормозного момента, какие создают двигатели параллельного возбуждения.

11.16.

ДВИГАТЕЛЬ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Такой двигатель имеет две обмотки возбуждения, одна из которых включена параллельно обмотке якоря, а другая — последовательно с ней (рис. 11.40). Доля каждой обмотки возбуждения в создании суммарного магнитного потока машины может быть различной. Если параллельная обмотка возбуждения создает не менее 70% суммарной МДС, то она является основной и двигатель называют *двигателем параллельно-последовательного возбуждения*. В двигателе *последовательно-параллельного возбуждения* не менее 70% МДС создается последовательной обмоткой возбуждения.

При согласном включении, когда параллельная и последовательная обмотки возбуждения создают потоки, совпадающие по направлению, двигатель смешанного возбуждения имеет характеристики, занимающие промежуточное положение между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения (см. рис. 11.41). Такое включение обмоток возбуждения применяют в тех случаях,

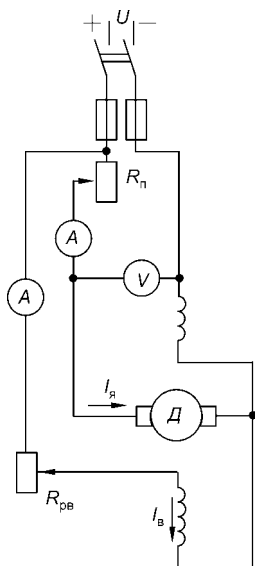


Рис. 11.40
Схема двигателя
смешанного
возбуждения

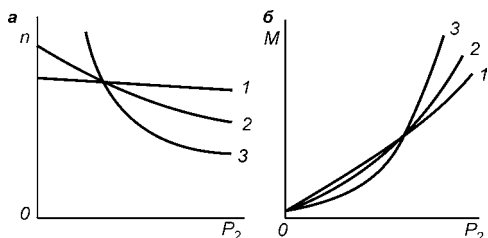


Рис. 11.41
Рабочие характеристики двигателей различных типов
 $a - n = f(P_2)$; $b - M = f(P_2)$; 1 — параллельного возбуждения; 2 — смешанного возбуждения; 3 — последовательного возбуждения.

когда одновременно нужно иметь большой пусковой момент и работать при малых нагрузках или даже при холостом ходе.

Встречное включение обмоток возбуждения применяют редко, так как в этом случае при пуске двигателя резко уменьшается пусковой момент из-за снижения магнитного потока. Обычно при пуске таких двигателей последовательную обмотку возбуждения закорачивают и она не участвует в создании магнитного потока. В рабочем режиме при встречном включении обмоток возбуждения двигатель может иметь абсолютно жесткую механическую характеристику.

11.17. МОЩНОСТЬ ПОТЕРЬ

В процессе преобразования энергии в машинах постоянного тока часть энергии преобразуется в теплоту и рассеивается в машине. Различают следующие виды потерь энергии, а следовательно, мощности потерь:

1. *Электрические потери* $P_{п.пр}$ — это потери на нагрев проводов обмоток якоря, добавочных полюсов, возбуждения и др. В каждой обмотке и в регулировочных реостатах $R_{рв}$ и $R_{ря}$ электрические потери пропорциональны квадрату тока: $P_{п.пр} = I^2 R$, где I — ток в них; R — их сопротивление. Электрические потери в щеточном контакте пропорциональны току якоря и падению напряжения под щеткой, т. е. $P_{п.щ} = I_{я} \Delta U_{щ}$.

2. *Потери в стали магнитопровода* от гистерезиса и вихревых токов $P_{п.с}$. Эти потери пропорциональны квадрату магнитной индукции и частоте вращения якоря.

3. *Механические потери* $P_{п.мх}$ — это потери, вызванные трением в подшипниках, щеток о коллектор и вращающегося якоря о воздух. Механические потери пропорциональны частоте вращения.

В качестве примера на рис. 11.42 представлена энергетическая диаграмма двигателя, показывающая баланс мощностей в нем. К двигателю из сети подводится электрическая энергия, мощность которой $P_1 = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}})$. Часть этой энергии с мощностью $P_{\text{п.пр}}$ тратится на нагрев проводов обмоток. Оставшаяся часть мощности $P_{\text{эм}}$, называемая *электромагнитной мощностью*, характеризует ту часть электроэнергии, которая преобразуется в механическую энергию, в результате чего происходит вращение якоря. Часть мощности $P_{\text{п.с}}$ определяет энергию, затрачиваемую на нагрев стального магнитопровода якоря, часть $P_{\text{п.мх}}$ — на трение. Оставшаяся мощность P_2 представляет собой полезную механическую мощность на валу двигателя.

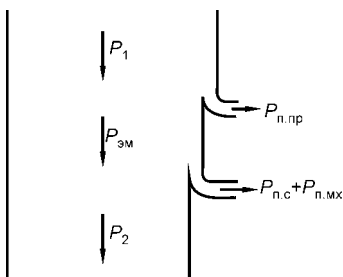


Рис. 11.42
Энергетическая диаграмма
двигателя постоянного тока

КПД двигателя и генератора $\eta = P_2/P_1$, где P_2 — механическая мощность на валу двигателя или электрическая мощность генератора, отдаваемая приемнику; P_1 — мощность электрической энергии, подводимой к двигателю из сети, или механическая мощность приводного двигателя, вращающего якорь генератора.

Номинальное значение КПД двигателей малой мощности составляет 0,78...0,85, а двигателей средней и большой мощности — 0,85...0,94.

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

12.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Асинхронная машина — это бесколлекторная машина переменного тока, у которой в установившемся режиме магнитное поле, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор вращаются с разными скоростями.

Наибольшее распространение получили асинхронные двигатели, причем из всех электрических двигателей они являются самыми распространенными. Преимущества асинхронного двигателя состоят в простоте устройства, изготовления и эксплуатации, а также в большой надежности и сравнительно низкой стоимости. Широкое применение находит *трехфазный* асинхронный двигатель, изобретенный в конце XIX в. М. О. Доливо-Добровольским. Используют также *однофазный* асинхронный двигатель. Трехфазные двигатели применяют во всех отраслях народного хозяйства, однофазные — в основном в схемах автоматики, для привода электроинструмента, бытовых машин и т. п.

Промышленность выпускает асинхронные двигатели на рабочее напряжение от 127 В до 10 кВ, мощностью от долей ватта до нескольких тысяч киловатт. Однофазные асинхронные двигатели имеют мощность, как правило, не превышающую 1,5 кВт. Двигатели максимальной мощности изготавливают на напряжение 6...10 кВ. При частоте 50 Гц синхронная частота вращения двигателей различного типа колеблется от 500 до 3000 об/мин.

Кроме асинхронных двигателей, преобразующих электрическую энергию переменного тока в механическую

энергию, имеются асинхронные машины, выполняющие функции преобразователя частоты, регулятора напряжения и фазорегулятора.

Асинхронные машины могут работать в режиме *генератора*. Но асинхронные генераторы как источники электрической энергии не применяют, так как они не имеют собственного источника возбуждения магнитного поля и могут работать только параллельно с другими (синхронными) генераторами, имеющими лучшие показатели.

Асинхронные машины малой мощности используют как генераторы для измерения частоты вращения валов (*тахогенераторы*).

12.2. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННЫХ МАШИН

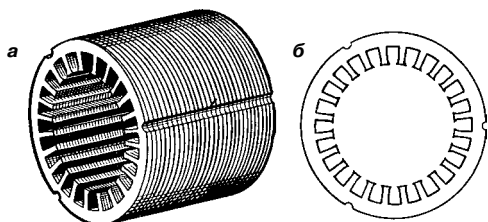
Основными частями асинхронной машины являются *статор* — неподвижная часть и *ротор* — вращающаяся часть.

Сердечник статора является неподвижной частью магнитопровода и представляет собой полый цилиндр (рис. 12.1а), набранный из стальных пластин, имеющих вид кольца и изолированных друг от друга. Как и в трансформаторе, выполнение магнитопровода из отдельных пластин уменьшает мощность потерь энергии в стали, вызываемых вихревыми токами. Стальной сердечник магнитопровода статора закрепляют в стальном или алюминиевом корпусе, охватывающем его со всех сторон. К боковым сторонам корпуса крепят подшипниковые щиты.

При штамповке стальных пластин (рис. 12.1б) на внутренней их стороне делают выступы различной формы. В результате при сборке на внутренней поверхности цилиндра статора получают пазы, направленные вдоль образующей цилиндра. В пазы закладывают обмотку статора, которая у трехфазного асинхронного двигателя

Рис. 12.1
Детали сердечника
статора асинхрон-
ной машины

а — магнитопровод в собранном виде; б — отдельный лист.



Обозначение выводов обмоток

Фаза	Начало обмотки	Конец обмотки
<i>A</i>	<i>C1</i>	<i>C4</i>
<i>B</i>	<i>C2</i>	<i>C5</i>
<i>C</i>	<i>C3</i>	<i>C6</i>

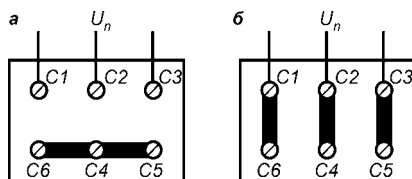


Рис. 12.2
Расположение выводов обмоток статора на щитке машины

a — соединение звездой; *б* — соединение треугольником.

состоит из трех фазных обмоток, смещенных в пространстве друг относительно друга в общем случае на угол $120^\circ/p$, где p — количество пар полюсов результирующего магнитного поля. Начала и концы фазных обмоток выводят наружу, они могут быть присоединены к зажимам специального щитка. Выводы обмоток охватывают алюминиевыми хомутами, на которых обозначены буквы и цифры, принятые для обозначения выводов (табл. 12.1).

На щитке двигателя выводы обмоток располагают так, как показано на рис. 12.2. Это позволяет легко и удобно с помощью коротких плоских пластин соединять обмотки статора звездой (рис. 12.2*a*) или треугольником (рис. 12.2*б*). На паспортной пластинке, укрепленной на корпусе, указывают два номинальных линейных напряжения, различающихся в $\sqrt{3}$ раза. Меньшее значение указанного напряжения является номинальным напряжением, на которое рассчитаны фазные обмотки статора. Способ соединения обмоток зависит от линейного напряжения в трехфазной сети. Если линейное напряжение источника питания равно наибольшему напряжению, указанному в паспорте машины, то обмотку его статора соединяют звездой, в противном случае — треугольником. В некоторых случаях обмотки соединены внутри двигателя и снаружи имеется только три вывода. В этом случае на щитке указано линейное напряжение.

Ротор асинхронного двигателя также набирают из стальных штампованных листов (рис. 12.3). Насаженные на вал, они образуют ротор, имеющий форму цилиндра.

Рис. 12.3
Форма стальных листов,
из которых набирают
сердечник ротора

1 — пазы; 2 — отверстия для
вентиляции; 3 — отверстие
для вала и шпонки.

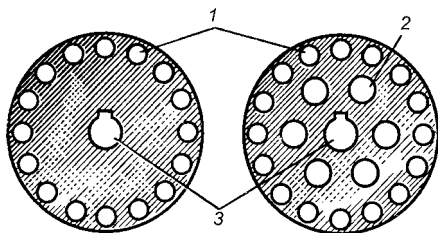
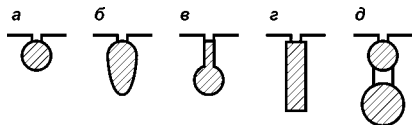


Рис. 12.4
Форма пазов ротора
с короткозамкнутой
обмоткой

а — круглая; б — овальная;
в — колбовидная; г — глубо-
кая; д — для двойной клетки.



По наружному периметру листа штампуют отверстия, образующие пазы ротора, в которые закладывают обмотку. Форма пазов может быть различной (рис. 12.4). Двигатели большой мощности имеют ротор с вентиляционными отверстиями для охлаждения.

По конструктивному исполнению обмотки ротора асинхронные двигатели подразделяют на двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором. *Короткозамкнутая* обмотка образуется медными или латунными неизолированными стержнями, помещаемыми в пазы ротора. Поперечное сечение этих стержней имеет форму паза. По торцам стержни соединяют медными короткозамыкающими кольцами. Получается обмотка, не имеющая никаких выводов (рис. 12.5). Такие обмотки могут быть одноклеточными и двухклеточными (форма паза на рис. 12.4д). Число фаз такой обмотки равно числу пазов, в которых она размещена.

У машин малой мощности (до 100 кВт) пазы ротора заливают расплавленным алюминием. При этом сразу отливают стержни обмотки, короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопажки (см. рис. 12.6).

Обмотку *фазного ротора* выполняют из изолированных проводников аналогично обмотке статора. Фазные обмотки

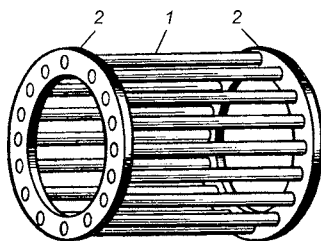


Рис. 12.5
Короткозамкнутая обмотка
ротора («беличья клетка»)
1 — стержни; 2 — короткозамы-
кающие кольца.

Рис. 12.6

Короткозамкнутая обмотка ротора, выполненная в виде алюминиевой отливки

1 — листы магнитопровода; 2 — короткозамыкающие кольца; 3 — вентиляционные лопасти; 4 — стержни.

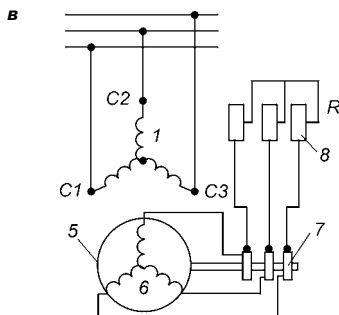
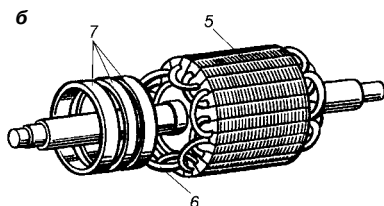
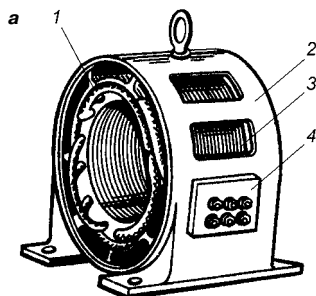
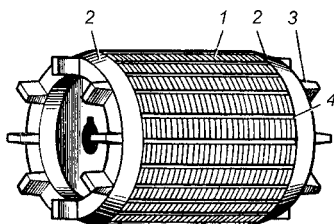


Рис. 12.7
Асинхронный двигатель с фазным ротором

а, б — устройство; в — электрическая схема. 1 — обмотки статора; 2 — корпус; 3 — сердечник статора; 4 — коробка с выводами; 5 — сердечник ротора; 6 — обмотка ротора; 7 — контактные кольца; 8 — пусковой (регулируемый) реостат.

ротора соединяют звездой, при этом их начала соединяют с контактными кольцами, расположенными на валу и изолированными как от вала, так и друг от друга. Контактные кольца вращаются вместе с валом. По ним скользят неподвижные щетки, к которым подсоединены реостаты, соединенные звездой (рис. 12.7).

12.3. ПОЛУЧЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

На рис. 12.8 показана магнитная цепь трехфазной асинхронной машины, на статоре которой расположены три одинаковые фазные обмотки, соединенные звездой. С целью упрощения рисунка каждая фазная обмотка изображена в виде одной катушки с диаметральной шагом.

Будем считать, что воздушный зазор между сердечниками статора и ротора равномерный, а магнитная проницаемость μ стальных участков магнитной цепи бесконечно велика, т. е. $\mu \rightarrow \infty$.

Если обмотки статора подключить к трехфазному симметричному источнику напряжения (к сети), то в них возникнет трехфазная симметричная система токов

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t; \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - (2\pi/3)); \quad (12.1) \\ i_C &= I_m \sin(\omega t - (4\pi/3)). \end{aligned}$$

На рис. 12.9 показаны временные диаграммы этих токов, а на рис. 12.8 — их условные положительные направления в линейных проводах и фазных обмотках, когда мгновенные значения токов положительны.

Переменный ток в каждой обмотке создает переменное магнитное поле, вектор магнитной индукции которого при сделанных допущениях имеет в воздушном зазоре только радиальную составляющую, прямо пропорциональную току в обмотке (ее МДС).

Реальная фазная обмотка в машине, в отличие от показанной на рис. 12.8, состоит из нескольких одинаковых катушек, расположенных в соседних пазах. Таковую обмотку называют *распределенной*. В машине с числом полюсов $2p = 2$ фазная обмотка занимает 1/3 окружности статора.

Магнитная индукция поля, создаваемого такой фазной обмоткой, оказывается распределенной на полюсном делении τ по синусоидальному закону (строго говоря, близкому к синусоидальному). Максимального значения магнитная индукция достигает на оси фазной обмотки и изменяется во времени по синусоидальному закону, как

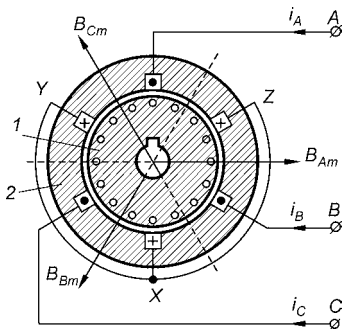


Рис. 12.8
Схема магнитной цепи асинхронной машины
1 — ротор; 2 — статор.

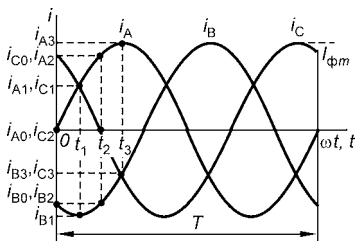


Рис. 12.9
Временные диаграммы токов в фазных обмотках статора

и ток. Так, например, для фазы A магнитная индукция на ее оси в любой момент времени может быть описана уравнением $B_{Am}(t) = B_{\Phi m} \sin \omega t$, где $B_{\Phi m}$ — максимальное значение магнитной индукции, соответствующее току $i_A = I_m$, при этом магнитная индукция изменяется от $+B_{\Phi m}$ при $i_A = I_m$ до $-B_{\Phi m}$ при $i_A = -I_m$. Характер изменения магнитной индукции в пространстве и во времени может быть описан уравнением стоячей волны, т. е. $B_{Am}(t, \alpha) = B_{\Phi m} \sin \omega t \cos \alpha$, где α — пространственная координата, отсчитываемая от оси фазной обмотки. Такое магнитное поле, неподвижное в пространстве и изменяющееся во времени, называют *пульсирующим*.

Положительные направления векторов магнитной индукции \underline{B}_{Am} , \underline{B}_{Bm} и \underline{B}_{Cm} на осях фазных обмоток соответствуют положительным мгновенным значениям токов в обмотках, как показано на рис. 12.8.

Если представить, что токи i_A , i_B и i_C в обмотках совпадают по фазе, то результирующее магнитное поле в воздушном зазоре будет равно нулю. Это можно объяснить тем, что в таком случае векторы магнитной индукции поля в любой точке пространства будут равны по значению и сдвинуты друг относительно друга на угол 120° , т. е. образуют симметричную трехфазную систему.

Так как в действительности токи в обмотках представляют трехфазную систему, то очевидно, что магнитная индукция результирующего магнитного поля, создаваемого фазными обмотками, не равна нулю. Для определения магнитной индукции результирующего поля можно воспользоваться временными диаграммами фазных токов (см. рис. 12.9). При $t = 0$ ток $i_{A0} = 0$,

$$\text{ток } i_{B0} = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m, \text{ ток } i_{C0} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m.$$

В соответствии с этим магнитная индукция фазы A на ее оси $B_{Am} = 0$, а магнитные индукции на осях фаз B и C равны:

$$B_{Bm} = -\frac{\sqrt{3}}{2} B_{\Phi m}, \quad B_{Cm} = \frac{\sqrt{3}}{2} B_{\Phi m}.$$

Магнитная индукция фазы B отрицательна, поэтому вектор магнитной индукции в этой фазе направлен противоположно показанному на рис. 12.8. Векторы магнитных индукций \underline{B}_{Bm} и \underline{B}_{Cm} для данного момента времени показаны на рис. 12.10а. Токи в проводниках B и Z , а также



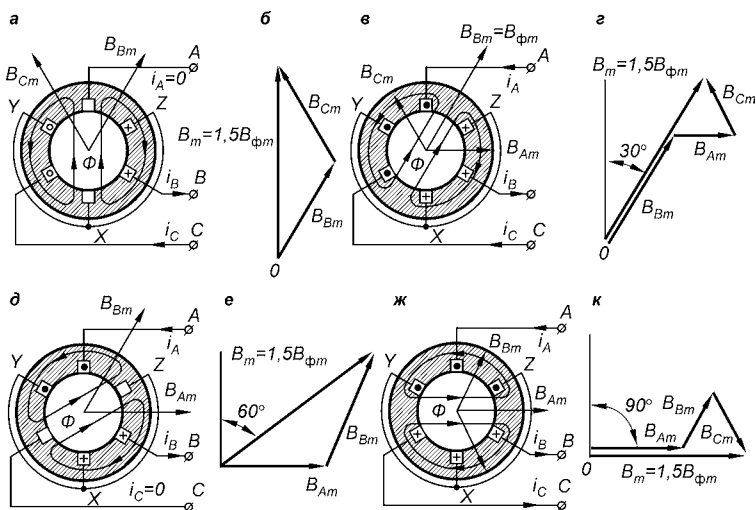


Рис. 12.10

Вращающееся магнитное поле, созданное обмотками статора

а, в, д, ж — действительные направления токов и векторов магнитных индукций в пространстве машины; б, г, е, к — векторные диаграммы магнитных индукций; а, б — при $t = 0$; в, г — при $t_1 = T/12$; д, е — при $t_2 = T/6$; ж, к — при $t_3 = T/4$.

в С и У, расположенных рядом, имеют одинаковые направления и создают магнитное поле с двумя полюсами, магнитные силовые линии которого показаны на рис. 12.10а.

На рис. 12.10б показано сложение векторов магнитных индукций B_{Bm} и B_{Cm} . Амплитуда магнитной индукции B_m результирующего магнитного поля равна $1,5B_{\Phi m}$.

Через промежуток времени Δt , равный $1/12$ периода, т. е. при $t_1 = T/12$, токи в обмотках примут значения $i_{A1} = i_{C1} = +0,5I_m$, $i_{B1} = -I_m$. Этим значениям токов соответствуют значения магнитных индукций: $B_{Am} = B_{Cm} = 0,5B_{\Phi m}$, $B_{Bm} = -B_{\Phi m}$. На рис. 12.10в, г выполнены построения, аналогичные моменту времени $t = 0$. Видно, что вектор магнитной индукции результирующего магнитного поля повернулся в пространстве на угол, равный $1/12$ части пространственного периода, соответствующего двум полюсным делениям. В машине с двумя полюсами это соответствует углу 30° . Амплитудное значение вектора магнитной индукции при этом не изменилось.

Аналогичные построения выполнены на рис. 12.10д, е, ж, к для моментов времени $t_2 = T/6$ и $t_3 = T/4$ соответственно.

Выполненные для четырех моментов времени построения показывают, что за промежуток времени от $t_0 = 0$ до $t_3 = T/4$, т. е. за четверть периода, ось результирующего магнитного поля повернулась на 90° (на четверть оборота). Следовательно, за время, равное одному периоду, ось магнитного поля сделает один оборот (повернется на угол, соответствующий 2τ), а амплитуда вектора магнитной индукции остается неизменной и равной $B_m = 1,5B_{\phi m}$.

Таким образом, результирующее магнитное поле, созданное тремя пульсирующими магнитными полями фаз, является *вращающимся*. Для получения такого магнитного поля необходимо, чтобы, во-первых, фазные обмотки статора были сдвинуты в пространстве на некоторый угол, и, во-вторых, токи в фазных обмотках были сдвинуты по фазе на некоторый угол. При невыполнении хотя бы одного из этих условий вращающееся магнитное поле возникать не будет. В самом общем случае амплитудное значение магнитной индукции результирующего поля $B_m = B_{\phi m}m/2$, где $m \geq 2$ — число фаз обмотки статора.

При анализе построений, сделанных на рис. 12.10, можно прийти к выводу, что направление оси результирующего магнитного поля всегда совпадает с осью той фазной обмотки статора, ток в которой в данный момент времени имеет максимальное значение (рис. 12.10в, ж). На рис. 12.11 показана картина магнитного поля для момента $t_3 = T/4$, когда ток в фазе А имеет максимальное значение

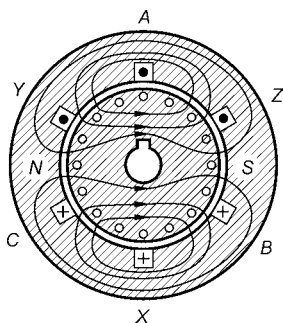


Рис. 12.11
Картина магнитного поля
в асинхронной машине с одной
парой полюсов

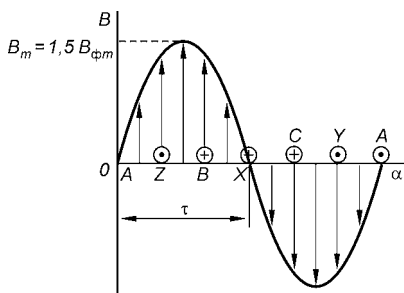


Рис. 12.12
Распределение магнитной
индукции вращающегося магнитного
поля в воздушном зазоре
асинхронной машины

значение. Магнитная индукция результирующего магнитного поля, как и поля, создаваемого фазной обмоткой, на полюсном делении распределена по синусоидальному закону (рис. 12.12).

Частота вращения магнитного поля. Магнитное поле, изображенное на рис. 12.11, имеет одну пару полюсов ($p = 1$). Это магнитное поле за время, равное одному периоду T , совершает один оборот, т. е. поворачивается на угол, соответствующий одной паре полюсов. В общем случае обмотка статора может иметь одну, две, три и т. д. пар полюсов. На рис. 12.13 показана магнитная цепь асинхронной машины с числом пар полюсов $p = 2$. Если рассмотреть развертку внутренней поверхности такого статора с проводниками, уложенными в пазах (рис. 12.13б), схему соединения проводников обмотки и направление токов в них для момента времени t_3 (см. рис. 12.9), когда ток i_A положительный, а токи i_B и i_C отрицательные, то видно, что направление токов в каждом трех соседних проводниках одинаково (тройки: 3, 4, 5; 6, 7, 8; 9, 10, 11; 12, 1, 2), а созданное токами статора магнитное поле имеет две пары полюсов ($p = 2$). За время одного периода ось результирующего магнитного поля в такой машине повернется на угол, соответствующий двум полюсным делениям, т. е. сделает половину оборота. В общем случае, когда машина имеет p пар полюсов, магнитное поле совершит $1/p$ оборота за один период T . За одну секунду магнитное поле совершит f/p оборотов. В электрических машинах принято определять частоту вращения

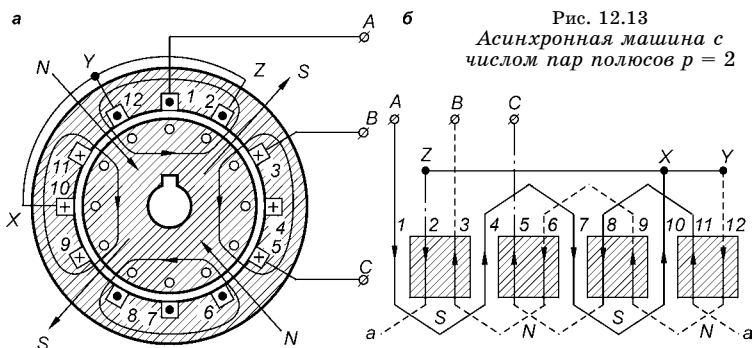


Рис. 12.13
Асинхронная машина с
числом пар полюсов $p = 2$

a — магнитная цепь; b — схема соединения проводников в фазных обмотках статора.

числом оборотов в минуту, тогда частота вращения магнитного поля

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \quad (12.2)$$

Таким образом, частота вращения магнитного поля прямо пропорциональна частоте приложенного к обмоткам статора напряжения и обратно пропорциональна числу пар полюсов.

В нормальных условиях эксплуатации электроустановок частота f поддерживается постоянной. Число пар полюсов в машине также постоянно. Поэтому частота вращения магнитного поля остается постоянной. Частоту вращения магнитного поля называют *синхронной*, так как она определяется частотой напряжения сети.

При частоте напряжения в сети $f = 50$ Гц существует шкала синхронных частот вращения магнитного поля, определяемых как $n_1 = 3000 / p$. Ниже приведены значения синхронных частот вращения n_1 (об/мин) в зависимости от числа пар полюсов p :

p	1	2	3	4	5	6
n_1	3000	1500	1000	750	600	500

12.4. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Созданное обмоткой статора вращающееся с частотой n_1 магнитное поле (магнитный поток Φ_1) пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС (рис. 12.14). Рассмотрим два проводника (1 и 2) обмотки

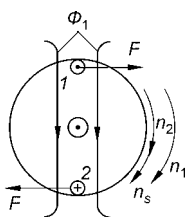


Рис. 12.14
К определению
электромаг-
нитных сил,
действующих
на проводники
обмотки
ротора

ротора, расположенные диаметрально противоположно на осевой линии магнитного потока. Согласно правилу правой руки ЭДС в проводнике 1 направлена «на читателя», а в проводнике 2 — «от читателя».

Проводники обмотки ротора (как короткозамкнутого, так и фазного) образуют замкнутую цепь, и под действием ЭДС в них возникает ток ротора, направление активной составляющей которого совпадает с направлением ЭДС. На проводники ротора с током, расположенные в магнитном поле, действуют силы F ,

пропорциональные магнитной индукции в месте расположения проводников, активной составляющей тока в них и длине проводников. Направление силы (см. рис. 12.14) определяют по правилу левой руки. Такие же силы действуют на все проводники обмотки ротора, при этом возникает вращающий момент на валу. Если вращающий момент превысит значение тормозного момента на валу, ротор начнет вращаться, и его частота вращения будет возрастать до тех пор, пока не наступит равновесие моментов при некотором значении частоты вращения $n_2 = \text{const}$ (см. § 11.3).

Направление вращения ротора совпадает с направлением вращения магнитного поля статора. Но частота вращения n_2 в режиме двигателя меньше n_1 . Если предположить, что $n_2 = n_1$, то проводники ротора не будут пересекаться вращающимся магнитным потоком, в них не будет индуцироваться ЭДС, в них не будет тока, а следовательно, сила F , действующая на проводники обмотки ротора, будет равна нулю. В таких условиях ротор сможет вращаться только по инерции. Но так как в реальном двигателе всегда имеются силы трения в подшипниках и трения вращающегося ротора о воздух, то ротор начнет тормозиться, т. е. получим $n_2 < n_1$. Таким образом, чтобы возникали сила F и вращающий момент, действующий на ротор, частота его вращения должна быть $n_2 < n_1$.

Скольжением называют относительную разность частот вращения магнитного поля и ротора. Скольжение обозначают буквой s и выражают в относительных единицах или в процентах:

$$s = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{или} \quad s_{\%} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100. \quad (12.3)$$

Частота вращения ротора асинхронного двигателя зависит как от скольжения, так и от частоты вращения магнитного поля. С учетом уравнений (12.2) и (12.3) ее можно определить следующим образом:

$$n_2 = (1 - s)n_1 = (1 - s) \frac{60f}{p}. \quad (12.4)$$

В режиме двигателя скольжение s изменяется от 0 до 1. При пуске двигателя $n_2 = 0$ и $s = 1$. При номинальной нагрузке для современных двигателей $s = 0,03 \dots 0,06$ или

3...6%. В паспорте двигателя указывают номинальную частоту вращения ротора, отличающуюся от синхронной на 3...6%. По этим данным всегда легко определить число пар полюсов двигателя. Например, если $n_2 = 1450$ об/мин, то $n_1 = 1500$ об/мин, $s = 3,3\%$, а $p = 2$.

Чем больше тормозной момент, создаваемый на валу двигателя, тем меньше частота вращения ротора n_2 и больше скольжение s . Именно потому, что частота вращения ротора не равна синхронной частоте и изменяется с изменением нагрузки, двигатель называют *асинхронным*.

12.5. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ В ОБМОТКАХ СТАТОРА И РОТОРА. ТОК РОТОРА

Если сравнить устройство и принцип действия асинхронного двигателя и трансформатора, то можно увидеть у них общие характерные элементы. У трансформатора есть первичная и вторичная обмотки, причем напряжение сети подводят к первичной обмотке. У асинхронного двигателя имеются обмотки статора и ротора, причем напряжение сети подводят только к обмотке статора. Первичная обмотка трансформатора и обмотка статора асинхронного двигателя создают магнитные потоки, которые индуцируют ЭДС во вторичной обмотке трансформатора и в обмотке ротора двигателя соответственно. Все это обуславливает возможность применения элементов теории трансформатора и для асинхронного двигателя.

Электродвижущие силы, индуцируемые основным магнитным потоком. В воздушном зазоре между статором и ротором асинхронного двигателя магнитная индукция вращающегося магнитного поля распределена по окружности статора по синусоидальному закону (см. рис. 12.12). Пересекая проводники обмотки статора и ротора, вращающийся магнитный поток индуцирует в них синусоидальные ЭДС. Действующее значение ЭДС, индуцированной в одном витке фазной обмотки, можно определить по той же формуле, что и в трансформаторе:

$$E_{1в} = 4,44f\Phi_m,$$

где Φ_m — максимальный магнитный поток, сцепленный с витком, причем $\Phi_m = B_{cp} \tau l = \frac{2}{\pi} B_m \tau l$; B_{cp} — среднее

а

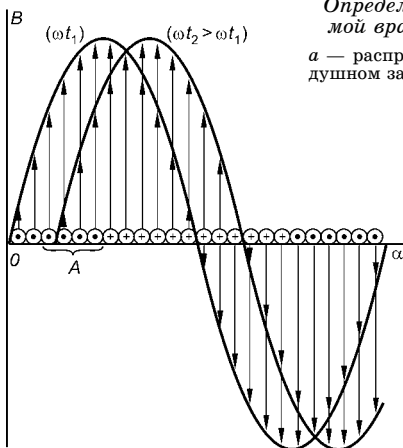
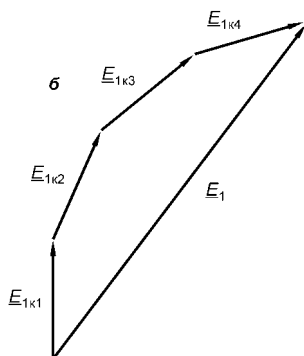


Рис. 12.15

Определение ЭДС статора, индуцируемой вращающимся магнитным полем

а — распределение магнитной индукции в воздушном зазоре; б — векторная диаграмма.



значение магнитной индукции на полюсном делении; τ — полюсное деление (длина окружности статора, приходящаяся на один полюс, см. рис. 12.12); l — длина сердечника статора.

Каждая фазная обмотка статора выполнена из нескольких катушек, уложенных в соседних пазах, занимающих часть полюсного деления (рис. 12.15а). Все проводники в катушках и обмотке в целом соединены, как правило, последовательно. Общее число витков обмотки $w_1 = 2pqw_k$, где $2p$ — число полюсов в машине, q — число пазов на полюс и фазу и w_k — число витков в катушке. В каждой катушке вращающееся магнитное поле индуцирует синусоидальные ЭДС, действующие значения которых равны $E_{1k} = 4,44fw_k\Phi_m$. Поскольку отдельные катушки фазной обмотки лежат в нескольких пазах и, следовательно, в пространстве смещены друг относительно друга на некоторый угол, то ЭДС в них будут сдвинуты по фазе. Обусловлено это тем, что бегущая волна результирующего магнитного поля занимает одинаковое положение по отношению к различным катушкам в различные моменты времени. Поэтому при определении ЭДС, индуцированной в фазной обмотке, ЭДС катушек нужно складывать с учетом их фазы. Следовательно, действующее значение комплексной ЭДС в фазной обмотке будет равно

$$\underline{E}_1 = \sum_{i=1}^q \underline{E}_{1ki}.$$

На рис. 12.15б показаны комплексные ЭДС катушек фазы A на примере рис. 12.15а. Как видно из рисунка, действующее значение фазной ЭДС $E_1 = |E_1|$ меньше алгебраической суммы действующих ЭДС катушек. Это уменьшение учитывают коэффициентом распределения обмотки $k_p < 1$. Если фазная обмотка имеет шаг $y < \tau$, то обмотка будет сцеплена с меньшим магнитным потоком

$$\Phi_{my} = \frac{y}{\tau} \Phi_m < \Phi_m,$$

вследствие чего ЭДС также уменьшится, что учитывают коэффициентом укорочения $k_y < 1$. Уменьшение ЭДС вследствие распределения обмотки и укорочения ее шага учитывают обмоточным коэффициентом $k_{об} = k_p k_y < 1$. Примерное значение обмоточного коэффициента $k_{об} = 0,9...0,96$.

Таким образом, действующее значение ЭДС фазной обмотки статора, индуцируемой вращающимся магнитным полем, равна

$$E_1 = 4,44fw_1k_{об1}\Phi_m. \quad (12.5)$$

Поскольку частота индуцируемой ЭДС пропорциональна частоте пересечения проводника вращающимся магнитным полем (в двигателе это n_1), частота ЭДС статора

$$f_1 = \frac{pn_1}{60} = \frac{60pf}{60p} = f,$$

т. е. равна частоте напряжения сети.

В обмотке неподвижного ротора, по аналогии с обмоткой статора, индуцируется ЭДС такой же частоты

$$E_2 = 4,44fw_2k_{об2}\Phi_m, \quad (12.6)$$

где w_2 — число витков обмотки фазы ротора, $k_{об2}$ — ее обмоточный коэффициент.

В короткозамкнутой обмотке в каждом пазу находится один проводник (стержень) и каждый из них представляет собой отдельную фазу. При определении ЭДС в фазе ротора необходимо принимать $w_2 = 0,5$, а $k_{об2} = 1$.

У двигателя с фазным ротором обмоточный коэффициент ротора имеет примерно такое же значение, что и обмоточный коэффициент статора, т. е. $k_{об2} \cong k_{об1}$.

Так как ротор относительно статора вращается с частотой $n_2 < n_1$ в направлении, совпадающем с направлением вращения результирующего магнитного поля (рис. 12.16),



то магнитное поле относительно ротора вращается с частотой $n_s = n_1 - n_2 = sn_1$. Поэтому в проводниках обмотки вращающегося ротора индуцируется синусоидальная ЭДС, имеющая частоту f_2 , равную

$$f_2 = \frac{pn_s}{60} = \frac{psn_1}{60} = sf, \quad (12.7)$$

так как число полюсов ротора всегда равно числу полюсов статора.

Таким образом, частота ЭДС в обмотке вращающегося ротора прямо пропорционально зависит от скольжения s и частоты f напряжения сети и равна ей только при пуске, когда $n_2 = 0$ и $s = 1$. В остальных режимах $f_2 < f$. При номинальной частоте вращения, если $s_{\text{ном}} = 0,04$, $f_2 = 0,04 \cdot 50 = 2$ Гц. При меньших скольжениях частота еще меньше.

С учетом (12.7) и сказанного выше, ЭДС в обмотке вращающегося ротора

$$E_{2s} = 4,44f_2w_2k_{o62}\Phi_m = 4,44sfw_2k_{o62}\Phi_m. \quad (12.8)$$

ЭДС вращающегося ротора можно выразить через ЭДС неподвижного ротора, воспользовавшись соотношениями (12.7) и (12.8):

$$E_{2s} = sE_2. \quad (12.9)$$

ЭДС обмотки ротора прямо пропорциональна скольжению или обратно пропорциональна частоте вращения ротора. Максимальное значение ЭДС ротора принимает при $s = 1$, т. е. при неподвижном роторе.

Отношение ЭДС обмотки статора E_1 к ЭДС обмотки неподвижного ротора E_2 обозначают k_e и называют коэффициентом трансформации по ЭДС. С учетом (12.4) и (12.7) получаем

$$k_e = \frac{w_1k_{o61}}{w_2k_{o62}}.$$

Величину

$$E'_2 = k_e E_2 = E_1 \quad (12.10)$$

называют *приведенной ЭДС ротора*. Как и в трансформаторе, она в k_e раз больше действительной ЭДС и равна ЭДС статора.

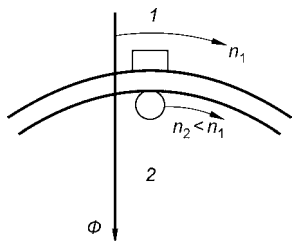


Рис. 12.16
Относительное
движение проводника
ротора
и вращающегося
магнитного потока

Электродвижущие силы, индуцируемые магнитными потоками рассеяния. Токи в обмотках статора и ротора создают магнитные потоки, сцепленные только с данной обмоткой и не взаимодействующие с потоком другой обмотки. Такие магнитные потоки являются *потоками рассеяния* (рис. 12.17). На рисунке поток рассеяния обмоток статора обозначен Φ_{pac1} , а поток рассеяния обмоток ротора — Φ_{pac2} . Так как эти потоки сцеплены только с одной обмоткой или даже только с частью проводников обмотки, то они являются фазными и по своему характеру — пульсирующими. Во времени потоки рассеяния изменяются по синусоидальному закону, так как создаются синусоидальными токами и значительную часть пути замыкаются по воздуху.

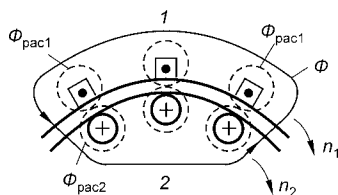


Рис. 12.17
Магнитные потоки рассеяния
1 — статора; 2 — ротора.

Потоки рассеяния индуцируют в обмотках статора и ротора синусоидальные ЭДС самоиндукции, уравнения для которых можно написать по аналогии с трансформатором:

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_{\text{pac1}} &= -jX_1 I_1, \\ \underline{E}_{\text{pac2}} &= -jX_2 I_2, \\ \underline{E}_{\text{pac2s}} &= -jX_{2s} I_2 = s\underline{E}_{\text{pac2}}, \end{aligned} \right\} \quad (12.11)$$

где $X_1 = \omega L_1 = 2\pi f L_1$ — индуктивное сопротивление фазной обмотки статора, обусловленное потоком рассеяния Φ_{pac1} ; $X_2 = \omega L_2 = 2\pi f L_2$ и $X_{2s} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f L_2$ — индуктивные сопротивления фазной обмотки неподвижного и вращающегося ротора соответственно, обусловленные потоком Φ_{pac2} . При этом индуктивное сопротивление обмотки вращающегося ротора можно определить через сопротивление обмотки неподвижного ротора:

$$X_{2s} = sX_2.$$

С учетом последнего можно выразить ЭДС рассеяния во вращающейся обмотке ротора через ее значение при неподвижном роторе:

$$\underline{E}_{\text{pac2s}} = s\underline{E}_{\text{pac2}}.$$

Ток ротора. Под действием ЭДС ротора E_{2s} , индуцируемой вращающимся магнитным полем, в замкнутой обмотке ротора возникает ток I_2 , определяемый по закону Ома:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}}, \quad (12.12)$$

где R_2 — активное сопротивление фазы ротора; Z_{2s} — полное сопротивление фазы ротора.

Ток I_2 в обмотке ротора имеет такую же частоту $f_2 = sf$, как и ЭДС E_{2s} . Так как полное сопротивление фазы ротора имеет индуктивную составляющую X_{2s} , то ток \underline{I}_2 отстает по фазе от \underline{E}_{2s} на угол

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_{2s}}{R_2}. \quad (12.13)$$

Так как $E_{2s} = sE_2$ и $X_{2s} = sX_2$, получаем

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}},$$

или, разделив на s ,

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}. \quad (12.14)$$

Определяемый по формуле (12.14) ток имеет то же значение, что и ток, определяемый по формуле (12.12), но его частота равна частоте ЭДС E_2 неподвижного ротора, т. е. частоте f напряжения сети. Сдвиг фаз между ЭДС и током

$$\psi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2 / s} = \arctg \frac{sX_2}{R_2} = \arctg \frac{X_{2s}}{R_2}$$

остается равным ψ_2 , определяемым по (12.13).

Используя формулу (12.14), можно построить совместную векторную диаграмму для обмоток статора и ротора двигателя, как это делалось для трансформатора, и составить связанную схему замещения двигателя. Однако следует помнить об условности, состоящей в том, что реально вращающийся ротор с реальной ЭДС E_{2s} в (12.12) представляется неподвижным ротором с ЭДС E_2 ,

значение которой при $f = \text{const}$ и $U_1 = \text{const}$ остается неизменным.

То, что ротор вращается, а частота его вращения изменяется, учитывают изменением активного сопротивления обмотки ротора R_2/s , которое оказывается зависящим от скольжения. Чем больше тормозной момент на валу двигателя, тем большее количество электроэнергии должно преобразовываться в механическую энергию. С увеличением тормозного момента частота вращения ротора уменьшается, а его скольжение увеличивается. При этом, как видно из формулы (12.14), активное сопротивление обмотки ротора уменьшается, а ток ротора I_2 возрастает, что компенсируется увеличением тока статора. Это равнозначно увеличению потребляемой двигателем электрической энергии. Максимальное значение ток ротора имеет при $s = 1$, т. е. при пуске двигателя, а минимальное значение — при s , близких к нулю, т. е. в режиме холостого хода.

12.6. УРАВНЕНИЯ МАГНИТОДВИЖУЩИХ СИЛ. ТОК СТАТОРА

Частота вращения магнитного поля ротора. В короткозамкнутом роторе каждый проводник, расположенный в пазу, образует отдельную фазу, следовательно, число фаз m_2 такой обмотки равно числу пазов ротора. Так как пазы ротора сдвинуты в пространстве на некоторый угол, то фазы (обмотки) оказываются также сдвинутыми в пространстве на некоторый угол. Фазный ротор имеет столько же фаз, сколько и статор ($m_2 = m_1$).

Вращающееся магнитное поле, магнитная индукция которого распределена в воздушном зазоре между статором и ротором по синусоидальному закону (см. рис. 12.12), индуцирует в проводниках обмотки ротора, расположенных в разных пазах, синусоидальные ЭДС, сдвинутые по фазе. Токи в проводниках обмотки ротора под действием этих ЭДС также сдвинуты по фазе. Следовательно, обмотка ротора, как и обмотка статора, создает вращающееся магнитное поле, так как выполнены все условия получения вращающегося магнитного поля, сформулированные ранее для обмотки статора.

Число пар полюсов статора и ротора всегда одинаково. Следовательно, частота вращения магнитного поля, созданного обмоткой ротора, относительно самого ротора, по аналогии со статором

$$n' = \frac{60f_2}{p} = s \frac{60f}{p} = sn_1 = n_1 - n_2,$$

где f_2 — частота тока в обмотке ротора.

Так как ротор относительно статора вращается с частотой n_2 , то частота вращения магнитного поля ротора относительно статора $n'_2 = n' + n_2 = n_1$.

||| *Магнитные поля, создаваемые обмотками статора и ротора, вращаются относительно статора с одинаковой частотой n_1 , образуя единое результирующее магнитное поле.*

Поэтому вместо «вращающееся магнитное поле статора» в дальнейшем будем говорить «вращающееся магнитное поле асинхронного двигателя».

Уравнение магнитодвижущих сил (МДС). Магнитные поля статора и ротора создаются их магнитодвижущими силами. При этом следует подчеркнуть, что в трехфазном асинхронном двигателе вращающееся магнитное поле статора является суммой магнитных полей, создаваемых МДС трех фаз. Это же относится и к полю ротора.

Как было показано в § 12.3, в общем случае амплитуда суммарной магнитной индукции поля, создаваемого многофазной обмоткой, равна $B_m = (m/2)B_{\Phi m}$, где m — число фаз обмотки, а $B_{\Phi m}$ — амплитудное значение магнитной индукции на оси фазной обмотки. Это значит, что амплитудное значение МДС многофазной обмотки, создающей результирующее магнитное поле в машине, равно

$$\underline{F}_m = \frac{m}{2} \underline{F}_{m\Phi} = \frac{m}{2} \underline{I}_{m\Phi} k_{o6} w = \frac{m}{2} \sqrt{2} \underline{I} k_{o6} w = \frac{m}{\sqrt{2}} \underline{I} k_{o6} w,$$

где $\underline{F}_{m\Phi} = \underline{I}_{m\Phi} k_{o6} w = \sqrt{2} \underline{I} k_{o6} w$ — амплитудное значение МДС фазной обмотки.

При идеальном холостом ходе асинхронного двигателя ($I_2 = 0$) МДС ротора равна нулю и вращающееся магнитное поле создается только МДС статора:

$$\frac{m_1}{2} \sqrt{2} \underline{I}_0 k_{061} w_1 = \frac{m_1}{\sqrt{2}} \underline{I}_0 k_{061} w_1.$$

В режиме нагрузки вращающееся магнитное поле создается МДС статора и ротора, причем результирующая МДС, аналогично трансформатору, остается постоянной и равной МДС холостого хода. Таким образом, уравнение МДС имеет вид

$$\frac{m_1}{\sqrt{2}} \underline{I}_1 k_{061} w_1 + \frac{m_2}{\sqrt{2}} \underline{I}_2 k_{062} w_2 = \frac{m_1}{\sqrt{2}} \underline{I}_0 k_{061} w_1.$$

Ток статора. Поделив все члены последнего уравнения на $\frac{m_1}{\sqrt{2}} k_{061} w_1$, получим

$$\underline{I}_1 + \frac{1}{k_i} \underline{I}_2 = \underline{I}_0, \text{ или } \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_0, \quad (12.15)$$

где $k_i = \frac{m_1 k_{061} w_1}{m_2 k_{062} w_2}$ — коэффициент трансформации по току, $\underline{I}'_2 = \frac{1}{k_i} \underline{I}_2$ — приведенный ток ротора.

Ток статора, определенный из (12.15),

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \quad (12.16)$$

Уравнения (12.15) и (12.16) являются уравнениями токов.

Ток статора, как и ток первичной обмотки трансформатора, имеет две составляющие: ток холостого хода \underline{I}_0 и ток $-\underline{I}'_2$, обусловленный нагрузкой.

Ток холостого хода \underline{I}_0 составляет 40...60% от номинального значения тока, т. е. значительно больший, чем в трансформаторе. Большое значение тока холостого хода обусловлено тем, что магнитный поток статора дважды пересекает воздушный зазор с большим магнитным сопротивлением (см. рис. 12.11) и для создания достаточного магнитного потока требуется значительно большая МДС и, следовательно, ток. Основной в токе холостого хода является намагничивающая составляющая, носящая индуктивный характер. Это приводит к снижению коэффициента мощности асинхронного двигателя и ухудшает его эксплуатационные характеристики.

Составляющая тока статора $-I'_2$, равная приведенному току ротора, взятому с обратным знаком, появляется только тогда, когда к валу ротора приложен тормозной момент, в том числе и момент холостого хода M_0 . Эта составляющая тока не может быть равной нулю, так как в противном случае вращающий момент будет равен нулю. В режиме холостого хода она много меньше намагничивающей составляющей тока I_0 , а в номинальном режиме составляет примерно $0,5I_{1\text{ном}}$. Физический смысл нагрузочной составляющей тока статора такой же, как в трансформаторе.

Необходимо отметить, что приведенная ЭДС E'_2 отличается от реальной только за счет различия числа витков и обмоточных коэффициентов статора и ротора, в то время как приведенный ток I'_2 отличается от реального еще за счет различия числа фаз обмоток статора и ротора. Таким образом, приведенная обмотка ротора имеет число витков $w_2 = w_1$, число фаз $m_2 = m_1$ и обмоточный коэффициент $k_{\text{об}2} = k_{\text{об}1}$.

12.7. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для построения схемы замещения обмотку ротора приводят к обмотке статора, т. е. принимают, что она имеет такие же обмоточный коэффициент, число витков и фаз, какие имеет обмотка статора. Приведенные ЭДС E'_2 и ток ротора I'_2 определяют по формулам (12.10) и (12.15) соответственно. Приведенные сопротивления ротора можно определить, приравняв мощность потерь энергии в обмотках реального и приведенного ротора: $m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I'^2_2 R'_2$, откуда

$$R'_2 = k_e k_i R_2, \quad X'_2 = k_e k_i X_2.$$

Чтобы иметь одинаковую частоту ЭДС и токов в обмотках статора и ротора, рассматривают процессы в машине с неподвижным ротором, ток в обмотке которого

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X'^2_2}}.$$

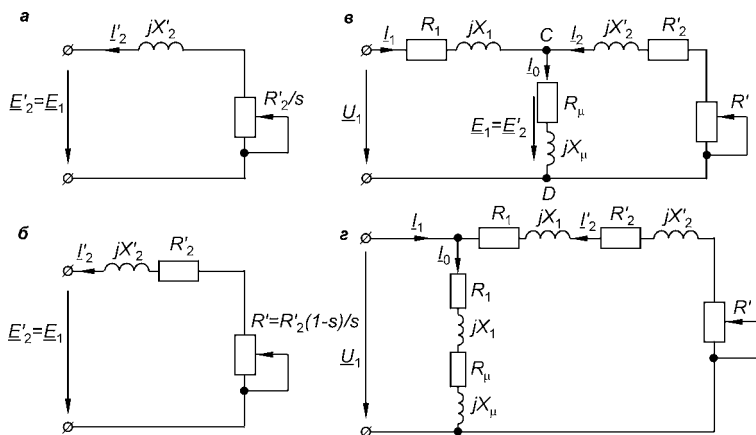


Рис. 12.18

Схемы замещения асинхронного двигателя

а, б — ротора; в — двигателя Т-образная; г — двигателя Г-образная.

Этому уравнению соответствует электрическая схема, изображенная на рис. 12.18а.

Переменное активное сопротивление обмотки ротора можно представить в виде суммы двух сопротивлений (рис. 12.18б):

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_2 \cdot \frac{1-s}{s} = R'_2 + R',$$

где R'_2 — активное сопротивление самой обмотки (обмотки неподвижного ротора).

Такая схема замещения обмотки ротора совпадает по структуре со схемой замещения вторичной обмотки трансформатора. Мощность электрической энергии, потребляемой участком цепи с сопротивлением R' , зависящим от скольжения, эквивалентна механической мощности двигателя. При идеальном холостом ходе, когда $s = 0$, сопротивление $R' = \infty$, что соответствует разрыву цепи ротора и отсутствию тока в его обмотке. При неподвижном роторе, когда $s = 1$, сопротивление $R' = 0$ и ток в роторе достигает максимального значения.

Во всех остальных случаях, когда $0 < s < 1$, электрическая мощность элемента с сопротивлением R' равна механической мощности асинхронного двигателя. Таким образом, механическая мощность асинхронного двигателя

$$P_{\text{мх}} = m_1 I_2'^2 R'_2 \cdot \frac{1-s}{s}, \quad (12.17)$$

причем принимают в расчет число фаз статора m_1 , а не ротора m_2 , так как ток ротора и сопротивление его обмотки приведены к обмотке статора.

Так как электромагнитный режим фазной обмотки статора аналогичен режиму первичной обмотки трансформатора, то ее схема замещения аналогична схеме замещения первичной обмотки трансформатора. Ветвь намагничивания с током I_0 имеет активное сопротивление R_μ , обусловленное мощностью потерь в сердечнике статора, и индуктивное сопротивление X_μ , обусловленное вращающимся магнитным потоком. Магнитное поле вращается относительно ротора с небольшой частотой $n_s = sn_1$, поэтому при нормальной нагрузке, когда $s = 0,02 \dots 0,06$, частота перемагничивания сердечника ротора $f_2 = sf_1$ невелика, и мощность потерь в сердечнике ротора мала, поэтому ею можно пренебречь. На зажимах ветви намагничивания действует ЭДС E_1 . Так как $E_1 = E'_2$, то к началу и концу ветви намагничивания можно присоединить схему замещения ротора.

Таким образом, полученная электрическая схема (рис. 12.18б) является схемой замещения асинхронного двигателя. Так как конфигурация схемы имеет вид буквы Т, то ее называют Т-образной схемой замещения. Это сложная схема, состоящая из параллельно-последовательного соединения отдельных элементов. В отличие от трансформатора ток холостого хода I_0 асинхронного двигателя настолько велик ($I_0 = (0,4 \dots 0,6)I_{\text{ном}}$), что пренебрегать сопротивлением ветви намагничивания нельзя.

Используя схему замещения, можно свести электро-механические процессы, протекающие в асинхронном двигателе, к электрическим. Для точки С схемы справедливо уравнение токов (12.16). Электрическая мощность элемента R' численно равна механической мощности (12.17), развиваемой двигателем.

В практических расчетах чаще используют Г-образную схему замещения (рис. 12.18г), в которой ветвь намагничивания включена на напряжение сети. Такая схема замещения состоит из двух параллельных ветвей. При холостом ходе, когда $R' = \infty$ и $I'_2 = 0$, ток статора $I_1 = I_0$. Как в Т-образной, так и в Г-образной схемах ток I_0 замыкается по последовательно включенным элементам с сопротивлениями R_1 , X_1 , R_μ и X_μ . В рабочем режиме

возникает ток I'_2 , который в этих схемах замещения замыкается по контуру, состоящему из одних и тех же элементов (R_1, X_1, R'_2, X'_2, R'). Ток статора в той и другой схемах $I_1 = I_0 - I'_2$.

В Г-образной схеме замещения

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R')^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (12.18)$$

Эта схема является приближенной. Значение тока I'_2 , найденное по формуле (12.18), на 3...6% больше действительного значения тока. На значении тока I_1 ошибка в вычислении тока I'_2 сказывается еще меньше.

Векторная диаграмма асинхронного двигателя подобна диаграмме трансформатора в силу сходства их теории. Вращающийся магнитный поток является общим для статора и ротора, поэтому удобнее начать построение векторной диаграммы с вектора магнитного потока Φ_m (рис. 12.19). Вектор тока холостого хода I_0 опережает вектор магнитного потока на угол δ_C потерь в стальном магнитопроводе. Действующее значение тока холостого хода I_0 в асинхронном двигателе составляет 40...60% от номинального тока статора. ЭДС статора E_1 и ротора E'_2 ,

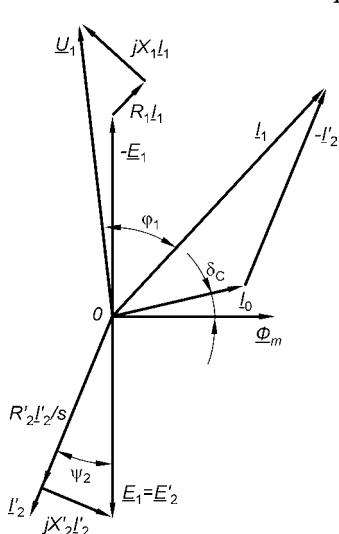


Рис. 12.19
Векторная диаграмма
асинхронного двигателя
в режиме нагрузки

индуцируемые потоком Φ_m , отстают по фазе от потока на угол $\pi/2$, причем для построения совместной диаграммы берут ЭДС неподвижного ротора, так как ее частота равна частоте напряжения сети и ЭДС статора.

Влияние тормозного момента на значение и фазу тока ротора оценивают изменением активного сопротивления ротора R_2/s при изменении скольжения. Поэтому вектор тока ротора I'_2 отстает по фазе от ЭДС E'_2 на угол $\psi_2 = \arctg(sX_2/R_2)$, увеличивающийся с увеличением нагрузки и скольжения s . При нагрузке, не превышающей

номинального значения, скольжение s не превышает 0,05...0,06, поэтому угол ψ_2 невелик.

Для схемы замещения ротора (см. рис. 12.18а) можно написать уравнение

$$\underline{E}'_2 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + jX'_2 \underline{I}'_2.$$

Это уравнение ЭДС для ротора аналогично уравнению ЭДС для вторичной обмотки трансформатора в режиме короткого замыкания. На векторной диаграмме активная составляющая падения напряжения $(R'_2/s)\underline{I}'_2$ совпадает по фазе с током \underline{I}'_2 (рис. 12.19), а индуктивная составляющая $jX'_2 \underline{I}'_2$ опережает по фазе вектор тока \underline{I}'_2 на угол $\pi/2$. Вектор тока в обмотке статора находят из уравнения токов (12.16).

Для схемы замещения статора (см. рис. 12.18б) можно написать уравнение ЭДС, которое имеет тот же вид, что и для первичной обмотки трансформатора:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1. \quad (12.19)$$

Из уравнения (12.19) находят вектор напряжения сети \underline{U}_1 , подводимого к обмотке статора. За счет большого значения тока холостого хода угол φ_1 у асинхронных двигателей велик и номинальное значение коэффициента мощности составляет 0,7...0,85.

12.8. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА И КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрим процесс преобразования энергии в асинхронном двигателе. Асинхронный двигатель потребляет из сети электрическую энергию, активная мощность которой

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Часть этой энергии преобразуется в тепловую энергию в проводниках обмотки статора, обладающих активным сопротивлением R_1 . Интенсивность этого преобразования оценивают активной мощностью

$$P_{\text{п.пр1}} = m_1 I_1^2 R_1,$$

называемой *мощностью электрических потерь* в проводниках обмотки статора.

Другая часть потребляемой электрической энергии преобразуется в тепловую в сердечнике статора вследствие возникновения в нем вихревых токов, а также расходуется на перемагничивание сердечника вследствие явления гистерезиса. Интенсивность этого преобразования оценивают мощностью

$$P_{\text{п.с1}} = m_1 I_0^2 R_{\mu} = c m_1 E_1^2,$$

которую называют *мощностью потерь в стали* сердечника статора.

Остальная часть электрической энергии передается посредством магнитного поля со статора на ротор. Мощность этой энергии

$$P_{\text{эм}} = P_1 - P_{\text{п.пр1}} - P_{\text{п.с1}}$$

называют *электромагнитной мощностью*. Она определяется током и ЭДС в роторе: $P_{\text{эм}} = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2$. На схеме замещения этой мощности соответствует мощность

$$P_{\text{эм}} = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}.$$

В роторе часть поступившей в него энергии преобразуется в тепловую в проводниках обмотки ротора. По аналогии со статором мощность электрических потерь в них

$$P_{\text{п.пр2}} = m_2 I_2'^2 R_2 = m_1 I_2'^2 R_2'. \quad (12.20)$$

Так как частота вращения ротора n_2 мало отличается от n_1 , мощностью потерь в сердечнике ротора в режиме двигателя можно пренебречь.

Оставшаяся энергия, под действием которой ротор приходит во вращение, характеризуется полной механической мощностью

$$P_{\text{мх}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{п.пр2}}.$$

При вращении ротора часть энергии расходуется на трение в подшипниках, трение щеток о кольца в двигателе с фазным ротором, на вентиляцию. Мощность этих потерь, называемая *мощностью механических потерь* $P_{\text{п.мх}}$, пропорциональна частоте вращения ротора.

Оставшаяся часть энергии преобразуется в полезную механическую энергию на валу двигателя. Мощность полезной механической энергии

$$P_2 = P_{\text{мх}} - P_{\text{п.мх}}.$$



В соответствии с изложенным на рис. 12.20 изображена так называемая энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

Зная мощность $P_{\Pi} = P_{\Pi.\text{пр}1} + P_{\Pi.\text{с}1} + P_{\Pi.\text{пр}2} + P_{\Pi.\text{мх}}$ суммарных потерь энергии в двигателе, можно определить его КПД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{\Pi}}{P_1} = 1 - \frac{P_{\Pi}}{P_1}.$$

Максимального значения КПД двигателя (как и в трансформаторе) достигает при нагрузке, близкой к номинальной. Двигатели малой и средней мощности имеют номинальный КПД в пределах 70...90%, двигатели большой мощности имеют КПД примерно 94...96%.

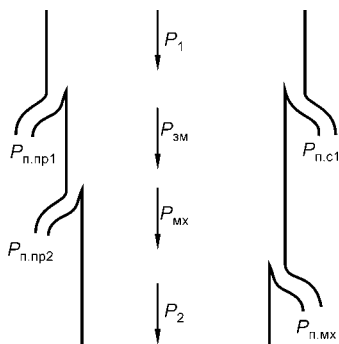


Рис. 12.20
Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

12.9. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Так как электромагнитная мощность передается на ротор вращающимся магнитным полем, то ее определяют через электромагнитный вращающий момент M :

$$P_{\text{эм}} = M\Omega_1,$$

где $\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{\pi n_1}{30}$ — угловая скорость вращения магнитного поля, если частота вращения этого поля n_1 оборотов в минуту.

В свою очередь электромагнитный вращающий момент может быть определен через полную механическую мощность:

$$P_{\text{мх}} = M\Omega_2,$$

где Ω_2 — угловая скорость вращения ротора, причем $\Omega_2 = \frac{\pi n_2}{30}$.

Как видно из рис. 12.20, разность электромагнитной и полной механической мощностей есть мощность энергии, затрачиваемой на нагрев обмотки ротора:

$$P_{эм} - P_{мх} = M(\Omega_1 - \Omega_2) = M\Omega_1 \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} = M\Omega_1 s = P_{п.пр2},$$

где $\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} = s$.

Учитывая (12.20), получим

$$M = \frac{m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}}{\Omega_1}. \quad (12.21)$$

Из векторной диаграммы для ротора (см. рис. 12.19) получаем

$$I_2' \frac{R_2'}{s} = E_2' \cos \psi_2 = 4,44 k_{о62} f w_1 \Phi_m \cos \psi_2,$$

а подставив это выражение в формулу (12.21), имеем

$$M = c_m I_2' \Phi_m \cos \psi_2, \quad (12.22)$$

где $c_m = 4,44 m_1 k_{о61} f w_1 / \Omega_1$ — постоянный коэффициент для данного двигателя.

Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален току ротора, амплитуде вращающегося магнитного потока и косинусу угла, равного сдвигу фаз между током и ЭДС в роторе.

Формулы для вращающего момента асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока отличаются только сомножителем $\cos \psi_2$. Величина $I_2' \cos \psi_2$ является активной составляющей тока, поэтому вращающий момент асинхронного двигателя

$$M = c_m I_2' \cos \psi_2 \Phi_m. \quad (12.23)$$

Как у двигателей постоянного тока, так и у асинхронных двигателей вращающий момент пропорционален магнитному потоку в зазоре машины и току в проводах обмотки вращающейся части машины. При этом в асинхронном двигателе вращающий момент создается только активной составляющей тока.

Для анализа электромеханических характеристик асинхронного двигателя необходимо получить аналитическую зависимость вращающего момента от скольжения. Из Г-образной схемы замещения (см. рис. 12.18г) ток ротора

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (12.24)$$

где $\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'$ — активное сопротивление цепи ротора.

Подставляя (12.24) в формулу (12.21) с учетом того, что $\Omega_1 = 2\pi f/p$, получим

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 R'_2 / s}{2\pi f \left((R_1 + R'_2 / s)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right)}. \quad (12.25)$$

Из (12.25) видно, что вращающий момент асинхронного двигателя зависит от скольжения и пропорционален квадрату напряжения сети, приложенного к обмотке статора. Поэтому асинхронные двигатели очень чувствительны к изменению напряжения. Так, при снижении напряжения на 10% вращающий момент уменьшается на 19%. Это является одним из недостатков асинхронного двигателя.

Точную зависимость $M = f(s)$ можно построить, если в формулу (12.25) подставлять числовые значения всех параметров. Найдем характер этой зависимости путем анализа формулы (12.25).

Рассмотрим работу двигателя при условии, что $U_1 = \text{const}$ (что, как правило, имеет место на практике). Так как индуктивное сопротивление асинхронного двигателя $X_k = X_1 + X'_2$, а активным сопротивлением R_1 обмотки статора можно пренебречь и считать, что

$$R_k = R_1 + \frac{R'_2}{s} \cong \frac{R'_2}{s},$$

то формулу (12.25) можно переписать в виде

$$M = \frac{c'_m \frac{R'_2}{s}}{\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_k^2}, \quad (12.26)$$

где $c'_m = \frac{m_1 p U_1^2}{2\pi f}$ — постоянный коэффициент.

При скольжениях, близких к нулю, можно пренебречь индуктивным сопротивлением, так как $X_k \ll R'_2 / s$. Тогда вместо (12.26) можно написать

$$M = \frac{c'_m s}{R'_2},$$

откуда видно, что вращающий момент прямо пропорционален скольжению (см. рис. 12.21а).

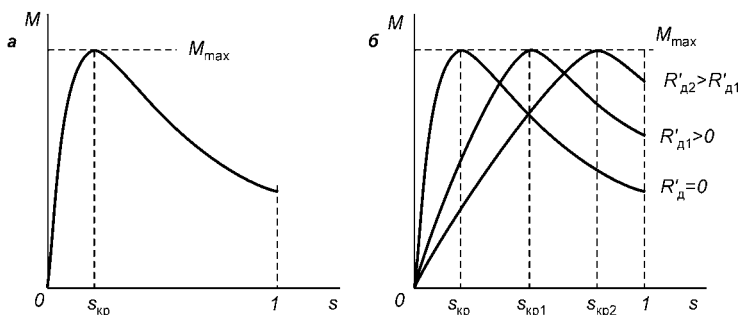


Рис. 12.21

Зависимость вращающего момента от скольжения

а — для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором; *б* — для двигателя с фазным ротором.

При скольжениях, близких к единице, сопротивления R'_2/s и X_K в (12.26) становятся соизмеримыми (часто даже $X_K > R'_2/s$). Поэтому можно утверждать, что знаменатель в (12.26) для этой области скольжения остается почти неизменным, а числитель с ростом скольжения уменьшается. Следовательно, в этой области значений s вращающий момент с увеличением скольжения уменьшается.

Таким образом, при каком-то значении скольжения $s_{кр}$ вращающий момент имеет максимальное значение M_{max} и зависимость $M = f(s)$ имеет вид, показанный на рис. 12.21а.

Значения $0 \leq s \leq 1$ соответствуют полному диапазону изменения скольжения асинхронного двигателя. Критическое значение скольжения $s_{кр}$, при котором вращающий момент максимален, можно определить, приравняв нулю первую производную $dM/ds = 0$ от вращающего момента по s . Тогда получим

$$s_{кр} = \frac{R'_2}{X_K}. \quad (12.27)$$

Так как $X_K = \text{const}$, то из (12.27) следует, что при изменении активного сопротивления цепи ротора изменяется критическое значение скольжения $s_{кр}$. Поскольку у асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором активное сопротивление ротора неизменно, двигатель имеет только одно значение $s_{кр}$ (обычно $s_{кр} = 0,1 \dots 0,2$) и только одну зависимость $M = f(s)$.

У асинхронного двигателя с фазным ротором последовательно с обмотками ротора через кольца и щетки можно включать реостаты с сопротивлением R'_d (см. рис. 12.7б). Тогда активное сопротивление цепи ротора $R'_p = R'_d + R'_2$, вращающий момент

$$M = \frac{c'_m \frac{R'_p}{s}}{\left(R'_p/s\right)^2 + X_K^2}, \quad (12.28)$$

а скольжение

$$s_{кр} = \frac{R'_p}{X_K} = \frac{R'_2 + R'_d}{X_K}. \quad (12.29)$$

Если в формулу (12.28) вместо s подставить $s_{кр}$ из (12.29), то получим формулу для максимального момента

$$M_{\max} = \frac{c'_m}{2X_K}, \quad (12.30)$$

из которой видно, что максимальный вращающий момент не зависит от активного сопротивления цепи ротора и остается постоянным при всех значениях R'_d (рис. 12.21б).

Так как в коэффициент c'_m входит напряжение питающей сети во второй степени, то значение максимального момента изменяется при изменении напряжения U_1 пропорционально квадрату этого напряжения.

То, что вращающий момент может принимать максимальное значение, видно из выражения (12.22). С ростом нагрузки увеличивается ток ротора I'_2 и одновременно уменьшается $\cos\psi_2$, так как угол ψ_2 увеличивается. При некотором значении нагрузки (скольжении) уменьшение $\cos\psi_2$ начинает преобладать над увеличением тока I'_2 . Фактически это означает, что увеличение тока ротора происходит только за счет индуктивной составляющей при одновременном уменьшении активной составляющей. В соответствии с (12.23) при уменьшении активной составляющей тока ротора вращающий момент уменьшается.

Изменяя сопротивление R'_d реостата, можно изменять значение критического скольжения $s_{кр}$, поэтому двигатель с фазным ротором может иметь семейство зависимостей $M = f(s)$ (рис. 12.21б).

12.10. ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Механическая характеристика. Механической характеристикой называют зависимость частоты вращения двигателя от вращающего момента $n_2 = f(M)$ при $U_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$. Ее можно построить, используя зависимость $M = f(s)$ и соотношение между n_2 и s . Из формулы (12.3) получаем, что $n_2 = (1 - s)n_1 = n_1 - n_1s$, откуда видно, что частота вращения ротора n_2 и скольжение s являются линейно зависимыми величинами. При $s = 1$ частота $n_2 = 0$, а при $s = 0$ частота $n_2 = n_1$. Следовательно, точке $s = 1$ на оси абсцисс (рис. 12.21) соответствует точка $n_2 = 0$, т. е. начало оси для частоты вращения. Увеличению частоты вращения n_2 соответствует направление оси абсцисс справа налево. Совместив начала осей для момента M и частоты n_2 и повернув оси на угол 90° по часовой стрелке, получим механическую характеристику асинхронного двигателя (рис. 12.22а).

На ней можно отметить: максимальный момент M_{\max} ; пусковой момент $M_{\text{п}}$ (при пуске двигателя, т. е. при $n_2 = 0$); номинальный момент $M_{\text{ном}}$, соответствующий номинальному режиму работы двигателя (ему соответствует номинальная частота вращения ротора $n_{2\text{ном}}$, указываемая в паспорте двигателя).

Рабочим участком механической характеристики является участок ab , на котором при изменении вращающего момента от 0 до M_{\max} частота вращения двигателя меняется мало. Так как скольжение в номинальном

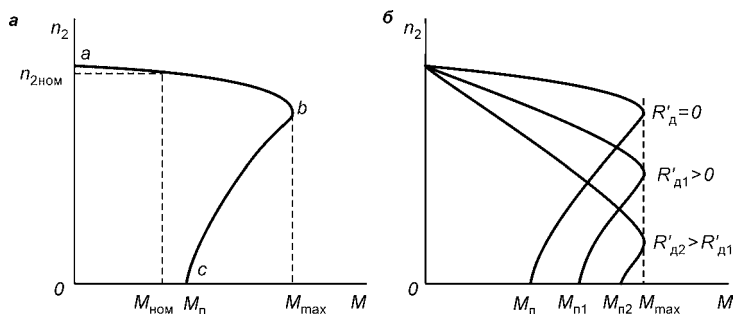


Рис. 12.22

Механические характеристики асинхронного двигателя

а — с короткозамкнутым ротором; б — с фазным ротором.

режиме составляет $s_{\text{ном}} = 0,03...0,06$, то частота вращения двигателя при номинальной нагрузке составляет 94...97% от частоты вращения магнитного поля, т. е. практически не изменяется. Такую механическую характеристику называют *жесткой характеристикой*.

Устойчивая работа двигателя, т. е. работа при $n_2 = \text{const}$, возможна только на участке ab характеристики. Допустим, что в исходном режиме двигатель работает в точке a' механической характеристики (рис. 12.23), т. е. имеет частоту вращения n'_2 и развивает вращающий момент M' . Если при этом тормозной момент увеличивается от M'_T до M''_T , то возникает неравенство моментов: $M' < M''_T$. Так как тормозной момент больше вращающего, ротор двигателя начинает тормозиться, увеличиваются скольжение, ЭДС и ток ротора, а следовательно, и вращающий момент двигателя. Замедление ротора продолжается до тех пор, пока не наступит равенство моментов: $M = M''_T$. При этом устанавливается постоянная частота вращения $n''_2 = \text{const}$ ($n''_2 < n'_2$). Этим значениям соответствует точка a'' . При уменьшении тормозного момента рассматриваемые величины изменяются в обратном порядке.

Таким образом, как бы ни изменялся тормозной момент в пределах участка ab , вращающий момент двигателя изменяется таким образом, что всегда сохраняется условие его устойчивой работы. В этом заключается свойство *внутреннего саморегулирования* асинхронного двигателя.

Точка b характеристики является точкой неустойчивого равновесия. Так, если тормозной момент несколько превысит максимальное значение вращающего момента, вращающий момент начинает уменьшаться и равенство $M = M_T$ становится невозможным — двигатель останавливается. Поэтому максимальный момент называют также *опрокидывающим моментом*. По значению отношения максимального момента к номинальному

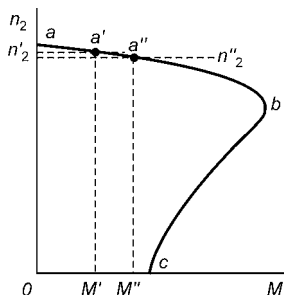


Рис. 12.23
Механическая характеристика для пояснения устойчивой работы асинхронного двигателя

($M_{\max}/M_{\text{ном}} = \gamma$) судят о *перегрузочной способности* двигателя. У асинхронных двигателей $\gamma = 1,7 \dots 2,5$. Для устойчивой работы двигателя нельзя допускать $\gamma < 1,7$.

Двигателю с фазным ротором соответствует семейство механических характеристик (см. рис. 12.22б). Обычно двигатель эксплуатируют при отсутствии добавочного реостата в цепи ротора и его механические свойства оценивают, пользуясь характеристикой при $R'_d = 0$. Эту характеристику, аналогичную характеристике двигателя с короткозамкнутым ротором, называют *естественной*.

Рабочие характеристики. Изменение различных электрических и механических параметров двигателя в нормальном режиме описывается рабочими характеристиками, под которыми понимают зависимости n_2 , s , M_2 , I_1 , $\cos\varphi_1$, η от мощности P_2 на валу двигателя при $U_1 = \text{const}$ и $f = \text{const}$ (рис. 12.24).

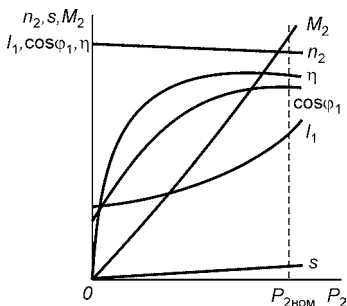


Рис. 12.24
Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Из механической характеристики (см. рис. 12.22а) видно, что в диапазоне изменения нагрузки от нуля до $M_{\text{ном}}$ частота вращения двигателя n_2 меняется мало. Так как нагрузку двигателя можно оценивать как тормозным моментом, так и механической мощностью P_2 , то можно сказать, что частота вращения n_2 меняется мало при изменении P_2 от нуля до номинального значения $P_{2\text{ном}}$.

Скольжение s ротора связано с n_2 следующим образом:

$$s = (n_2 - n_1)/n_1 = 1 - n_2/n_1.$$

При холостом ходе двигателя ($P_2 = 0$) $n_2 \approx n_1$ и скольжение s мало отличается от нуля, но при этом $s > 0$. С увеличением тормозного момента на валу и, следовательно, мощности P_2 частота вращения ротора n_2 несколько уменьшается, а скольжение — увеличивается. При номинальной нагрузке ($P_2 = P_{2\text{ном}}$) $s_{\text{ном}} = 0,03 \dots 0,06$.

Полезный тормозной момент на валу двигателя

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega_2} = \frac{P_2}{2\pi n_2 / 60} = 9,55 \frac{P_2}{n_2},$$



если частота вращения ротора указана в оборотах в минуту. Так как с увеличением мощности P_2 частота вращения ротора n_2 несколько уменьшается, то зависимость $M(P_2)$ несколько отклоняется от линейной. Электромагнитный вращающий момент M больше момента нагрузки M_2 на значение момента холостого хода M_0 .

Ток статора I_1 определяют по формуле (12.16). Он имеет две составляющие: постоянную I_0 и переменную I'_2 , зависящую от нагрузки. При холостом ходе можно считать, что $I_1 = I_0$, т. е. ток статора равен току холостого хода, значение которого у асинхронных двигателей достигает 40...60% от номинального значения $I_{1\text{ном}}$. При увеличении мощности P_2 увеличиваются ток I'_2 и ток I_1 (рис. 12.25).

На диаграмме (рис. 12.25) рассмотрены четыре значения тока I'_2 . При этом для токов $I'_{2,3}$ и $I'_{2,4}$ учтено увеличение скольжения с увеличением нагрузки и связанное с этим увеличение угла ψ_2 . При увеличении нагрузки ток статора I_1 увеличивается все быстрее. При $P_{2\text{ном}}$ ток $I_{1\text{ном}}$ примерно в два раза больше I_0 .

Так как при холостом ходе $I_1 = I_0$ и его основной составляющей является реактивная составляющая, совпадающая по фазе с магнитным потоком, коэффициент мощности $\cos\varphi_{1,0}$ асинхронных двигателей очень мал (0,15...0,2). С увеличением нагрузки ток статора все в большей степени определяется активной составляющей тока ротора, и $\cos\varphi_1$ увеличивается (это видно из векторной диаграммы, на которой условно принято $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1$). При больших нагрузках, хотя ток ротора I'_2 и увеличивается, но так как одновременно увеличивается угол ψ_2 , уменьшение угла φ_1 прекращается, коэффициент мощности двигателя остается без изменения (в некоторых случаях может даже уменьшиться).

Характеристика $\eta(P_2)$ имеет вид, типичный для электрических машин. Сначала КПД резко увеличивается, начиная от нуля, а затем меняется мало.

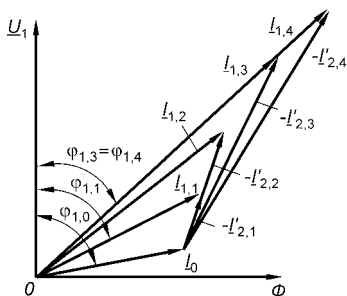
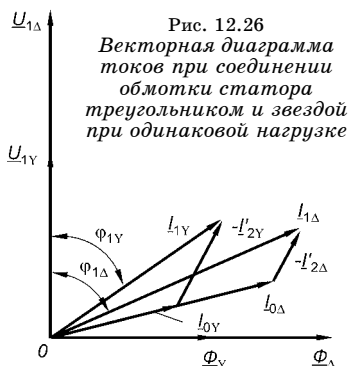


Рис. 12.25
Векторная диаграмма токов для определения изменения тока I_1 и коэффициента мощности $\cos\varphi_1$

Улучшение рабочих характеристик. Как видно из рабочих характеристик (см. рис. 12.24), при малых нагрузках асинхронные двигатели имеют плохие энергетические показатели (ток статора велик, коэффициент мощности и КПД малы). Если асинхронный двигатель длительно эксплуатируется при нагрузках, не превышающих 50% номинальной нагрузки, то встает вопрос либо о его замене двигателем меньшей номинальной мощности, либо об улучшении его рабочих характеристик.



В случае если фазные обмотки двигателя рассчитаны на номинальное напряжение, равное линейному напряжению сети, его обмотки статора должны быть соединены треугольником, о чем уже говорилось ранее. В таком случае удастся улучшить характеристики асинхронного двигателя при малых нагрузках, соединив его обмотки статора звездой. При этом

напряжение, подаваемое на фазные обмотки статора, уменьшается в $\sqrt{3}$ раза, так же уменьшаются магнитный поток и ток холостого хода (последний может уменьшиться и более чем в $\sqrt{3}$ раза, если машина при соединении треугольником работает в области магнитного насыщения).

На рис. 12.26 представлена векторная диаграмма магнитных потоков и токов при соединении обмоток треугольником и звездой, при этом $\Phi_{\Delta} = \sqrt{3}\Phi_Y$, $I_{0\Delta} = \sqrt{3}I_{0Y}$. Определим значения I_1 , $\cos\varphi_1$ и η для случаев соединения обмотки статора треугольником и звездой при одинаковом тормозном моменте на валу. При этом должно быть выполнено равенство $c_m I'_{2Y} \Phi_Y \cos\psi_{2Y} = c_m I'_{2\Delta} \Phi_{\Delta} \cos\psi_{2\Delta}$, или, что то же, $c_m I'_{2Y,a} \Phi_Y = c_m I'_{2\Delta,a} \Phi_{\Delta}$, где $I'_{2Y,a}$, $I'_{2\Delta,a}$ — активные составляющие приведенного тока ротора при соединении обмотки статора звездой и треугольником соответственно.

Зная, что $\Phi_Y = \Phi_{\Delta} / \sqrt{3}$, можно прийти к выводу, что выполняется соотношение $I_{2Y,a} = \sqrt{3}I_{2\Delta,a}$, т. е. активная составляющая тока ротора при соединении обмотки статора звездой в $\sqrt{3}$ раза больше, чем при соединении треугольником.

При малой нагрузке ток статора I_1 в основном определяется током холостого хода, поэтому так как $I_{0Y} < I_{0\Delta}$, то $I_{1Y} < I_{1\Delta}$, что и показано на диаграмме. С другой стороны, ток ротора, имеющий большую активную составляющую, при соединении обмотки статора звездой больше, чем при соединении треугольником. Поэтому $\varphi_{1Y} < \varphi_{1\Delta}$ и коэффициент мощности при малых нагрузках увеличивается: $\cos\varphi_{1Y} > \cos\varphi_{1\Delta}$. КПД двигателя также увеличивается, так как потери в стали магнитопровода $P_{\text{ст.с1}}$, пропорциональные квадрату фазного напряжения, уменьшаются в три раза при соединении обмоток звездой, в то время как потери на нагрев обмоток при малых нагрузках незначительны. На рис. 12.27 показаны некоторые рабочие характеристики для разных схем соединения обмоток статора.

При больших нагрузках ток статора начинает определяться составляющей тока ротора, которая при соединении звездой больше, чем при соединении треугольником, поэтому $I_{1Y} > I_{1\Delta}$. Кроме того, за счет увеличенного скольжения при соединении звездой $\psi_{2Y} > \psi_{2\Delta}$ при одной и той же нагрузке. Это приводит к увеличению угла φ_{1Y} по сравнению с $\varphi_{1\Delta}$ и соотношению $\cos\varphi_{1Y} < \cos\varphi_{1\Delta}$. При резком увеличении тока ротора при больших нагрузках мощность потерь энергии в роторе $P_{\text{р.пр2}}$ увеличивается настолько, что экономия на потерях в стальном магнитопроводе компенсируется и КПД уменьшается.

Таким образом, если обмотки статора асинхронного двигателя в нормальном режиме соединены треугольником, то для улучшения его рабочих характеристик при нагрузках $P_2 < 0,5P_{2\text{ном}}$ выгодно переходить на соединение обмоток статора звездой.

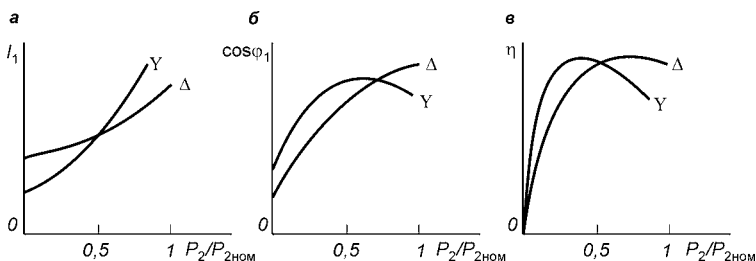


Рис. 12.27

Рабочие характеристики асинхронного двигателя при соединении обмотки статора треугольником и звездой

а — $I_1(P_2)$; б — $\cos\varphi_1(P_2)$; в — $\eta(P_2)$.

12.11. ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Выведению двигателя на нормальный режим предшествует его пуск, в процессе которого он трогается с места и разгоняется до частоты вращения, соответствующей нагрузке. Чтобы двигатель начал вращаться под нагрузкой, необходимо, чтобы его пусковой момент $M_{\text{п}}$ был больше тормозного момента $M_{\text{т}}$, создаваемого рабочим механизмом. Двигатель разгоняется в соответствии с механической характеристикой.

При выполнении условия, что $M_{\text{п}} > M_{\text{т}}$, частота вращения ротора будет увеличиваться от $n_2 = 0$ при пуске до значения, при котором наступит равновесие моментов $M = M_{\text{т}}$.

В момент пуска частота вращения $n_2 = 0$, а скольжение $s = 1$. Пусковой ток ротора $I'_{2\text{п}}$ можно определить по формуле (12.24), в которой $s = 1$:

$$I'_{2\text{п}} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}.$$

Так как в рабочем режиме $s = 0,03...0,06$, т. е. много меньше 1, то $R'_2 \ll R'_2/s$, вследствие чего пусковой ток ротора в несколько раз больше номинального. Пусковой ток статора $I_{1\text{п}} = I_0 - I'_{2\text{п}}$ определяется в основном пусковым током ротора и может превышать номинальное значение тока в 5...7 раз, т. е. $I_{1\text{п}} = (5...7)I_{1\text{ном}}$.

Таким образом, при подаче полного напряжения сети U_1 на обмотку статора имеет место бросок пускового тока, который затем уменьшается по мере разгона двигателя, уменьшения скольжения и увеличения сопротивления R'_2/s . Такое увеличение тока в сети может привести к снижению напряжения, если мощность источника питания соизмерима с мощностью двигателя, что отрицательно скажется на работе других электроприемников, подключенных к тому же источнику энергии. Это может сказаться неблагоприятно и на самом двигателе. Если двигатель разгоняется длительное время или осуществляют его частые пуски, то обмотки могут нагреваться до температуры больше допустимой. Поэтому при пуске двигателя необходимо снижать пусковой ток. Это осуществляют подключением пускового реостата к обмотке



фазного ротора и понижением на период пуска подводимого к статору напряжения U_1 .

При пуске двигателя должны удовлетворяться следующие требования: процесс пуска должен быть простым и осуществляться, по возможности, без сложных пусковых устройств; пусковой момент должен быть достаточно большим, а пусковой ток — по возможности небольшим.

Наибольшее распространение нашли следующие способы пуска:

1) прямой пуск, когда обмотку статора двигателя включают на полное напряжение сети без применения каких-либо вспомогательных устройств;

2) реостатный пуск, при котором на время пуска к обмотке ротора подключают пусковой реостат;

3) пуск при пониженном напряжении, подводимом к обмотке статора.

Прямой пуск. Его применяют при пуске двигателей с короткозамкнутым ротором малой и средней мощности. Основными недостатками этого способа пуска являются большие пусковые токи, превышающие в 5...7 раз номинальный ток, а также небольшой пусковой момент. Однако двигатели малой и средней мощности спроектированы таким образом, что за время пуска пусковые токи не создают чрезмерных электродинамических усилий, опасных для отдельных элементов обмотки статора с точки зрения их механической прочности, и не приводят к недопустимому перегреву обмоток. Поэтому, несмотря на указанные недостатки, прямой пуск широко применяют благодаря простоте пуска и достаточно хорошим технико-экономическим показателям двигателя.

Предельная мощность двигателя при осуществлении прямого пуска зависит от мощности источника питания и требований других электроприемников к допустимому снижению напряжения.

Схема пуска приведена на рис. 12.28.

Пуск с помощью пускового реостата. Этот способ применяют только для двигателей с фазным ротором. Трехфазный пусковой реостат включают последовательно

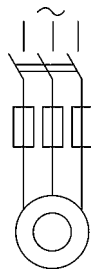
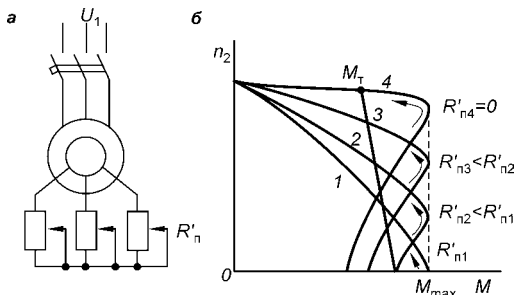


Рис. 12.28
Схема прямого
включения
в сеть асин-
хронного
двигателя
с короткозам-
кнутым
ротором

Рис. 12.29
Пуск
асинхронного
двигателя
с фазным
ротором

а — схема включения пускового реостата; *б* — механические характеристики.



с обмоткой ротора через щетки и кольца (рис. 12.29*а*). В результате сопротивление цепи ротора увеличивается, а пусковой ток ротора

$$I'_{2п} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_п)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}$$

уменьшается и, следовательно, уменьшается пусковой ток двигателя.

Сопротивление пускового реостата $R'_п$ можно подобрать таким, что пусковой момент будет равен максимальному ($M_п = M_{max}$). Для этого необходимо, чтобы $s_{кр} = 1$. Воспользовавшись формулой (12.29), получаем

$$R'_п/X_{кр} = (R'_2 + R'_п)/X_{кр} = 1,$$

откуда сопротивление пускового реостата, приведенное к обмотке статора,

$$R'_п = X_{кр} - R'_2.$$

При включении пускового реостата сопротивлением $R'_{п1} = R'_п$ двигатель трогается с места при $M_п = M_{max}$ (характеристика 1 на рис. 12.29*б*). По мере того, как увеличивается частота вращения двигателя, сопротивление пускового реостата уменьшают. Этому соответствует переход на новую механическую характеристику (2 на рис. 12.29*б*). Когда пусковой реостат полностью выведен, разгон двигателя заканчивается в соответствии с естественной характеристикой 4. Такое изменение сопротивления пускового реостата обеспечивает условия разгона двигателя при моментах, близких к максимальному, благодаря чему сокращается время пуска. Это особенно важно, когда пуск двигателя осуществляют под нагрузкой.

Асинхронные двигатели с фазным ротором сложнее по конструкции и дороже двигателей с короткозамкнутым

ротором. Но в связи с тем, что при пуске они могут развивать максимальный момент, их применяют в установках с тяжелыми условиями пуска (подъемные краны, лебедки и др.).

Пуск при пониженном напряжении. Этот способ применяют для двигателей с короткозамкнутым ротором. Так как вращающий момент пропорционален квадрату напряжения, такой способ пуска применим только при отсутствии нагрузки на валу двигателя.

Если в нормальном режиме обмотки статора двигателя соединены треугольником, то для пуска их соединяют звездой (рис. 12.30), что приводит к уменьшению напряжения на обмотке в $\sqrt{3}$ раза. Во столько же раз уменьшается и фазный ток в обмотке статора. Так как при соединении звездой линейный ток равен фазному, а при соединении треугольником он больше фазного в $\sqrt{3}$ раза, то при переключении обмоток двигателя на звезду линейный ток уменьшается в три раза. Это значит, что пусковой ток в сети при соединении обмотки звездой и вращающий момент также уменьшаются в три раза. После разгона двигателя обмотку статора переключают на треугольник.

Для понижения напряжения на время пуска последовательно с обмоткой статора можно включать элементы с активным (рис. 12.31а) или индуктивным (рис. 12.31б) сопротивлением. После окончания пуска эти элементы шунтируются.

Понизить напряжение и уменьшить пусковой ток можно также с помощью автотрансформатора (см. рис. 12.32). При пуске двигателя автоматический выключатель QF

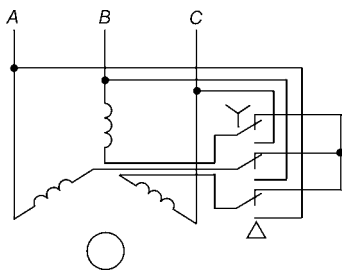


Рис. 12.30
Схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором путем переключения обмотки статора со звезды в треугольник

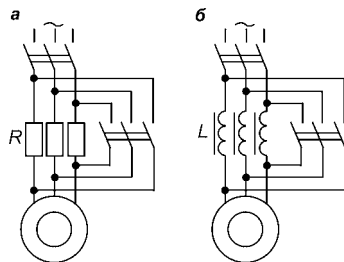


Рис. 12.31
Схемы пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при понижении напряжения с помощью
а — резисторов; б — индуктивных элементов.

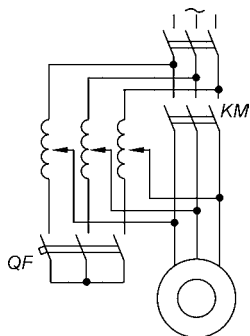


Рис. 12.32
Схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с помощью автотрансформатора

включен, а контактор KM выключен. По мере разгона двигателя с помощью автотрансформатора повышают напряжение. После разгона двигателя выключают QF и включают KM , при этом напряжение сети непосредственно подается на статор двигателя. Эта схема сложнее, дороже и менее надежна по сравнению со схемами, представленными на рис. 12.31.

Улучшение пусковых характеристик двигателей с короткозамкнутым ротором. Из-за большого пускового тока и малого пускового момента мощность двигателя с короткозамкнутым ротором, для которого применим прямой пуск, ограничена. Из анализа механических характеристик (см. рис. 12.22б) видно, что при увеличении сопротивления обмотки ротора пусковой момент увеличивается. Но чтобы такое увеличение сопротивления обмотки ротора иметь только на момент пуска, пазы ротора делают глубокими (см. рис. 12.4в, г). Такие двигатели называют *глубокопазными*. Магнитный поток рассеяния $\Phi_{\text{рас}2}$, создаваемый током ротора (током в отдельном стержне), стремится замкнуться по пути с наименьшим магнитным сопротивлением (рис. 12.33а). Проводник обмотки ротора можно представить состоящим из отдельных элементарных плоских проводников, расположенных друг над другом по высоте паза. Так как в момент пуска частота тока ротора равна частоте тока статора, то элементарные проводники, расположенные внизу паза, сцеплены с большим

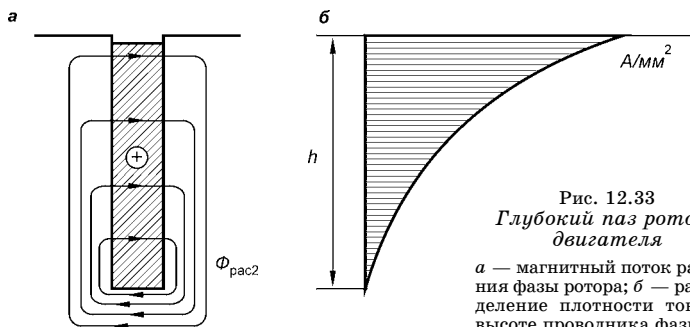


Рис. 12.33
Глубокий паз ротора двигателя

а — магнитный поток рассеяния фазы ротора; б — распределение плотности тока по высоте проводника фазы.

потоком рассеяния большой частоты. Их индуктивное сопротивление в связи с этим настолько велико, что ток в них очень мал (рис. 12.33б). Почти весь ток вытесняется в верхние слои проводника фазы ротора. Это эквивалентно уменьшению сечения проводника, а следовательно, увеличению его активного сопротивления R'_2 , что приводит к увеличению пускового момента.

По мере разгона двигателя частота тока ротора уменьшается и при номинальной частоте вращения достигает 1...3 Гц. При такой частоте индуктивное сопротивление нижних слоев проводника уменьшается, ток равномерно распределяется по всей высоте проводника и активное сопротивление ротора уменьшается, что позволяет получить достаточно высокий КПД двигателя в рабочем режиме. Глубокопазные двигатели обычно имеют мощность не менее 120...150 кВт.

Для улучшения пусковых характеристик применяют также ротор с *двумя короткозамкнутыми обмотками*. Одну из обмоток располагают ближе к поверхности ротора. Ее выполняют из проводников меньшего сечения (иногда из материала с большим удельным сопротивлением — марганцовистой латуни или бронзы). Вторая (внутренняя) обмотка имеет большее сечение, и ее стержни изготовляют из меди. Таким образом, активное сопротивление наружной обмотки больше, чем сопротивление внутренней обмотки. Каждая из обмоток создает свой вращающий момент, а их сумма равна вращающему моменту двигателя.

Картина магнитного потока рассеяния $\Phi_{\text{рас}2}$ такая же (см. рис. 12.34а), как у двигателя с глубоким пазом. В момент пуска, когда частота тока ротора велика, внутренняя обмотка имеет большое индуктивное сопротивление, и ток в ней мал. Поэтому она создает небольшой пусковой момент. Индуктивное же сопротивление наружной обмотки мало, чем обусловлен большой ток в ней, определяемый ее активным сопротивлением. Этот активный ток создает значительный пусковой момент. Поэтому наружную обмотку называют *пусковой*. По окончании разгона двигателя индуктивное сопротивление обмоток уменьшается и ток в них практически определяется их активными сопротивлениями. Так как активное сопротивление внутренней обмотки много меньше, чем наружной обмотки, то основная часть тока ротора в рабочем

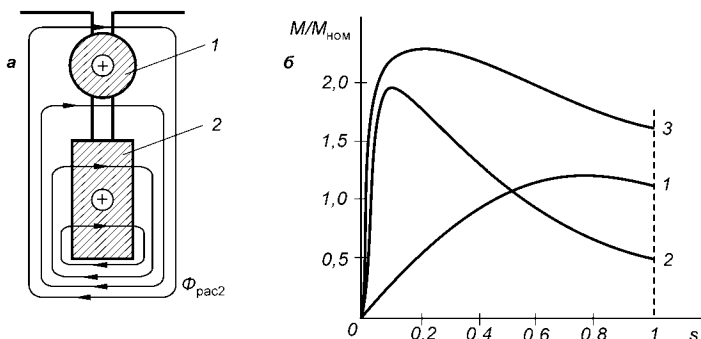


Рис. 12.34

Паз ротора двигателя с двойной клеткой

a — магнитный поток рассеяния ротора: 1 — паз пусковой обмотки, 2 — паз рабочей обмотки; *б* — зависимости моментов от скольжения: 1 — момент пусковой обмотки, 2 — момент рабочей обмотки, 3 — суммарный момент.

режиме замыкается по внутренней обмотке. Поэтому эту обмотку называют *рабочей* обмоткой.

Для пусковой обмотки согласно зависимости $M = f(s)$ (1 на рис. 12.34б) скольжение $s_{кр}$ велико. Для рабочей обмотки (2 на рис. 12.34б) значение $s_{кр}$ такое же, как для обычных короткозамкнутых двигателей. Зависимость суммарного момента $M = f(s)$ характеризуется большим значением пускового момента. Для двигателей с двойной клеткой кратность пускового момента $M_{п}/M_{ном} = 1,3...1,7$, а кратность пускового тока $I_{п}/I_{ном} = 4,5...6$.

Двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками имеют несколько меньший коэффициент мощности, так как углубление паза (или рабочей обмотки) увеличивает поток рассеяния и индуктивное сопротивление ротора.

12.12.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Принципы регулирования частоты вращения ротора можно установить, анализируя формулу (12.4):

$$n_2 = (1 - s)n_1 = (1 - s)\frac{60f}{p},$$

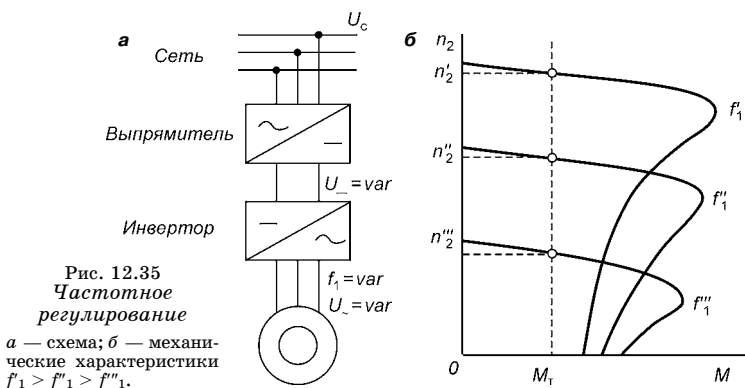
из которой следует, что частоту вращения асинхронного двигателя можно регулировать изменением: а) частоты f питающего напряжения, б) числа полюсов и в) скольжения.

Изменение частоты напряжения сети. Так как синхронная частота вращения n_1 пропорциональна частоте f напряжения питающей сети, то частоту вращения ротора можно регулировать изменением частоты напряжения сети. Для этого необходимо иметь автономный источник питания. В качестве таких источников все более широкое применение находят полупроводниковые преобразователи частоты.

Частотное регулирование обычно совмещают с регулированием напряжения. Если напряжение сети U_1 постоянно, то при изменении частоты напряжения согласно выражению $U_1 = E_1 = c_e f \Phi_m$ изменяется магнитный поток. При увеличении потока магнитная система работает в режиме магнитного насыщения, что приводит к увеличению тока холостого хода и потерь в стали магнитопровода. При уменьшении потока возрастает ток ротора, что приводит к повышенному его нагреву и увеличению потерь мощности.

Существуют различные способы регулирования напряжения и частоты в зависимости от требований, предъявляемых к двигателю. Так, например, если тормозной момент на валу двигателя не изменяется, то частоту и напряжение изменяют так, чтобы магнитный поток в машине оставался неизменным, т. е. подводимое к двигателю напряжение необходимо изменять пропорционально частоте, чтобы отношение напряжения к частоте оставалось постоянным ($U_1/f = \text{const}$).

Один из возможных вариантов частотного регулирования приведен на рис. 12.35.



Здесь переменное напряжение сети U_c с помощью управляемого полупроводникового выпрямителя преобразуется в постоянное напряжение U_- , значение которого можно изменять. Далее это напряжение подают на инвертор, с помощью которого это напряжение преобразуется в переменное напряжение U_- регулируемой частоты f_1 .

Изменение числа пар полюсов. Изменить число пар полюсов можно только для обмотки статора, поэтому этот способ применяют для двигателей с короткозамкнутым ротором. Число пар полюсов можно изменить либо располагая на статоре несколько (обычно две) обмоток, каждая из которых имеет разное число пар полюсов и которые включают не одновременно, либо переключая секции каждой фазной обмотки (соединяя их параллельно, последовательно, согласно или встречно).

На рис. 12.36 показан один из примеров переключения секций (катушек). Рассмотрим одну фазу, ток в которой имеет максимальное значение. Первую катушку составляют проводники 1 и 2, вторую катушку — проводники 3 и 4. При соединении конца первой катушки с началом второй (согласное включение) получим направление токов в проводниках, показанное на рис. 12.36а. При этом число пар полюсов $p = 2$. При соединении конца первой катушки с концом второй (встречное включение) получим $p = 1$ (рис. 12.36б). Частота вращения магнитного потока статора $n_1 = 60f/p$ при таком изменении числа пар полюсов изменится в два раза. Таким образом,

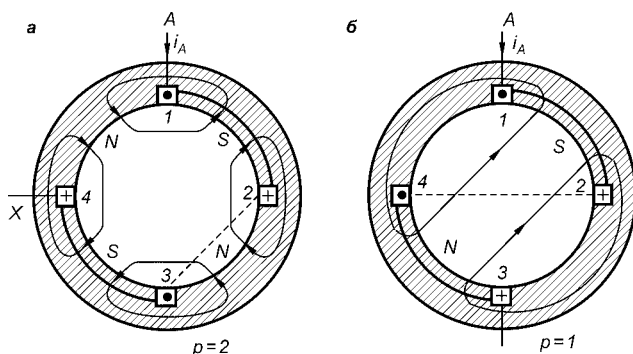


Рис. 12.36

*Изменение числа пар полюсов
при переключении секций обмотки статора
а — согласное включение; б — встречное включение.*

ясно, что регулирование частоты вращения возможно только ступенями. Если на статоре расположены две обмотки, включаемые поочередно, и если возможно включение секций по разным схемам, то двигатель получается *многоскоростным*. Такой двигатель может иметь частоты вращения $n_1 = 3000, 1500, 1000, 500$ об/мин. Примерно такое же соотношение получается для частот вращения ротора n_2 . Многоскоростные двигатели имеют большие массы и габариты, чем двигатели нормального исполнения.

Включение в цепь ротора регулировочных реостатов. Этот способ регулирования частоты вращения применим только для двигателей с фазным ротором. Регулировочные реостаты включают последовательно с фазными обмотками ротора, т. е. аналогично пусковым реостатам (см. рис. 12.29а). В отличие от пусковых регулировочные реостаты рассчитаны на длительный режим работы. При постоянном тормозном моменте на валу двигателя, а следовательно, при постоянном вращающем моменте изменение сопротивления регулировочного реостата приводит к изменению частоты вращения двигателя.

Каждому значению сопротивления R_p соответствует своя механическая характеристика (рис. 12.37а). При $M = \text{const}$ частота вращения двигателя тем меньше, чем больше сопротивление регулировочного реостата. Если сопротивление $R_p = 0$, то двигатель имеет частоту вращения $n_{2,0}$, близкую к синхронной частоте n_1 . Если $R_{p1} > 0$, то $n_{2,1} < n_{2,0}$ и т. д.

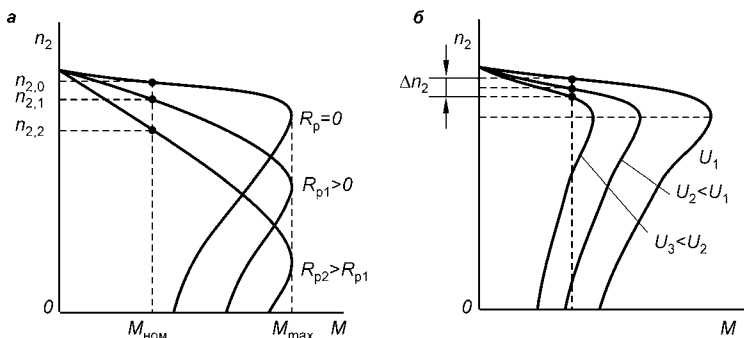


Рис. 12.37
Механические характеристики двигателя

а — при различных значениях сопротивления R_p регулировочного реостата; б — при различных значениях напряжения сети.

Таким образом, регулирование частоты вращения возможно только в сторону ее уменьшения по отношению к синхронной частоте. Обычно изменение сопротивления регулировочного реостата осуществляют ступенями, и поэтому частота вращения также изменяется ступенями. КПД двигателя уменьшается, так как в регулировочных реостатах значительная часть электрической энергии преобразуется в тепловую, поэтому этот способ регулирования частоты вращения двигателя не является экономичным.

Изменение напряжения U_1 . Как видно из формулы (12.25), вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения сети. Следовательно, при изменении напряжения U_1 двигатель имеет семейство механических характеристик (рис. 12.37б) с разными значениями максимального момента M_{\max} при одном и том же значении скольжения $s_{\text{кр}}$. Меняя напряжение от U_1 до U_3 , можно изменить частоту вращения двигателя на Δn_2 . Однако диапазон регулирования частоты вращения у двигателей нормального исполнения очень мал.

Увеличить диапазон регулирования частоты вращения можно, если увеличивать активное сопротивление ротора. Это приводит к увеличению наклона рабочего участка механической характеристики и, следовательно, к увеличению Δn_2 . Но вместе с этим растут потери мощности в обмотке ротора, и КПД двигателя снижается. Поэтому этот способ применяют для микродвигателей, для которых значение КПД несущественно.

Для изменения напряжения на обмотке статора двигателя можно также использовать автотрансформаторы с плавным регулированием напряжения, магнитные усилители, тиристорные регуляторы напряжения и др.

Реверсирование асинхронных двигателей. Ротор асинхронного двигателя вращается в ту же сторону, что и магнитное поле статора. Из этого следует, что для изменения направления вращения ротора необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора. Для этого достаточно изменить чередование фаз напряжения питающей сети, поменяв местами любые два линейных провода на щитке двигателя или источника питания.



12.13. АСИНХРОННАЯ МАШИНА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТОРМОЗА

Рассмотрим ротор асинхронной машины, который вращается в том же направлении, что и магнитный поток, но с частотой $n_2 > n_1$ (это может иметь место при спуске грузов, когда момент, создаваемый грузом, совпадает по направлению с вращающим моментом и ускоряет вращение ротора (рис. 12.38а)). При таком соотношении частот вращения скольжение $s = (n_1 - n_2)/n_1$ становится отрицательным. Активная составляющая тока ротора в соответствии с (12.12)

$$I'_{2a} = I'_2 \cos \psi_2 = \frac{E'_2}{Z'_2} \frac{R'_2}{s}$$

становится также отрицательной, т. е. противоположной вектору ЭДС \underline{E}'_2 (рис. 12.38б). Реактивная составляющая тока ротора

$$I'_{2p} = I'_2 \sin \psi_2 = \frac{E'_2}{Z'_2} X'_2$$

остается индуктивной по отношению к ЭДС \underline{E}'_2 . Вектор тока ротора $\underline{I}'_2 = \underline{I}'_{2a} + \underline{I}'_{2p}$. Ток статора $\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2$, напряжение сети $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{R}_1 \underline{I}_1 + j \underline{X}_1 \underline{I}_1$.

Из векторной диаграммы (рис. 12.38б) видно, что активная составляющая тока статора \underline{I}_{1a} противоположна по фазе напряжению сети. Это означает, что асинхронная машина не потребляет электрическую энергию из сети, а наоборот, отдает ее в сеть. Следовательно, машина перешла в *генераторный режим*.

Частоты тока и напряжения сети одинаковы. Практически асинхронные генераторы на электростанциях не применяют, так как для создания магнитного поля необходим большой реактивный ток. Генераторный режим используют для подтормаживания асинхронных двигателей, например при спуске груза и др.

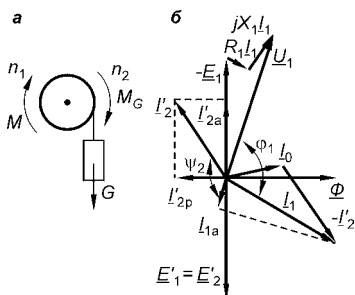


Рис. 12.38
Генераторный режим
асинхронной машины

а — схема создания режима; б —
векторная диаграмма.

Режим, при котором направление вращения ротора асинхронной машины противоположно направлению вращения магнитного потока, называют *режимом электромагнитного тормоза*. Его применяют для экстренного торможения асинхронного двигателя (рис. 12.39), осуществляемого путем изменения направления вращения магнитного поля статора, в то время как ротор продолжает вращение в прежнем направлении. Этот способ торможения называют также *торможением противовключением*. В таком режиме ротор быстро тормозится, и, когда частота его вращения станет равной или близкой к нулю, напряжение сети отключают.

В режиме электромагнитного тормоза скольжение $s = (n_1 - (-n_2))/n_1 > 1$. Следовательно, сопротивление ротора

$$Z'_2 = \sqrt{(R'_2/s)^2 + X_2'^2}$$

уменьшается по сравнению с сопротивлением в момент пуска ($s = 1$), а ток ротора и соответственно ток статора становятся больше пускового тока. Поэтому режим электромагнитного тормоза применяют только для двигателей с фазным ротором. Одновременно с изменением направления вращения магнитного поля статора к фазной обмотке ротора обычно подключают добавочный реостат для уменьшения токов ротора и статора. Сопротивление добавочного реостата выбирают таким, при котором $s_{кр} > 1$.

Зависимость вращающего момента асинхронной машины в различных режимах работы представлена на рис. 12.40.

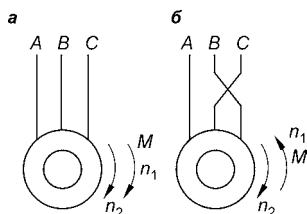


Рис. 12.39
Схемы включения асинхронной машины в режиме электромагнитного тормоза
а — исходная; б — экстренное торможение.

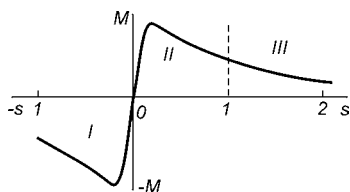


Рис. 12.40
Зависимость $M = f(s)$ для разных режимов асинхронной машины

I — генераторный; II — двигательный; III — электромагнитного торможения.

12.14. ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Во многих производственных механизмах и устройствах вращательное движение ротора электродвигателя преобразуется в поступательное или возвратно-поступательное движение рабочих органов (подъемно-транспортные машины, механизмы подачи станков, прессы, молоты и т. д.). Для преобразования вращательного движения в линейное применяют специальные механические передачи

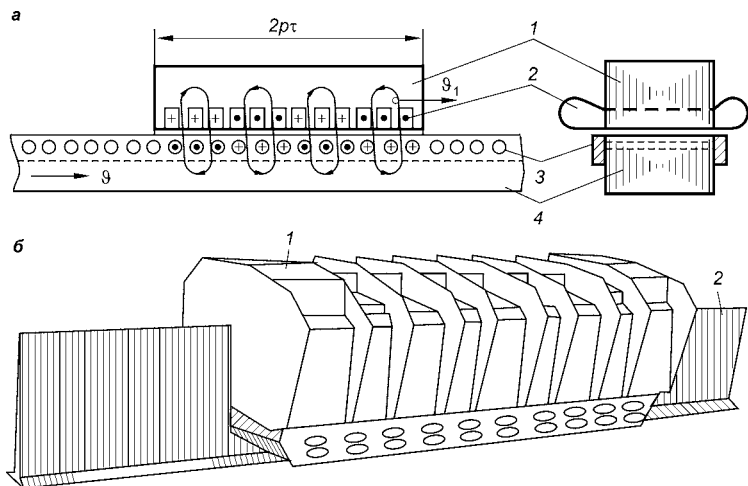


Рис. 12.41
Линейный асинхронный двигатель
а — односторонний; б — двухсторонний.

(кривошипно-шатунный механизм и др.). Это промежуточное звено можно исключить или упростить, применяя линейные асинхронные электродвигатели (ЛАД).

В линейном асинхронном двигателе статор 1 (рис. 12.41) представляет собой линейный магнитопровод, в пазах которого размещают трехфазную обмотку, состоящую, как и в трехфазном двигателе, из трех фазных обмоток, смещенных в пространстве относительно друг друга на некоторый одинаковый угол.

Ротор 3 (рис. 12.41а) может иметь конструкцию, подобную ротору обычной асинхронной машины, но развернутому в плоскости. Чаще всего ротор линейного асинхронного двигателя представляет собой сплошную проводящую алюминиевую полосу, уложенную на сплошной

или шихтованный сердечник 4 из электротехнической стали (см. рис. 12.41а), в зависимости от требований, предъявляемых к двигателю. Такой двигатель называют односторонним (ОЛАД).

Линейный асинхронный двигатель может быть конструктивно выполнен таким образом, что его статор 1 состоит из двух одинаковых магнитопроводов с обмотками, в зазоре между которыми находится ротор 2 в виде сплошной вертикально расположенной токопроводящей полосы (рис. 12.41б). Такой линейный асинхронный двигатель называют двухсторонним (ДЛАД).

Принцип действия линейного асинхронного двигателя аналогичен принципу действия трехфазного асинхронного двигателя. При подключении его обмотки статора к трехфазному источнику напряжений возникающая при этом трехфазная система токов образует бегущее вдоль воздушного зазора магнитное поле. Линейная скорость движения v_1 поля относительно статора пропорциональна частоте f напряжения сети и длине полюсного деления τ : $v_1 = 2\tau f$. Бегущее магнитное поле индуцирует в роторе ЭДС, под действием которой в нем возникает ток. Взаимодействие тока с бегущим магнитным полем создает силу, которая направлена в сторону движения магнитного поля, как и в асинхронном двигателе нормального исполнения. Такая же сила действует и на статор. Если статор двигателя неподвижен, а вторичный элемент (ротор) установлен на подвижном элементе (тележке), то тележка будет перемещаться в направлении движения магнитного поля, аналогично ротору в трехфазном асинхронном двигателе. Если, наоборот, статор ЛАД установлен на подвижном элементе (тележке), а ротор неподвижен (см. рис. 12.41б), то под действием возникающей силы подвижный элемент (тележка) будет перемещаться в направлении, противоположном движению магнитного поля.

Как и в трехфазном асинхронном двигателе, скорость перемещения подвижного элемента всегда меньше скорости бегущего магнитного поля. Относительную разность скоростей движения поля и подвижного элемента в ЛАД оценивают скольжением, под которым в данном случае понимают величину, равную $s = (v_1 - v_2)/v_1$, где v_2 — линейная скорость перемещения подвижного элемента. При номинальной нагрузке скольжение имеет

примерно такие же значения, как и в асинхронных двигателях традиционного исполнения.

Поскольку воздушный зазор в ЛАД в силу их конструктивных особенностей значительно больше, чем в асинхронных двигателях нормального исполнения (до 50 мм), возрастает и ток холостого хода, поэтому энергетические показатели ЛАД значительно хуже, чем у обычных асинхронных двигателей. Так, коэффициент мощности и КПД у линейных асинхронных двигателей не превышают, как правило, следующих значений: $\cos\varphi_1 = 0,4...0,5$, а $\eta = 0,6...0,7$.

Несмотря на это, ЛАД все чаще используют в приводах металлообрабатывающих станков для получения возвратно-поступательного перемещения обрабатываемых деталей, в приводе тележек подъемных кранов, в качестве тяговых двигателей для высокоскоростного наземного транспорта и др.

12.15. ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

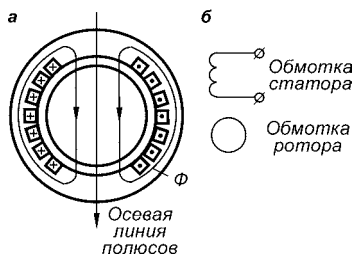
Ротор однофазного двигателя выполняют, как правило, с короткозамкнутой обмоткой. На статоре двигателя располагают одну фазную обмотку (рис. 12.42а), занимающую примерно $\frac{2}{3}$ окружности статора. Переменный ток в обмотке статора, изменяющийся во времени по синусоидальному закону, создает, как было показано в § 12.3, пульсирующее магнитное поле, магнитная индукция которого распределена в воздушном зазоре по синусоидальному закону, т. е.

$$B(t, \alpha) = B_m \sin \omega t \cos \alpha,$$

где α — пространственный угол, отсчитываемый от оси фазной обмотки.

Рис. 12.42
Однофазный
асинхронный
двигатель

а — расположение обмотки на статоре; б — изображение на электрических схемах.



Пользуясь формулой $2\sin\alpha\cos\beta = \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)$, известной из тригонометрии, это пульсирующее магнитное поле, неподвижное в пространстве, можно заменить суммой двух идентичных магнитных полей, вращающихся относительно статора с одинаковой частотой

$$n_1 = \frac{60f}{p},$$

но в противоположных направлениях

$$B(t, \alpha) = \frac{1}{2} B_m \sin(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} B_m \sin(\omega t + \alpha) = B_I(t, \alpha) + B_{II}(t, \alpha).$$

При неподвижном роторе эти поля создают одинаковые вращающие моменты, направление которых, как и в трехфазном асинхронном двигателе, совпадает с направлением вращения магнитных полей. Так как магнитные поля вращаются в противоположных по отношению к статору направлениях, то создаваемые ими вращающие моменты действуют на ротор также в противоположных направлениях и пусковой момент двигателя при этом оказывается равным нулю.

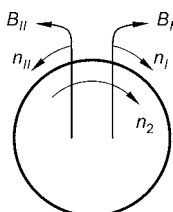


Рис. 12.43
К определению
скольжений
 s_I и s_{II}

Допустим, что ротор под действием каких-либо причин вращается. Магнитное поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, называют *прямым*, магнитное поле противоположного направления называют *обратным* (см. рис. 12.43). Обозначим частоту вращения ротора в направлении прямого поля n_2 . Тогда скольжение по отношению к прямому полю

$s_I = (n_1 - n_2)/n_1 = 1 - n_2/n_1$, а по отношению к обратному полю $s_{II} = (n_1 + n_2)/n_1 = 1 + n_2/n_1 = 2 - s_I$.

При пуске двигателя $s_I = 1$ и $s_{II} = 1$. Если $s_I = 0$, то $s_{II} = 2$, а если $s_I = 2$, то $s_{II} = 0$.

Прямое и обратное вращающиеся магнитные поля создают вращающие моменты

$$M_I = \frac{c'_m \frac{R'_2}{s_I}}{(R'_2/s_I)^2 + X_K^2}, \quad M_{II} = \frac{c'_m \frac{R'_2}{s_{II}}}{(R'_2/s_{II})^2 + X_K^2},$$

которые зависят от скольжения так же, как в трехфазных асинхронных двигателях (см. рис. 12.21). С учетом связи между s_I и s_{II} и того, что моменты M_I и M_{II} проти-

воположны по направлению, на рис. 12.44 построены зависимости $M_I(s_I)$, $M_{II}(s_{II})$ и суммарный момент $M(s)$.

Анализируя эти зависимости, можно сделать следующие выводы.

1. Однофазный двигатель, как уже отмечалось ранее, не имеет пускового момента (при $s_I = s_{II} = 1$ вращающий момент $M = M_{II} = 0$), и для того чтобы ротор начал вращаться, к его валу нужно кратковременно приложить внешний момент $M_{вн}$, превышающий тормозной момент M_T на валу. В результате двигатель начнет вращаться самостоятельно в направлении приложенного внешнего момента.

2. Частота вращения даже при холостом ходе у однофазного асинхронного двигателя меньше, чем у трехфазного, так как обратное магнитное поле создает тормозной момент на валу.

3. Рабочие характеристики этого двигателя также хуже, чем у трехфазного.

4. Однофазный двигатель имеет меньшую перегрузочную способность, так как максимальное значение M_{\max} вращающего момента меньше максимального значения момента M_I .

Однофазный асинхронный двигатель с пусковой обмоткой. Для пуска в ход однофазного асинхронного двигателя применяют специальную *пусковую обмотку (ПО)*, располагаемую на статоре под углом 90° к *рабочей (РО)*, как это изображено на рис. 12.45а. Последовательно с пусковой обмоткой включают фазосдвигающий элемент, например конденсатор C , благодаря которому ток I_{II} в этой обмотке опережает по фазе напряжение сети U_1 на некоторый угол. Применение пусковой обмотки обеспечивает выполнение двух необходимых условий для получения вращающегося магнитного поля (сдвиг обмоток статора в пространстве и сдвиг токов в обмотках по фазе на некоторый угол).

Пусковую обмотку включают только на время пуска. Благодаря ей в двигателе образуется вращающееся магнитное поле и возникает пусковой момент $M'_п$ (см. рис. 12.46).

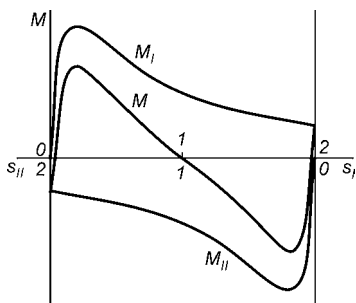


Рис. 12.44
Зависимость
вращающих моментов
от скольжения

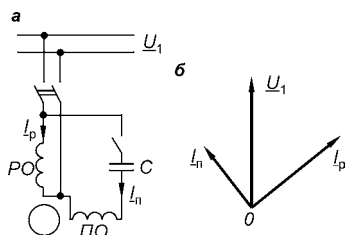


Рис. 12.45

Однофазный асинхронный двигатель с пусковой обмоткой

а — электрическая схема; б — векторная диаграмма токов.

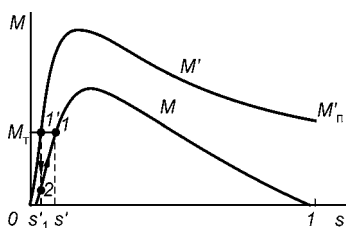


Рис. 12.46

Зависимость вращающих моментов от скольжения однофазного двигателя с пусковой обмоткой

Если пусковой момент окажется больше тормозного момента на валу, то двигатель будет разгоняться в соответствии с зависимостью $M'(s)$. Разгон двигателя закончится в точке 1', когда вращающий момент станет равным тормозному ($M' = M_T$). После этого пусковую обмотку отключают. Теперь магнитное поле в двигателе создается только рабочей обмоткой и его режим работы определяется зависимостью $M(s)$. При отключении пусковой обмотки благодаря моменту инерции частота вращения ротора мгновенно измениться не может, поэтому скольжение остается равным s'_1 (рис. 12.46), а рабочей точкой становится точка 2 на кривой $M(s)$. Так как тормозной момент M_T остается неизменным, то для точки 2 имеем $M < M_T$. Двигатель начинает тормозиться, скольжение s увеличивается, вращающий момент увеличивается, и в точке 1 кривой $M(s)$ наступает равенство моментов ($M = M_T$). Двигатель переходит в новый установившийся режим работы при несколько большем скольжении s' .

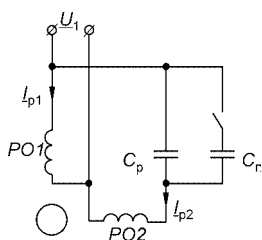


Рис. 12.47

Электрическая схема конденсаторного двигателя с рабочей и пусковой обмотками

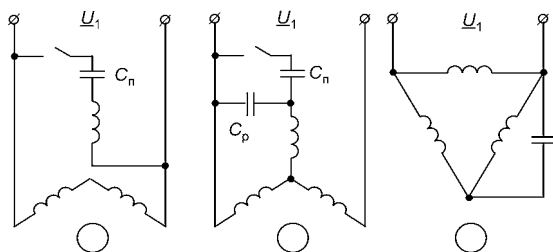
Промышленность выпускает однофазные двигатели с двумя рабочими обмотками. С одной из них последовательно включают рабочий конденсатор с емкостью C_p (рис. 12.47). Такой двигатель называют *конденсаторным*. Для получения большего пускового момента параллельно с рабочим конденсатором C_p включают пусковой конденсатор с емкостью C_n , который отключают после окончания пуска. Коэффициент

мощности конденсаторного двигателя выше, чем однофазного, и достигает значений 0,8...0,95, а КПД — 0,5...0,7.

Преимуществом однофазного двигателя является то, что для его питания не требуется трехфазный источник напряжения. Но он имеет существенные недостатки, среди которых — низкий коэффициент мощности и КПД, меньшая перегрузочная способность. Однофазные двигатели с пусковой обмоткой выпускаются на мощность до 600 Вт.

Трехфазный асинхронный двигатель в однофазном режиме. Трехфазный асинхронный двигатель может оказаться в однофазном режиме при обрыве одного из линейных проводов (перегорание предохранителя, повреждение провода или нарушение контакта). Если это происходит

Рис. 12.48
Возможные
схемы
включения
трехфазных
асинхронных
двигателей
в однофазную
сеть



до пуска двигателя, то обмотки статора создают пульсирующее, а не вращающееся магнитное поле, и двигатель с места не тронется, так как он по сути становится однофазным и его пусковой момент равен нулю (будет слышно лишь гудение, вызванное пульсирующим магнитным полем). Если обрыв происходит при работе двигателя, то двигатель продолжает вращаться. При тяжелых условиях работы (при большом тормозном моменте M_T) может оказаться, что максимальное значение вращающего момента в однофазном режиме меньше тормозного момента. В этом случае двигатель остановится, и если защитные устройства его не отключат, то его обмотки статора сгорят.

Трехфазный асинхронный двигатель может быть использован при питании от однофазной сети. Возможные схемы включения приведены на рис. 12.48.

Однофазный двигатель с расщепленными полюсами. Статор такого двигателя (см. рис. 12.49а) имеет явно выраженные полюсы 1, на которых располагают сосредоточенную обмотку 2, подключаемую к однофазному источнику питания. С внутренней стороны полюсы имеют

аксиальный паз, который делит поперечное сечение полюса на две неравные части, меньшая из которых охватывается короткозамкнутым витком 3. Ротор этого двигателя — короткозамкнутый. Такой двигатель называют также *двигателем с экранированными полюсами*.

Магнитный поток, созданный током I_1 в обмотке статора, делится на две части: $\Phi_{\text{п}}$ — поток через часть полюса, не охваченную витком; $\Phi'_{\text{п}}$ — поток через часть полюса, охваченную витком (рис. 12.49б). Переменный поток $\Phi'_{\text{п}}$ индуцирует в короткозамкнутом витке ЭДС $E_{\text{к}}$, отстающую по фазе от потока $\Phi'_{\text{п}}$ на $\pi/2$. Под действием этой ЭДС в витке возникает ток, практически совпадающий с ней по фазе и создающий магнитный поток $\Phi'_{\text{к}}$. Суммарный поток через экранированную часть полюса $\Phi_{\text{к}} = \Phi'_{\text{п}} + \Phi'_{\text{к}}$.

Потоки $\Phi_{\text{п}}$ и $\Phi_{\text{к}}$ (рис. 12.49а) сдвинуты в пространстве на угол α , что обеспечивает выполнение первого условия получения вращающегося магнитного поля. Как видно из векторной диаграммы, потоки $\Phi_{\text{п}}$ и $\Phi_{\text{к}}$ и, следовательно, создающие их МДС сдвинуты относительно друг друга на угол γ , т. е. выполнено и второе условие. Таким образом, благодаря расщеплению полюсов и короткозамкнутому витку, в двигателе создается вращающееся магнитное поле. При этом возникает вращающий момент, под действием которого ротор вращается в сторону экранированной части полюса.

Мощность таких двигателей — от долей ватта до 300 Вт. Недостатки двигателя — отсутствие реверса, низкие КПД (до 20...40%) и коэффициент мощности (0,4...0,6).

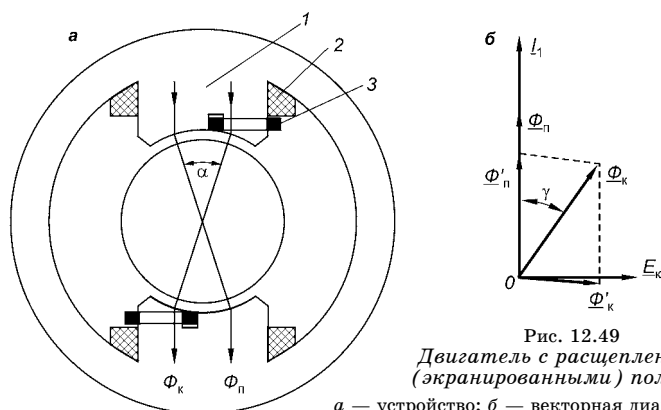


Рис. 12.49

Двигатель с расщепленными (экранированными) полюсами

а — устройство; б — векторная диаграмма.

12.16. ОДНОФАЗНЫЙ КОЛЛЕКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Однофазный коллекторный двигатель (ОКД) с последовательной обмоткой возбуждения включают в электрическую сеть переменного тока, как показано на рис. 12.50, где Я — якорь, устройство которого не отличается от устройства якоря в машинах постоянного тока, ОВ — последовательная обмотка возбуждения, ДП — добавочные полюсы, предназначенные для улучшения коммутации (для уменьшения искрения под щетками), КО — компенсационная обмотка для компенсации реакции якоря (см. § 11.6) и повышения коэффициента мощности $\cos \varphi$. Добавочные полюсы и компенсационную обмотку устанавливают только в двигателях большой мощности. Щетки устанавливают на линии геометрической нейтрали, как и в машинах постоянного тока.

Сердечник статора выполняют из листовой электротехнической стали, что обусловлено необходимостью снижения потерь энергии от вихревых токов в этих участках магнитной цепи, так как магнитный поток в них изменяется во времени с частотой f напряжения сети.

При включении ОКД в сеть переменный ток $i = I_m \sin \omega t$ в обмотке возбуждения ОВ создает магнитодвижущую силу $F = \omega i$, совпадающую по фазе с током, которая в свою очередь создает в машине переменный магнитный поток $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \alpha)$. Отставание магнитного потока от тока по фазе на некоторый

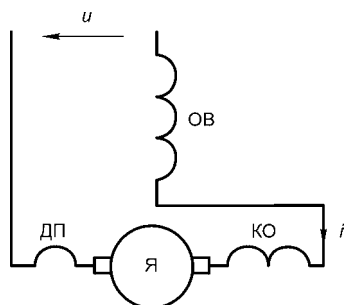


Рис. 12.50
Схема включения

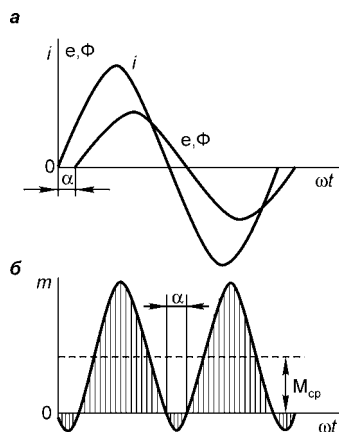


Рис. 12.51
Временные диаграммы

а — тока, магнитного потока, ЭДС;
б — вращающего момента.

угол α обусловлено потерями в стали магнитопровода от вихревых токов. Временные диаграммы тока i и магнитного потока Φ показаны на рис. 12.51а.

Принцип действия ОКД, как и двигателя постоянного тока, основан на силовом взаимодействии магнитного поля и проводников с током, поэтому для мгновенного значения вращающего момента ОКД можем написать следующее выражение:

$$m = C_m i \Phi = C_m I_m \Phi_m \sin \omega t \sin(\omega t - \alpha).$$

Временная диаграмма вращающего момента показана на рис. 12.51б. Из нее видно, что вращающий момент изменяется во времени с удвоенной частотой по сравнению с частотой изменения тока и магнитного потока и большую часть времени имеет положительное значение. Среднее значение вращающего момента за время одного периода

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = c_m I \Phi_m \cos \alpha.$$

Поскольку якорь обладает моментом инерции, он вращается практически с постоянной скоростью, как будто на его валу действует постоянный вращающий момент, равный среднему значению.

Переменный магнитный поток Φ , созданный обмоткой возбуждения, индуцирует в обмотке вращающегося якоря ЭДС вращения $\underline{E} = c_e n \Phi_m$, совпадающую по фазе с магнитным потоком.

В ОКД обмотки якоря и возбуждения кроме активного сопротивления $r_{\text{я}}$ и $r_{\text{в}}$ обладают индуктивными сопротивлениями $x_{\text{я}}$ и $x_{\text{в}}$, обусловленными потоком главных полюсов, а также потоками реакции якоря и рассеяния.

По аналогии с двигателем постоянного тока уравнение напряжения для ОКД имеет вид

$$\underline{U} = \underline{E} + r\underline{I} + jx\underline{I} = \underline{E} + \underline{Z}\underline{I},$$

где $r = r_{\text{я}} + r_{\text{в}}$ и $x = x_{\text{я}} + x_{\text{в}}$ — суммарные активное и индуктивное сопротивления обмоток.

В соответствии с уравнением напряжения на рис. 12.52 построена векторная диаграмма ОКД. Наличие индуктивного сопротивления приводит к сдвигу фаз φ между напряжением \underline{U} и током двигателя \underline{I} . В номинальном режиме коэффициент мощности обычно составляет

$\cos \varphi_{\text{ном}} \approx 0,7 \dots 0,95$ и тем больше, чем больше частота вращения.

Механические и рабочие характеристики ОКД и двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением имеют одинаковый вид (см. § 11.15). Способы регу-

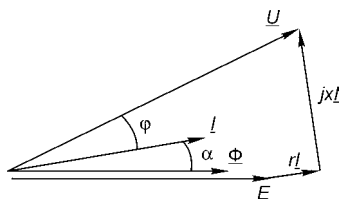


Рис. 12.52
Векторная
диаграмма двигателя

лирования частоты вращения аналогичны таковым в машинах постоянного тока (см. § 11.13). КПД однофазных коллекторных двигателей несколько ниже, чем КПД двигателей постоянного тока, вследствие наличия потерь энергии от вихревых токов в магнитной цепи. Пуск двигателя, как правило, осуществляют прямым включением в сеть.

К положительным качествам двигателя относят: возможность получения больших частот вращения при частоте напряжения в сети 50 Гц ($n = 3000 \dots 30\,000$ об/мин); возможность простого, плавного, широкого и экономичного регулирования частоты вращения.

Недостатком этих двигателей является значительное искрение в щеточном контакте, что является источником радиопомех.

Однофазные коллекторные двигатели малой мощности находят широкое применение в промышленных и бытовых устройствах, когда требуются большие частоты вращения или регулирование частоты вращения (ручной электроинструмент, шлифовальные машины, пылесосы и др.).

Для бытовой техники и электроинструмента отечественная промышленность выпускает однофазные коллекторные двигатели типа КНЦ-250, КНЦ-370 и КНЦ-750 мощностью 250, 370 и 750 Вт при частотах вращения 12 000...15 000 об/мин и КПД $\eta = 0,65 \dots 0,74$.

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

13.1.
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Синхронная машина — это машина переменного тока, у которой в установившемся режиме магнитное поле, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор имеют одинаковую частоту вращения $n = 60f/p$.

На современных электростанциях электроэнергию вырабатывают *синхронными генераторами*, которые приводятся во вращение паровыми или гидравлическими турбинами. В первом случае синхронные генераторы называют *турбогенераторами*, во втором — *гидрогенераторами*. Это самые крупные электрические машины переменного тока. В настоящее время построен турбогенератор мощностью 1200 МВт и напряжением 24 кВ, который установлен на Костромской ГРЭС. Гидрогенератор Саяно-Шушенской ГЭС имеет мощность 640 МВт. На автономно работающих электростанциях (удаленные малонаселенные районы, лесоразработки, горные предприятия) синхронные генераторы имеют небольшую мощность и приводятся во вращение дизельными двигателями (дизель-генераторы) или газовыми турбинами. Мощные дизель-генераторные установки применяют и на морских судах.

Применяют синхронные машины также в качестве двигателей. *Синхронные двигатели* имеют постоянную частоту вращения, поэтому их применяют там, где нет необходимости регулировать частоту вращения или где она должна быть постоянной. Синхронные двигатели имеют большую мощность (от 50 кВт до десятков тысяч киловатт). Их применяют на металлургических заводах,

в шахтах и других предприятиях для привода мощных насосов, компрессоров, непрерывных нерегулируемых прокатных станов и т. д. Они имеют очень хорошие энергетические показатели (коэффициент мощности и КПД) и в таких областях использования находятся практически вне конкуренции с другими электрическими машинами.

Имеются также специальные синхронные микродвигатели мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт, используемые в схемах автоматики, звукозаписи, для вращения ленты самопишущих приборов и в других случаях, требующих строгого постоянства частоты вращения.

Синхронные генераторы и двигатели могут служить источником реактивной энергии. Однако выпускаются и специальные синхронные машины, называемые *синхронными компенсаторами*, которые предназначены для генерирования только реактивной энергии.

Промышленность выпускает и целый ряд специальных синхронных машин, таких как индукторные машины, машины с катящимся ротором, с когтеобразными полюсами, шаговые двигатели и др., конструкция и принцип действия которых изложены в литературе по электрическим машинам и здесь не рассматриваются.

13.2. УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ МАШИН

Статор синхронных машин имеет такое же устройство, как и статор асинхронной машины. Трехфазную обмотку, размещенную в пазах сердечника статора, выполняют с таким же числом полюсов, как и ротор. В синхронных машинах обмотку статора принято называть *обмоткой якоря*, а сердечник статора вместе с обмоткой — *якорем*. Однако статор синхронных машин имеет и некоторые конструктивные особенности, обусловленные необходимостью его интенсивного охлаждения, так как в крупных синхронных машинах мощность потерь энергии, преобразующейся в тепловую, очень велика. Так, например, в турбогенераторе ТЭВ-800-2, номинальная мощность которого составляет 800 МВт при КПД $\eta_{\text{ном}} = 98,86\%$, мощность потерь в номинальном режиме составляет 9,12 МВт, из них 7,16 МВт — мощность

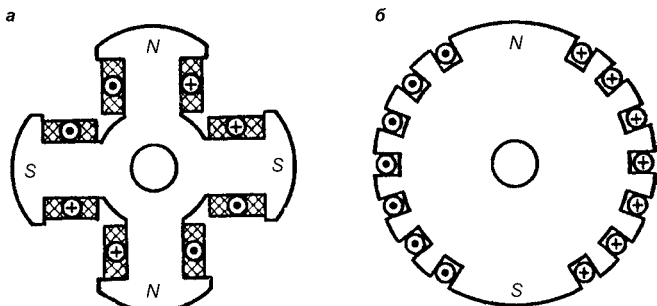


Рис. 13.1
 Поперечные сечения роторов синхронной машины
 а — явнополюсного; б — неявнополюсного.

потерь в якоре. Поэтому в таких крупных машинах в системах охлаждения в качестве хладагентов используют водород, трансформаторное масло и дистиллированную воду. Так, в турбогенераторе ТЭВ-800-2 применяют полное водяное охлаждение (статор и ротор охлаждаются водой). Применяют и комбинированные системы охлаждения: статор охлаждают водой, а ротор — водородом и др. В машинах относительно небольшой мощности используют также и воздушное принудительное охлаждение.

Ротор синхронных машин конструктивно выполняют либо явнополюсным (с явно выраженными полюсами), либо неявнополюсным (с неявно выраженными полюсами), поперечные сечения которых показаны на рис. 13.1. На роторе располагают *обмотку возбуждения*. Ее подключают к источнику постоянного напряжения, называемого *возбудителем*. Таким образом, ротор синхронной машины имеет свой магнитный поток, который определяет полярность его полюсов. В этом заключается принципиальное конструктивное отличие ротора синхронной машины от ротора асинхронной машины, полярность полюсов которого всегда определяется полярностью полюсов статора.

Неявнополюсный ротор, как правило, изготовляют как единое целое из стальной поковки, используя для этого особо прочную сталь, обладающую высокими магнитными и механическими свойствами. Обмотку возбуждения закладывают в пазы, выфрезерованные на наружной поверхности ротора, и она создает магнитное поле

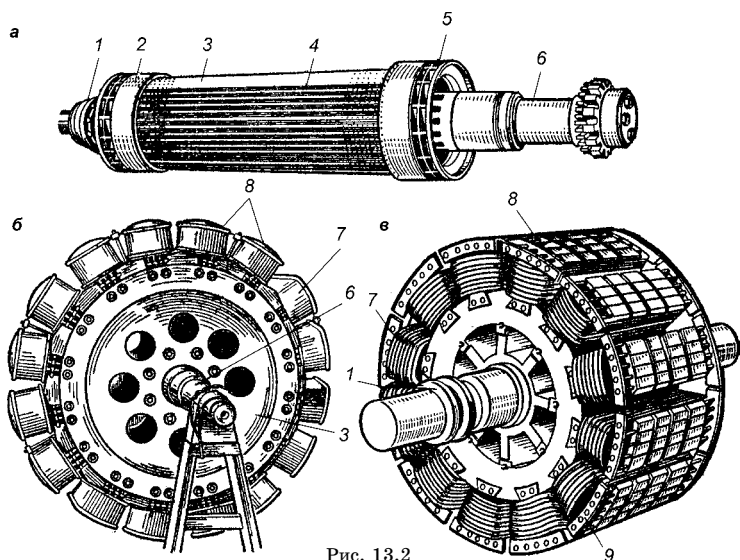


Рис. 13.2
Общий вид роторов

а — турбогенератора; *б* — гидрогенератора; *в* — синхронного двигателя. 1 — контактные кольца; 2 — кольцевые бандажи; 3 — ротор; 4 — металлические клинья; 5 — вентилятор; 6 — вал; 7 — обмотка возбуждения; 8 — полюсы; 9 — пусковая обмотка.

с двумя или четырьмя полюсами, если ее подключить к источнику постоянного напряжения. Такой ротор применяют в синхронных машинах при частотах вращения вала 3000 об/мин и 1500 об/мин (в турбогенераторах и синхронных двигателях). Общий вид неявнополюсного ротора турбогенератора показан на рис. 13.2*а*.

Чтобы составить представление о габаритных размерах мощных турбогенераторов, приведем лишь некоторые из них для турбогенератора ТЭВ-800-2: диаметр сердечника статора внутренний — 1,2 м, наружный — 1,4 м; наружный диаметр корпуса статора — 4,28 м; наружный диаметр ротора — около 1,2 м; длина сердечника ротора — 7,1 м, полная длина ротора — 14,29 м.

Явнополюсный ротор применяют в гидрогенераторах, синхронных двигателях и компенсаторах, в которых частота вращения, как правило, не превышает 1000 об/мин. Внешний вид роторов таких машин показан на рис. 13.2*б*, *в*. Сердечники полюсов изготовляют из листовой электротехнической стали. Число полюсов, на которых размещают обмотку возбуждения, может быть

достаточно большим, особенно в гидрогенераторах. Это связано с тем, что гидравлические турбины — тихоходные машины, и чтобы получить промышленную частоту напряжения $f = pn/60 = 50$ Гц при малой частоте вращения n , необходимо иметь большое число пар полюсов p . Так, например, гидрогенераторы, установленные на Саяно-Шушенской ГЭС, имеют частоту вращения $n = 142,8$ об/мин и число пар полюсов $p = 21$. По этой причине наружный диаметр ротора мощных гидрогенераторов может достигать 16 м при длине 1,75 м. С целью снижения механической нагрузки на вал в мощных гидрогенераторах вал ротора располагают вертикально. Внешний вид гидрогенератора с таким конструктивным исполнением показан на рис. 13.3.

Синхронные двигатели изготавливают, как правило, с горизонтальным расположением вала. При частоте вращения 3000 об/мин они имеют ротор с неявно выраженными полюсами, а при частоте вращения от 100 до 1000 об/мин — с явно выраженными полюсами. В машинах небольшой мощности такое исполнение ротора иногда применяют и при частотах вращения 1500 об/мин. В явнополюсных двигателях в полюсные наконечники укладывают короткозамкнутую обмотку, называемую *пусковой*, аналогичную короткозамкнутой обмотке ротора в асинхронных машинах (рис. 13.4). Она предназначена

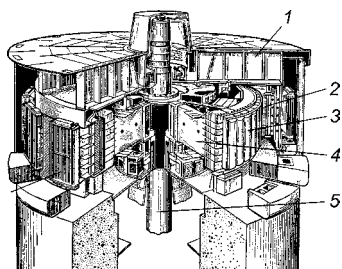


Рис. 13.3
Общий вид
гидрогенератора
с вертикальным
расположением вала
1 — верхняя крестовина; 2 —
статор; 3 — полюсы ротора,
4 — обод ротора; 5 — вал.

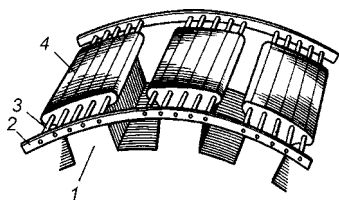


Рис. 13.4
Устройство пусковой
обмотки в явнополюсных
синхронных машинах
1 — сердечник полюса; 2 —
короткозамыкающие кольца;
3 — стержни пусковой обмотки;
4 — полюсный наконечник.

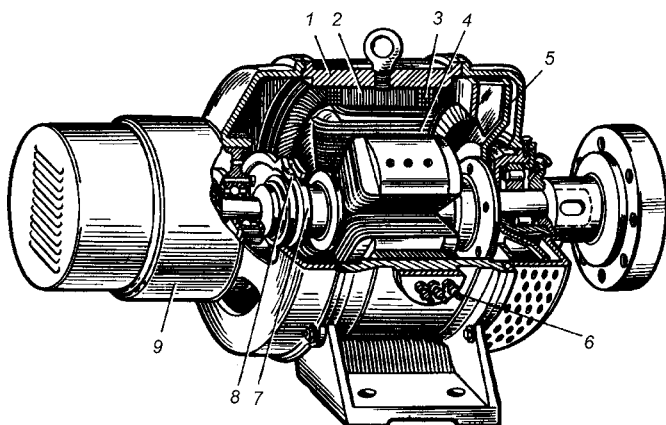


Рис. 13.5

Устройство явнополюсной машины небольшой мощности

1 — корпус; 2 — сердечник статора; 3 — обмотка якоря; 4 — ротор;
5 — вентилятор; 6 — выводы обмотки якоря; 7 — контактные кольца;
8 — щетки; 9 — возбудитель.

для осуществления асинхронного пуска синхронных двигателей и повышения устойчивости работы двигателя.

Синхронные компенсаторы выполняют только в явнополюсном исполнении с горизонтальным расположением вала.

Устройство синхронной машины небольшой мощности с явнополюсным ротором показано на рис. 13.5.

Системы возбуждения. Системой возбуждения называют совокупность электрических машин, аппаратов и устройств, предназначенных для питания обмоток возбуждения синхронных машин постоянным током и регулирования этого тока (тока возбуждения), причем ток возбуждения $I_v = U_v/R_v$ изменяют только изменением напряжения возбудителя U_v . Система возбуждения должна иметь очень высокую надежность в работе, так как от ее надежности зависит и надежность работы синхронной машины.

Системы возбуждения крупных синхронных машин достаточно сложны, их подразделяют на независимые системы возбуждения и системы с самовозбуждением, на щеточные и бесщеточные. Здесь приведены лишь простейшие принципиальные электрические схемы некоторых подобных систем возбуждения.

В *независимой щеточной* системе возбуждения (рис. 13.6а) в качестве возбудителя используется генератор постоянного тока, устанавливаемый на одном валу с ротором 2 синхронной машины. В этом случае напряжение от обмотки якоря 6 возбудителя подают через щетки 5 на контактные кольца 4, расположенные на валу ротора 2, с которыми соединена обмотка возбуждения 3 синхронной машины. Регулирование тока возбуждения I_B синхронной машины осуществляют изменением тока в обмотке возбуждения 7 возбудителя, регулируя таким образом напряжение на его зажимах. Для этого в системе возбуждения установлен регулятор напряжения 8.

На рис. 13.6б приведена *щеточная* система возбуждения, в которой обмотка возбуждения подключена

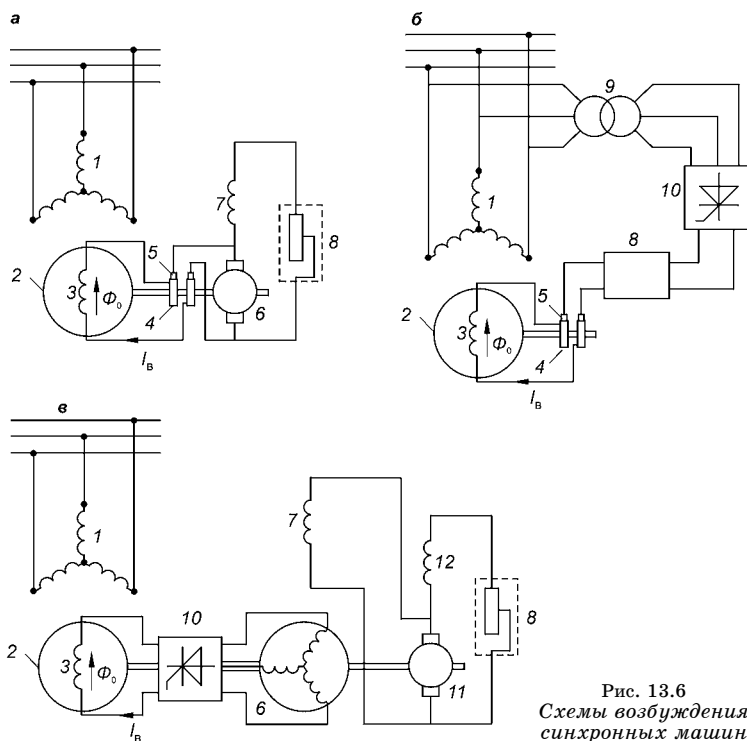


Рис. 13.6
Схемы возбуждения
синхронных машин

а — независимая щеточная; б — щеточная с самовозбуждением; в — независимая бесщеточная. 1 — обмотка якоря; 2 — ротор генератора; 3 — обмотка возбуждения генератора; 4 — кольца; 5 — щетки; 6 — якорь возбудителя; 7 — обмотка возбуждения возбудителя; 8 — регулятор напряжения; 9 — понижающий трансформатор; 10 — выпрямитель; 11 — якорь подвозбудителя; 12 — обмотка возбуждения подвозбудителя.

к обмотке якоря 1 через понижающий трансформатор 9 и управляемый или неуправляемый полупроводниковый выпрямитель 10. В синхронных генераторах такую систему называют системой с *самовозбуждением*, так как для питания обмотки возбуждения в этом случае используют часть электрической энергии, вырабатываемой самим генератором. Мощность электрической энергии, используемой для возбуждения синхронной машины, составляет, как правило, не больше 3% от номинальной мощности синхронной машины. В такой системе возбуждения необходимость в применении понижающего трансформатора 9 обусловлена тем, что напряжение на зажимах якоря синхронной машины может достигать нескольких десятков киловольт, а напряжение, на которое рассчитана обмотка возбуждения, как правило, не превышает 400 В.

Примерная схема *бесщеточной* системы возбуждения показана на рис. 13.6в. Здесь, в отличие от щеточной системы возбуждения (см. рис. 13.6а), возбудителем является трехфазный синхронный генератор обращенного типа, в котором обмотка возбуждения расположена на статоре, а обмотка якоря 6 расположена на валу ротора синхронной машины и вращается вместе с ним. Напряжение от возбудителя подают на расположенный также на валу ротора вращающийся полупроводниковый выпрямитель 10. В нем это переменное напряжение преобразуется в постоянное напряжение, которое и подводят к обмотке возбуждения синхронной машины. Источником напряжения для возбудителя служит генератор постоянного тока, расположенный на валу ротора и называемый *подвозбудителем*. Регулирование напряжения возбудителя и, следовательно, тока возбуждения синхронной машины осуществляют, как и в схеме рис. 13.6а, изменяя ток в его обмотке возбуждения 7.

13.3. СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Принцип действия. Получение трехфазной системы ЭДС на зажимах обмотки статора трехфазного синхронного генератора подробно изложено в гл. 4 (см. § 4.2), где показано, что при вращении возбужденного ротора с частотой n в фазных обмотках статора основным магнитным

потоком Φ_0 индуцируется трехфазная симметричная система ЭДС (см. (4.1)):

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_{A0} &= E_0, \\ \underline{E}_{B0} &= E_0 e^{-j\frac{2\pi}{3}} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) E_0, \\ \underline{E}_{C0} &= E_0 e^{-j\frac{4\pi}{3}} = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) E_0. \end{aligned} \right\}$$

Действующее значение ЭДС E_0 в каждой фазной обмотке статора и соответствующая комплексная ЭДС \underline{E}_0 соответственно равны:

$$E_0 = 4,44fwk_{об}\Phi_{0m}, \quad \underline{E}_0 = -j4,44fwk_{об}\Phi_{0m}, \quad (13.1)$$

где $f = pn/60$ — частота индуцированной ЭДС, w — число витков фазной обмотки статора, $k_{об}$ — ее обмоточный коэффициент, Φ_{0m} — магнитный поток полюса ротора, создаваемый обмоткой возбуждения и называемый *основным магнитным потоком*.

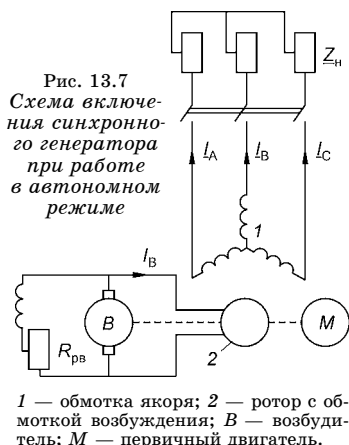
Если к выводам обмотки статора (обмотки якоря) подключить трехфазный симметричный приемник электрической энергии с сопротивлением Z_H (рис. 13.7), то в фазных обмотках якоря и фазах приемника возникнет трехфазная симметричная система токов \underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C , которая создаст вращающееся магнитное поле якоря, как и в асинхронных машинах (см. § 12.3). Число полюсов $2p$

этого поля равно числу полюсов ротора, а магнитный поток полюса статора (якоря) равен $\Phi_{ят}$.

Частота вращения n_1 этого магнитного поля относительно статора:

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60}{p} \cdot \frac{pn}{60} = n.$$

Следовательно, магнитное поле, создаваемое обмоткой якоря, вращается относительно статора с частотой, равной частоте вращения



ротора, т. е. *синхронно* с ним. Поэтому результирующий магнитный поток Φ равен сумме основного потока и потока якоря ($\Phi_m = \Phi_{0m} + \Phi_{ям}$) и вращается также с синхронной скоростью. Этот поток, как и основной, неподвижен относительно ротора.

Реакция якоря. Результирующий магнитный поток зависит от характера нагрузки синхронной машины, т. е. от сдвига фаз между ЭДС E_0 и током статора I . Влияние магнитного потока якоря на результирующий магнитный поток называют *реакцией якоря*.

На рис. 13.8 с целью упрощения обмотка возбуждения генератора и обмотка фазы А статора показаны в виде одного витка. Направление индуцированной ЭДС E_0 в проводниках фазы А, определенное по правилу правой руки, соответствует указанному направлению вращения ротора. Так как проводники расположены на осевой линии полюсов, то в них индуцируются ЭДС, значения которых максимальны ($+E_{0m}$ и $-E_{0m}$).

При *активной нагрузке* сдвиг фаз между ЭДС E_0 и током якоря I равен нулю ($\psi = 0$), поэтому максимальным значениям ЭДС будут соответствовать и максимальные значения токов в проводниках ($+I_m$ и $-I_m$). Картина магнитных полей, соответствующая этой нагрузке, имеет вид, показанный на рис. 13.8а.

Как было показано в гл. 12 (см. § 12.3), ось вращающегося магнитного поля статора всегда совпадает с осью той фазы, ток в которой в данный момент времени максимальный. Следовательно, достаточно рассмотреть только

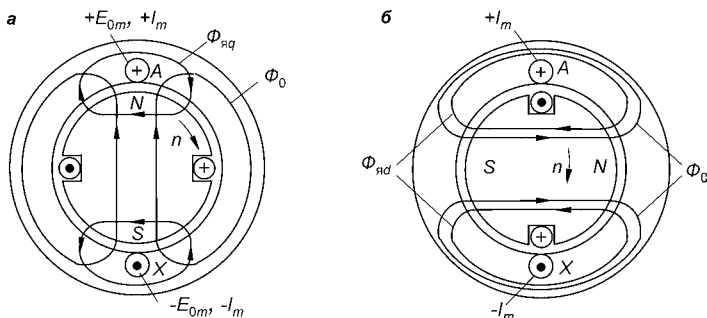


Рис. 13.8

Картина магнитных потоков
в синхронном неявнополюсном генераторе

а — при активной нагрузке ($\psi = 0$); б — при индуктивной нагрузке ($\psi = +\pi/2$).

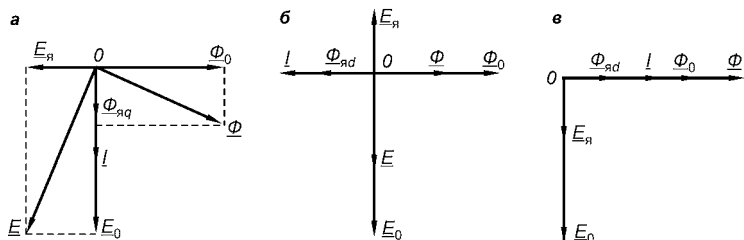


Рис. 13.9

Векторные диаграммы магнитных потоков и ЭДС синхронного генератора при различных углах ψ

$a - \psi = 0$; $b - \psi = +\pi/2$; $c - \psi = -\pi/2$.

поток фазы А. Как видно из рис. 13.8а, в фазе А ток имеет амплитудное значение I_m , и осевая линия магнитного потока якоря $\Phi_{я}$ направлена перпендикулярно осевой линии основного магнитного потока Φ_0 . Такой поток якоря называют *поперечным* и обозначают $\Phi_{яq}$.

Векторная диаграмма магнитных потоков и ЭДС при активной нагрузке показана на рис. 13.9а. ЭДС \underline{E}_0 , индуцируемая основным потоком $\underline{\Phi}_0$, отстает от него по фазе на $\pi/2$. Ток нагрузки (ток якоря) \underline{I} совпадает по фазе с ЭДС \underline{E}_0 , так как принято, что $\psi = 0$. Поток якоря $\underline{\Phi}_{яq}$ совпадает с током по фазе, а ЭДС $\underline{E}_{я}$, индуцируемая вращающимся потоком якоря $\underline{\Phi}_{я}$, отстает от него по фазе на $\pi/2$. Значение ЭДС $E_{я}$ определяют по формуле, аналогичной (13.1). ЭДС $E_{я}$ является ЭДС самоиндукции, пропорциональной потоку $\Phi_{яq}$ или току I . Поэтому она может быть представлена в виде

$$\underline{E}_{я} = -j4,44f\omega k_{об}\underline{\Phi}_{ям} = -jX_{я}\underline{I}, \quad (13.2)$$

где $X_{я}$ — индуктивное сопротивление обмотки якоря, обусловленное магнитным потоком $\underline{\Phi}_{я}$.

Результирующие магнитный поток $\underline{\Phi}$ и ЭДС \underline{E} находят из уравнений

$$\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_0 + \underline{\Phi}_{яq}, \quad \underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{я}. \quad (13.3)$$

При *индуктивной нагрузке* ток якоря \underline{I} в фазе А отстает от ЭДС \underline{E}_0 на угол $\psi = +\pi/2$ и достигает максимального значения I_m на $1/4$ периода позднее момента времени, при котором ЭДС примет максимальное значение E_{0m} . За это время полюсы ротора с основным магнитным потоком Φ_0 повернутся на половину полюсного

деления (или на $1/4$ окружности в машине с двумя полюсами) и займут положение, показанное на рис. 13.8б. При этом магнитный поток якоря будет замыкаться по продольной оси полюсов, как и основной магнитный поток. Такой магнитный поток якоря называют *продольным* и обозначают $\Phi_{яd}$. Из рис. 13.8б видно, что при индуктивной нагрузке поток якоря $\Phi_{яd}$ направлен навстречу основному потоку Φ_0 и поэтому является *размагничивающим*. Индуктивная нагрузка уменьшает результирующий магнитный поток Φ (рис. 13.9б) и результирующую ЭДС E .

При *емкостной нагрузке* ток противоположен по фазе индуктивному току ($\psi = -\pi/2$) и создает магнитный поток якоря, который совпадает по направлению с основным магнитным потоком. Следовательно, он является продольным *намагничивающим* потоком $\Phi_{яd}$. Как видно из векторной диаграммы (рис. 13.9в), в этом случае результирующие магнитный поток Φ и ЭДС E увеличиваются за счет реакции якоря.

В общем случае, когда ток нагрузки имеет активную и реактивную составляющие, поток якоря имеет как продольную $\Phi_{яd}$, так и поперечную $\Phi_{яq}$ составляющие, т. е. $\Phi_{я} = \Phi_{яq} + \Phi_{яd}$. При активно-индуктивной нагрузке генератора реакция якоря является размагничивающей, а при активно-емкостной нагрузке намагничивающей.

Уравнение напряжения и векторные диаграммы синхронного генератора с неявно выраженными полюсами. Из сказанного ранее следует, что в обмотке якоря синхронного генератора вращающиеся магнитные потоки индуцируют ЭДС: основной поток Φ_0 индуцирует ЭДС E_0 , поток якоря $\Phi_{я}$ — ЭДС $E_{я}$. Кроме того, ток якоря I создает магнитный поток рассеяния $\Phi_{рас}$, который, как и в асинхронных машинах (см. § 12.5), индуцирует в обмотке статора ЭДС рассеяния

$$\underline{E}_{ярас} = -jX_{ярас} \underline{I}, \quad (13.4)$$

где $X_{ярас}$ — индуктивное сопротивление обмотки якоря, обусловленное магнитным потоком рассеяния.

Для замкнутой цепи фазы, состоящей из фазной обмотки статора и фазы нагрузки (см. рис. 13.10а), по второму закону Кирхгофа можно написать

$$\underline{E}_0 + \underline{E}_{я} + \underline{E}_{ярас} = \underline{U} + R_{я} \underline{I},$$

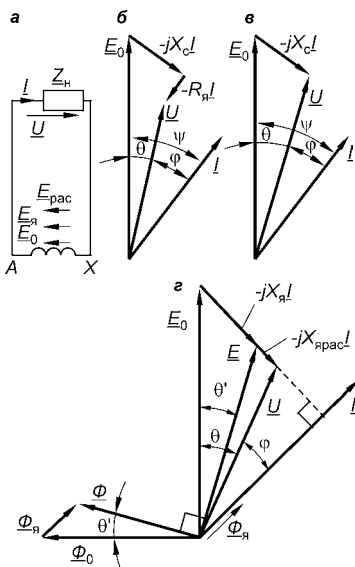


Рис. 13.10
 Схема и векторные диаграммы
 синхронного генератора
 с неявно выраженными полюсами
 а — схема; б — полная диаграмма; в,
 г — упрощенная при активно-индуктив-
 ной нагрузке; д — упрощенная при ак-
 тивно-емкостной нагрузке.

где \underline{U} — напряжение на зажимах обмотки статора или на нагрузке; $R_{\text{я}}$ — активное сопротивление обмотки статора (якоря). Учитывая (13.2) и (13.4), получим уравнение

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - R_{\text{я}}\underline{I} - j(X_{\text{я}} + X_{\text{ярас}})\underline{I} = \underline{E}_0 - R_{\text{я}}\underline{I} - jX_{\text{с}}\underline{I}, \quad (13.5a)$$

где $X_{\text{с}} = X_{\text{я}} + X_{\text{ярас}}$ — синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря.

Уравнение (13.5a) является уравнением напряжения неявнополюсного синхронного генератора. На его основании можно построить векторную диаграмму (рис. 13.10б). Сначала проводят вектор ЭДС \underline{E}_0 . Задаваясь характером нагрузки (углом ψ), проводят вектор тока \underline{I} . Затем по уравнению (13.5a) находят вектор напряжения \underline{U} . У синхронных генераторов активное сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} \ll X_{\text{с}}$, поэтому падением напряжения $R_{\text{я}}I$ обычно пренебрегают. Получаем упрощенное уравнение напряжения генератора

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jX_{\text{с}}\underline{I}, \quad (13.5б)$$

согласно которому на рис. 13.10в построена упрощенная векторная диаграмма.

На рис. 13.10г, д показаны векторные диаграммы не только ЭДС, напряжения и тока, но и магнитных потоков.

Из них следует также, что при активно-индуктивной нагрузке (рис. 13.10*г*) реакция якоря носит размагничивающий характер ($\Phi < \Phi_0$), а при активно-емкостной (рис. 13.10*д*) — намагничивающий характер ($\Phi > \Phi_0$).

Характеристики синхронного генератора при работе в автономном режиме. *Характеристика холостого хода* — это зависимость ЭДС статора E_0 от тока возбуждения I_B при токе статора $I = 0$, частоте вращения $n = \text{const}$ (что равносильно $f = \text{const}$). ЭДС $E_0 = 4,44k_{об}wf\Phi_{0m} = c_e\Phi$, где $c_e = 4,44k_{об}wf = \text{const}$. Так как основным магнитный поток Φ_{0m} создается током возбуждения, а между ЭДС E_0 и потоком Φ_{0m} имеет место линейная зависимость, то характеристика холостого хода генератора $E_0(I_B)$ имеет такой же вид, как зависимость $\Phi_{0m}(I_B)$, т. е. имеет вид характеристики намагничивания (рис. 13.11).

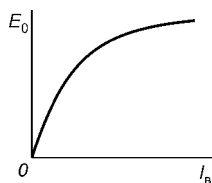


Рис. 13.11
Характеристика холостого хода синхронного генератора

Внешней характеристикой называют зависимость напряжения на зажимах обмотки статора от тока статора $U(I)$ при $I_B = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$ и $f = \text{const}$. Ток возбуждения обычно выбирают таким, чтобы при номинальном токе статора (токе нагрузки) $I_{ном}$ напряжение генератора было номинальным ($U_{ном}$) (см. рис. 13.12). В дальнейшем при изменении тока от $I_{ном}$ до $I = 0$ ток возбуждения поддерживают неизменным. Синхронные генераторы проектируют для работы с $\cos\varphi = 0,85...0,9$ при токе, отстающем от напряжения по фазе. При уменьшении тока, имеющего индуктивную составляющую ($\varphi > 0$), уменьшается продольная размагничивающая составляющая потока якоря $\Phi_{ад}$, результирующий поток увеличивается и суммарная ЭДС в обмотке статора также увеличивается. Это является основной причиной повышения напряжения при уменьшении тока нагрузки. Кроме того, некоторое влияние оказывает падение напряжения $R_{я}I$ на обмотке якоря. При холостом ходе ($I = 0$) напряжение $U_0 = E_0$. Изменение напряжения

$$\Delta u = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%$$

при этом может достигать 30–50%.

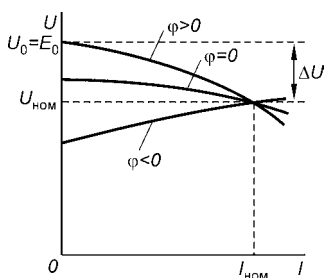


Рис. 13.12
Внешние характеристики
синхронного генератора

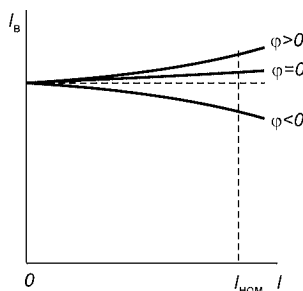


Рис. 13.13
Регулировочные характери-
стики синхронного генератора

При активной нагрузке ($\varphi = 0$, $\psi > 0$) продольный размагничивающий поток $\Phi_{ад}$ значительно меньше, чем при активно-индуктивной нагрузке. Поэтому изменение напряжения также меньше. При активно-емкостной нагрузке ($\varphi < 0$) с уменьшением тока уменьшается составляющая продольного намагничивающего потока $\Phi_{ад}$ и результирующий поток уменьшается, следствием чего является снижение напряжения.

Регулировочная характеристика показывает, как следует изменять ток возбуждения I_v при изменении тока нагрузки I , чтобы напряжение U осталось постоянным, т. е. является зависимостью $I_v(I)$ при $U = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, $f = \text{const}$.

Так как при активно-индуктивной нагрузке с уменьшением тока от $I_{ном}$ до нуля напряжение увеличивается, то для поддержания его постоянным надо уменьшать результирующий магнитный поток путем уменьшения тока возбуждения (рис. 13.13). При активно-емкостной нагрузке — наоборот.

13.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОЩНОСТЬ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Электромагнитную мощность синхронной машины определим, рассматривая неявнополусный синхронный генератор, при этом полученные ниже выражения для электромагнитных мощности и момента будут справедливы и для синхронного неявнополусного двигателя.

В крупных синхронных машинах мощность потерь энергии мала по сравнению с мощностью электрической энергии, отдаваемой генератором в сеть, поэтому можно считать, что электромагнитная мощность равна активной мощности генератора:

$$P_{\text{эм}} = P = mUI \cos \varphi, \quad (13.6)$$

где m — число фаз генератора, U и I — действующие значения фазных напряжения и тока соответственно.

Из векторной диаграммы синхронного генератора (рис. 13.14) можно получить соотношения, позволяющие выразить электромагнитную мощность через ЭДС E_0 и угол θ . Из прямоугольного треугольника ABC имеем $BC = AB \cos \varphi = X_c I \cos \varphi$, а из треугольника OBC имеем $BC = OB \sin \theta = E_0 \sin \theta$. Из равенства $X_c I \cos \varphi = E_0 \sin \theta$ получим: $I \cos \varphi = E_0 \sin \theta / X_c$. После подстановки этого выражения в формулу (13.6) получим



Рис. 13.14
Векторная
диаграмма
ЭДС, напряже-
ния, тока и
магнитных
потоков
синхронного
генератора

$$P_{\text{эм}} = \frac{mUE_0 \sin \theta}{X_c}. \quad (13.7)$$

Электромагнитный момент синхронной машины

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega} = \frac{mUE_0 \sin \theta}{\Omega X_c}, \quad (13.8)$$

где Ω — угловая скорость вращения ротора.

Вектор магнитного потока Φ_0 опережает вектор ЭДС E_0 на угол $\pi/2$. Вектор результирующего магнитного потока Φ опережает вектор напряжения U также на угол $\pi/2$, так как $U = E$ (см. рис. 13.9а). Магнитный поток якоря $\Phi_{\text{я}}$ совпадает по фазе с током I , и результирующий магнитный поток согласно (13.3) $\Phi = \Phi_0 + \Phi_{\text{я}}$. Из векторной диаграммы следует, что угол между векторами магнитных потоков Φ_0 и Φ равен углу θ . Результирующий магнитный поток Φ определяет полюсы статора, а магнитный поток Φ_0 — полюсы ротора. Таким образом, угол θ является пространственным углом между осявыми линиями полюсов статора и ротора. Так как результирующий

магнитный поток отстает от основного на угол θ , это значит, что полюсы статора генератора отстают от полюсов ротора на угол θ . Угол θ синхронного генератора считают положительным.

Как видно из (13.7) и (13.8), электромагнитная мощность и электромагнитный момент синхронной машины, у которой $X_c = \text{const}$ и $\Omega = \text{const}$, пропорциональны напряжению U , ЭДС E_0 (или току возбуждения I_B) и $\sin\theta$. Если $U = \text{const}$, $E_0 = \text{const}$ и $\Omega = \text{const}$, то электромагнитная мощность и электромагнитный момент синхронной машины зависят только от угла θ , поэтому его называют *углом нагрузки*. При $\theta = \text{const}$ электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ уравнивает вращающий момент $M_{\text{вн}}$ первичного двигателя, приводящего в движение ротор генератора, т. е. $M_{\text{вн}} - M_{\text{эм}} = 0$. Если увеличить вращающий момент первичного двигателя, то ротор начнет ускоряться в направлении вращения, так как электромагнитный момент окажется меньше внешнего. Угол θ при этом будет возрастать до тех пор, пока электромагнитный момент генератора в соответствии с (13.8) не возрастет настолько, чтобы уравновесить возросшее значение вращающего момента первичного двигателя. При этом возрастет и электромагнитная мощность генератора, так как $P_{\text{эм}} = \Omega M_{\text{эм}}$.

Для изменения электромагнитной мощности генератора надо изменять вращающий момент первичного двигателя, приводящего в движение ротор генератора.

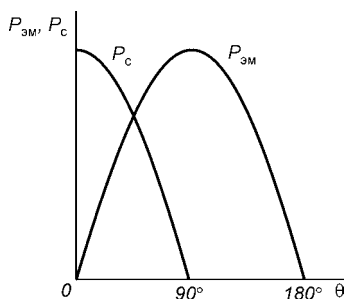


Рис. 13.15
Угловая характеристика и удельная синхронизирующая мощность синхронной машины

На рис. 13.15 представлена *угловая характеристика* синхронной машины: $P_{\text{эм}}(\theta)$ при $U = \text{const}$ и $E_0 = \text{const}$. Такой же вид имеет и *угловая характеристика* $M_{\text{эм}}(\theta)$. Для машины с неявно выраженными полюсами она имеет вид правильной, а для машины с явно выраженными полюсами — искаженной синусоиды. Это связано с тем, что ротор последней имеет

различное сопротивление для поперечного и продольного магнитных потоков якоря. Из угловой характеристики видно, что максимальное значение электромагнитная мощность и, следовательно, электромагнитный момент принимают при $\theta = 90^\circ$.

Производные $dM_{\text{эм}}/d\theta$ и $dP_{\text{эм}}/d\theta$, называют соответственно *удельным синхронизирующим моментом* и *удельной синхронизирующей мощностью* или *коэффициентами синхронизирующего момента* и *синхронизирующей мощности*. Они характеризуют устойчивость работы синхронной машины. Для неявнополюсной синхронной машины в соответствии с уравнениями (13.7) и (13.8) эти коэффициенты равны:

$$M_c = \frac{dM_{\text{эм}}}{d\theta} = \frac{mUE_0 \cos \theta}{\Omega X_c}, \quad P_c = \frac{dP_{\text{эм}}}{d\theta} = \frac{mUE_0 \cos \theta}{X_c}.$$

Зависимость удельной синхронизирующей мощности P_c от угла нагрузки при $U = \text{const}$ и $E_0 = \text{const}$ показана на рис. 13.15. Зависимость $M_c(\theta)$ имеет такой же вид. Чем меньше угол θ , тем больше M_c и P_c , тем устойчивее режим работы синхронной машины. Синхронные машины обычно имеют номинальное значение угла θ в пределах $20 \dots 35^\circ$, а их статическая устойчивость сохраняется, если угол нагрузки не превышает 90° , т. е. при $\theta < 90^\circ$. Последнее относится как к синхронным генераторам, так и к двигателям.

13.5. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С СЕТЬЮ

Синхронные генераторы на электростанциях работают параллельно друг с другом, представляя собой как бы единый источник большой мощности. Электростанции также соединяют для параллельной работы с помощью линий электропередачи. Таким образом, ряд электростанций образует мощную энергосистему, по сравнению с которой мощность одного генератора или двигателя очень мала. Такую энергосистему считают источником бесконечной мощности. При этом напряжение сети энергосистемы \underline{U}_c и его частоту f_c можно считать неизменными.

На рис. 13.16а изображена схема включения синхронной машины для параллельной работы с сетью.

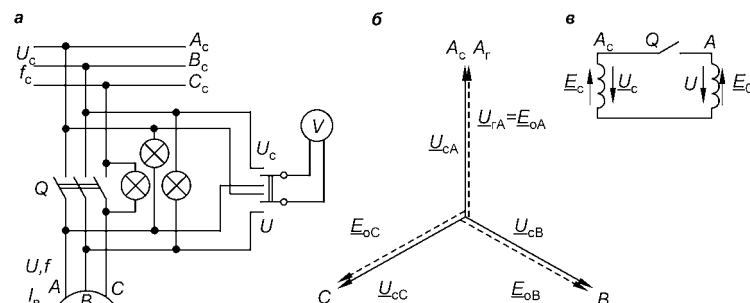


Рис. 13.16
Включение синхронной машины
для параллельной работы с сетью

а — схема включения; *б* — векторные диаграммы трехфазных систем напряжений сети (сплошные) и генератора (штриховые); *в* — схема замещения сети и генератора.

Ротор машины приводят во вращение, и созданный обмоткой возбуждения основной магнитный поток Φ_0 индуцирует в обмотке статора машины ЭДС E_0 , частота которой f . Так как машина работает на холостом ходу, напряжение машины $\underline{U} = \underline{E}_0$. Включать машину с помощью выключателя Q следует в тот момент, когда мгновенные значения потенциалов неподвижных и подвижных контактов выключателя равны. Тогда ток в обмотке статора синхронной машины после включения будет оставаться равным нулю. Таким образом, для включения синхронной машины в сеть необходимо выполнить следующие условия:

- 1) действующие значения напряжения синхронной машины U и сети U_c должны быть равны ($U = U_c$);
- 2) эти напряжения должны совпадать по фазе ($\underline{E}_0 = \underline{U} = \underline{U}_c$, т. е. $\underline{U} - \underline{U}_c = \underline{E}_0 - \underline{U}_c = 0$);
- 3) частоты напряжений синхронной машины и сети должны быть равны ($f = f_c$);
- 4) чередование фаз синхронной машины и сети должно быть одинаковым.

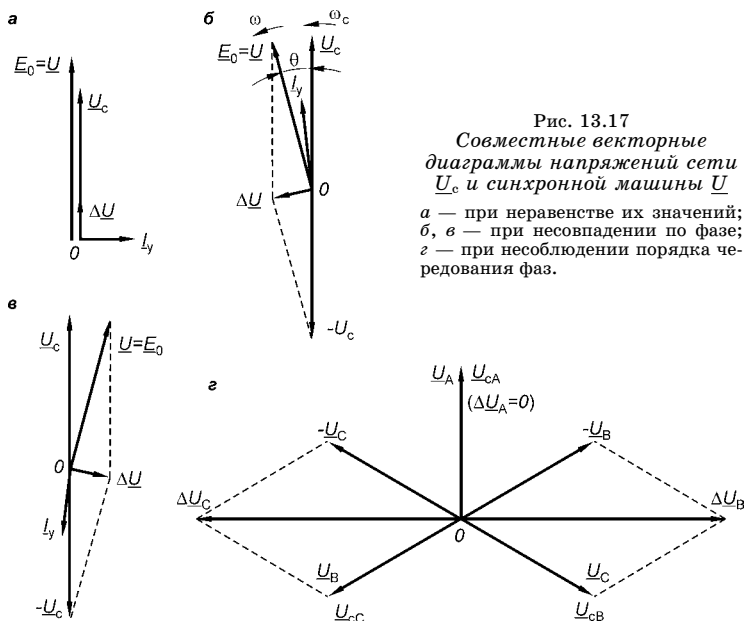
При выполнении всех перечисленных условий трехфазные системы напряжений синхронной машины и сети будут одинаковы (рис. 13.16б).

На рис. 13.16в представлена схема замещения фазы A сети (ЭДС \underline{E}_c , начало фазы A_c) и фазы A обмотки синхронной машины (ЭДС \underline{E}_0 , начало фазы A). Если указанные выше условия параллельной работы выполнены,

то напряжение $\Delta \underline{U}$ на контактах выключателя Q равно нулю ($\Delta \underline{U} = \underline{U} - \underline{U}_c = 0$).

Если при включении выключателя действующие значения напряжений U и U_c не равны при выполнении всех других условий, то $\Delta \underline{U} = \underline{U} - \underline{U}_c \neq 0$. На рис. 13.17а построена векторная диаграмма напряжений, когда $U > U_c$. Под действием $\Delta \underline{U}$ в цепи возникает уравнивающий ток \underline{I}_y , отстающий по фазе от $\Delta \underline{U}$ почти на $\pi/2$, так как сопротивление контура «сеть–машина» практически равно индуктивному сопротивлению X_c синхронной машины. По отношению к сети и к синхронной машине ток \underline{I}_y является реактивным, поэтому никаких механических толчков или ударов он создать не может. Но он ограничивает активный ток нагрузки, так как полный ток машины не должен превышать определенного значения.

Если при включении синхронной машины напряжения \underline{U}_c и \underline{U} не совпадают по фазе, но значения их равны (рис. 13.17б, в), то возникающий ток \underline{I}_y практически имеет только активную составляющую. Поэтому он создает механический момент, являющийся для ротора синхронной машины либо вращающим, либо тормозным.



В любом случае из-за внезапно приложенного к ротору механического момента произойдет толчок или удар, что может привести к разрушению ротора. Если ΔU невелико, то уравнивающий ток I_y небольшой и созданный им механический момент только ускоряет или затормаживает ротор. Через некоторое время устанавливается режим, когда $\Delta U = 0$ и $I_y = 0$.

При неравенстве частот ($f \neq f_c$) частоты вращения векторов напряжения также не равны ($\omega \neq \omega_c$). Поэтому значение ΔU изменяется во времени от 0 (когда \underline{U}_c и \underline{U} совпадают по фазе) до $2U_c$ (когда \underline{U}_c и \underline{U} противоположны по фазе). В соответствии с этим значение тока I_y изменяется от нуля до значения, превышающего номинальное значение тока во много раз. Это создает аварийный режим.

Если при включении синхронной машины окажется, что чередование фаз сети и машины различно, то в отдельных фазах возникают ΔU , равные линейному напряжению, как это показано на рис. 13.17г, где для фазы А выполнено условие $\underline{U}_A = \underline{U}_{cA}$, а для других фаз $\Delta U = U_{\text{л}}$. Возникающий в этих фазах ток I_y в несколько раз превышает номинальное значение.

Для проверки выполнения условий включения машины применяют специальные приборы — *синхроноскопы*. Простейший из них, используемый чаще всего в лабораторных условиях, состоит из трех ламп, включенных, как показано на рис. 13.16а. Такой синхроноскоп называют ламповым. На электростанциях для синхронизации мощных генераторов применяют *стрелочные синхроноскопы*.

Равенство $U = U_c$ контролируют вольтметром. Если $U \neq U_c$, то изменяют ток возбуждения синхронной машины. Каждая лампа синхроноскопа включена так, что к ней приложено напряжение $\Delta U = U - U_c$. Если выполнены все условия параллельной работы, то все напряжения $\Delta U = 0$ и лампы не горят. В этот момент можно включать выключатель Q.

Если частоты разные, то значения ΔU все время меняются от 0 до $2U_c$ и лампы то гаснут (при $\Delta U = 0$), то загораются. Чем больше разность в частотах, тем больше частота мигания ламп. Поэтому необходимо изменять частоту вращения ротора синхронной машины так, чтобы



уменьшить частоту мигания. Когда различие в частотах f и f_c станет совсем незначительным, длительность периода, когда лампы не горят, будет большой и выключатель Q можно включать в середине этого периода. При этом может оказаться, что все-таки $\Delta U \neq 0$, и в обмотках машины возникнет ток I_y . Если включение произойдет в момент, когда полюсы ротора синхронной машины опережают полюсы статора, определяемые напряжением сети \underline{U}_c (рис. 13.17б), то синхронная машина оказывается в режиме генератора и ток I_y создает тормозной момент на его валу. Под действием этого момента частота вращения ротора уменьшится, что равносильно уменьшению частоты вращения вектора \underline{U} на диаграмме. Через некоторое время напряжения сети и синхронной машины совпадут по фазе ($\underline{U} = \underline{U}_c$) и получим $\Delta \underline{U} = 0$ (режим холостого хода).

При различном чередовании фаз сети и синхронной машины лампы синхроскопа будут загораться и гаснуть поочередно, так как напряжение ΔU на разных фазах в один и тот же момент времени разное. Например, на рис. 13.17г $\Delta U_A = 0$, а другие ΔU равны линейному напряжению. В следующий момент времени либо $\Delta U_B = 0$, либо $\Delta U_C = 0$. При неправильном чередовании фаз необходимо поменять местами линейные провода любых двух фаз.

После включения синхронного генератора в сеть его напряжение \underline{U} становится равным напряжению сети \underline{U}_c , и уравнение (13.5б) для неявнополюсного генератора примет вид

$$\underline{U} = \underline{U}_c = \underline{E}_0 - jX_c \underline{I} = \text{const}, \quad (13.9)$$

так как $U_c = \text{const}$.

Из этого уравнения следует уравнение для тока якоря

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_0 - \underline{U}_c}{jX_c} = \frac{\Delta \underline{U}}{jX_c}. \quad (13.10)$$

Итак, если синхронную машину включают в сеть при соблюдении всех условий синхронизации, то в момент включения ток якоря равен нулю, что следует из уравнения (13.10), активная и реактивная мощности машины также равны нулю. Это соответствует режиму идеального холостого хода. Вращающий момент M первичного

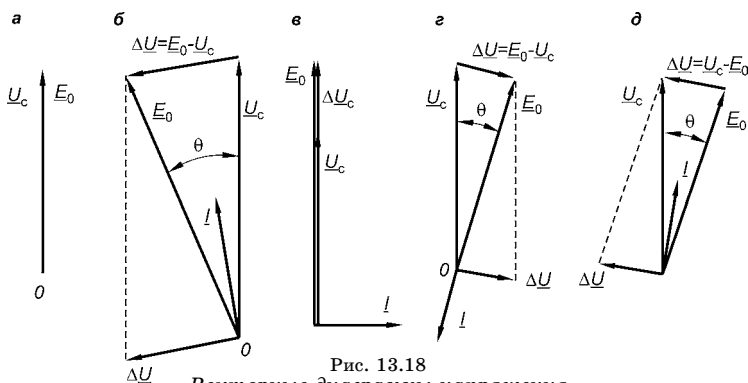


Рис. 13.18
Векторные диаграммы напряжения
сети \underline{U}_c и ЭДС \underline{E}_0 синхронной машины
при ее работе параллельно с сетью

a — режим идеального холостого хода; *б* — режим генератора; *в* — регулирование реактивной мощности генератора; *г* и *д* — режим двигателя.

двигателя при этом равен моменту холостого хода M_0 . Векторная диаграмма для этого режима представлена на рис. 13.18*а*.

Регулирование активной мощности генератора. Если увеличить вращающий момент первичного двигателя (например, паровой турбины), приложенный к валу ротора, на ΔM , то под действием избыточного момента ротор начнет ускоряться. Ось полюсов ротора начнет смещаться в направлении вращения на угол θ . При этом разноименные полюсы ротора и статора, притягиваясь друг к другу, будут создавать электромагнитный (тормозной) момент $M_{эм}$ (см. (13.8)), направленный встречно вращающему моменту первичного двигателя. Угол нагрузки θ будет увеличиваться до значения, при котором наступит равновесие моментов ($M_{эм} = \Delta M$). Этим механическим процессам соответствует векторная диаграмма, приведенная на рис. 13.18*б*, на которой вектор ЭДС \underline{E}_0 опережает вектор напряжения сети \underline{U}_c на угол θ . Под действием напряжения $\Delta \underline{U} = \underline{E}_0 - \underline{U}_c$, которое является составляющей ЭДС \underline{E}_0 , в обмотке якоря возникает ток \underline{I} , активная составляющая которого совпадает с ЭДС \underline{E}_0 . Это указывает на то, что синхронная машина отдает электрическую энергию в сеть, т. е. работает в режиме генератора. Чем больше вращающий момент турбины, тем больше угол θ , тем больше электромагнитная мощность $P_{эм}$ энергии, которую генератор отдает в сеть.

||| Чтобы увеличить нагрузку генератора, нужно увеличить вращающий момент первичного двигателя, приложенный к валу генератора, и, наоборот, уменьшить его, если нагрузку генератора необходимо уменьшить.

Регулирование реактивной мощности генератора. Рассмотрим случай, когда синхронная машина после ее включения в сеть находится в режиме идеального холостого хода ($\underline{E}_0 = \underline{U}_c$, $\Delta \underline{U} = 0$, $\underline{I} = 0$, см. рис. 13.18а). Вращающий момент первичного двигателя равен моменту холостого хода и сохраняется неизменным ($M = M_0 = \text{const}$). Если увеличить ток возбуждения (*перевозбудить синхронную машину*), то увеличится основной магнитный поток Φ_0 и, следовательно, ЭДС E_0 . При этом равенство $\underline{E}_0 = \underline{U}_c$ нарушается и появляется $\Delta \underline{U} \neq 0$, вследствие чего в обмотке якоря в соответствии с уравнением (13.10) появится ток \underline{I} (см. рис. 13.18б). Ток якоря определяется напряжением $\Delta \underline{U}$, совпадающим по фазе с напряжением сети \underline{U}_c , и индуктивным сопротивлением X_c , поэтому по отношению к напряжению сети он будет реактивным индуктивным током, т. е. будет по фазе отставать от напряжения сети на 90° .

При уменьшении тока возбуждения (при *недовозбуждении*), наоборот, уменьшатся основной магнитный поток Φ_0 и ЭДС E_0 , появятся $\Delta \underline{U} \neq 0$ и ток в обмотке якоря. Ток и в этом случае будет реактивным, но будет по фазе опережать напряжение сети на 90° . Таким образом, при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока якоря и, следовательно, только реактивная мощность машины $Q = m U_c I \sin \varphi$.

В случае идеального холостого хода ($M = M_0 = \text{const}$) активная мощность машины равна нулю. При работе машины под нагрузкой изменение тока возбуждения, так же как и в режиме холостого хода, приводит лишь к изменению реактивной составляющей тока якоря и реактивной мощности машины. Активная составляющая тока якоря зависит только от внешнего момента на валу машины и при неизменных моменте, напряжении \underline{U}_c и частоте f сети остается также неизменной.

||| Для регулирования реактивной мощности Q , а значит, и коэффициента мощности $\cos \varphi = P / \sqrt{P^2 + Q^2}$, необходимо изменять ток возбуждения.

13.6. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Как уже отмечалось ранее, после включения синхронной машины в сеть при соблюдении всех условий синхронизации машина находится в режиме идеального холостого хода, при котором $\underline{E}_0 = \underline{U}_c$, $\Delta \underline{U} = 0$ и ток якоря $\underline{I} = 0$. К валу ротора со стороны первичного двигателя приложен внешний вращающий момент, равный моменту холостого хода M_0 , и ротор вращается с частотой $n = \text{const}$. Векторная диаграмма, соответствующая этому режиму, показана на рис. 13.18а. При этом угол нагрузки $\theta = 0$, оси полюсов ротора и статора совпадают и вращаются с синхронной скоростью (рис. 13.19а).

Если теперь к валу ротора приложить внешний тормозной момент (или отключить от вала первичный двигатель, вращающий ротор), то ротор будет тормозиться, и вместе с ним начнет уменьшаться частота вращения основного магнитного потока Φ_0 . ЭДС \underline{E}_0 , индуцированная этим магнитным потоком, начнет отставать по фазе от напряжения сети \underline{U}_c на некоторый угол $\theta \neq 0$ (см. рис. 13.18г). Под действием напряжения $\Delta \underline{U} = \underline{E}_0 - \underline{U}_c \neq 0$ в обмотке якоря в соответствии с уравнением (13.10) появится ток \underline{I} , отстающий по фазе от $\Delta \underline{U}$ на угол, близкий к $\pi/2$.

Трехфазная система токов в обмотке якоря синхронной машины создает вращающийся с частотой $n = 60f_c/p$ магнитный поток якоря $\Phi_{\text{я}}$ подобно тому, как это имеет место в асинхронных машинах. Поскольку к ротору приложен тормозной момент, то полюсы ротора отстают от полюсов статора на некоторый угол θ , зависящий от тормозного момента (рис. 13.19б). Полюсы статора притягивают к себе разноименные полюсы ротора и как бы «тянут» их за собой, создавая таким образом вращающий

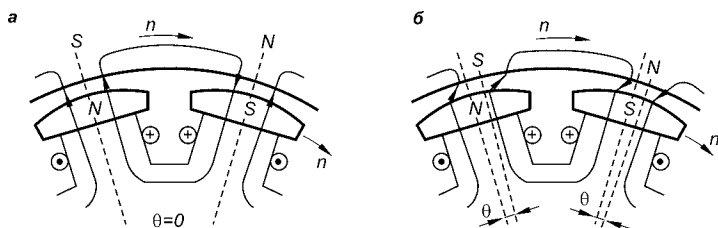


Рис. 13.19

Магнитный поток в синхронной машине

а — в режиме идеального холостого хода; б — в режиме двигателя.

момент, равный электромагнитному моменту $M_{\text{эм}}$ (см. (13.8)) и направленный в сторону вращения магнитного потока $\Phi_{\text{я}}$. Синхронная машина при этом перейдет в двигательный режим. Так как взаимодействие полюсов статора и ротора (притяжение разноименных полюсов) возможно только в том случае, если они неподвижны друг относительно друга, то ротор будет вращаться в сторону вращения магнитного потока $\Phi_{\text{я}}$ с такой же частотой, т. е. синхронно с ним.

Таким образом, если к валу синхронной машины, включенной в сеть, приложить тормозной момент, то она автоматически перейдет в двигательный режим.

Это можно показать и с помощью векторной диаграммы (см. рис. 13.18г). Из нее видно, что активная составляющая тока якоря \underline{I} находится в противофазе с ЭДС \underline{E}_0 . Это означает, что электрическая энергия из сети передается синхронной машине, которая является потребителем этой энергии, т. е. синхронным двигателем.

Если определять $\Delta \underline{U}$ как составляющую напряжения сети ($\Delta \underline{U} = \underline{U}_c - \underline{E}_0$), то активная составляющая тока \underline{I} совпадает по фазе с напряжением сети \underline{U}_c (рис. 13.18д), что также означает, что синхронная машина потребляет электрическую энергию из сети и работает двигателем.

Уравнение напряжения двигателя. На рис. 13.20а изображена схема замещения фазы синхронного двигателя. Условные положительные направления напряжения сети \underline{U}_c и ЭДС \underline{E}_0 синхронной машины в этой схеме сохранены теми же, что и на рис. 13.16в. Направление тока совпадает с направлением напряжения \underline{U}_c и противоположно ЭДС \underline{E}_0 .

Вращающийся магнитный поток якоря $\Phi_{\text{я}}$ индуцирует в обмотке статора ЭДС $\underline{E}_{\text{я}} = -jX_{\text{я}}\underline{I}$. Как и в генераторе, ток якоря создает поток рассеяния $\Phi_{\text{ярас}}$, который в обмотке якоря индуцирует ЭДС рассеяния $\underline{E}_{\text{ярас}} = -jX_{\text{ярас}}\underline{I}$. Условные положительные направления этих ЭДС совпадают с положительным направлением тока \underline{I} (рис. 13.20а). Тогда по второму закону Кирхгофа для схемы рис. 13.20а получим уравнение напряжения двигателя:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - \underline{E}_{\text{я}} - \underline{E}_{\text{ярас}} = \underline{E}_0 + jX_{\text{с}}\underline{I}.$$

Этому уравнению соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 13.20б. Сначала проводят

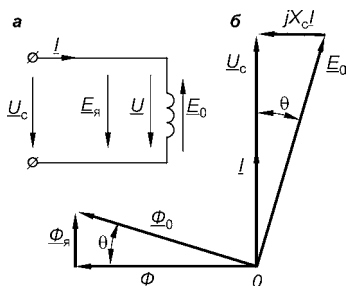


Рис. 13.20
Схема замещения фазы
синхронного двигателя
и его векторная диаграмма.
а — схема; б — векторная диаграмма.

вектор напряжения \underline{U}_c . Вектор ЭДС \underline{E}_0 отстает от напряжения \underline{U}_c на угол θ . В общем случае значение ЭДС E_0 в соответствии с (13.1) определяется магнитным потоком Φ_0 , т. е. током возбуждения, и может быть больше, меньше или равным напряжению U_c . Из конца вектора ЭДС \underline{E}_0 проводим вектор падения напряжения $jX_c \underline{I}$. Вектор тока \underline{I} отстает по фазе от вектора падения напряжения на угол $\pi/2$.

Как видно из рис. 13.20а, если пренебречь ЭДС рассеяния $\underline{E}_{\text{ярас}}$, то суммарная ЭДС в синхронном двигателе $\underline{E} = \underline{E}_0 - \underline{E}_{\text{я}}$; следовательно, результирующий магнитный поток также равен разности основного потока и потока якоря:

$$\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_0 - \underline{\Phi}_{\text{я}}.$$

На векторной диаграмме (рис. 13.20б) построены векторы магнитных потоков $\underline{\Phi}$, $\underline{\Phi}_0$ и $\underline{\Phi}_{\text{я}}$, причем угол θ между $\underline{\Phi}$ и $\underline{\Phi}_0$ является углом между осяевыми линиями полюсов статора и ротора синхронного двигателя. Это еще раз подтверждает, что в синхронном двигателе магнитные полюсы статора опережают при вращении полюсы ротора и «тянут» их за собой, создавая вращающий момент.

Обычные условия работы двигателя характеризуются тем, что $U_c = \text{const}$ и $f_c = \text{const}$ ($X_c = \text{const}$). Если при этом ток возбуждения и ЭДС E_0 постоянны, то электромагнитные момент и мощность синхронного двигателя определяются только углом θ (см. (13.7) и (13.8)). Пусть на валу двигателя имеется какая-то нагрузка, ротор вращается с постоянной частотой n и между осяевыми линиями полюсов сохраняется постоянный угол θ . При увеличении нагрузки (тормозного момента на валу) ротор двигателя начинает тормозиться и угол θ увеличивается. Одновременно с этим в соответствии с (13.7) и (13.8) увеличиваются электромагнитный момент и электромагнитная мощность, и, следовательно, увеличивается потребление электрической энергии из сети. Увеличение

угла нагрузки будет происходить до тех пор, пока электромагнитный момент не уравновесит тормозной момент, приложенный к валу двигателя. При этом ротор двигателя будет продолжать вращение с той же частотой n , но при новом значении угла $\theta' > \theta$. При уменьшении нагрузки все происходит в обратном порядке.

Угловые характеристики $M(\theta)$ и $P_{эм}(\theta)$ синхронного двигателя, используемые при анализе устойчивости его работы, имеют такой же вид, как и аналогичные характеристики синхронного генератора (см. рис. 13.15), но при этом угол нагрузки в двигательном режиме принято считать отрицательным.

Преимущество синхронного двигателя заключается в том, что его электромагнитный момент пропорционален первой степени напряжения сети (у асинхронных двигателей — квадрату напряжения). Кроме того, путем изменения тока возбуждения (изменения E_0) можно добиться изменения максимального вращающего электромагнитного момента, т. е. уменьшение максимального момента из-за уменьшения напряжения сети можно компенсировать и даже несколько увеличить за счет увеличения ЭДС.

Пуск синхронного двигателя. Если обмотка возбуждения неподвижного ротора синхронного двигателя подключена к источнику постоянного напряжения, то она создает основной магнитный поток, который определяет полярность полюсов ротора. При включении обмотки якоря в сеть трехфазная система токов в ней создает вращающийся магнитный поток, частота вращения которого $n = 60f_c/p$ (при $p = 1$ и $f_c = 50$ Гц частота $n = 3000$ об/мин). При такой частоте вращения каждую 0,01 с меняется полярность полюсов статора по осевой линии неподвижного ротора, сила притяжения между полюсами статора и ротора сменяется силой отталкивания и средний вращающий момент равен нулю. За это время ротор практически не успеет тронуться с места, так как он обладает моментом инерции. Отсутствие пускового момента в рассмотренной конструкции является большим недостатком синхронных двигателей, который длительное время препятствовал их широкому применению. В настоящее время существует ряд способов пуска в ход синхронных двигателей.

Для осуществления *асинхронного пуска* на роторе явнополюсного синхронного двигателя располагают

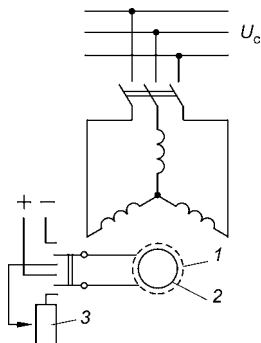


Рис. 13.21
Схема асинхронного
пуска синхронного
двигателя

1 — обмотка возбуждения;
2 — короткозамкнутая пус-
ковая обмотка; 3 — реостат.

короткозамкнутую пусковую обмотку (см. рис. 13.4), аналогичную короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного двигателя. В неявнополюсных синхронных двигателях роль пусковой обмотки выполняет массивный стальной сердечник ротора. На рис. 13.21 представлена электрическая схема асинхронного пуска явнополюсного синхронного двигателя.

При подключении обмотки статора к сети с напряжением U_c создается вращающийся магнитный поток $\Phi_{\text{я}}$ статора. Короткозамкнутая обмотка ротора в результате взаимодействия с вращающимся потоком статора создает асинхронный вращающий момент, под действием которого ротор трогается с места и разгоняется до частоты вращения n_2 , близкой к синхронной частоте n (n_2 на 3...5% меньше n).

Обмотку возбуждения 1 синхронного двигателя при пуске замыкают на реостат 3. Осуществлять пуск при разомкнутой обмотке возбуждения нельзя по следующей причине. Во время разгона двигателя вращающийся поток статора индуцирует в обмотке возбуждения ЭДС, действующее значение которой, по аналогии с асинхронным двигателем, зависит от скольжения s , числа витков $w_{\text{в}}$ обмотки и от амплитудного значения магнитного потока якоря, т. е. $E_{\text{в}} = 4,44sf_c w_{\text{в}} \Phi_{\text{я}}$. Так как число витков обмотки возбуждения велико, то при неподвижном роторе ($s = 1$) ЭДС в обмотке возбуждения может достичь такого значения, при котором произойдет пробой изоляции. В то же время при замыкании обмотки возбуждения накоротко могут создаваться условия, при которых частота вращения ротора не сможет превысить значения, равного примерно половине синхронной ($n_2 \approx 0,5n$). Поэтому обмотку возбуждения при пуске замыкают на реостат, сопротивление которого в 10...12 раз больше активного сопротивления самой обмотки.

Когда ротор двигателя достигнет частоты вращения, близкой к синхронной, обмотку возбуждения переключают

на источник постоянного тока. После этого полюсы ротора приобретают собственную полярность. При незначительном отличии в частотах вращения полюсов статора и ротора разноименные полюсы притягиваются друг к другу, а одноименные — отталкиваются. В результате ротор получает некоторое ускорение, и после нескольких качаний ротора его частота вращения достигает синхронной и остается далее постоянной, равной n (двигатель «втягивается в синхронизм»).

Как и в случае асинхронного двигателя, при пуске синхронного двигателя возникают большие пусковые токи (в 4...6 раз большие номинального). Поэтому мощные двигатели пускают при пониженном напряжении. Для снижения напряжения используют реакторы и автотрансформаторы. Однако это уменьшает пусковой момент, для увеличения которого короткозамкнутую пусковую обмотку выполняют из материала с большим активным сопротивлением (латунь).

При остановке двигателя сначала отключают обмотку статора от сети, а затем замыкают обмотку возбуждения на реостат. Направление вращения синхронного двигателя изменяют так же, как асинхронного двигателя.

Пуск с помощью *разгонного двигателя* осуществляют только при холостом ходе синхронного двигателя. При этом его ротор приводят во вращение разгонным двигателем (асинхронным или двигателем постоянного тока). Мощность разгонного двигателя невелика, она определяется мощностью, необходимой только для вращения ротора синхронного двигателя, т. е. несколько большей мощности механических потерь энергии. С помощью синхроскопа проверяют выполнение условий параллельной работы синхронных машин, и когда все условия выполнены, статор синхронного двигателя подключают к сети. После этого разгонный двигатель отключают, и синхронный двигатель будет вращаться с синхронной частотой.

Пуск в ход синхронных двигателей значительно сложнее, чем асинхронных, а так как они сложнее по конструкции, требуют двух источников питания (переменного и постоянного тока) и регулирование их частоты вращения возможно только путем изменения частоты напряжения, то их применение становится выгодным только при больших мощностях (более 100 кВт).

13.7.

$$\begin{aligned} P_1 &= mU_c I \cos\varphi = \text{const}, \\ P_{\text{ам}} &= mU_c E_0 \sin\theta / X_c = \text{const}. \end{aligned}$$
$$I \cos \varphi = I_a = \text{const}, \quad (13.11)$$

$$E_0 \sin \theta = \text{const.}, \quad (13.12)$$

Построим векторные диаграммы (рис. 13.22) синхронного двигателя с учетом полученных условий (13.11) и (13.12). В качестве исходного режима выберем такой режим, при котором ток статора $I_1 = I_a$, т. е. $\cos\varphi = 1$. Ток возбуждения, при котором $\cos\varphi = 1$, обычно считают нор-

При увеличении тока возбуждения ЭДС увеличивается до E_{02} . Условие (13.12) будет выполняться и в этом случае. На векторной диаграмме конец вектора ЭДС E_{02} будет скользить по линии AB , параллельной вектору напряжения \underline{U}_c . При этом уравнение напряжения будет иметь вид $\underline{U}_c = \underline{E}_{02} + jX_c \underline{I}_2$, где \underline{I}_2 — ток статора в этом режиме. Вектор тока \underline{I}_2 отстает от вектора падения напряже-

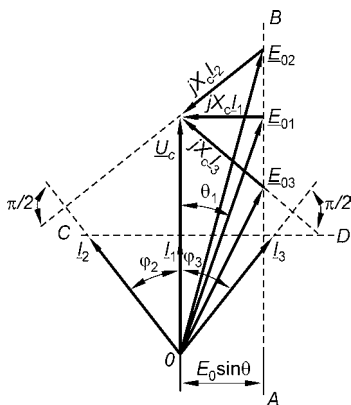


Рис. 13.22
Векторные диаграммы
синхронного двигателя
при $M_2 = \text{const}$ и изменении
тока возбуждения

ния $jX_c I_2$ на угол $\pi/2$, т. е. является перпендикулярным к нему. Так как значение тока I_2 определяется условием (13.11), то конец его вектора при любом токе возбуждения должен скользить по линии CD , проведенной через конец вектора тока $\underline{I}_1 = \underline{I}_a$ перпендикулярно вектору напряжения \underline{U}_c . Полученный вектор тока \underline{I}_2 опережает напряжение \underline{U}_c на угол φ_2 , что означает, что синхронный двигатель при увеличении тока возбуждения сверх нормального ведет себя как емкостный элемент, т. е. реактивная составляющая тока статора и реактивная мощность двигателя имеют емкостный характер. В результате ток статора увеличивается.

При уменьшении тока возбуждения ЭДС уменьшается до E_{03} . Вектор тока \underline{I}_3 имеет реактивную индуктивную составляющую, т. е. в этом случае синхронный двигатель ведет себя как индуктивный элемент или как асинхронный двигатель, реактивная составляющая тока и реактивная мощность которого имеют индуктивный характер. Ток статора также увеличивается по сравнению с током \underline{I}_1 исходного режима.

Как при уменьшении, так и при увеличении тока возбуждения по сравнению с нормальным значением в токе якоря появляется реактивная составляющая, вследствие чего ток якоря и угол φ увеличиваются, а $\cos \varphi$ уменьшается.

Зависимости $I(I_B)$ и $\cos \varphi(I_B)$ имеют вид буквы U (рис. 13.23), поэтому их называют U-образными характеристиками. Их строят при условии $U_c = \text{const}$, $M_2 = \text{const}$. Двигатель имеет семейство U-образных характеристик для различных значений момента M_2 .

При уменьшении тормозного момента на валу двигателя активная составляющая тока и ток статора уменьшаются. На рис. 13.24 приведены векторные диаграммы для исходного режима (\underline{E}_{01} , \underline{I}_1 , $jX_c \underline{I}_1$) и для режима, соответствующего меньшему моменту (\underline{E}'_{01} , \underline{I}'_1 , $jX_c \underline{I}'_1$) при $I_B = \text{const}$. При уменьшении

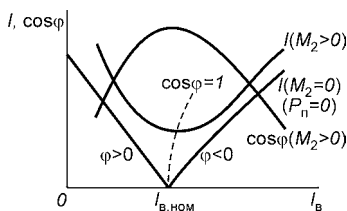


Рис. 13.23
U-образные
характеристики
синхронного двигателя

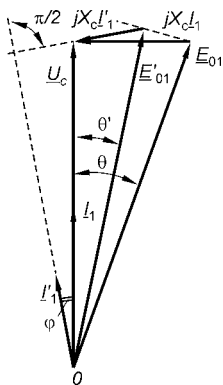


Рис. 13.24
Векторные
диаграммы синхрон-
ного двигателя при
 $I_b = \text{const}$ и измене-
нии тормозного
момента на валу
двигателя

момента угол θ уменьшается до θ' , а конец вектора \underline{E}'_{01} описывает окружность, так как $E'_{01} = E_{01}$ при $I_b = \text{const}$. Вектор тока \underline{I}'_1 , отстающий от вектора $jX_c \underline{I}'_1$ на угол $\pi/2$, опережает вектор напряжения \underline{U}_c на угол φ , т. е. с уменьшением тормозного момента в токе статора появляется емкостная составляющая. Чтобы поддержать $\cos \varphi = 1$, необходимо уменьшить ток возбуждения, что приведет к уменьшению ЭДС E_0 , повороту векторов $jX_c \underline{I}'_1$ и \underline{I}'_1 по часовой стрелке и совпадению по фазе тока \underline{I}'_1 и напряжения \underline{U}_c . Поэтому с уменьшением момента M_2 значение нормального тока возбуждения, при котором $\cos \varphi = 1$, также уменьшается (штриховая линия на рис. 13.23).

Рабочие характеристики. Рабочие характеристики представляют собой зависимости частоты вращения n , вращающего момента M , тока статора I , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и КПД η от мощности P_2 на валу двигателя при $U_c = \text{const}$, $f = \text{const}$ и $I_b = \text{const}$ (рис. 13.25). Представленные характеристики соответствуют току возбуждения, при котором в режиме холостого хода двигатель имеет $\cos \varphi = 1$.

Выбор значения тока возбуждения, которое в дальнейшем поддерживают постоянным, определяется режимом реактивной мощности двигателя. Выпускаемые промышленностью синхронные двигатели имеют номинальное значение $\cos \varphi = 0,8 \dots 0,85$ при отрицательном угле φ . На практике угол φ можно поддерживать близким к нулю ($\cos \varphi = 1$) или отличным от нуля (отрицательным).

В режиме холостого хода $M = M_0$, т. е. M равно моменту, определяемому потерями в самом двигателе. При $f = \text{const}$ частота вращения n постоянна, а вращающий момент прямо пропорционален мощности P_2 . С ростом нагрузки увеличивается активная и появляется индуктивная составляющая тока статора, угол φ увеличивается, а $\cos \varphi$ уменьшается.

Ток статора I с увеличением мощности P_2 растет, начиная от значения, равного току холостого хода, за счет увеличения активной и реактивной составляющих. Ток холостого хода зависит от значения тока возбуждения. Ток холостого хода достигает минимального значения при $\cos\varphi = 1$ (при нормальном токе возбуждения) и составляет 5...10%, а при $\cos\varphi = 0,8$ он может достигать 50...60% от номинального значения тока якоря.

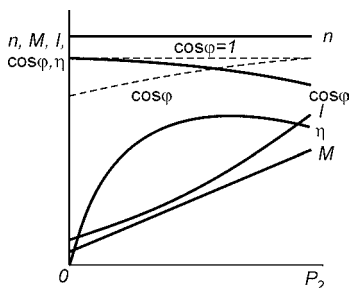


Рис. 13.25
Рабочие характеристики синхронного двигателя

Изменение КПД η — типичное для электрических машин.

На рис. 13.25 штриховой линией проведена кривая изменения $\cos\varphi$ при условии, что при номинальной мощности $P_{2\text{ном}}$ установлен ток возбуждения, при котором $\cos\varphi = 1$.

13.8. СИНХРОННЫЙ КОМПЕНСАТОР

Синхронным компенсатором называют синхронную машину, предназначенную для генерирования реактивной энергии. Активная составляющая тока статора синхронного компенсатора мала в сравнении с номинальным током, поэтому номинальный ток практически является реактивным током.

Большинство приемников электроэнергии переменного тока (асинхронные двигатели, трансформаторы, индукционные печи, тиристорные преобразователи и др.) могут работать только при наличии индуктивной составляющей тока, создающей магнитное поле в них. В результате увеличиваются полный ток электроприемника $I_{\text{пр}}$ (см. рис. 13.26) и ток в линии передачи, а $\cos\varphi_{\text{пр}}$ уменьшается. Это приводит к увеличению мощности потерь $I_{\text{пр}}^2 R_{\text{л}}$ и к потере напряжения $\Delta U = I_{\text{пр}} R_{\text{л}} \cos\varphi_{\text{пр}} + I_{\text{пр}} X_{\text{л}} \sin\varphi_{\text{пр}}$ в линии передачи. Вследствие этого снижается экономичность передачи электрической энергии и возникают большие отклонения напряжения на зажимах приемников.

При подключении синхронного компенсатора в точку включения электроприемников (см. рис. 13.27) ток

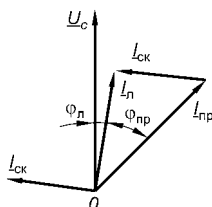


Рис. 13.26

Векторная диаграмма токов электроприемника и синхронного компенсатора

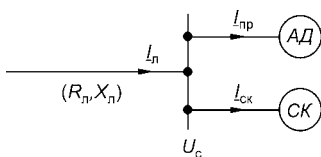


Рис. 13.27

Схема включения асинхронного двигателя и синхронного компенсатора

в линии равен сумме токов приемников $I_{\text{пр}}$ и компенсатора $I_{\text{ск}}$: $I_{\text{л}} = I_{\text{пр}} + I_{\text{ск}}$. Как видно из векторной диаграммы, представленной на рис. 13.26, ток в линии уменьшается ($I_{\text{л}} < I_{\text{пр}}$), а $\cos \varphi_{\text{л}} > \cos \varphi_{\text{пр}}$. В результате уменьшаются мощность потерь и потери напряжения в линии передачи. Таким образом, синхронный компенсатор является местным источником реактивной мощности для электроприемников, он освобождает линии передачи большой протяженности от реактивной мощности. Устанавливают синхронные компенсаторы на крупных подстанциях.

Оптимальная мощность синхронных компенсаторов в узлах потребления составляет 20...30% полной мощности линии электропередачи. Промышленность выпускает синхронные компенсаторы мощностью от 10 МВ А до 160 МВ А на напряжения 6,6...15,75 кВ при частотах вращения 750...1000 об/мин.

Пуск синхронных компенсаторов аналогичен пуску синхронных двигателей.

13.9. РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Синхронный реактивный двигатель не имеет обмотки возбуждения на роторе, а следовательно, и основного магнитного потока Φ_0 . Существует только один магнитный поток — поток якоря, создаваемый реактивным током якоря (статора). Поэтому двигатель и называют реактивным.

Статор реактивного двигателя выполняют так же, как у обычного синхронного или асинхронного двигателя. Ротор имеет явно выраженные полюсы, магнитная проводимость которых различна в продольном и поперечном направлениях (рис. 13.28). Явно выраженные полюсы

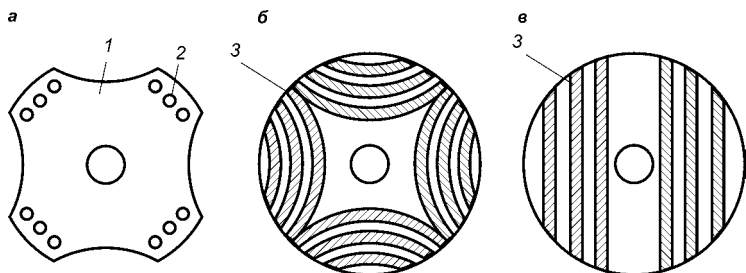


Рис. 13.28

Типы конструкций роторов реактивных двигателей

а, б — четырехполюсный; в — двухполюсный; 1 — стальной лист ротора; 2 — стержень короткозамкнутой обмотки; 3 — стальные секции, залитые алюминием.

создают различными способами. Ротор (рис. 13.28а) может быть изготовлен так же, как короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя с выфрезерованными впадинами. В других типах роторов (рис. 13.28б, в) стальные листы различной ориентации, имеющие хорошую магнитную проводимость в определенном направлении, заливают алюминием.

Трехфазная или двухфазная обмотка статора создает вращающийся магнитный поток. Короткозамкнутая обмотка ротора (рис. 13.28а) создает асинхронный вращающийся момент, под действием которого ротор разгоняется до частоты вращения, близкой к синхронной. После этого вращающийся магнитный поток, стремясь замкнуться по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, создает тангенциальную составляющую силу, которая заставляет ротор вращаться с частотой, равной частоте вращения магнитного потока статора $n = 60f/p = \text{const}$. В роторах других типов вращающийся момент создается вихревыми токами, индуцируемыми в алюминиевой заливке.

13.10. СЕЛЬСИНЫ

Устройство и принцип действия. *Сельсином* называют машину переменного тока малой мощности, предназначенную для синхронной передачи угла поворота или вращения либо для генерирования напряжения, пропорционального углу рассогласования. Таким образом, с помощью сельсинов можно обеспечить синхронное вращение не связанных механически валов или обеспечить

одновременный поворот валов на одинаковый угол. Своё название сельсины получили от английского слова *selfsynchronising*, что в переводе на русский язык означает «самосинхронизирующийся». Мощность сельсинов — несколько ватт.

Сельсины имеют статор и ротор, магнитопровод которых набирают из листовой стали, и две обмотки: обмотку возбуждения и обмотку синхронной связи. Одну из них располагают на статоре, другую — на роторе. От этого зависит конструкция сельсина.

Обмотка возбуждения является однофазной, питаемой от источника переменного тока. Поэтому сельсины — однофазные машины. Если обмотка возбуждения расположена на роторе (рис. 13.29а), то его труднее балансировать, но для соединения с обмоткой на валу сельсина необходимо иметь только два скользящих контакта, образуемых щётками и кольцами на валу ротора. Если обмотка возбуждения расположена на статоре (рис. 13.29б), то его легче балансировать, но для соединения с обмоткой связи, расположенной на роторе, требуется три скользящих контакта.

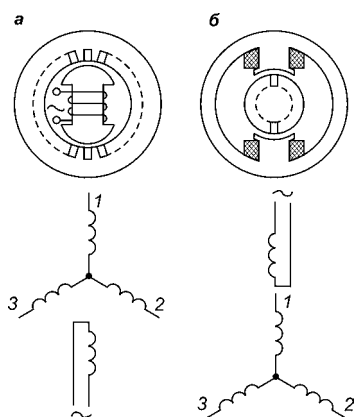


Рис. 13.29
Устройство однофазных
контактных сельсинов и их
электрические схемы

а — обмотка возбуждения на роторе; б — обмотка возбуждения на статоре.

Обмотка синхронной связи состоит из трех обмоток (1, 2, 3), соединенных звездой. Если обмотку возбуждения располагают на роторе, то обмотки синхронной связи — на статоре, и наоборот. Обмотки синхронной связи располагают в пазах, в пространстве машины они сдвинуты на угол 120° .

Принцип действия сельсина не зависит от места расположения обмоток. Обмотку возбуждения подключают к источнику переменного тока. Ток I_v в обмотке возбуждения (рис. 13.30) создает пульсирующий магнитный поток Φ_v , замыкающийся через статор и ротор. Таким образом, обмотка возбуждения сельсина в данном случае

играет роль первичной обмотки трансформатора. Созданный ею поток изменяется во времени по синусоидальному закону и индуцирует в обмотках синхронной связи синусоидальные ЭДС, совпадающие по фазе. Значение ЭДС в обмотке зависит от ее положения по отношению к осевой линии обмотки возбуждения. ЭДС с максимальной амплитудой индуцируется в той обмотке, осевая линия которой совпадает с осевой линией обмотки возбуждения (на рис. 13.30а в обмотке 1). Это же относится и к действующим значениям ЭДС в обмотках синхронной связи, которые меньше максимальных значений в $\sqrt{2}$ раза.

При повороте ротора на угол α (рис. 13.30б) амплитудные и действующие значения ЭДС в обмотках связи изменяются по закону косинуса:

$$E_1 = E \cos \alpha; E_2 = E \cos(\alpha - 120^\circ); E_3 = E \cos(\alpha - 240^\circ),$$

где E — действующее значение ЭДС в обмотке, когда ее осевая линия совпадает с осевой линией обмотки возбуждения. Изменение действующих значений ЭДС в зависимости от угла поворота ротора показано на рис. 13.31.

Сельсины жестко соединяют с валами тех механизмов, частота вращения или угол поворота которых синхронизируются. Сельсин, соединенный с валом, изменение положения которого задают произвольно или по какой-либо программе, называют *сельсином-датчиком*, а сельсин, соединенный с другим валом, который должен синхронно осуществить то же изменение своего положения, называют *сельсином-приемником*. Если за исходное положение роторов сельсинов принять положение, при котором осевая линия обмотки 1 синхронной связи (см. рис. 13.30) совпадает с осевой линией обмотки возбуждения, то углы поворота по отношению к положению обмотки 1 обозначают: θ_d — угол поворота ротора сельсина-датчика; θ_n — сельсина-приемника. Разность $\theta_d - \theta_n = \theta$ называют *углом рассогласования сельсинов*.

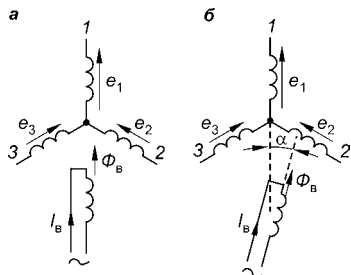


Рис. 13.30
Индуктирование ЭДС
в обмотке синхронной связи
сельсинов

а — исходное положение ($\alpha = 0$);
б — при повороте ротора на угол α .

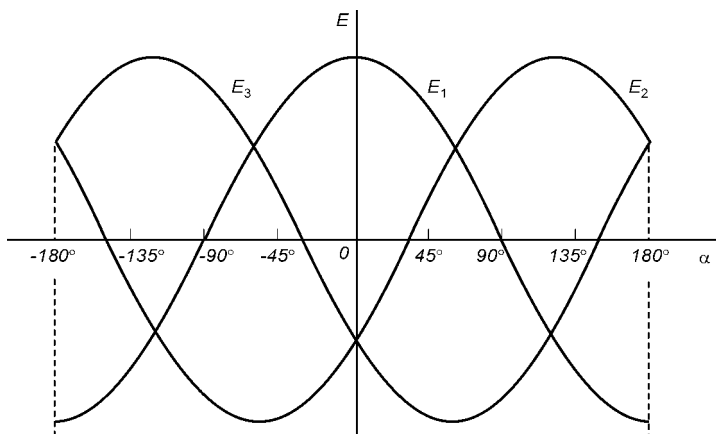


Рис. 13.31

Изменение действующих значений ЭДС в обмотках 1, 2, 3 синхронной связи (рис. 13.30) в зависимости от угла поворота ротора

Сельсины в индикаторном режиме. Схема включения сельсинов, работающих в индикаторном режиме, показана на рис. 13.32. Обмотки возбуждения сельсина-датчика (СД) и сельсина-приемника (СП) подключают к одному источнику переменного тока. Прерывистыми пунктирными линиями показано, что расстояние между сельсинами может быть сколь угодно большим. Одноименные обмотки синхронной связи соединяют линиями связи.

Магнитные потоки Φ_v в сельсинах совпадают по фазе. В исходном положении (рис. 13.32а), когда обмотки синхронной связи сельсинов занимают одинаковое положение в пространстве и осевые линии обмоток 1 совпадают

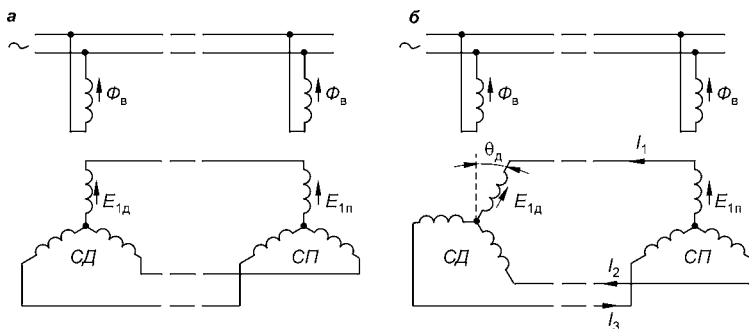


Рис. 13.32

Схема включения сельсинов при работе их в индикаторном режиме а — $\theta = 0$; б — $\theta = \theta_d$.

с осевыми линиями обмоток возбуждения, в одноименных обмотках синхронной связи *СД* и *СП* индуцируются одинаковые по значению и направлению ЭДС (на рисунке показаны $E_{1д}$ и $E_{1п}$). Суммарная ЭДС в контуре обмоток $\Delta E_1 = E_{1д} - E_{1п} = 0$, ΔE_2 и ΔE_3 также равны нулю. Поэтому в линиях и обмотках связи тока нет, магнитные потоки обмоток ротора отсутствуют и вращающий момент не создается.

Если повернуть ротор *СД* на угол θ_d (рис. 13.32б), то значение ЭДС в обмотках связи *СД* изменится в соответствии с рис. 13.31, а в обмотках связи *СП* останется прежним. В результате в контуре обмоток появляются ЭДС $\Delta E > 0$, значение и направление которых можно определить с помощью рис. 13.31. Под действием ЭДС ΔE в линиях и обмотках связи возникнут уравнивающие токи (I_1 , I_2 и I_3). Обмотки связи создают пульсирующие магнитные потоки Φ_r роторов сельсинов, сдвинутые в пространстве по отношению к потокам Φ_v статора на угол рассогласования θ .

В результате взаимодействия магнитных потоков статора и ротора возникает вращающий синхронизирующий момент, пропорциональный $\sin\theta$, под действием которого ротор *СП* поворачивается. По мере поворота угол θ и синхронизирующий момент уменьшаются. Когда ротор *СП* повернется на угол $\theta_n = \theta_d$, угол рассогласования и синхронизирующий момент станут равными нулю. Ротор *СП* остановится. Поэтому ротор сельсина-приемника поворачивается на такой же угол, какой был задан сельсином-датчиком. На валу *СП* может быть укреплена стрелка, которая покажет угол, заданный *СД*. Отсюда и название режима.

Сельсины в трансформаторном режиме. Трансформаторный режим сельсинов применяют тогда, когда нужно осуществить синхронное вращение или поворот ведомого вала, на котором имеется нагрузка. Мощности сельсина достаточно только для поворота стрелки указывающего прибора, но недостаточно для преодоления какого-либо момента, создаваемого исполнительным механизмом.

К источнику переменного тока подключают только обмотку возбуждения сельсина-датчика (см. рис. 13.33). В обмотках синхронной связи *СД* индуцируются ЭДС, под действием которых в линиях связи и обмотках связи *СП* возникают токи (показаны ЭДС $E_{1д}$ и ток I_1 обмотки *I*). Ток в обмотке ротора *СП* создает пульсирующий

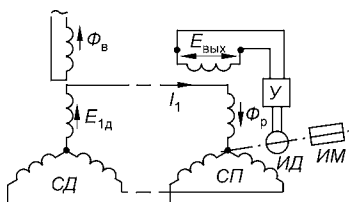


Рис. 13.33
*Схема включения сельсинов
 при работе в трансформатор-
 ном режиме*

магнитный поток ротора Φ_r , замыкающийся через статор и индуцирующий в обмотке возбуждения ЭДС выхода $E_{\text{вых}}$. Таким образом, обмотка связи СП играет роль первичной обмотки, а обмотка возбуждения — вторичной обмотки трансформатора. Отсюда название режима.

В исходном положении обмоток, показанном на рис. 13.33, обмотка возбуждения СП расположена под углом 90° к осевой линии обмотки 1 синхронной связи. Поэтому в ней индуцируется ЭДС $E_{\text{вых}} = 0$. Ротор сельсина-приемника не вращается.

Если повернуть ротор сельсина-датчика на угол θ_d , то магнитный поток ротора Φ_r сельсина-приемника повернется в пространстве сельсина на тот же угол $\theta_d = \theta$, т. е. угол рассогласования, как это имело место при индикаторном режиме. В результате возникнет составляющая магнитного потока Φ_r , совпадающая с осевой линией обмотки возбуждения. Эта составляющая пропорциональна $\sin\theta$, поэтому она индуцирует ЭДС выхода:

$$E_{\text{вых}} = E \sin\theta,$$

где E — ЭДС выхода при $\theta = 90^\circ$, т. е. максимальное действующее значение ЭДС.

ЭДС $E_{\text{вых}}$ подается на усилитель $У$ и далее на обмотку управления исполнительного двигателя ИД. При включении обмотки управления двигатель начинает вращаться. На одном валу с двигателем находятся ротор сельсина-приемника и исполнительный механизм (ИМ), вращающаяся часть которого необходимо повернуть на угол, заданный сельсин-датчиком. Когда исполнительный двигатель, а следовательно, и ротор сельсина-приемника повернутся на угол θ , ЭДС $E_{\text{вых}}$ станет равной нулю и сигнала на обмотке управления двигателя не будет. Двигатель остановится.

Таким образом, в трансформаторном режиме в отличие от индикаторного вращения вала осуществляет специальный двигатель. Это позволяет управлять на расстоянии вращением механизмов с большим тормозным моментом.

АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ, ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

14.1. АППАРАТУРА РУЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Простейшим электрическим аппаратом, применяемым в стационарных установках, является *рубильник* (рис. 14.1), предназначенный для нечастого включения и отключения электрической цепи постоянного и переменного тока напряжением до 1 кВ. Рубильники бывают открытого и закрытого (с металлическим кожухом) исполнения; с боковой или центральной рукояткой; одно-, двух- и трехполюсные. Изготавливают рубильники на малые (5...10 А) и большие (100 А и более) токи. В основном рубильники предназначены для отключения цепей без тока, т. е. играют роль *разъединителей*. Если рубильники используют для выключения цепей под нагрузкой, то их контакты снабжают дугогасительными камерами.

Для предохранения контактов от оплавления при образовании электрической дуги в момент разрыва контактов рубильники выполняют с двумя параллельными ножами: главным 4 и вспомогательным 2. Кроме шарнирного ножи имеют пружинное соединение 3. При размыкании вспомогательный нож быстро выходит из неподвижных контактов 1, в результате чего образовавшаяся электрическая дуга имеет малую мощность и быстро гаснет.

Провода питающей сети присоединяют к неподвижным контактам, что обеспечивает большую безопасность обслуживающего персонала.

Если имеется два ряда неподвижных контактов, и подвижные контакты

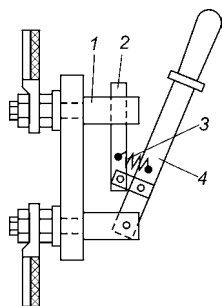


Рис. 14.1
Схема устройства
рубильника

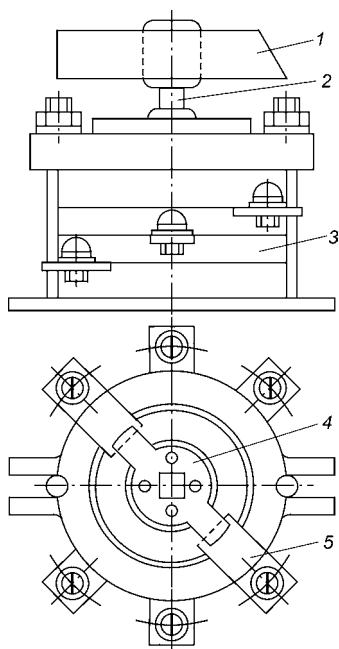


Рис. 14.2

Схема устройства трехполюсного пакетного выключателя

могут поочередно замыкаться то с одним, то с другим их рядом, рубильник называется *переключателем*.

Пакетные выключатели (рис. 14.2) и переключатели состоят из пакетов-колец, изготовленных из изолирующего материала. Между пакетами 3 укреплены неподвижные контакты 5. Подвижные контакты выполняют в виде пластин 4 различной формы, насаживаемых на стержень 2 квадратного сечения. Эти пластины изолированы от стержня и друг от друга и их можно поворачивать на угол 45, 90 или 120° с помощью рукоятки 1. Таким образом, контактное устройство каждого полюса или фазы изолировано.

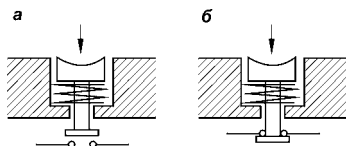
При повороте стержня 2 в каждом полюсе создается два разрыва. Дуга быстро гаснет в закрытом пространстве, чему способствуют дугогасительные фибровые шайбы, расположенные между пластинами. Для быстрого переключения и фиксации положения рукоятки в верхней части аппарата размещают пружинное устройство.

Пакетные выключатели и переключатели могут быть одно-, двух-, трех- и многополюсными. Пластины, являющиеся подвижными контактами, в пакетных переключателях имеют различную конфигурацию, поэтому при поворотах рукоятки на 90° получают различные комбинации замыкания и размыкания электрических цепей. Выпускают пакетные выключатели серий *ПВ* и переключатели серии *ПП* с числом шайб до семи на номинальные токи от 10 до 400 А. Они имеют наибольшую частоту отключений в час — 300.

Для ручного дистанционного управления электромагнитными аппаратами применяют *кнопки управления* (рис. 14.3). При нажатии на кнопку управления

Рис. 14.3
Схема устройства
кнопок управления

а — замыкающая; б — размыкающая.



электрическая цепь либо замыкается (рис. 14.3а), либо размыкается (рис. 14.3б). В зависимости от типа кнопки количество контактов может быть различным, но не более восьми. Комплект кнопок управления, смонтированных в едином корпусе, образует *кнопочную станцию*.

Аппараты ручного управления разнообразны как по назначению, так и по конструкции. Среди них выключатели, тумблеры, путевые переключатели, конечные выключатели, контроллеры и др.

14.2. ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Плавкие предохранители предназначены для защиты электроустановок от токов короткого замыкания и длительных перегрузок. Они получили свое название от плавкой вставки — их основной детали. Плавкую вставку изготавливают из легкоплавких металлов и их сплавов (свинца, олова, цинка, иногда меди и серебра) и включают последовательно с защищаемой электроустановкой (электрической сетью, электродвигателем и т. д.).

Во всей электрической цепи, состоящей из последовательно включенных предохранителя, проводов и электроустановки (рис. 14.4), в которых ток имеет одно и то же значение, самым слабым местом в тепловом отношении является плавкая вставка предохранителя. Ее защитная характеристика, называемая также времятоковой, представляет зависимость времени расплавления $t_{пл}$ от тока в цепи, она показана на рис. 14.5. Видно, что при токе в плавкой вставке, равном ее номинальному току ($I/I_{ном} = 1$), она не расплавляется. Если по каким-либо причинам (короткое замыкание, перегрузка) ток в цепи увеличивается, то температура плавкой вставки повышается и через некоторое время она расплавляется. Чем на большее

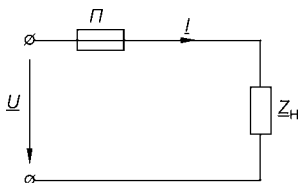


Рис. 14.4
Схема включения
предохранителя

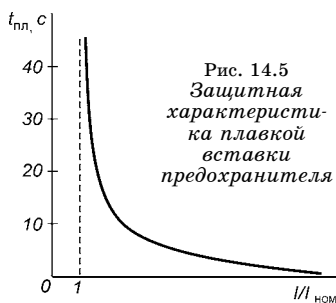


Рис. 14.5
Защитная
характеристи-
ка плавкой
вставки
предохранителя

значение ток в цепи превышает номинальный ток плавкой вставки, тем быстрее она расплавится, что приведет к разрыву электрической цепи. Это равносильно отключению электроустановки.

Конструктивно предохранители делят на предохранители пробочного типа и трубчатые.

Предохранители *пробочного типа* имеют фарфоровый корпус и плавкую вставку. *Номинальным током* предохранителя является наибольший ток, который предохранитель способен отключить без его разрушения. Следовательно, в предохранитель можно устанавливать плавкие вставки, номинальный ток которых не превышает номинального тока предохранителя. Так, плавкий предохранитель с номинальным током 20 А можно эксплуатировать с плавкими вставками на 6, 10, 15 или 20 А. *Трубчатые* предохранители, применяемые в сетях напряжением до 1 кВ, выпускают на токи до 1000 А. Их конструкции весьма разнообразны. Для защиты сетей с малыми токами (радиоприемники, телевизоры и т. д.) применяют предохранители со *стеклянным патроном* и плавкой вставкой в виде тонкой проволоки.

В силовых сетях широкое распространение получили предохранители с *закрытыми разборными патронами без наполнителя* серии ПР-2 на токи патронов 15...1000 А и плавких вставок 6...1000 А. Патрон предохранителя (рис. 14.6) выполняют в виде фибровой трубки 1, по концам которой укреплены латунные втулки 2. Латунные колпаки 3, накрученные на втулки, у предохранителей

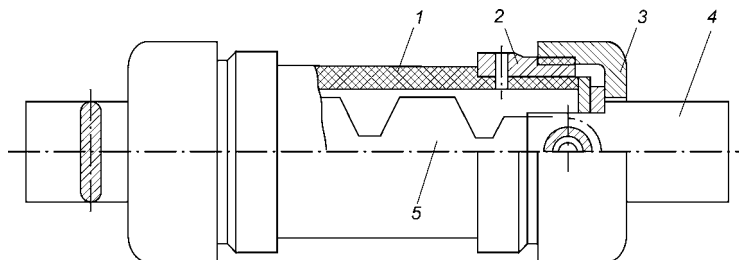


Рис. 14.6
Трубчатый предохранитель серии ПР-2

с номинальным током до 60 А являются контактной частью. У предохранителей на 100...1000 А контактной частью являются медные ножи 4.

Плавкая вставка 5, изготовленная из цинковой пластины, имеет несколько суженных мест, в которых образуется электрическая дуга. Под действием высокой температуры фибра разлагается, выделяющийся при этом газ создает высокое давление внутри патрона и препятствует ионизации, что способствует быстрому гашению дуги. Так как предохранитель разборный, то перегоревшая плавкая вставка может быть заменена другой.

Имеются предохранители с *наполнителем*. В качестве наполнителя используют сухой мелкий кварцевый песок. Это неразборные герметизированные предохранители с фарфоровым патроном. Кварцевый песок отнимает теплоту от электрической дуги и тем самым способствует быстрому ее гашению.

14.3.

КОНТАКТОРЫ И МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКОВ

Контактором называют коммутационный электромагнитный аппарат, у которого вручную производят переключение в цепи управления, а переключение в главной цепи происходит при этом автоматически. Контакторы предназначены для частых включений и отключений электроустановки под нагрузкой (до 1500 включений и отключений в час).

По роду тока в главной (силовой) цепи контактора различают контакторы постоянного и переменного токов. В зависимости от назначения главной электрической цепи, включаемой и отключаемой главными контактами, контакторы бывают *линейные*, включающие и отключающие различные электрические цепи (обмотки электрических машин и т. д.), и контакторы *ускорения*, служащие для переключения ступеней пускового или регулировочного реостата.

Устройство и принцип действия электромагнитного контактора показаны на рис. 14.7. При замыкании кнопки управления 1 в цепи управления 2, представляющей собой катушку, намотанную на сердечник 3, возникает ток. Созданный им магнитный поток и электромагнитная сила притягивают якорь 5 к сердечнику 3. Магнитный поток замыкается по магнитопроводу, состоящему из

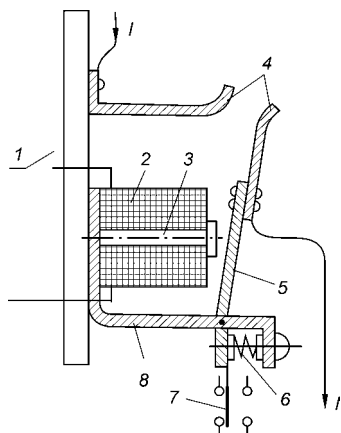


Рис. 14.7
Устройство и принцип действия контактора

сердечника 3, якоря 5 и скобы 8. Когда якорь притянут к сердечнику, замыкаются главные контакты 4 и осуществляется или подача напряжения на обмотку электродвигателя, или шунтирование ступени пускового реостата.

Катушку 2 наматывают из большого количества витков тонкого провода, поэтому ток в ней небольшой. Следовательно, вручную кнопкой управления замыкают и размыкают цепь с малым током. Кнопка управления имеет небольшие размеры и может

быть размещена на любом удобном для оператора расстоянии от электроустановки. Контактор же размещают вблизи электроустановки. Таким образом, можно дистанционно управлять электроустановкой.





Одновременно с замыканием главных контактов происходит переключение блок-контактов 7, число которых может быть различным. В зависимости от конкретной схемы включения контактора блок-контакты могут быть использованы все, или частично, или ни один из них не использован. Блок-контакты включают в цепь управления данного контактора или другого аппарата.

При размыкании кнопки управления цепь управления размыкается, магнитный поток исчезает и под действием пружины 6 якорь 5 отпадает от сердечника. При этом главные контакты размыкаются и электроустановка отключается. У некоторых типов контакторов якорь отпадает от сердечника под действием собственного веса.

На электрических схемах контакты контактора изображают в таком положении, которое они занимают в момент, когда в цепи управления данного контактора нет тока. Главные контакты 4 контактора, изображенного на рис. 14.7, как и правый блок-контакт 7, являются *замыкающими*, а левый блок-контакт — *размыкающим*. Изображение контактов и катушек (обмоток) на электрических схемах показано в табл. 14.1 (по ГОСТ 2.755).

**Условные графические обозначения на электрических схемах
некоторых элементов и устройств электрической цепи**

Наименование элемента		Обозначение
Контакт коммутирующего устройства (общее обозначение)	замыкающий	
	размыкающий	
	переключающий	
Выключатель	однополюсный	
	трехполюсный	
Переключатель	однополюсный	
	трехполюсный	
	двухполюсный трехпозиционный с нейтральным положением	
Разъединитель		
Выключатель нагрузки		
Выключатель автоматический		
Кнопки управления	с замыкающим контактом	
	с размыкающим контактом	
Контакт главной цепи контактора, магнитного пускателя	замыкающий	
	размыкающий	
	замыкающий дугогасительный	
	размыкающий дугогасительный	
Контакт теплового реле без самовозврата (с возвратом нажатием кнопки)		
Контакт замыкающий с выдержкой времени	при замыкании	
	при размыкании	

Наименование элемента		Обозначение
Контакт размыкающий с выдержкой времени	при размыкании	
	при замыкании	
Обмотка контактора, реле		
Нагревательный элемент теплового реле		

Контакторы постоянного тока бывают одно- и двух-полюсными. Все части магнитопровода изготовляют цельными из электротехнической стали. Благодаря большой индуктивности катушки управления после замыкания цепи управления ток в ней нарастает медленно (по экспоненциальному закону) до установившегося значения, которое при постоянном токе не зависит от индуктивности катушки, а следовательно, от положения якоря. Так же медленно нарастает магнитный поток. Поэтому у контакторов постоянного тока якорь притягивается медленно и удары якоря по сердечнику слабые. Это обуславливает большую механическую долговечность контакторов постоянного тока (до 30...50 млн включений).

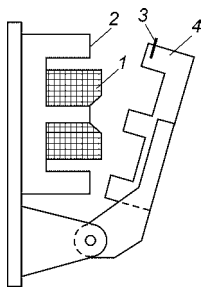


Рис. 14.8
Схема Ш-образного магнитопровода контактора переменного тока
1 — катушка; 2 — сердечник; 3 — короткозамкнутый виток; 4 — якорь.

Магнитопровод контакторов переменного тока выполняют из отдельных листов электротехнической стали (для уменьшения потерь, обусловленных вихревыми токами). По форме магнитопроводы бывают соленоидные, П- и Ш-образные (рис. 14.8). Катушки управления имеют меньшее число витков, так как в отличие от катушек контакторов постоянного тока они имеют большую индуктивную составляющую сопротивления (при замкнутой магнитной системе). В момент включения катушки управления ток в ней велик, якорь быстро притягивается и ударяется о сердечник, после чего ток в цепи

управления снижается. Удары якоря о сердечник сокращают срок службы контактора.

Во включенном состоянии контакторы переменного тока создают шум (гудение). Этот шум вызван тем, что при питании катушки управления переменным током при частоте 50 Гц ток и магнитный поток 100 раз в секунду проходят через нулевые значения, когда сила, удерживающая якорь у сердечника, становится равной нулю.

Образующаяся в результате этого вибрация якоря и создает гудение. Поэтому контакторы переменного тока имеют специальное устройство для уменьшения шума. Обычно это короткозамкнутый виток (медный), плоскость которого перпендикулярна магнитным линиям. Виток размещают на торце якоря или сердечника так, что он охватывает часть сечения магнитопровода. Часть созданного током катушки

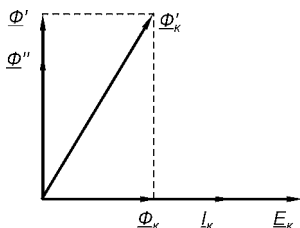


Рис. 14.9
Векторная диаграмма
магнитных потоков контак-
тора переменного тока

управления переменного магнитного потока $\underline{\Phi}'$ пронизывает короткозамкнутый виток и индуцирует в нем ЭДС $\underline{E}_к$ (рис. 14.9), под действием которой в витке возникает ток $\underline{I}_к$, создающий магнитный поток $\underline{\Phi}_к$. Таким образом, через охваченную витком часть магнитопровода проходит магнитный поток $\underline{\Phi}'_к = \underline{\Phi}' + \underline{\Phi}_к$.

Через часть магнитопровода, не охваченную витком, проходит магнитный поток $\underline{\Phi}''$, созданный током управления и совпадающий по фазе с потоком $\underline{\Phi}'$. Так как потоки $\underline{\Phi}''$ и $\underline{\Phi}_к$ не совпадают по фазе, то, когда магнитный поток, созданный катушкой управления, проходит через нулевое значение, якорь удерживается у сердечника потоком короткозамкнутого витка, который в это время отличен от нуля.

При размыкании главных контактов контактора образуется электрическая дуга, так как в главной цепи токи могут достигать больших значений (в основном контакторы изготовляют на токи до 600 А). Электрическая дуга, если она мощная и горит долго, оплавляет контакты, делает их поверхность неровной. Это, в свою очередь, ведет к увеличению сопротивления контактов, так

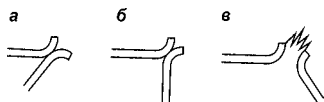


Рис. 14.10
Взаимное расположение
контактов в процессе их
размыкания

а — рабочий; б — промежуточное;
в — в момент разрыва.

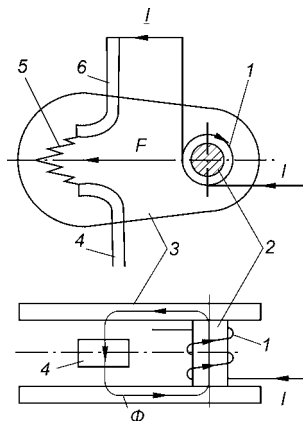


Рис. 14.11
Устройство и принцип
действия дугогасительной
катушки

как площадь соприкосновения уменьшается (соприкосновение точками, а не плоскостью). В результате под воздействием рабочего тока контакт сильно нагревается и еще больше разрушается. Поэтому контакторы имеют устройства дугогашения или в них предусматриваются меры, способствующие быстрому дугогашению.

Размыкание контактов начинается с *перекатывания* подвижного контакта по неподвижному контакту (рис. 14.10а). Разрыв контактов и образование дуги начинается тогда, когда контакты соприкасаются своими верхними частями (рис. 14.10б, в). Это предохраняет от разрушения рабочие точки контакта. При включении контактора контакты соприкасаются сначала своими верхними частями.

Другие способы улучшения дугогашения основаны на воздействии на саму дугу. Электрическую дугу легче погасить, если ее растянуть (удлинить). При этом увеличивается интенсивность отдачи теплоты в окружающую среду, и дуга гаснет быстрее.

Для растяжения дуги применяют *дугогасительные катушки*, включаемые последовательно в главную цепь. Катушку 1 (рис. 14.11) выполняют из небольшого числа витков толстого провода и насаживают на стальной стержень 2, являющийся сердечником магнитопровода. Созданный ток I главной цепи магнитный поток замыкается через металлические щечки 3, изготовленные из листовой стали, и через пространство между главными контактами 4 и 6. Образующаяся электрическая дуга 5 при размыкании контактов представляет собой «гибкий проводник с током», помещенный в магнитное поле. Как известно, на такой проводник действует сила F , направление

которой определяют по правилу левой руки. Направление тока в катушке выбирают таким, чтобы сила F «выдувала» дугу на концы контактов. Электрическая дуга, передвигаясь, растягивается и быстро гаснет. Дугогасительные катушки применяют в контакторах постоянного и переменного токов, так как направление силы F остается постоянным и при переменном токе.

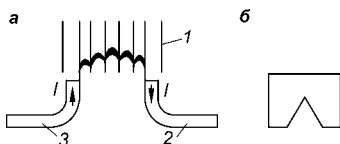
Для гашения электрической дуги применяют также *дугогасительные решетки* (рис. 14.12а), выполняемые из омедненных стальных пластин (рис. 14.12б), расположенных на расстоянии 1...2 мм друг от друга. Дугогасительную решетку размещают над главными контактами. Электрическая дуга перемещается на пластины 1 решетки как силой внешнего магнитного поля (с помощью дугогасительной катушки), так и силой магнитного поля контура тока I , образуемого контактами 2 и 3, или только под действием второй силы. При этом дуга удлиняется, разбивается пластинами на короткие дуги, пластины интенсивно отнимают теплоту от дуги, и дуга быстро гаснет.

Дугогасительные камеры, выполняемые из теплоустойчивого материала (асбоцемент), также улучшают условия гашения дуги. В этих камерах имеется узкая щель, в которой располагают контакты и ось которой совпадает с осью дуги. Асбоцементы являются изолирующими материалами, защищающими металлические нетокопроводящие части аппарата от переброса на них электрической дуги. Это позволяет гасить дугу в узком пространстве и обуславливает уменьшение габаритов контактора и снижение звукового и светового эффектов, связанных с замыканием и размыканием контактов.

Магнитные пускатели представляют совокупность контактора и тепловых реле (см. § 14.4), а иногда и плавких предохранителей, установленных на одной панели.

В последнее время находят применение бесконтактные тиристорные контакторы и пускатели, в которых проблемы, связанные с дугогашением, отсутствуют.

Рис. 14.12
Устройство и принцип действия дугогасительной решетки



14.4. РЕЛЕ

Реле — это аппараты, которые производят автоматическое переключение контактов в цепи управления другого аппарата. Сами реле не производят переключения в главной цепи коммутирующего аппарата, который включает и отключает электроустановку, они только передают команду другому аппарату.

Изготавливают реле разнообразными по конструкции, выполняемым функциям и принципу действия. По параметру, на изменение которого реагируют реле, различают реле токовые, напряжения, мощности, частоты, тепловые, газовые и др. По принципу действия воспринимающих

органов реле бывают электромагнитные, поляризованные, индукционные, электродинамические, ионные и др.

Тепловое реле предназначено в основном для защиты электродвигателей от длительных перегрузок на 10...20%. Наибольшее распространение имеют реле с биметаллической пластиной. Принцип действия такого реле поясняется на рис. 14.13.

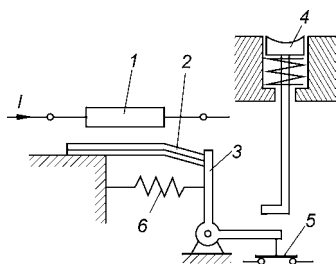


Рис. 14.13
Принцип действия теплового реле с биметаллической пластиной

Нагревательный элемент 1 включают последовательно с электрической цепью, которую надо защищать. Поэтому ток I в нем является током нагрузки. Теплота, выделяемая нагревательным элементом, нагревает расположенную рядом биметаллическую пластину 2. Эта пластина выполнена из двух материалов с разными тепловыми коэффициентами линейного расширения (нижняя пластина имеет больший коэффициент расширения). Если ток в цепи не превышает номинального значения, то количества теплоты, выделяемой нагревательным элементом, недостаточно для распрямления пластины 2.

При перегрузках двигателя ток в цепи превышает номинальное значение и нагревательный элемент выделяет теплоты больше. Через некоторое время деформация свободного конца биметаллической пластины приводит к ее распрямлению и рычаг 3 освобождается. Под

действием пружины 6 рычаг 3 поворачивается против часовой стрелки, и контакты 5, включенные в цепь управления контактора, размыкаются, отключая двигатель. Через некоторое время пластина 2 остынет, примет свою первоначальную форму, и тогда с помощью кнопки возврата 4 вручную можно вернуть рычаг 3 в рабочее положение и замкнуть контакты 5. Реле снова готово к работе. Обозначение на электрических схемах нагревательных элементов и контактов тепловых реле приведено в табл. 14.1.

Для нагревания биметаллической пластины требуется значительное время даже при очень большом токе нагрузки. Поэтому тепловое реле не может надежно защищать от токов короткого замыкания и его используют для защиты от токов, незначительно превышающих номинальный ток (это может быть вызвано перегрузкой двигателя или перегоранием предохранителя в одной фазе). Значение тока срабатывания реле, т. е. тока, при котором тепловое реле размыкает свои контакты, выбирают по номинальному току электродвигателя. Изменить ток срабатывания можно заменой нагревательного элемента, изменением расстояния между нагревательным элементом и биметаллической пластиной и другими способами (в зависимости от конструкции реле).

Для защиты двигателей от токов короткого замыкания применяют *максимальные токовые реле* (рис. 14.14). Катушку 1 реле включают последовательно с защищаемой цепью, поэтому ток в ней равен рабочему току электроустановки. Катушку реле выполняют из небольшого числа витков толстого провода, чтобы ее сопротивление было малым. Создаваемый ток магнитный поток замыкается по сердечнику 7, скобе 6 и якорю 4. При токе в катушке, равном номинальному или даже несколько превышающему его, якорь 4 удерживается в положении, изображенном на рис. 14.14, пружиной 5.

Если ток в цепи превысит номинальное значение в несколько раз, что имеет место при коротком замыкании, то возникающая электромагнитная сила станет столь велика, что

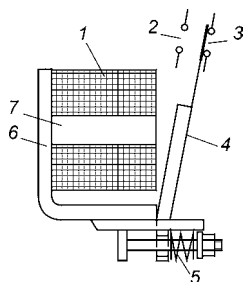


Рис. 14.14
Устройство
и принцип действия
максимального
токового реле с
поворотным якорем

якорь 4 притянется к сердечнику 7, преодолевая силу пружины 5. При этом контакт 3 разомкнется, а контакт 2 замкнется. Контакты 3 реле включают в цепь управления контактора или другого аппарата, поэтому при их размыкании контактор отключает электроприемник.

Ток срабатывания максимального токового реле регулируют натяжением пружины 5. Обычно выбирают ток срабатывания $I_{\text{сраб}} = (2...3)I_{\text{ном}}$. Время срабатывания реле, т. е. время от момента возникновения сверхтока в катушке до момента размыкания контактов 3, составляет 0,02...0,15 с. Чем больше ток, тем меньше время срабатывания. Максимальное токовое реле может быть настроено на защиту от чрезмерных перегрузок.

После срабатывания реле и отключения контактором электроустановки магнитный поток в реле исчезает и якорь отпадает от сердечника. Такое реле называют *реле с самовозвратом*.

Другие конструкции реле могут иметь или ручной, или электромагнитный возврат якоря в исходное положение. Максимальные токовые реле разнообразны по конструкции. По принципу действия и устройству *реле напряжения* подобно максимальному токовому реле. В отличие от него катушку реле напряжения наматывают из тонкого провода, она имеет большое число витков и большое сопротивление. Катушку включают на напряжение сети, и реле реагирует на изменение напряжения. Различают реле максимального и минимального напряжения.

Реле *максимального* напряжения регулируют так, чтобы при повышении напряжения на определенное значение по сравнению с номинальным и связанным с этим увеличением тока и магнитного потока якорь притягивался к сердечнику, контакты замыкались и подавалась команда коммутирующему аппарату.

Реле *минимального* напряжения имеет один контакт, разомкнутый при номинальном напряжении. При понижении напряжения уменьшаются ток в катушке реле и магнитный поток. Якорь не может удерживаться у сердечника, он отпадает, контакт замыкается, и реле срабатывает.

Контакты реле на электрических схемах изображают так же, как контакты контактора.

Реле времени применяют в схемах автоматического управления, если надо обеспечить необходимые выдержки

времени, чтобы получить определенную последовательность срабатывания аппаратов через определенные промежутки времени. Их используют, например, при пуске двигателя постоянного тока или асинхронного двигателя с фазным ротором, когда пусковой реостат надо выводить ступенями через определенные интервалы времени. По принципу действия реле времени бывают электромагнитные, маятниковые, электронные, пневматические и т. д.

На рис. 14.15 показано устройство и принцип действия электромагнитного реле времени с медной гильзой. Когда контакт 7, принадлежащий другому аппарату, замыкается, в катушке 1 возникает постоянный ток, якорь 5 притягивается к сердечнику 2, контакты 6 размыкаются, а контакты 8 замыкаются без выдержки времени. Такое положение контакты реле занимают в нормальном режиме, когда никаких переключений в цепи не происходит и выдержку времени обеспечивать не нужно.

При размыкании контакта 7 реле начинает отработывать выдержку времени. Когда размыкается цепь катушки 1 и ток в ней становится равным нулю, магнитный поток Φ_0 в магнитопроводе начинает уменьшаться. Этот поток индуцирует ЭДС самоиндукции в медной гильзе 3 подобно тому, как индуцируется ЭДС в короткозамкнутом витке контактора. Под действием этой ЭДС в медной гильзе возникает ток, создающий магнитный поток Φ_r , который по принципу Ленца стремится поддерживать магнитный поток в магнитопроводе неизменным. Так как основной поток Φ_0 уменьшается, поток Φ_r совпадает с ним по направлению. Суммарный поток в магнитопроводе будет поддерживаться запасенной в магнитном поле катушки энергией. Так как при наличии тока происходит нагревание медной гильзы и рассеяние энергии, магнитный поток постепенно убывает (см. рис. 14.16).

По мере уменьшения магнитного потока уменьшается сила, удерживающая якорь у сердечника (сила пропорциональна квадрату магнитного потока). Через некоторое

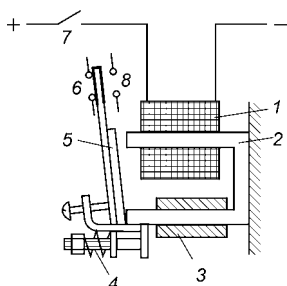


Рис. 14.15
Устройство и принцип действия электромагнитного реле времени постоянного тока

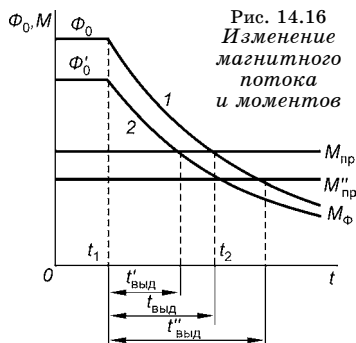


Рис. 14.16
Изменение
магнитного
потока
и моментов

время момент M_{Φ} , созданный этой силой, будет равен моменту $M_{\text{пр}}$, созданному пружиной 4 (рис. 14.15). В этот момент якорь отпадет от сердечника, контакты 6 замкнутся, а контакты 8 разомкнутся (см. рис. 14.15). Промежуток времени от размыкания контакта 7 до переключения контактов 6 и 8 называют *выдержкой времени*

и $t_{\text{выд}} = t_2 - t_1$ (рис. 14.16). Реле времени этого типа обеспечивают выдержку времени от долей секунды до 5...12 с. Выдержку времени реле можно регулировать двумя путями. Грубая регулировка обеспечивается за счет помещения между якорем и сердечником немагнитных пластин различной толщины. Это изменяет магнитное сопротивление магнитопровода и магнитный поток до значения Φ'_0 (2 на рис. 14.16), выдержка времени $t'_{\text{выд}}$ уменьшается с увеличением толщины пластины. Тонкая регулировка выдержки времени производится изменением натяжения пружины 4 (см. рис. 14.15), т. е. изменением момента $M_{\text{пр}}$ ($t''_{\text{выд}}$ на рис. 14.16).

Роль медной гильзы может выполнять непосредственно катушка реле. В этом случае одновременно с размыканием контакта 7 катушка замыкается накоротко и становится подобной короткозамкнутому витку с большим сопротивлением.

Этот тип реле применяют только при постоянном токе, так как при переменном токе в момент размыкания контакта 1 магнитный поток Φ_0 может иметь любое значение от нуля до максимального, и, следовательно, реле может отработать неконтролируемую выдержку времени.

На электрических схемах контакты реле времени изображают так, как показано в табл. 14.1. Как и у контакторов, на схемах контакты реле времени изображают в том положении, которое они занимают при отсутствии тока в катушке реле. Таким образом, контакты 6 на рис. 14.15 являются *размыкающими*, а контакты 8 — *замыкающими*. Дополнение в виде вертикальной черты с полуокружностью показывает, при каком действии с контактами (замыкании

или размыкании) отрабатывается выдержка времени. Так как контакты 6 замыкаются при отработке выдержки времени, то на схемах они будут обозначены как «Контакт размыкающий с выдержкой времени при замыкании», а контакты 8 — как «Контакт замыкающий с выдержкой времени при размыкании» в табл. 14.1.

Во многих конструкциях реле времени используют механические замедлители (обычно часовой механизм). На рис. 14.17 показана схема устройства и принцип действия маятникового реле времени. При замыкании контакта 1, принадлежащего другому аппарату, в катушке 2 возникает ток, создающий магнитный поток. Намагниченный якорь 4 притягивается к сердечнику 3 и производит мгновенное переключение контактов 5. Система рычагов 6 сжимает пружину 7, усилие которой передается на рычаг 10, и храповой сегмент 12 начинает вращать систему шестерен 13. Скорость вращения шестерен регулируют маятником 15. Ее можно изменять путем перемещения грузов 14. Через некоторое время все зубцы храпового сегмента пройдут по шестерне, рычаг 10 будет свободно перемещаться и под действием той же пружины 7 резко замкнет контакты 8 и разомкнет контакты 9. Таким образом, контакты 9 и 8 сработают с выдержкой времени.

На электрических схемах контакты 9 изображают как «Контакт размыкающий с выдержкой времени при размыкании», а контакты 8 — как «Контакт замыкающий с выдержкой времени при замыкании» в табл. 14.1. Выдержку времени регулируют грубо болтом 11, который меняет начальное зацепление храпового сегмента 12 с шестерней, и точно — путем перемещения грузов 14. Различные типы маятникового реле времени могут иметь выдержку времени от 2 до 17 с. Если маятниковое реле времени встроено в контактор, то оно не имеет собственной электромагнитной системы.

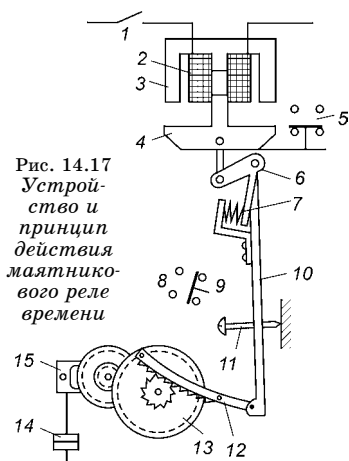


Рис. 14.17
Устройство и принцип действия маятникового реле времени

14.5. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Автоматический выключатель (или *автомат*, как его часто называют) является коммутирующим аппаратом, предназначенным для автоматического отключения цепи при возникновении в ней короткого замыкания, перегрузки или снижении напряжения и для нечастых ручных включений и отключений цепей при нормальных режимах работы. Таким образом, некоторые конструкции автоматических выключателей объединяют в себе функции рубильника, предохранителя и теплового реле. В отличие от контактора автоматический выключатель выполняет функции защиты электроустановки, он может отключать большие токи короткого замыкания.

Автоматические выключатели применяют в сетях переменного и постоянного тока напряжением до 1 кВ. Они бывают одно-, двух-, и трехполюсные, имеют пластмассовый корпус. Для гашения дуги применяют камеры с дугогасительными решетками. У некоторых автоматических выключателей вместо рукояток управления имеются соленоиды включения и отключения.

Измерительным органом, контролирующим значение тока или напряжения, при которых автоматический выключатель должен отключать электрическую цепь, является *расцепитель*, по типу которого автоматические выключатели подразделяют на автоматические выключатели с электромагнитным, тепловым и комбинированным (т. е. имеющие независимо действующие электромагнитный и тепловой расцепители) расцепителями.

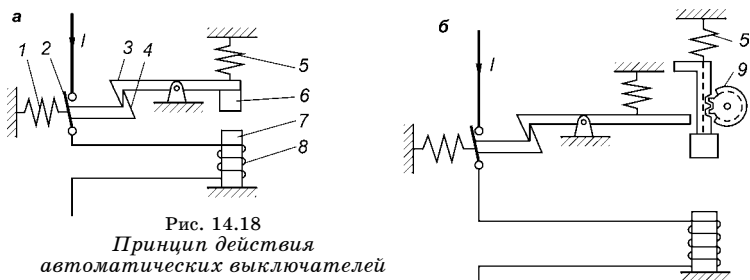
Автоматические выключатели *максимального тока*, отключающие цепь при превышении током заданного значения, имеют электромагнитный расцепитель, принцип действия которого показан на рис. 14.18а. Катушка электромагнита 8 включена последовательно с защищаемой цепью. Если ток в цепи превышает заданное значение, сердечник 7 притягивает к себе якорь 6, удерживаемый пружиной 5, защелка 3–4 освобождается и пружина 1 отключает выключатель 2. Ток срабатывания, при котором автоматический выключатель отключает цепь, можно отрегулировать натяжением пружины 5 в пределах $(1...20)I_{ном}$. Время отключения составляет 0,05...0,15 с, поэтому его называют автоматическим выключателем мгновенного действия.

Иногда в цепи возникает кратковременная неопасная перегрузка, при которой не надо отключать цепь. Тогда автоматический выключатель максимального тока должен иметь устройство, обеспечивающее выдержку времени, т. е. допускающее работу в течение нескольких секунд при токе, превышающем его ток срабатывания. Принцип получения выдержки времени показан на рис. 14.18б. Здесь зубчатая система 9 не позволяет электромагнитной системе мгновенно притянуть якорь к сердечнику. Если повышенное значение тока исчезает раньше момента соприкосновения якоря с сердечником, то пружина 5 оттягивает якорь в исходное положение и автоматический выключатель не размыкает цепь.

Принцип действия автоматического выключателя с *тепловым расцепителем* аналогичен принципу действия теплового реле. Эти автоматические выключатели не могут надежно защищать от коротких замыканий. Как и тепловые реле, они защищают лишь от длительных перегрузок.

Автоматические выключатели с *комбинированным расцепителем* имеют электромагнитный расцепитель, реагирующий мгновенно на ток короткого замыкания, и тепловой, реагирующий на ток длительной перегрузки.

Изображенная условно на рис. 14.18 защелка 3–4 (или механизм свободного расцепления) предназначена для того, чтобы при ненормальном режиме работы защищаемой цепи была исключена возможность вручную (рукояткой) или дистанционно принудительно удерживать контакты автоматического выключателя во включенном положении. Механизмы свободного расцепления состоят из системы рычагов, и их конструкции весьма разнообразны.



а — без выдержки времени; б — с выдержкой времени.

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

15.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Чтобы привести в движение любой исполнительный механизм, требуется двигатель, преобразующий какой-либо вид энергии в механическую энергию, а также система механических передач между валом двигателя и исполнительным механизмом. Длительное время в промышленности использовали паровые и водяные двигатели. В настоящее время они практически полностью вытеснены электродвигателями. Применение электродвигателей для привода в движение исполнительных механизмов (станков, вентиляторов, лебедок, кранов и др.) обусловлено рядом их преимуществ перед другими двигателями. К этим преимуществам следует отнести возможность изготовления электродвигателей практически любой мощности, простоту устройства и управления, надежность эксплуатации, возможность автоматизации.

Электромеханическое устройство, состоящее из электродвигателя, передаточных механизмов, соединяющих электродвигатель с исполнительным механизмом, и элементов управления и автоматизации, называют электроприводом.

Основным элементом электропривода является электродвигатель. Если электродвигатель питается от преобразователя (тока, частоты и т. д.), то он также является частью электропривода.

Электропривод — основной механизм, применяемый при механизации и автоматизации производственных процессов. Применение электродвигателей позволяет заменить ручной труд механизированным в самых различных

условиях (под землей, под водой), избавляет от необходимости использовать передаточные механизмы, так как электродвигатель может быть изготовлен в едином корпусе с исполнительным механизмом и любой мощности.

Автоматизация производственных процессов связана с применением электропривода, поскольку автоматизировать работу электрических цепей достаточно просто. Применение различных электрических аппаратов и приборов освобождает человека от ручных переключений в электрических цепях для управления электродвигателем (пуск, остановка, реверсирование, изменение скорости), а следовательно, и исполнительным механизмом. Использование автоматизированного электропривода позволяет увеличить производительность труда не только за счет высвобождения рабочих рук, но и за счет увеличения скорости выполнения операций и мощности производственных агрегатов, уменьшения времени простоев оборудования и обеспечения оптимизации технологических процессов.

Следующим шагом в применении автоматизированного электропривода является создание автоматических линий, т. е. системы машин, выполняющих в определенной последовательности серию операций, приводимых в движение электродвигателями с автоматическим управлением. Роль человека в этом случае сводится в основном к наладке электрического оборудования, наблюдению и уходу за ним.

15.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Так как электродвигатель — главный элемент электропривода, рассмотрим основные режимы его работы.

На валу электродвигателя исполнительным механизмом создается тормозной момент M_T . Чтобы двигатель продолжал устойчивое вращение, он должен развивать вращающий момент M , равный по значению тормозному моменту M_T . Различные механизмы, вращаемые электродвигателем, могут создавать постоянный или изменяющийся во времени тормозной момент, следовательно, и мощность электродвигателя должна быть постоянной или изменяющейся во времени. Мощность P исполнительного механизма — это мощность на валу электродвигателя, т. е. его полезная мощность. Мощность P_c электрической энергии, потребляемой двигателем из сети, больше

мощности P на значение потерь $P_{\text{п}}$ в электродвигателе. Эти потери затрачиваются на нагревание обмоток, стали магнитопровода, других частей двигателя.

При постоянной мощности на валу двигателя происходит постоянное выделение теплоты и температура частей двигателя повышается. С ростом температуры увеличивается теплоотдача в окружающую среду. При достижении некоторого значения температуры наступает установившийся тепловой процесс, при котором вся выделяемая в двигателе теплота отдается в окружающую (охлаждающую) среду. При этих условиях прекращается повышение температуры, она достигает *установившегося значения*.

Если принять (что обычно и делают), что в тепловом отношении электрический двигатель — однородное тело, то можно написать уравнение теплового баланса двигателя:

$$Qdt = Cd\vartheta + A\vartheta dt,$$

где Q — количество теплоты, выделяемое в двигателе в единицу времени, Дж/с; C — теплоемкость двигателя, т. е. количество теплоты, необходимое для повышения температуры двигателя на 1°C , Дж/ $^\circ\text{C}$; A — теплоотдача двигателя, т. е. количество теплоты, отдаваемой двигателем в охлаждающую среду в единицу времени при разности температур в 1°C , Дж/(с· $^\circ\text{C}$); ϑ — превышение температуры двигателя над температурой охлаждающей среды, $^\circ\text{C}$; t — время, с.

Разделив переменные в уравнении теплового баланса, имеем

$$\int dt = \frac{C}{A} \int \frac{d\vartheta}{Q/A - \vartheta}.$$

После интегрирования этого уравнения получим

$$t = -\frac{C}{A} \ln\left(\frac{Q}{A} - \vartheta\right) + \ln K. \quad (15.1)$$

Обозначим через ϑ_0 превышение температуры двигателя над температурой охлаждающей среды в момент $t = 0$. С учетом этого условия из уравнения (15.1) получаем

$$\vartheta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-t/T}\right) + \vartheta_0 e^{-t/T}, \quad (15.2)$$

где $T = C/A$ — постоянная времени.

При нагреве двигателя за время $t \rightarrow \infty$ превышение температуры двигателя над температурой охлаждающей



среды принимает установившееся значение ϑ_y , и из уравнения (15.2) получаем, что

$$\vartheta_y = Q/A. \quad (15.3)$$

С учетом этого равенства

$$\vartheta = \vartheta_y - (\vartheta_y - \vartheta_0)e^{-t/T}. \quad (15.4)$$

Из выражения (15.4) видно, что превышение температуры двигателя увеличивается во времени по экспоненциальному закону. За промежуток времени $4T$ превышение температуры двигателя достигает значения, которое лишь на 2% меньше установившегося. Поэтому ко времени $t = 4T$ процесс нагрева двигателя можно считать практически установившимся (у малоомощных двигателей открытого исполнения постоянная времени T составляет 20...30 мин).

Чем больше мощность двигателя, тем больше ток в рабочих обмотках, а следовательно, большее количество теплоты выделяется в двигателе и, как следует из (15.3), тем большее значение имеет установившаяся температура. Следовательно, *установившаяся температура ϑ_y* зависит от мощности P на валу двигателя. На рис. 15.1 показано, как с изменением мощности (по сравнению с номинальной) меняется значение ϑ_y .

При отключении двигателя от электрической сети $Q = 0$ и из (15.2) получим

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-t/T},$$

т. е. превышение температуры двигателя над температурой охлаждающей среды уменьшается по экспоненциальному закону (рис. 15.2).

Если при включении двигателя его температура была равна температуре окружающей среды, то $\vartheta_0 = 0$. Такие

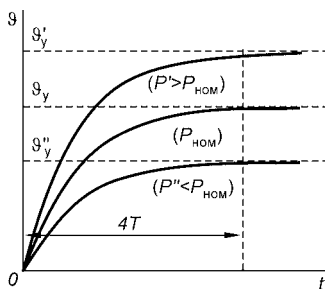


Рис. 15.1
Изменение во времени превышения температуры двигателя над температурой охлаждающей среды при разных мощностях нагрузки ($P_{ном}$ — номинальная мощность на валу двигателя)

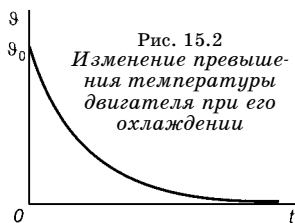


Рис. 15.2
Изменение превышения температуры двигателя при его охлаждении

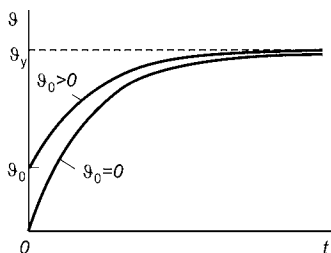


Рис. 15.3
Изменение превышения температуры двигателя при разных значениях температуры охлаждающей среды

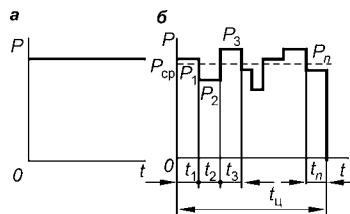


Рис. 15.4
Графики нагрузки продолжительного режима работы двигателя
а — при постоянной нагрузке; б — при изменяющейся нагрузке.

условия имеют место тогда, когда двигатель включают под нагрузку после длительной остановки. Если включить двигатель, когда после отключения его температура еще не успела уменьшиться до температуры охлаждающей среды, то $\Delta_0 > 0$ и изменение Δ происходит по другому закону (рис. 15.3).

Механические устройства, приводимые во вращение двигателем, в процессе работы создают различные тормозные нагрузки на его валу, начиная от режима холостого хода, когда $P = 0$, и кончая номинальным режимом, когда $P = P_{\text{ном}}$, или даже режимом перегрузки, когда $P > P_{\text{ном}}$. Поэтому кривые, соответствующие изменению мощности во времени, называемые *графиками нагрузки* двигателя, могут быть самыми различными. Все разнообразие графиков нагрузки можно объединить в три группы, которые определяют три основных режима работы двигателя, а именно: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

Продолжительным режимом работы называют такой режим, при котором двигатель работает с неизменной нагрузкой такое длительное время, что превышение температуры Δ двигателя достигает значения Δ_y . Вид графиков нагрузки продолжительного режима приведен на рис. 15.4. В этом режиме с постоянной нагрузкой работают электродвигатели, приводящие во вращение насосы, вентиляторы, компрессоры, воздухоудные установки, бумагоделательные машины и т. д.

При *кратковременном режиме* двигатель вначале работает короткий промежуток времени, за который не успевает нагреться до установившейся температуры, затем

следует длительный период, когда двигатель не работает и охлаждается до температуры окружающей среды. Кратковременный режим работы характерен для двигателей редко работающих механизмов, таких как затворы шлюзов, подъемные механизмы разводных мостов, механизмы убирания шасси самолетов и т. д. Вид графиков нагрузки двигателя кратковременного режима приведен на рис. 15.5а, б.

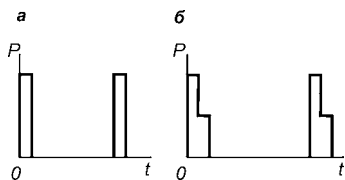


Рис. 15.5

Графики нагрузки кратковременного режима

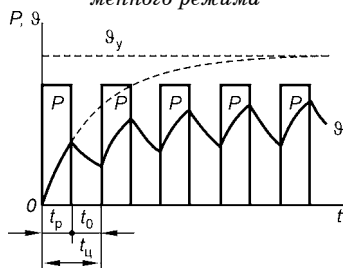


Рис. 15.6

График нагрузки повторно-кратковременного режима

Повторно-кратковременным режимом работы двигателя называют такой режим, при котором периоды работы под нагрузкой чередуются с периодами отключения машины, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышение температуры могло достигнуть установившегося значения.

В повторно-кратковременном режиме работает большая группа электродвигателей, приводящих в движение подъемно-транспортные механизмы, прессы, штамповочные машины, металлообрабатывающие станки. Пример графика нагрузки повторно-кратковременного режима приведен на рис. 15.6. Показанное на этом же рисунке изменение превышения температуры ϑ двигателя представляет собой линию, состоящую из чередующихся отрезков нагрева в периоды работы двигателя под нагрузкой и охлаждения в периоды пауз. В каждый следующий период работы двигателя температура его увеличивается, но не достигает установившегося значения.

В повторно-кратковременном режиме работает большая группа электродвигателей, приводящих в движение подъемно-транспортные механизмы, прессы, штамповочные машины, металлообрабатывающие станки. Пример графика нагрузки повторно-кратковременного режима приведен на рис. 15.6. Показанное на этом же рисунке изменение превышения температуры ϑ двигателя представляет собой линию, состоящую из чередующихся отрезков нагрева в периоды работы двигателя под нагрузкой и охлаждения в периоды пауз. В каждый следующий период работы двигателя температура его увеличивается, но не достигает установившегося значения.

Время цикла $t_{\text{ц}}$ повторно-кратковременного режима складывается из промежутка времени t_p работы двигателя и промежутка паузы t_0 .

Режим считается повторно-кратковременным, если время цикла $t_{\text{ц}} \leq 10$ мин. Если время цикла больше, то режим считается продолжительным. Условия работы двигателя в повторно-кратковременном режиме зависят от соотноше-

ния времени работы двигателя и времени паузы. Для графика нагрузки этого режима введено понятие *продолжительности включения* (ПВ), под которой понимают выраженное в процентах отношение времени работы двигателя ко времени цикла:

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 \% .$$

Стандартные значения ПВ составляют 15, 25, 40 и 60%.

15.3. ВЫБОР МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Как было показано, для каждого двигателя установленное значение температуры ϑ_y зависит от мощности нагрузки. Из всех материалов, применяемых в электродвигателях, изоляция обмоток наиболее чувствительна к температуре нагрева. Все электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах и аппаратах, подразделяются согласно ГОСТ 8865 на семь классов по теплостойкости с предельно допустимыми температурами нагрева, приведенными в табл. 15.1. Там же приведены максимально допустимые значения превышения температуры изоляции над температурой окружающей (охлаждающей) среды, которая принята равной 40°C и установлена стандартом.

Поэтому мощность двигателя определяется из условия, что температура нагрева различных частей двигателя должна быть меньше или равна допустимой температуре нагрева изоляции обмотки. В каталогах и паспорте двигателя указывают мощность, соответствующую температуре окружающей среды 40°C. Если температура окружающей среды меньше или больше этого значения, то допускается соответственно увеличение или уменьшение мощности нагрузки по сравнению с указанной в паспорте.

Для приведения во вращение производственного механизма, имеющего заданный график нагрузки (нагрузочную

Таблица 15.1

Классификация изоляционных материалов по теплостойкости

Класс изоляции	Y	A	E	B	F	H	C
Максимально допустимая температура нагрева, °C	80	105	120	135	155	180	>180
Максимально допустимое превышение температуры, °C	40	65	80	95	115	140	>140

диаграмму), требуется электродвигатель определенной мощности, для которого допустимое превышение температуры $\vartheta_{\text{доп}} \geq \vartheta_{\text{у}}$. Если будет взят двигатель повышенной мощности, то $\vartheta_{\text{у}}$ будет меньше $\vartheta_{\text{доп}}$, что приведет к недоиспользованию возможностей двигателя, к неоправданному увеличению капиталовложений, массы и габаритов установки. Если будет взят двигатель заниженной мощности, то $\vartheta_{\text{у}}$ будет больше $\vartheta_{\text{доп}}$. Это приведет к температурной перегрузке изоляции, срок службы которой резко сократится (при эксплуатации двигателя в нормальных условиях срок службы изоляции составляет 15–20 лет). Имеются данные, что перегрузка двигателя на 25% приводит к износу изоляции в течение 1,5 месяцев. Поэтому правильный выбор мощности двигателя имеет большое технико-экономическое значение.

Таким образом, основным критерием выбора мощности двигателя является его нагрев. Для выбора мощности двигателя по условиям нагрева необходимо знать график нагрузки производственного механизма. После этого производят проверку двигателя выбранной мощности на перегрузочную способность как в момент пуска, так и в периоды работы с повышенной мощностью.

В продолжительном режиме работы при неизменной нагрузке (см. рис. 15.4а) выбор номинальной мощности двигателя $P_{\text{ном}}$ не представляет затруднений. Если температура окружающей среды равна 40°C , то мощность двигателя должна удовлетворять условию $P_{\text{ном}} \geq P$. Зная мощность нагрузки P , выбирают такой двигатель, мощность которого является ближайшей большей или равной мощности нагрузки.

В продолжительном режиме работы при переменной нагрузке (см. рис. 15.4б) предварительно выбирают мощность двигателя по средней мощности нагрузки $P_{\text{ср}}$ из условия $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{ср}}$, а затем проводят проверочный расчет. Все методы проверки выбора мощности двигателя основаны на условии, что средняя мощность потерь в двигателе при работе по переменному графику нагрузки за рабочий цикл не должна превышать номинальную мощность потерь при работе двигателя с постоянной номинальной нагрузкой: $P_{\text{п.ср}} \leq P_{\text{п.ном}}$. Среднюю мощность потерь рассчитывают, используя график нагрузки, по формуле

$$P_{\text{п.ср}} = \frac{P_{\text{п1}} t_1 + P_{\text{п2}} t_2 + \dots + P_{\text{пn}} t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{пi}} t_i}{t_{\text{ц}}}, \quad (15.5)$$

где $P_{\text{пi}}$ — мощность потерь при мощности нагрузки P_i .

Если выполнено условие $P_{\text{п.ср}} \leq P_{\text{п.ном}}$, то температура двигателя не будет превышать допустимое для изоляции значение. Если в результате расчетов получают, что $P_{\text{п.ср}} > P_{\text{п.ном}}$, то необходимо взять двигатель следующей, большей мощности по каталогу и повторить проверочный расчет.

Этот метод проверки хотя и является самым точным, но для определения мощности потерь $P_{\text{пi}}$ требует предварительного расчета тока, а затем расчета мощности потерь. Поэтому на практике чаще применяют другие методы, основанные на расчете эквивалентных величин (тока, момента и мощности).

Эквивалентными называют такие постоянные значения тока, момента и мощности, при которых в двигателе имеет место такая же мощность потерь энергии, как и при работе этого двигателя с переменной нагрузкой.

Мощность потерь в двигателе состоит из постоянных потерь (потери в стали, на трение в подшипниках, вентиляционные), не зависящих от нагрузки, и переменных потерь, пропорциональных квадрату тока и, таким образом, зависящих от нагрузки. Принимая во внимание только переменные потери, из (15.5) получим для *эквивалентного тока*

$$I_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}}. \quad (15.6)$$

Если получают, что $I_{\text{эк}} \leq I_{\text{ном}}$, то двигатель выбран правильно ($I_{\text{ном}}$ — номинальный ток двигателя).

Когда график переменной нагрузки продолжительного режима не имеет периодов холостого хода, то для двигателей с мало меняющейся частотой вращения применяют метод *эквивалентной мощности*, определяемой по формуле, аналогичной (15.6):

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}}.$$

Расчет эквивалентной мощности производят непосредственно по графику нагрузки. Поэтому это наиболее простой метод. Он применим для двигателей постоянно-го тока с параллельным возбуждением, асинхронных двигателей, работающих на естественной характеристике, и синхронных двигателей.

Проверка двигателя на *перегрузочную способность* заключается в сравнении максимального момента нагрузки, определяемого графиком нагрузки, с максимальным моментом M_{\max} , развиваемым двигателем. Максимальный момент двигателя превышает номинальный момент в γ раз, и величину $\gamma = M_{\max}/M_{\text{ном}}$ называют *коэффициентом перегрузочной способности* двигателя. Для двигателей постоянного тока $\gamma = 2,0 \dots 2,5$ (определяется условиями коммутации), для асинхронных двигателей $\gamma = 1,7 \dots 2,5$. Зная номинальный момент для выбранного двигателя, определяют $M_{\max} = \gamma M_{\text{ном}}$ и сравнивают его с максимальным моментом нагрузки. Если момент M_{\max} двигателя меньше максимального момента нагрузки, то необходимо взять двигатель большей мощности. Чем более неравномерен график нагрузки, тем выше вероятность, что мощность двигателя будет определяться максимальной мощностью нагрузки.

При тяжелых условиях пуска двигателя производят его проверку по *пусковому моменту*.

Для кратковременного режима работы мощность двигателя выбирают из условия, что его максимальный момент M_{\max} должен быть больше максимального момента нагрузки, а затем проверяют по пусковому моменту.

При повторно-кратковременном режиме работы можно выбрать специальный двигатель, предназначенный для работы в этом режиме, номинальная мощность которого определена для одного из значений ПВ (15, 25, 40 или 60%). Определив ПВ по графику нагрузки, выбирают двигатель из условия, что $P_{\text{ном}} \geq P$. Если по графику нагрузки получается нестандартное значение ПВ, то мощность двигателя определяют из условия

$$\sqrt{P^2 \cdot \text{ПВ}} = \sqrt{P_{\text{ном}}^2 \cdot \text{ПВ}_{\text{станц}}},$$

где P — мощность по графику нагрузки (см. рис. 15.6); ПВ — нестандартное значение продолжительности включения по графику нагрузки; $\text{ПВ}_{\text{станц}}$ — стандартное значение

продолжительности включения, указанное в паспорте двигателя.

Мощность двигателя выбирают по формуле

$$P_{\text{ном}} \geq P \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{пасп}}}}. \quad (15.7)$$

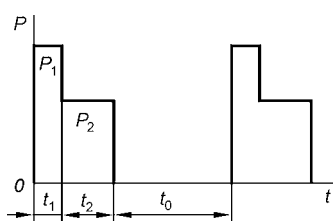


Рис. 15.7
Ступенчатый график
нагрузки повторно-кратко-
временного режима

Так же производят расчет мощности двигателя при замене его двигателем с другим значением ПВ.

Если повторно-кратковременный режим характеризуется ступенчатым графиком нагрузки (рис. 15.7), то предварительно определяют эквивалентную мощность за период работы:

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2}{t_1 + t_2}}$$

и продолжительность включения в процентах:

$$\text{ПВ} = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} \cdot 100 \, \%.$$

Затем мощность двигателя выбирают по соотношению (15.7), подставляя вместо P эквивалентную мощность $P_{\text{эк}}$.

При проверке двигателей на перегрузочную способность следует учесть, что в каталогах указывается коэффициент перегрузочной способности для ПВ = 25% для старых и 40% для новых серий двигателей.

15.4. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

При выборе типа электродвигателя определяющими являются технические данные производственного механизма, такие как мощность, условия пуска (под нагрузкой или на холостом ходу), частота вращения, ее постоянство или необходимость глубокого регулирования и др., а также стоимость установки и ее эксплуатации, необходимость регулирования коэффициента мощности и т. д.

В тех случаях, когда необходимо поддерживать постоянную частоту вращения при значительной мощности

и редких пусках, выбирают синхронные двигатели, частота вращения которых при постоянной частоте переменного напряжения остается постоянной при любой нагрузке. Кроме того, синхронные двигатели одновременно являются компенсирующими устройствами, повышающими коэффициент мощности предприятия. Их применяют в приводах насосов, вентиляторов, компрессорных установок, преобразовательных агрегатов и др.

Двигатели постоянного тока используют в тех случаях, когда требуется широкий диапазон плавного регулирования частоты вращения и необходимо часто останавливать и изменять направление вращения.

При небольшом диапазоне регулирования частоты вращения применяют двигатели постоянного тока параллельного возбуждения при питании от сети постоянного тока неизменного напряжения. При широком диапазоне регулирования частоты вращения и частых пусках удобен также двигатель параллельного возбуждения, но с питанием от отдельного источника, напряжение которого можно изменять в широких пределах. Такие условия имеют место в приводах мощных реверсивных прокатных станов, крупных металлообрабатывающих станков, шахтных подъемников и лифтов высотных зданий, мощных экскаваторов.

Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения благодаря своей мягкой механической характеристике и большому пусковому моменту нашли применение в основном на электрическом транспорте, для привода подъемных кранов, некоторых вспомогательных механизмов прокатных станов.

Так как для большинства механизмов не требуется регулировать частоту вращения или поддерживать ее постоянной, то самыми распространенными являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Они просты по устройству и эксплуатации, надежны и дешевы.

В некоторых установках, где требуется регулировать частоту вращения в узких пределах, где необходим большой пусковой момент и где имеют место частые включения, используют асинхронные двигатели с фазной обмоткой ротора. Их применяют для привода прокатных станов, подъемных кранов, пассажирских лифтов малой и средней мощности, ковочных машин и прессов, другого

оборудования. Но эти двигатели снижают КПД электропривода при регулировании частоты вращения за счет мощности потерь в регулировочных реостатах. Кроме того, регулирование частоты вращения возможно только в сторону уменьшения от значения синхронной частоты.

При выборе типа двигателя необходимо учитывать условия окружающей среды, в которых ему придется работать (влажность, наличие взрывоопасных продуктов, пыли, паров кислот и др.). Загрязнение обмоток пылью, снижая теплоотдачу, приводит к преждевременному износу изоляции. Пары воды и кислот ухудшают свойства изоляции. Если окружающая среда содержит взрывоопасные продукты, то необходимо выбрать двигатель такой конструкции, при которой образующаяся в нем искра не имела бы контакта с этой средой.

В соответствии с условиями среды должен быть выбран двигатель защищенного, закрытого или взрывозащищенного исполнения. *Защищенные* двигатели имеют приспособления, предохраняющие персонал от случайного соприкосновения с токоведущими частями, от попадания сверху капель влаги, от дождя и брызг. В *закрытых* двигателях для улучшения охлаждения имеется вентилятор, насаженный на вал двигателя.

15.5. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Автоматическое управление электродвигателями и другими приемниками электрической энергии осуществляют путем применения в электрических цепях различных аппаратов. Автоматически осуществляют пуск двигателя, регулирование частоты его вращения, торможение, остановку, а также защиту от коротких замыканий и перегрузок и другие операции. Рассмотрим несколько типовых схем автоматического управления электродвигателями постоянного и переменного токов.

Прежде чем приступить к анализу электрических схем управления электродвигателями, заметим, что все детали, принадлежащие одному электрическому аппарату, на электрической схеме обозначают одинаковыми символами, например, буквами *КМ* должны быть обозначены

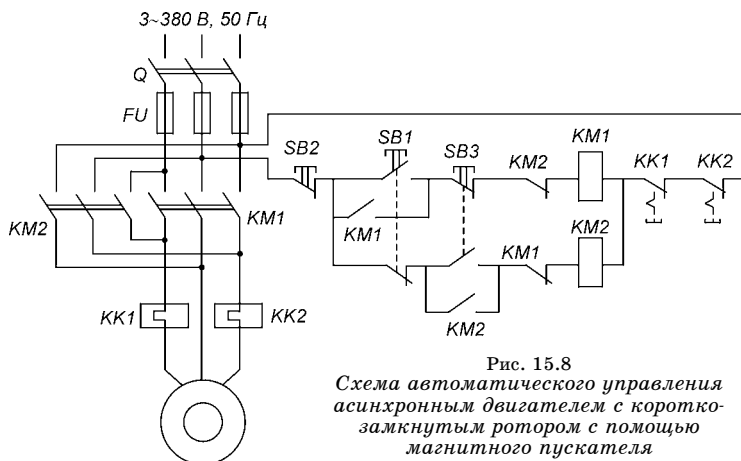


Рис. 15.8
Схема автоматического управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с помощью магнитного пускателя

катушка магнитного пускателя (или электромагнитного контактора) и контакты этого аппарата.

Управлять асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором можно с помощью магнитного пускателя. Магнитный пускатель размещают в удобном для оператора месте и на любом расстоянии от двигателя.

Согласно схеме управления (рис. 15.8) можно осуществить автоматический пуск асинхронного двигателя в двух направлениях вращения, условно названных «Вперед» и «Назад», и его остановку. Для этого реверсивный магнитный пускатель имеет два контактора: *KM1* для направления вращения «Вперед» и *KM2* для вращения в противоположном направлении, т. е. «Назад», и два тепловых реле *KK1* и *KK2*, предназначенные для защиты двигателя от длительных перегрузок.

Для управления двигателем применяют кнопочную станцию. Кнопочная станция имеет три кнопки управления: кнопку *SB1* (кнопку «Пуск»), предназначенную для включения контактора *KM1*; кнопку *SB3* для включения контактора *KM2*, аналогичную кнопке *SB1*; кнопку *SB2* (кнопку «Стоп») для отключения двигателя. Каждая из кнопок *SB1* и *SB3* имеет замыкающий и размыкающий контакты, которые имеют механическую связь (на электрической схеме эта связь показана штриховой линией).

При включении выключателя *Q* двигатель не трогается с места, так как контакты *KM1* и *KM2* в главной цепи (цепи статора двигателя) разомкнуты и напряжение

на обмотку статора не подается. При нажатии на кнопку *SB1* замыкается цепь, состоящая из последовательно включенных кнопок *SB2*, *SB1* и *SB3*, замкнутого контакта *KM2*, катушки контактора *KM1* и замкнутых контактов тепловых реле *KK1* и *KK2*. Таким образом, замыкается цепь катушки контактора *KM1*, а в цепи катушки контактора *KM2* той же кнопкой *SB1* делается еще один разрыв.

В катушке контактора *KM1* возникает ток, и якорь контактора *KM1* притягивается к сердечнику (контактор срабатывает). При этом изменяют свое положение все контакты, обозначенные *KM1*: контакты *KM1* в главной цепи замыкаются, в результате чего подается напряжение на обмотку статора и двигатель начинает вращаться; замыкается блок-контакт *KM1*, включенный параллельно кнопке *SB1* (теперь кнопку *SB1* можно отпустить, и ток в цепи катушки *KM1* будет замыкаться через блок-контакт *KM1*); размыкается блок-контакт *KM1* в цепи катушки контактора *KM2*, производя новый разрыв цепи вместо ликвидированного разрыва при отпускании кнопки *SB1*. Разрыв цепи катушки *KM2* необходим для того, чтобы при ошибочном одновременном нажатии кнопок *SB1* и *SB3* не сработали сразу оба контактора, что привело бы к короткому замыканию цепи главными контактами *KM1* и *KM2*.

Для остановки двигателя необходимо нажать на кнопку *SB2* («Стоп»), при этом размыкается цепь катушки контактора *KM1*, исчезает усилие, притягивающее якорь к сердечнику, все замыкающие контакты *KM1* также размыкаются, а размыкающие — замыкаются. Обмотка статора двигателя отключается от сети и двигатель останавливается.

При нажатии на кнопку *SB3* двигатель будет вращаться в другую сторону, так как главные контакты *KM2* обеспечивают изменение чередования фаз.

Защита двигателя от коротких замыканий осуществляется плавкими предохранителями, защита от длительных перегрузок — тепловыми реле. При возникновении перегрузки нагревательные элементы тепловых реле *KK1* и *KK2*, включенные последовательно в главную цепь, нагреваются настолько, что одно из них (или оба сразу) срабатывает и размыкает контакты *KK1* и *KK2*, включенные

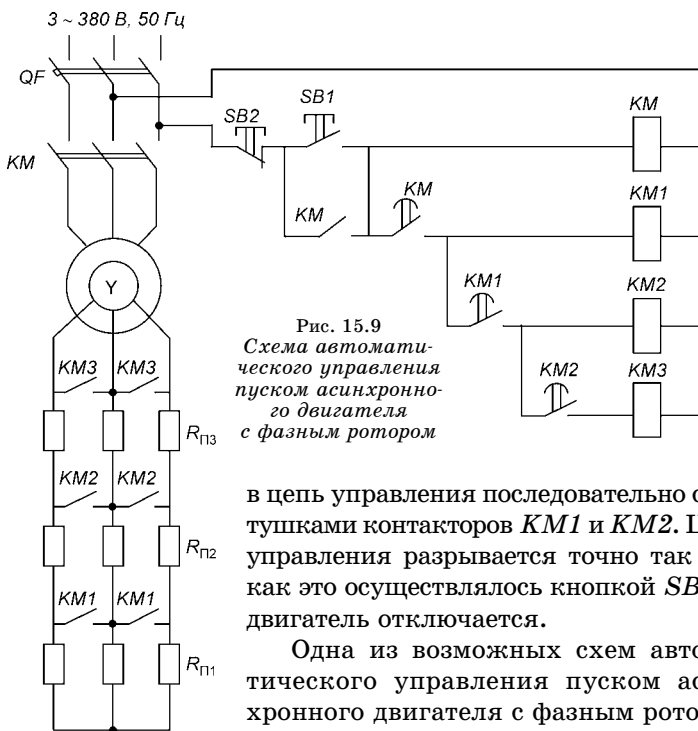


Рис. 15.9
Схема автоматического управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором

в цепь управления последовательно с катушками контакторов *KM1* и *KM2*. Цепь управления разрывается точно так же, как это осуществлялось кнопкой *SB2*, и двигатель отключается.

Одна из возможных схем автоматического управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором приведена на рис. 15.9. Защита двигателя от коротких замыканий и перегрузок осуществляется автоматическим выключателем *QF*. Для уменьшения пускового тока и увеличения пускового момента в цепь ротора включен пусковой реостат R_{π} . Схема автоматического управления пуском обеспечивает выключение ступеней пускового реостата через некоторые интервалы времени по мере разгона двигателя. Число ступеней может быть различным в зависимости от мощности двигателя и условий пуска.

Для обеспечения выдержки времени при выключении ступеней пускового реостата к линейному контактору *KM* и контакторам ускорения пристроены маятниковые реле времени. При трех ступенях пускового реостата в схеме имеется три контактора ускорения *KM1*, *KM2* и *KM3*. После включения автоматического выключателя нажимают кнопку *SB1* («Пуск»). Замыкается цепь катушки контактора *KM*, он срабатывает и мгновенно замыкает контакты *KM* в главной цепи и блок-контакт *KM*,

шунтирующий кнопку $SB1$. При этом напряжение подается на обмотку статора двигателя, и он начинает вращаться при полностью введенном пусковом реостате. Контакт KM реле времени, включенный последовательно с катушкой контактора ускорения $KM1$, пока не замкнут — он замкнется только через некоторое время.

На механических характеристиках двигателя (рис. 15.10) с тремя ступенями пускового реостата точка T является точкой трогания двигателя с места. Двигатель разгоняется при условиях, соответствующих характеристике 1, т. е. при большом вращающем моменте. Через некоторое время (при $t = t_1$ на рис. 15.11), когда замкнется контакт KM реле времени (см. рис. 15.9) и цепь катушки контактора $KM1$ будет замкнута, контактор $KM1$ срабатывает и мгновенно замыкает свои контакты $KM1$, выключающие ступень пускового реостата. Меньшему сопротивлению пускового реостата соответствует механическая характеристика 2 (см. рис. 15.10), и дальнейший разгон двигателя продолжается согласно этой характеристике.

Через некоторое время после срабатывания контактора $KM1$ (см. рис. 15.9) замкнется контакт $KM1$ маятникового реле времени и сработает контактор $KM2$, выключающий вторую ступень пускового реостата. Аналогично срабатывает контактор $KM3$, полностью выводящий пусковой реостат, после чего двигатель заканчивает разгон по естественной характеристике 4 (см. рис. 15.10). Таким образом, схема обеспечивает разгон двигателя при вращающих моментах, близких к максимальному. Изменение

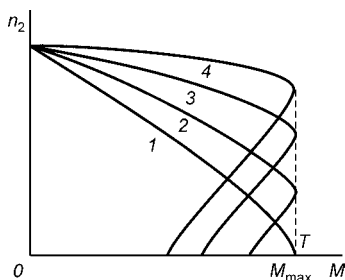


Рис. 15.10

Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором

1, 2, 3 — при включении ступеней пускового реостата в цепь ротора; 4 — естественная.

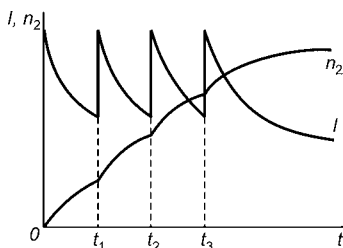


Рис. 15.11

Изменение частоты вращения ротора и тока статора при автоматическом пуске асинхронного двигателя с фазным ротором

частоты вращения и тока статора во времени показано на рис. 15.11. Для остановки двигателя необходимо нажать кнопку *SB2* (см. рис. 15.9).

На рис. 15.12 приведена схема автоматического управления пуском двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Пусковой реостат имеет две ступени: R_1 и R_2 . Цепь якоря двигателя от коротких замыканий защищена максимальным токовым реле *КА*, а цепь управления — предохранителями. Автоматический пуск осуществляют с помощью линейного контактора *КМ*, двух контакторов ускорения *КМ1* и *КМ2* и двух реле времени *КТ1* и *КТ2*.

При включении выключателя *Q* замыкаются две параллельные цепи, первую из которых составляют последовательно включенные катушка реле времени *КТ1*, катушка максимального токового реле *КА*, обмотка якоря, ступени R_1 и R_2 пускового реостата. В этой цепи сопротивление всех остальных элементов бесконечно мало по сравнению с сопротивлением катушки *КТ1*. Сопротивление

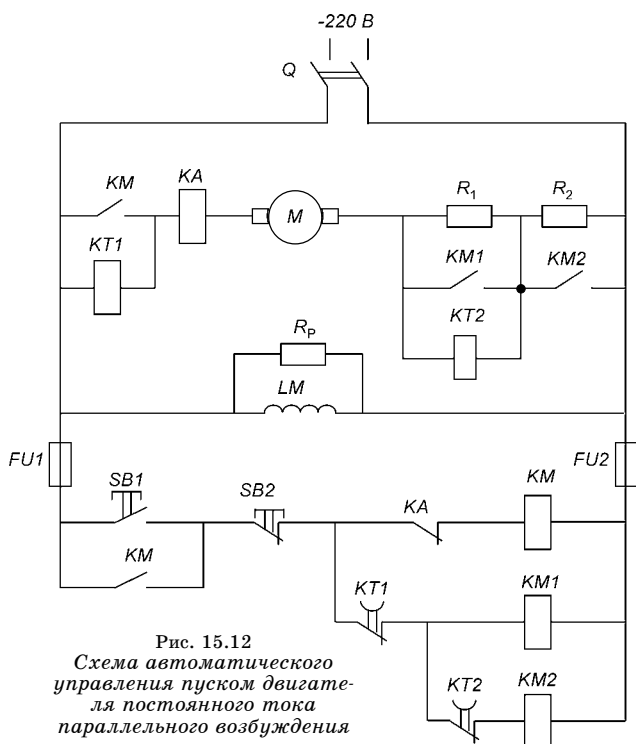


Рис. 15.12
Схема автоматического
управления пуском двигателя
постоянного тока
параллельного возбуждения

катушки *КТ1* велико, поэтому ток в ней очень мал, но в то же время является номинальным током для этого реле. Поэтому реле *КТ1* мгновенно размыкает контакт *КТ1* в цепи катушки контактора *КМ1*. В катушку реле *КТ2*, включенную параллельно с реостатом R_1 , ответвляется ток, близкий к нулю, так как ее сопротивление тоже велико, поэтому реле *КТ2* не срабатывает.

Вторая параллельная цепь включает в себя обмотку возбуждения *LM* с разрядным резистором R_p . Ток в обмотке возбуждения равен номинальному току, но двигатель с места не трогается, так как ток в обмотке якоря очень мал и недостаточен для создания вращающего момента, превышающего момент холостого хода.

При нажатии на кнопку *SB1* в катушке линейного контактора *КМ* возникает ток и контактор замыкает главный контакт *КМ* в цепи якоря двигателя и блок-контакт *КМ*, шунтирующий кнопку *SB1*. При замыкании главного контакта *КМ* ток в цепи якоря замыкается через последовательно включенные катушку реле максимального тока *КА*, обмотку якоря и пусковые реостаты R_1 и R_2 . Сопротивление этой цепи теперь определяется в основном сопротивлениями R_1 и R_2 , и ток достигает значения, при котором вращающий момент двигателя будет превышать момент холостого хода. Двигатель трогается с места. Ток, ответвляющийся в обмотку реле *КТ2*, также увеличивается, и реле *КТ2* срабатывает, размыкая мгновенно контакт *КТ2* в цепи катушки контактора *КМ2*.

Для катушки электромагнитного реле времени *КТ1* замыкание главного контакта *КМ* означает замыкание накоротко катушки *КТ1*. Следовательно, катушка реле играет роль медной гильзы, и реле времени *КТ1* начинает отрабатывать выдержку времени. Через некоторое время замкнется контакт *КТ1*, и в катушке контактора *КМ1* появится ток. Контактор *КМ1* работает и замкнет контакт *КМ1*, шунтируя при этом ступень R_1 пускового реостата и замыкая накоротко обмотку *КТ2* реле времени *КТ2*. Сопротивление пускового реостата уменьшится до R_2 . Через некоторое время реле *КТ2* замкнет контакт *КТ2*, и контактор *КМ2* работает, контакт *КМ2* замкнется. Пусковой реостат окажется полностью выведенным, и дальнейший разгон двигателя будет происходить при полном напряжении сети, подведенном к якорю.

При коротком замыкании в цепи якоря срабатывает максимальное токовое реле KA , размыкающее контакт KA в цепи катушки контактора KM , и контактор выключается. При этом размыкаются контакт KM в цепи якоря и контакт KM , шунтирующий кнопку $SB1$. Двигатель отключается от сети и останавливается, а контакторы $KM1$ и $KM2$ размыкают свои контакты, подготовив цепь к очередному пуску. Энергия магнитного поля, запасенная в обмотке возбуждения, гасится в разрядном резисторе R_p .

Для отключения двигателя достаточно нажать на кнопку $SB2$.

15.6. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Электроэнергетика является одной из важнейших отраслей народного хозяйства. Ее задачей является производство, передача и распределение электроэнергии между потребителями, т. е. их *электроснабжение*. Эти процессы осуществляются одновременно, в электроэнергетике нет «склада готовой продукции». Это определяет условия работы всех участков системы электроснабжения: электроэнергия должна быть произведена и передана потребителю только в тот момент и в таком количестве, когда и в каком количестве она ему нужна. Поэтому персонал, обслуживающий электростанции и передающие устройства, должен постоянно обеспечивать условия, позволяющие увеличивать или уменьшать мощность передачи.

Производство электроэнергии осуществляется на электрических станциях, на которых устанавливают трехфазные синхронные генераторы. Эти генераторы вырабатывают электроэнергию синусоидального тока частотой 50 Гц, напряжением 3...24 кВ. Тип электростанций зависит от вида первичной энергии, преобразуемой в электрическую.

Тепловые электростанции (ТЭС) — это электростанции, на которых за счет сжигания топлива (каменного угля, торфа, мазута, нефти, природного газа) происходит преобразование химической энергии в электрическую. Первичным двигателем, вращающим генератор, является паровая или газовая турбина. Если часть пара турбины идет на тепловые процессы (отопление зданий и другие технологические процессы), то электростанцию

называют *теплофикационной (теплоэлектроцентральной, ТЭЦ)*. Если отбор пара не производится, то электростанцию называют *конденсационной (КЭС)*.

На *гидравлических электростанциях*, или *гидроэлектростанциях (ГЭС)*, используют энергию водного потока. Сооружаемые на реках плотины обеспечивают перепад воды (разность между верхним и нижним бьефом) от нескольких десятков метров на равнинных реках до сотен метров на горных.

На *атомных электростанциях (АЭС)* источником энергии служит ядерный реактор, в котором в результате цепной ядерной реакции выделяется тепловая энергия. С помощью парогенератора, паровой турбины и синхронного генератора эта тепловая энергия преобразуется в электрическую энергию. В качестве ядерного топлива на АЭС обычно используют уран ^{235}U . По количеству получаемой электроэнергии 1 кг урана ^{235}U эквивалентен 2900 т угля. Первая в мире промышленная АЭС была пущена в СССР в 1954 г. Ее мощность составляла 5000 кВт. С 1996 г. на территории России действуют 26 АЭС.

Среди других типов электростанций можно назвать дизельные, ветроэлектростанции, гелиоэлектростанции, геотермальные, приливные. *Дизельные* электростанции, на которых генератор приводят во вращение дизельным двигателем, являются мобильными, их используют в труднодоступных районах, а также в качестве резервных источников питания на других типах электростанций. На *ветряных* электростанциях используют энергию ветра, они не имеют большого значения, так как основным их недостатком является отсутствие возможности управлять энергией ветра. На *солнечных (гелио-)* электростанциях используют энергию Солнца, их можно применять в районах с жарким климатом при наличии большого числа солнечных дней в году. На *геотермальных* электростанциях используют дешевую энергию подземных теплых источников. В России такая электростанция работает на Камчатке (Паужетская). На *приливных* электростанциях (ПЭС) используют энергию приливов и отливов. В нашей стране в 1968 г. построена Кислогубская ПЭС на Кольском полуострове мощностью 800 кВт.

Основная доля установленной мощности и выработки электроэнергии приходится на тепловые электростанции,



преимуществом которых является меньшая стоимость сооружения и меньший срок строительства. Но себестоимость выработки электроэнергии на ТЭС в несколько раз выше, чем на ГЭС. Это объясняется тем, что на ТЭС велика доля топливной составляющей себестоимости выработки, т. е. стоимости источника энергии. На ГЭС составляющая источника энергии отсутствует, так как после постройки плотины подъем воды осуществляется без дополнительных затрат.

Атомные электростанции долгое время не получали широкого развития из-за больших капиталовложений на 1 кВт мощности. Благодаря достижениям науки и техники в последнее время удельные капиталовложения (руб/кВт) на строительство АЭС приблизились к удельным капиталовложениям на строительство ТЭС, и поэтому удельный вес атомных электростанций увеличивается как в нашей стране, так и во всем мире. Выработка электрической энергии на АЭС России в 2009 году составила около 16%.

Для передачи электроэнергии от электростанций к потребителям сооружают *линии электропередачи* напряжением 6, 10, 35, 110, 220, 330, 500, 750 и 1050 кВ. Линии электропередачи могут быть *воздушными* или *кабельными*. Для сооружения воздушных линий передачи используют деревянные (при напряжениях до 35 кВ), металлические и железобетонные опоры. Для крепления проводов к опорам и их изоляции применяют фарфоровые или стеклянные изоляторы. Чем выше напряжение линии передачи, тем выше должна быть опора и тем большее число изоляторов должно входить в гирлянду. Воздушная линия электропередачи может быть *одноцепной* или *двухцепной* (одна цепь трехфазной линии состоит из трех линейных проводов). Кроме того, линии напряжением 110 кВ и выше обычно имеют грозозащитные тросы, соединяющие верхние точки опор и заземленные.

Кабелем называют один или несколько изолированных проводников, заключенных в герметическую оболочку, поверх которой, как правило, накладывают защитные оболочки, служащие для фиксации изоляции и защиты от воздействия влаги и химических веществ. Такие оболочки выполняют из свинца, алюминия, полиэтилена. Для защиты оболочек кабеля от механических повреждений на них накладывают защитные покровы из стальных лент или проволок, называемые броней.

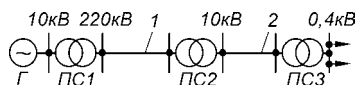


Рис. 15.13
Принципиальная схема
электроснабжения

Г — генератор; ПС — подстанция;
1 — воздушная линия; 2 — воздушная
или кабельная линия.

Кабельные линии, прокладываемые в земле и под водой, а также внутри помещений, в основном применяют при напряжении 6...35 кВ в черте города, населенного пункта или предприятия, где воздушные линии недо-

пустимы, так как занимают большую территорию и портят внешний вид городов. Но кабельные линии дороже воздушных. Кабели напряжением 35 кВ бывают также *газонаполненными* с избыточным давлением инертного газа (обычно малоактивного азота). Кабели на напряжение 110 кВ выполняют *маслонаполненными* или *газонаполненными*.

На рис. 15.13 показана принципиальная схема электроснабжения от электростанции до потребителя. Передача электроэнергии на дальние расстояния выгодна при высоком напряжении. Чем больше передаваемая мощность и дальность передачи, тем большее напряжение требуется. Повышение напряжения приводит к уменьшению тока, а следовательно, потерь энергии в линии передачи.

Если значение напряжения линии передачи не совпадает с напряжением генераторов электростанции, то для их соединения применяют трансформаторы, которые устанавливают на *подстанциях* (ПС). Они являются их главными элементами. Обычно на электростанциях строят *повышающие* подстанции, а в местах потребления электроэнергии — *понижающие* подстанции с одной или несколькими последовательными трансформациями (для уменьшения напряжения до значения 0,4...10 кВ, при котором можно осуществлять питание электроприемников).

Для связи трансформатора с линиями электропередачи применяют различные *высоковольтные коммутирующие аппараты*.

Высоковольтный выключатель предназначен для включения и отключения цепи с рабочим током, а также для отключения цепи с током короткого замыкания. Применяют в основном масляные мало- и многообъемные, воздушные, электромагнитные выключатели. В *многообъемных масляных выключателях* масло служит и изолирующей средой, и газогенерирующим материалом. В *малообъемных*

масляных выключателях масло служит только в качестве газогенерирующего материала для быстрого гашения электрической дуги. В *воздушных выключателях* дуга гасится в дугогасительных камерах с помощью газового дутья (при высоком давлении), их применяют в сетях 330...750 кВ.

Разъединители предназначены для отключения и включения цепей под напряжением и для создания видимого разрыва в цепях высокого напряжения. Разъединители не имеют дугогасительных устройств. Поэтому, как правило, отключать цепи под током, а также включать цепи под нагрузку с помощью разъединителей запрещается. Видимый разрыв цепи с помощью разъединителя, т. е. снятия напряжения с контактов выключателя и других элементов электроустановки, производят после отключения ее выключателем.

Выключатель нагрузки занимает промежуточное положение между выключателем и разъединителем. Он предназначен для включения и отключения токов нагрузки, но не токов короткого замыкания. Для отключения токов короткого замыкания последовательно с выключателем нагрузки включают высоковольтный предохранитель. Выключатели нагрузки применяют в сетях с напряжением 6...10 кВ.

В схемах электроснабжения промышленных предприятий подстанция с низшим напряжением 6...10 кВ (*ПС2* на рис. 15.13) может быть *главной понижающей подстанцией (ГПП)* предприятия, от которой отходят линии к *распределительным пунктам (РП)* и цеховым *трансформаторным подстанциям (ТП)*. Наличие и число распределительных пунктов зависят от размера предприятия и установленной мощности цехов. От этих же условий зависят число трансформаторных подстанций в цехе и мощность трансформатора. Поэтому схема электроснабжения от шин низшего напряжения *ГПП* до шин низшего напряжения *ТП* может иметь вид, представленный на рис. 15.14.

От шин 6...10 кВ *ГПП* воздушная или кабельная линия передачи может идти непосредственно к цеховым *ТП* (на рис. 15.14 к *ТП1*). На крупных предприятиях создают распределительные пункты, предназначенные для приема и распределения электроэнергии на одном напряжении без преобразования и трансформации. На рис. 15.14 показан *РП*, который питается по двум кабельным линиям при

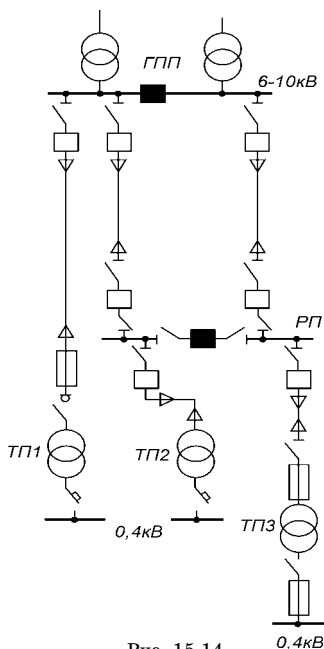


Рис. 15.14
Принципиальная схема
электропитания промышлен-
ных предприятий на
напряжении 6–10 кВ

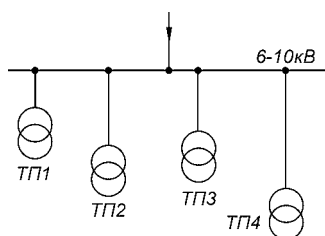


Рис. 15.15
Радиальная схема питания
цеховых ТП

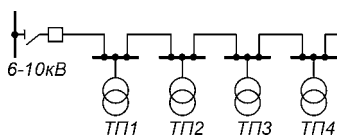


Рис. 15.16
Магистральная схема
питания цеховых ТП

напряжении 6–10 кВ. К РП присоединяют цеховые ТП (ТП2 и ТП3 на рис. 15.14).

Соединение трансформаторов ТП с линиями передачи может осуществляться через выключатель нагрузки и предохранитель (ТП1), через разъединитель и предохранитель (ТП3). В некоторых случаях присоединение может быть глухим, т. е. без аппаратов (ТП2).

В зависимости от категории нагрузок промышленного предприятия, расчетной мощности и территориального расположения существует несколько схем питания ТП. На рис. 15.15 приведен пример *радиальной схемы питания ТП*, когда каждая ТП имеет свою самостоятельную линию питания. Эта схема проста в эксплуатации и обеспечивает высокую надежность электропитания. Недостатком ее является то, что она требует большого количества аппаратов и большого расхода проводов на линии.

Другой схемой питания является *магистральная схема* (рис. 15.16), когда к линии присоединяют несколько ТП. Эта схема более сложна в эксплуатации, менее надежна, но требует меньшего числа аппаратов высокого напряжения и меньших капитальных затрат.

Чаще всего применяют *комбинированную схему питания*,

когда одни *ТП* питают по магистральной, а другие — по радиальной схеме.

Цеховые *ТП* обычно делают встроенными. В зависимости от нагрузки цеха число *ТП* может быть различным (одна и более). На каждой *ТП* устанавливают один или два трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/Y-0$ или $\Delta/Y-11$. Обычно силовую, технологическую и осветительную нагрузки цеха присоединяют к одним и тем же шинам низшего напряжения *ТП*, т. е. к одному трансформатору. Осветительную нагрузку присоединяют к отдельному трансформатору только в том случае, если силовая нагрузка (двигатели) создает большие колебания напряжения.

От шин низшего напряжения *ТП* (рис. 15.17) начинается *распределительная сеть* напряжением 0,4 кВ для присоединения электроприемников. От шин *ТП* отходят присоединенные через автоматический выключатель или рубильник с предохранителем кабельные линии к *главным щитам*. Главные щиты для питания силовой и осветительной нагрузок выполняют раздельными. Для питания силового щита, так как силовая нагрузка, как правило, является симметричной, применяют трехжильный кабель (три провода). Для питания главного щита осветительной нагрузки применяют четырехжильный кабель (три линейных и один нейтральный провод), так как осветительная нагрузка, как правило, несимметрична.

От главных щитов отходят линии к *групповым щитам*, от которых отходят *групповые линии* непосредственно к приемникам электроэнергии. Эти линии присоединяют или через автоматические выключатели (чаще), или через пакетные выключатели и рубильники с предохранителями. Для присоединения каждого двигателя прокладывают отдельную групповую линию с аппаратами включения и защиты.

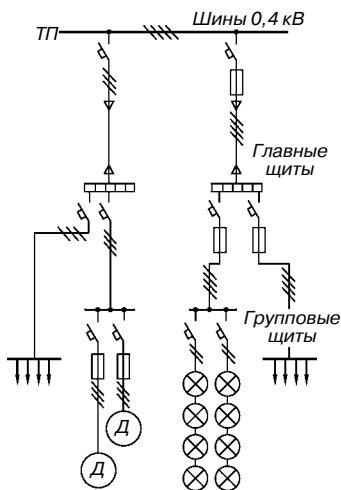


Рис. 15.17
Схема питания электроприемников на низшем напряжении

Групповые линии осветительной нагрузки могут быть двух-, трех- и четырехпроводные. При двухпроводной групповой линии осветительные приборы присоединяют на фазное напряжение, т. е. к линейному и нейтральному проводам. При четырехпроводной групповой линии осветительные приборы присоединяют поочередно по длине линии на разное фазное напряжение.

Для питания двигателей и других мощных приемников часто вместо главного и группового щитов в цехах применяют закрытые шинопроводы, проложенные вдоль цеха. Ответвительные коробки с предохранителями и автоматическими выключателями, располагаемые примерно через 0,7 м друг от друга по длине шинопровода, допускают штепсельное подключение ответвлений без снятия напряжения. Шинопроводы удобны в цехах с перемещаемым оборудованием.

15.7. РАСЧЕТНАЯ МОЩНОСТЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Для правильного выбора сечения проводов, соединяющих отдельные приемники с источником питания, выбора мощности трансформаторов и другого электрооборудования необходимо знать *расчетную мощность*, т. е. максимально возможную электрическую мощность данного узла системы электроснабжения. Расчетную мощность отдельного приемника определяют по его номинальной ($P_{\text{ном}}$) мощности.

Так как номинальная (или установленная) мощность двигателя — это механическая мощность, развиваемая двигателем на валу, то расчетная мощность, т. е. мощность электрической энергии, потребляемой двигателем из сети, определяется как

$$P_p = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{дв}},$$

где P_p — расчетная мощность двигателя; $\eta_{\text{дв}}$ — КПД двигателя.

Расчетные реактивная Q_p и полная S_p мощности двигателя переменного тока:

$$Q_p = P_p \operatorname{tg} \varphi; \quad S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = P_p / \cos \varphi,$$

где $\cos \varphi$ — номинальное значение коэффициента мощности двигателя.

Мощность энергии на главном щите силовой нагрузки или в другой точке схемы электроснабжения складывается из мощностей всех приемников, подключенных в данный момент времени к этой точке. Однако график изменения мощности в этой точке сети будет отличаться от графика любого отдельного двигателя, так как мощность двигателей в один и тот же момент времени различна. В качестве примера на рис. 15.18 приведен суточный график нагрузки на главном щите или на шинах низшего напряжения *ТП*. Характер графика зависит от сменности работы предприятия и других условий. На таких графиках откладывают средние значения мощности электрической энергии, потребляемой из сети за час или полчаса.

Номинальная или установленная мощность электроприемников обычно известна. Максимальную мощность P_{\max} нагрузки, т. е. расчетную мощность для данного узла схемы электроснабжения, также необходимо знать заранее, т. е. при проектировании и выборе электрооборудования, когда, как правило, реальные графики нагрузки отсутствуют. Если знать отношение расчетной (максимальной) мощности к номинальной, называемое *коэффициентом спроса*

$$k_c = P_{\max}/P_{\text{ном}},$$

то $P_{\max} = P_p = k_c P_{\text{ном}}$, где $P_{\text{ном}}$ — суммарная номинальная мощность всех электроприемников, формирующих данный график нагрузки. Коэффициенты спроса для ряда предприятий различного характера в зависимости от числа и мощности электродвигателей и других электроприемников определены опытным путем. Их значения обычно приводят в справочниках. Коэффициент спроса всегда меньше единицы. Это обусловлено тем, что в одно и то же время бывают включены не все двигатели, а из включенных двигателей не все работают с номинальной мощностью. Кроме того, на коэффициент спроса влияет КПД электроприемников.

Таким методом определяют расчетные активные и реактивные мощности однородных групп электроприемников предприятия.

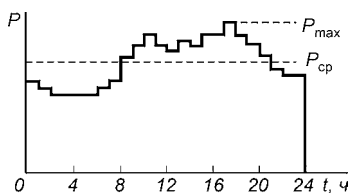


Рис. 15.18
Суточный график нагрузки
нескольких электроприемников
предприятия

Затем складывают отдельно активные и реактивные мощности этих групп и определяют активную и реактивную расчетные мощности всего предприятия. Полная расчетная мощность предприятия

$$S_{\text{пред}} = \sqrt{P_{\text{пред}}^2 + Q_{\text{пред}}^2},$$

где $P_{\text{пред}}$, $Q_{\text{пред}}$ — соответственно активная и реактивная расчетные мощности предприятия.

Среднее значение коэффициента мощности предприятия $\cos\varphi_{\text{пред}} = P_{\text{пред}}/S_{\text{пред}}$.

Расчетную мощность осветительной нагрузки при проектировании, как правило, определяют по удельной мощности освещения, т. е. по мощности осветительных приборов, приходящейся на 1 м² площади. Значение удельной мощности зависит от нормируемой освещенности, источника света (лампы накаливания или газоразрядные лампы), типа светильника, площади и высоты помещения. Эти данные имеются в справочниках.

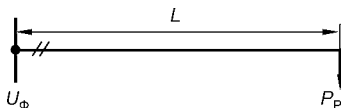
От правильного определения расчетной мощности предприятия, цехов, отдельных групп электроприемников зависят экономичность всей электротехнической части, надежность электроснабжения, качество электроэнергии. Если расчетная мощность будет завышена, то будет выбрано электрооборудование завышенной мощности, проложены провода и кабели увеличенного сечения. Это приведет к увеличению капиталовложений, а мощность оборудования не будет полностью использована. Если расчетная мощность окажется заниженной, то все электрооборудование будет работать с перегрузкой, следствием чего может быть его быстрый износ или создание аварийной обстановки, ведущей к перерыву электроснабжения. В электрических сетях будут большие потери напряжения, а напряжение у приемников будет пониженным по сравнению с номинальным.

15.8. ВЫБОР СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ

В качестве проводникового материала для проводов обычно используют алюминий и медь. Чаще всего применяют алюминиевые провода, как более дешевые. Медные провода обычно используют при некоторых особых условиях.



Рис. 15.19
Схема двухпроводной линии
с нагрузкой в конце линии



Расчет проводов сводится к выбору их марки и сечения. Промышленность выпускает провода следующего сечения (мм²): 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 16; 25; 35; 50 и т. д.

Провод выбранного сечения должен удовлетворять следующим условиям:

1. Механическая прочность должна быть достаточной, т. е. сечение провода $q_{\text{мх}}$ должно быть больше или равно минимальному допустимому сечению $q_{\text{мин}}$. Для алюминиевых проводов в большинстве случаев $q_{\text{мх}} = 2,5 \text{ мм}^2$, для медных — $q_{\text{мх}} = 0,5 \dots 1,0 \text{ мм}^2$.

2. Длительно допустимый ток $I_{\text{доп}}$ для данного сечения провода, определяемый температурой нагрева изоляции, должен быть больше или равен расчетному. Имеются справочные таблицы, в которых в зависимости от марки провода и кабеля и способа их прокладки приводят значения длительно допустимых токов для каждого сечения.

3. Потеря напряжения в сети не должна превышать допустимого значения (обычно 5%).

При питании однофазного приемника, включенного в конце двухпроводной линии (рис. 15.19), расчетный ток

$$I_p = \frac{P}{U_{\phi} \cos \varphi}. \quad (15.8)$$

По этому току по таблицам справочника выбирают такое стандартное сечение q_I провода, чтобы $I_{\text{доп}} \geq I_p$.

Потеря напряжения на участке цепи $\Delta U = I_p(R \cos \varphi + X \sin \varphi)$. Так как при напряжении до 1 кВ можно считать $X = 0$, то

$$\Delta U = I_p R \cos \varphi. \quad (15.9)$$

Поскольку для двухпроводной линии активное сопротивление

$$R = \frac{2L}{\gamma q}, \quad (15.10)$$

где L — длина линии, м; q — сечение провода, мм²; γ — удельная проводимость (для алюминиевых проводов $\gamma = 33 \text{ м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$, для медных $\gamma = 54 \text{ м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$), подставляя в формулу (15.9) выражения (15.8) и (15.10), получаем выражение для потери напряжения в вольтах

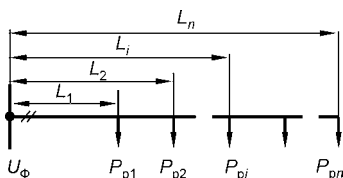


Рис. 15.20

Схема двухпроводной линии
с нагрузками, распределенными
вдоль линии

$$\Delta U = \frac{2P_p L}{\gamma q U_\Phi}. \quad (15.11)$$

Обозначив через Δu допустимую потерю напряжения в процентах от номинального напряжения, имеем

$$\Delta U = \frac{\Delta u U_\Phi}{100}. \quad (15.12)$$

Тогда из формул (15.11) и (15.12) получим, что для обеспечения потери напряжения в рассчитываемой линии не более Δu сечение проводов должно быть

$$q_{\Delta U} \geq \frac{200 P_p L}{\gamma \Delta u U_\Phi^2}. \quad (15.13)$$

Выбирают такое стандартное сечение провода q , чтобы оно было больше или равно наибольшему из трех найденных ($q_{\text{мх}}$, q_I , $q_{\Delta U}$).

Если электроприемники распределены вдоль двухпроводной линии (рис. 15.20), то сечение проводов

$$q_{\Delta U} \geq \frac{200 \sum_{i=1}^n P_{pi} L_i}{\gamma \Delta u U_\Phi^2}, \quad (15.14)$$

где P_{pi} — расчетная мощность электроприемника с номером i , Вт; L_i — расстояние электроприемника с номером i от источника питания, м.

Если вместо однофазных приемников вдоль трехпроводной линии распределены трехфазные приемники, то формула (15.14) принимает следующий вид:

$$q_{\Delta U} \geq \frac{100 \sum_{i=1}^n P_{pi} L_i}{\gamma \Delta u U_\Delta^2}, \quad (15.15)$$

где P_{pi} — расчетная мощность трехфазного приемника с номером i , Вт; U_Δ — линейное напряжение, В.

Вместо коэффициента 200 в формуле (15.15) стоит коэффициент 100, так как в трехфазной сети обратными проводами для каждой фазы являются линейные провода других фаз. Для одного трехфазного приемника в конце линии в формуле (15.15) следует принять $i = 1$.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

**ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

ВВЕДЕНИЕ

Электроника — это часть электротехники, в которой используется управление потоком электронов и других заряженных частиц в электровакуумных и полупроводниковых устройствах, объединенным под общим названием «электронные элементы». Такие элементы используются как в силовой электронике, так и в технике измерения, передачи и обработки информации. Задачей *сильноточной* техники является генерирование, передача и распределение электроэнергии с последующим ее преобразованием и регулированием в соответствии с нуждами потребителя. Электроника, осуществляющая эти задачи, называется «силовой электроникой». Она является одной из развивающихся областей и широко используется при регулировании напряжения, частоты, числа фаз и порядка их чередования, а также для коммутации электрических сетей. Цель силовой электроники — преобразование большого количества энергии, поэтому основное внимание при разработке схем уделяется получению наибольшего КПД.

В *слаботочной* электронике основной целью является передача информации с наименьшим возможным искажением и обработка информации с наибольшей возможной точностью, в то время как вопрос о достижении высокого КПД является второстепенным. Разница в целях приводит к разным техническим решениям в схемотехнике даже при использовании полупроводниковых элементов одного и того же типа. Другие различия являются следствием разработки специальных электронных элементов, предназначенных для применения исключи-

тельно в одной из областей. Примером могут служить используемые в силовой электронике полупроводниковые приборы с высоким рабочим напряжением и большим предельным током. Однако нельзя провести четкую границу раздела между областями электроники. Так, аппаратура управления и регулирования в устройствах силовой электроники по своим техническим решениям близка к слаботочной электронике и наоборот, например, блоки питания оборудования слаботочной электроники должны быть рассчитаны и сконструированы в соответствии с принципами, существующими в силовой электронике.

Силовая электроника сделала большой скачок в своем развитии с появлением полупроводниковых приборов большой мощности, обладающих высокими предельными характеристиками по напряжению и току. Это позволило внедрить силовое электронное оборудование в различных областях промышленности. Более того, они позволили решить некоторые проблемы, которые раньше вовсе не могли быть решены. Силовую электронику часто называют преобразовательной техникой благодаря тому, что она обладает одним общим признаком — управляет потоком энергии посредством включения и выключения вентильных электронных элементов (коммутации), введенных в основные электрические схемы. При этом различают преобразователи с естественной коммутацией и принудительной коммутацией. В преобразователях с естественной коммутацией выключение вентиля происходит под действием переменного напряжения источника питания или сети. Коммутация в преобразователях с принудительной коммутацией осуществляется с помощью дополнительных коммутирующих контуров.

Задачей развития электроники также является снижение массы и габаритов устройств электроники, в том числе источников питания электронной аппаратуры и электродвигателей. Сегодня уже невозможно представить компьютер, видеокамеру, телевизор и др. без компактного и надежного импульсного источника. Примерно десятилетие назад на рынке компонентов силовой электроники произошла техническая революция, воплотившая в жизнь самые смелые идеи разработчиков 1960-х годов. Ведущие мировые фирмы начали массовый выпуск

комплектующих элементов, по своим свойствам приближающихся к идеальным. Появились специальные импульсные диоды с малым временем обратного восстановления, диоды Шоттки с высоким рабочим напряжением и большим током, управляемые полупроводниковые ключи (транзисторы MOSFET и IGBT), силовые полупроводниковые модули, включающие в себя несколько согласованных по электрическим свойствам ключевых и неуправляемых (вспомогательных) элементов. Кроме того, разработаны драйверы для управления силовыми ключами, элементы защиты от опасных перенапряжений, микросхемы управления источниками электропитания, комбинированные микросхемы, включающие в себя силовые элементы и управление.

Сравнительно новыми устройствами, выполненными в интегральном исполнении, являются появившиеся на рынке корректоры коэффициента мощности с импульсным принципом действия. Разработаны и массово производятся микросхемы управления для всех широко известных импульсных схем стабилизаторов и преобразователей: понижающих, повышающих, инвертирующих и т. д.

Развитие электроники и ее обширное применение предопределило потребность промышленности в специалистах-«электронщиках», а также специалистах, у которых базовая подготовка должна включать расширенные знания в электротехнике и электронике.

В данной части представлены основные физические особенности работы полупроводниковых приборов, устройство и принцип действия современных электронных элементов, а также конструкции основополагающих устройств электронной техники, что позволит студентам получить базовые знания для последующего использования в разработках электронных устройств, применяемых в различных областях промышленности.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

16.1.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ЛАМПЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Электроравакуумные лампы — это приборы, у которых электроды помещены в корпус с низким давлением (вакуум) или наполненный газом, в которых электрический ток существует соответственно только за счет свободных электронов и ионов (смешанная проводимость). Применение электронных ламп в промышленности обусловлено в первую очередь высоким внутренним сопротивлением прибора, что выигрышно отличает их от полупроводниковых приборов с точки зрения помехозащитности.

Под вакуумом понимают такую высокую степень разрежения воздуха или газа, при котором длина свободного пробега электрона больше расстояния между катодом и анодом, т. е. когда движение электронов происходит без столкновения с молекулами газа. Источником электронов в электронных лампах служит металлический электрод — катод, с поверхности которого электроны в результате электронной эмиссии выходят в окружающую среду. В настоящее время электроравакуумные лампы применяются в мощных высокочастотных (более 400 кГц) генераторных устройствах.

16.2.

ВИДЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Вокруг атомов металлов беспорядочно перемещаются электроны, слабо связанные с ними. При нормальной температуре и отсутствии внешнего электрического поля только некоторая часть электронов, обладающая наибольшей кинетической энергией, выходит за пределы металла.

В результате создается электронный слой вокруг катода, который вместе с расположенным на поверхности катода слоем положительных ионов (испарившихся атомов катода, лишившихся электронов в вакууме, или ионов газа) образует некоторую разность потенциалов, называемую *потенциальным барьером*.

Эта разность потенциалов препятствует выходу электронов за пределы проводника.

Для преодоления потенциального барьера и выхода электронов из катода необходимо им сообщить энергию, равную работе по преодолению тормозящего действия электрического поля. Эту энергию называют *работой выхода электронов* и обозначают $e\phi$. Она равна абсолютному значению химического потенциала электронного газа, находящегося в вакууме в равновесии с эмиттером при напряженности электрического поля $E = 0$. Отношение работы выхода к заряду электрона именуется *потенциалом выхода* ϕ .

Катоды испускают электроны в результате термоэлектронной, автоэлектронной и термоавтоэлектронной эмиссий, при этом возможно существование других, более сложных, комбинированных процессов, обеспечивающих возникновение электронов у катода. К ним относится вторичная эмиссия под ударами тяжелых частиц и фотоэлектронная эмиссия электронов.

При температуре абсолютного нуля электроны металла способны занимать энергетические уровни лишь до энергии Ферми:

$$W_f = (h^2/2m_e) \cdot (3n_e/8\pi)^{2/3},$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, m_e — масса электрона, n_e — концентрация электронов.

При этом электроны не могут занимать уровни с более высокими значениями энергии, так как вероятность их заполнения в этом случае равна нулю. Следовательно, энергия $W = W_f$ является максимальной энергией электронов в металле при температуре абсолютного нуля.

Распределение энергии внутри металла (рис. 16.1) представляется в виде потенциальной ямы глубиной W_0 , в которой электроны распределены в соответствии с функцией распределения Ферми, при соответствующей температуре T .

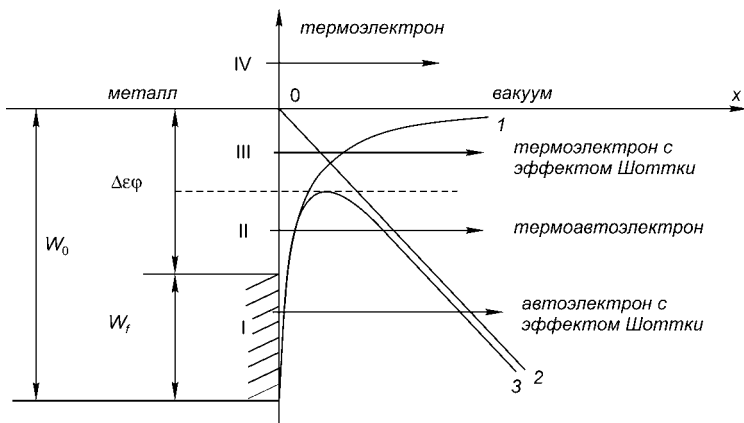


Рис. 16.1
Снижение потенциального барьера
под действием внешнего ускоряющего поля:

1 — потенциальный барьер без внешнего электрического поля; 2 — энергия, сообщаемая электронам однородным внешним электрическим полем; 3 — потенциальный барьер при наличии ускоряющего электрического поля.

Для того чтобы электрон мог покинуть кристаллическую решетку металла, необходимо, чтобы он обладал энергией, превосходящей значение поверхностного потенциального барьера, а направление его движения осуществлялось в плоскости, перпендикулярной поверхности металла.

В этом случае условие выхода электрона записывают в виде $m_e v_x^2 / 2 \geq W_0$. Отсюда может быть определена предельная скорость выхода: $v_e \geq (2W_0/m_e)^{1/2}$.

Из всех электронов металла, обладающих компонентой скорости v_x , за единицу времени t достигают поверхности только те электроны, которые находятся внутри объема на глубине, не превышающей $v_x t$.

Энергию, необходимую для выхода из металла, электрон может получить в результате нагревания тела, что приводит к появлению достаточно быстрых электронов, способных, благодаря своей кинетической энергии, преодолеть внутренние силы притяжения. Таким образом, возникает *термоэлектронная эмиссия* электронов, описываемая законом Ричардсона–Дэшмана:

$$j_{\text{тээ}} = AD_0 T^2 \exp\left(-\frac{W_0 - W_f}{kT}\right) = AD_0 T^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right), \quad (16.1)$$

где $A = 4\pi m_e e k^2 / h^3 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ А/(м}^2 \cdot \text{К}^2)$ — постоянная Ричардсона; $D_0 \approx 0,94...0,97$ — квантово-механический коэффициент отражения электронов от границы «металл–вакуум»; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Кл}$ — постоянная Больцмана; ϕ — потенциал выхода, выраженный в вольтах; T — температура катода.

Согласно квантомеханической теории не все электроны выходят в вакуум, так как существует вероятность их отражения от потенциального барьера. Поэтому в уравнение (16.1) введен дополнительный коэффициент прозрачности барьера D_0 , являющийся функцией энергии электрона. Для коэффициента прозрачности выполняется соотношение $D_0 = 1 - \gamma'$, где γ' — коэффициент отражения Шоттки, характеризующий вероятность того, что электрон с энергией, достаточной для выхода, возвращается с поверхности в материал.

Вторичной электронной эмиссией называют явление выхода вторичных электронов под действием ударов первичных электронов о поверхность тела. Летящие первичные электроны ударяются о поверхность катода и проникают в его поверхностный слой, отдавая часть своей энергии вторичным электронам проводника. Если в результате столкновения вторичные электроны будут обладать энергией, большей работы выхода, то они выйдут за пределы проводника. Так как первичный электрон, обладающий значительной энергией, может отдать ее одному или нескольким электронам, то число вторичных электронов может быть больше первичных. Первичные электроны, встречая на своем пути поверхность металла, тормозятся и отдают свою энергию его электронам (например, аноду лампы).

Электронной эмиссией под ударами тяжелых частиц называют явление выхода электронов под действием ударов ионов или возбужденных атомов (молекул) о поверхность проводника (для газозаполненных ламп), т. е. этот вид эмиссии подобен вторичной электронной эмиссии.

Наличие электрического поля у поверхности катода не только облегчает термоэлектронную эмиссию, но способно и непосредственным образом вырывать электроны из холодного металла. Наложение внешнего поля меняет распределение потенциальной энергии электрона в области границы тела (рис. 16.1). При отсутствии электри-

ческого поля ($E = 0$) толщина потенциального барьера, окружающего электронную яму, не ограничена. Появление внешнего электрического поля ($E > 0$) снижает потенциальный барьер на границе металла на $e^{3/2}E^{1/2}/(4\pi\epsilon_0)^{1/2}$, уменьшает работу выхода и увеличивает эмиссионный ток. Очевидно, что при очень высокой напряженности электрического поля у поверхности металла потенциальный барьер способен снизиться настолько, что его вершина может оказаться на одной высоте с уровнем Ферми.

При значении $E > 3 \cdot 10^8$ В/м существенным является выход электронов во внешнюю часть пространства вследствие возникающей *автоэлектронной эмиссии*. Самопроизвольный выход электронов за пределы твердого тела не связан с затратой дополнительной энергии. При этом появляется возможность туннельного просачивания электронов непосредственно из всего объема ямы, а не только из окрестности уровня Ферми. Зависимость плотности тока автоэлектронной эмиссии от электрического поля очень сильная — так, при изменении напряженности электрического поля E в 1,13...1,33 раза плотность тока меняется не меньше, чем на порядок.

Вероятность туннельного проникновения частицы сквозь объем определяется в основном площадью барьера над линией перехода, и, следовательно, она тем больше, чем выше энергия электрона. При $T = 0$ наибольшей вероятностью выхода обладают электроны с максимальной энергией, соответствующей границе Ферми. Вероятность туннельного перехода и плотность тока автоэлектронной эмиссии представляются уравнением Фаулера–Нордгейма:

$$j_{\text{аэ}} = 1,54 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{t^2 \Psi(\xi) \varphi} \exp \left[-6,85 \cdot 10^7 \frac{\varphi^{3/2}}{E} \Psi(\xi) \right], \quad (16.2)$$

где $\Psi(\xi)$ — функция относительного снижения потенциального барьера Нордгейма.

Аргументом функции Нордгейма $\Psi(\xi)$ является безразмерная величина $\xi = e(eE)^{1/2}/((4\pi\epsilon_0)^{1/2}|W_x|)$, представляющая собой отношение уменьшения работы выхода за счет эффекта Шоттки к работе выхода электрона с данной энергией $|W_x|$. При $W_x = e\varphi\xi = (eE)^{1/2}/\varphi$ функция $\Psi(\xi)$ табулирована и может быть представлена в виде графика, близкого к параболе вида $\psi(\xi) \approx 0,955 - 1,03\xi^2$.

Токи автоэлектронной эмиссии, сопоставимые с токами термоэлектронной эмиссии, фиксируются при полях, эквивалентных $5 \cdot 10^9$ В/м. Однако экспериментальные исследования показывают, что эмиссия может происходить и при меньшей напряженности электрического поля. Это объясняется возможностью возникновения автоэлектронной эмиссии на микроскопических выступках поверхности металла, где неравномерность поля значительна. Кроме того, искажение электрического поля вблизи выступов способствует притягиванию к ним подлетающих заряженных частиц, в результате чего они подвергаются более интенсивной бомбардировке, чем остальная поверхность.

Приведенное уравнение (16.2) соответствует случаю, когда $T = 0$. Температурная зависимость автоэлектронного тока обусловлена большей вероятностью прохождения сквозь потенциальный барьер термически возбужденных электронов на уровни, лежащие выше уровня Ферми.

Если электрическое поле создается у нагретой поверхности, то его влияние на ток эмиссии можно заметить и при относительно небольших значениях E . Это явление в (16.1) учитывается с помощью так называемой поправки Шоттки, сводящейся к эффективному снижению работы выхода на $-eE$:

$$j_{\text{таэз}} = AT^2 \exp\left(-\frac{e(\varphi - \sqrt{eE})}{kT}\right). \quad (16.3)$$

В области высоких температур к собственно автоэлектронному току, обусловленному туннельным механизмом, добавляется ток термоэлектронной эмиссии, обусловленный электронами с энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, сниженного за счет эффекта Шоттки.

На рис. 16.1 энергетический спектр электронов в металле разделен на четыре области. Электроны первой области могут быть эмитированы при любых температурах, включая и $T = 0$. Электроны второй области участвуют в автоэлектронной эмиссии при $T > 0$ (их можно назвать термоэлектронами). Выход в вакуум из третьей области соответствует увеличению термоэлектронного тока за счет эффекта Шоттки. Из четвертой группы элек-

троны покидают твердое тело за счет механизма термоэлектронной эмиссии даже при энергии $W \cong 0$.

Электрическое поле у поверхности твердого тела может быть образовано не только за счет внешней разности потенциалов, но также за счет поля положительно заряженных ионов, находящихся у поверхности катода. Подобный слой ионов формируется при испарении автоэмиссионного катода при его разогреве собственно автоэмиссионным током. Последующая ионизация испарившихся атомов с катода приводит к возврату образовавшихся ионов и бомбардировке ими катода. Сильное электрическое поле в пограничной области вызывает дополнительное усиление автоэлектронной эмиссии. Этот процесс перехода от обычной автоэлектронной эмиссии к более высоким плотностям эмиссионного тока может привести к формированию в разрядном промежутке вакуумной дуги. Ниже даны определения основных видов эмиссии электронов с поверхности катода.

Автоэлектронной эмиссией называют явление выхода электронов из катода под действием сильного электрического поля у его поверхности. Сила, действующая на электрон, находящийся в электрическом поле, пропорциональна заряду электрона и напряженности поля. Поэтому при достаточно большой напряженности электрического поля силы, действующие на электроны, становятся достаточными для преодоления потенциального барьера и выхода электронов из холодного катода. *Термоавтоэлектронная эмиссия* обеспечивается одновременным нагревом катода и наличием электрического поля. *Фотоэлектронной эмиссией* называют явление выхода электронов под действием излучения, поглощаемого катодом, когда электроны катода получают дополнительную энергию для выхода от частиц света — фотонов. Лучистая энергия испускается и поглощается определенными порциями — квантами. Если энергия кванта больше работы выхода, то электрон может покинуть катод. Явление выхода электронов из катода под действием световой энергии называется фотоэффектом.

Электроны, вылетающие из катода, продолжают движение под воздействием внешнего электрического поля, образуя электрический ток эмиссии. С повышением

температуры катода, увеличением энергии первичных электронов или тяжелых частиц, напряженности ускоряющего поля вблизи катода, светового потока ток эмиссии растет, так как увеличивается число n эмитированных электронов. Напротив, отсутствие ускоряющего внешнего электрического поля приводит к образованию вокруг катода объемного отрицательного заряда, препятствующего дальнейшему выходу электронов.

16.3. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ЛАМП

Конструктивно электровакуумная лампа состоит из баллона, электродов и цоколя. Баллон может быть изготовлен из стекла (натриевого, боросиликатного, свинцового, кварцевого), металла (сталь, медь, алюминий, титан) или керамики (окиси алюминия, кремнезема, форстерита, стеатита). К цоколю с помощью штырьков подсоединены выводы электродов. Электродами электровакуумных ламп являются катод, анод и сетка.

Катод лампы, являющийся источником электронов, характеризуется следующими параметрами: *максимальной плотностью катодного тока, экономической эффективности, рабочей температурой и долговечностью.*

Катодным током является электронный поток, направленный от катода к другим электродам. Для увеличения долговечности электронной лампы максимальный катодный ток обычно значительно меньше полного эмиссионного тока катода. Максимально допустимый катодный ток, приходящийся на единицу площади поверхности катода, эмитирующего электроны, соответствует максимальной плотности катодного тока, которая в современных электронных лампах составляет $(0,1...1) \cdot 10^4$ А/м².

Экономическая эффективность катода H (мА/Вт) характеризуется как отношение тока эмиссии к мощности цепи накала (разогретый катод):

$$H = \frac{I_{\text{к. max}}}{I_{\text{н}} U_{\text{н}}}, \quad (16.4)$$

где $I_{\text{к. max}}$ — максимальный ток эмиссии катода; $I_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$ — ток и напряжение накала.

Чем выше эффективность H катода, тем больший ток эмиссии можно получать при меньшей мощности цепи накала. Для различных современных ламп экономическая эффективность катода составляет 2...100 мА/Вт.

Рабочая температура как параметр влияет на экономическую эффективность катода. Чем ниже рабочая температура катода, тем меньшая мощность требуется для его нагрева. Температура катодов в среднем составляет 1000...2600°C.

Под *долговечностью* катода подразумевается та продолжительность времени, в течение которого катод может непрерывно работать, сохраняя свои исходные параметры в пределах установленных норм.

Термоэлектронные катоды подразделяются по типу своих эмитирующих поверхностей на четыре группы: металлические (из чистого металла, например из вольфрама), металлопленочные, полупроводниковые и сложные (металло-полупроводниковые и металлокерамические).

Металлические (однородные) неактивированные катоды менее экономичные. Так, например, у вольфрамовых катодов $H = 2...10$ мА/Вт при рабочей температуре 2300...2600°C (температура плавления 3395°C), но они хорошо работают в сложных температурных условиях, обладают высокой стойкостью при бомбардировке их ионами остаточных газов под воздействием сильных электрических полей. Применяются такие катоды в мощных лампах и в тех случаях, когда требуется высокая стабильность параметров катода во времени. Для изготовления металлических катодов применяют металлы с высокой температурой плавления, обладающие хорошими механическими свойствами: прочностью, ковкостью, тягучестью. Наиболее распространенным является катод из вольфрама и реже из тантала и ниобия.

Металлопленочные катоды изготавливаются путем нанесения на металлический (однородный) катод покрытия, состоящего из одного или нескольких слоев. Особенностью покрытия является наличие положительного заряда, который создает электрическое поле, уменьшающее работу выхода электронов. Наиболее распространенными металлопленочными катодами являются карбидированный и бариево-вольфрамовый катоды (см. рис. 16.2). Такие катоды экономически эффективнее металлических,

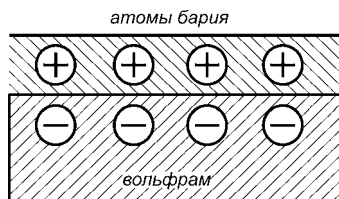


Рис. 16.2
Схема
металлопленочного катода

но уступают им в отношении стабильности параметров и механической прочности.

Полупроводниковые катоды обладают более высокой экономической эффективностью и поэтому широко распространены. В таких катодах основание покрыто относительно толстым слоем актив-

ного вещества с электропроводностью электронного типа. К полупроводниковым катодам относятся оксидный и ториево-оксидный катоды.

Сложные катоды изготавливают на основе оксидных или металлокерамических катодов. Оксидные катоды изготавливают из составной пористой структуры, пропитанной активной массой, или получают путем прессования карбонатов и никелевого порошка с последующей обработкой и активированием (оксидно-никелевые катоды). Металлокерамические катоды изготавливают из порошков вольфрама, окиси тория и керамики путем прессования и спекания при высокой температуре.

В зависимости от способа подогрева различают катоды прямого и косвенного действия (рис. 16.3). В катодах прямого накала нить накала является эмитирующей поверхностью. Такие катоды применяют в лампах большой мощности и выполняют из проволоки или ленты, которым придают различные формы: нити, решетки, спирали, беличьего колеса и т. п. Катоды прямого накала имеют малую массу и, следовательно, малую теплоемкость, так что время их разогрева относительно мало и эффективность их выше, чем у катодов косвенного действия. У катодов прямого накала электрический потенциал меняется по длине нити вследствие падения напряжения от проходящего по ней тока. При питании катодов прямого накала переменным током это явление приводит к появлению фона переменного тока в анодной цепи лампы. К недостаткам катодов прямого накала относится также малая площадь эмитирующей поверхности и недостаточная жесткость конструкции. Катоды прямого накала выполняют однородными металлическими и активированными торием или барием.

У катодов косвенного действия разделены эмитирующая поверхность и подогреватель, которые могут быть электрически не связаны между собой. Они имеют большую эмитирующую поверхность и массу, что позволяет получить значительный эмиссионный ток и высокую тепловую инерцию. Однако время разогрева у них велико, и эффективность ниже, чем у катодов прямого накала. Распределение потенциала по катоду одинаковое по всей длине. Подогреватели катодов, изготовленные в виде спирали из вольфрама или сплава вольфрама с рением, помещают внутри катода. В качестве изолирующего материала применяют окись алюминия или окись бериллия.

Анод является коллектором электронов, которые отдают ему кинетическую энергию, полученную ими в ускоряющем электрическом поле лампы. При этом анод нагревается, и, чтобы максимальная температура анода не превышала установленного для данной лампы значения, его охлаждают. Существует пять способов охлаждения анода: лучеиспускание через вакуум (анод находится внутри баллона), отвод тепла теплопроводностью через массивный вывод (анод находится внутри стеклянного или металлокерамического баллона, на его вывод надет радиатор), а также воздушное, водяное, пароводяное охлаждение. В первом и втором способах охлаждение естественное, в остальных трех принудительное потоком воздуха, воды или пара. Предельно допустимую температуру анода выбирают в зависимости от его материала, типа катода, способа охлаждения, газоразделения из анода и материала баллона лампы. Максимальная мощность энергии, рассеиваемой на аноде: $P_a = I_a U_a$, где I_a и U_a — анодный ток и напряжение. Чтобы температура анода не превышала допустимую,

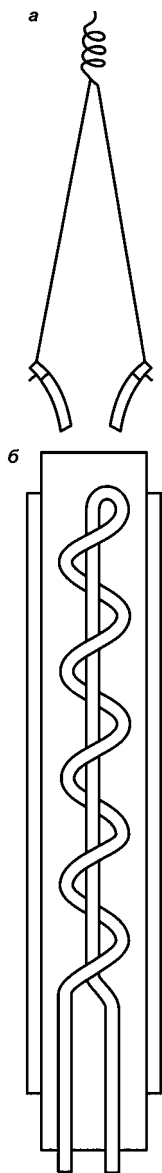


Рис. 16.3
Устройство катодов

a — прямого действия; *б* — косвенного действия.

необходимо, чтобы мощность энергии P_a , рассеиваемая на аноде, была меньше допустимой $P_{a \text{ доп}}$. Допустимая мощность энергии, рассеиваемая на аноде, устанавливается в зависимости от допустимой температуры анода, его материала и способа охлаждения.

Материалом анодов в лампах малой мощности является никель и алюминированное железо, в лампах большой мощности при естественном охлаждении — молибден, тантал и титан, при искусственном охлаждении — медь. В ионных (газонаполненных) приборах преимущественно используют графит. Конструктивно аноды электронных ламп изготавливают цилиндрическими, эллиптическими и коробчатой формы.

Сетки электровакуумных ламп изготавливают спиральными, рамочными и штампованными. Спиральные сетки навивают из проволоки различного диаметра на специальных автоматах и сваривают с держателями точечной сваркой. В электронных лампах число сеток может быть от одной до шести, и каждая из них имеет свое назначение и название. В зависимости от назначения сеток материалом для них может быть вольфрам, молибден, сплавы никеля и другие металлы.

16.4. ДВУХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ (ДИОДЫ)

Диод является простейшей электронной лампой с катодом и анодом и применяется как выпрямитель переменного тока (кенотрон). Выводы электродов присоединяют к штырькам, впрессованным в пластмассовый цоколь лампы, или проводят непосредственно через стекло колбы. В высоковольтном диоде вывод от анода расположен в верхней части лампы (рис. 16.4), катод имеет форму нити.

На рис. 16.5 показано условное обозначение диодов с катодами прямого и косвенного накала. Аноды ламп соединяют с одним штырьком цоколя, катод прямого накала — с двумя штырьками, катод косвенного накала — с тремя штырьками.

Для анализа принципа действия диода воспользуемся схемой, приведенной на рис. 16.6. Используя потенциометр R_n как делитель напряжения, на диод подается анод-

ное напряжение U_a . При прямой подаче напряжения на диод между анодом и катодом создается ускоряющее электрическое поле. Под действием этого поля электроны направленно перемещаются к аноду, создавая анодный ток I_a . Условное направление тока — от анода к катоду. При открытом диоде анодный ток увеличивается с ростом анодного напряжения.

Если приложить к диоду обратное напряжение: минус к аноду, а плюс к катоду, то электрическое поле между анодом и катодом становится тормозящим для электронов. При этом практически ни один из эмитированных электронов не достигает поверхности анода. Напряжение, приложенное к лампе, при котором ток близок к нулю, называется обратным анодным напряжением. Следовательно, диод обладает свойством *односторонней проводимости*.

Зависимость анодного тока от анодного напряжения при неизменном напряжении накала U_n называют анодной или вольтамперной характеристикой диода (см. рис. 16.7). При анодном напряжении, равном нулю, диод проводит незначительный начальный ток, который обусловлен электронами с запасом кинетической энергии, достаточной для достижения анода.

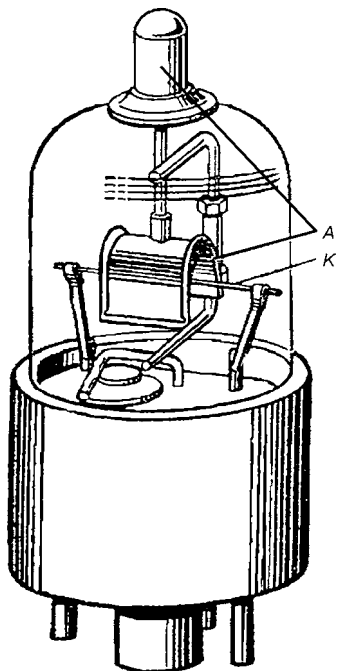


Рис. 16.4
Устройство диода

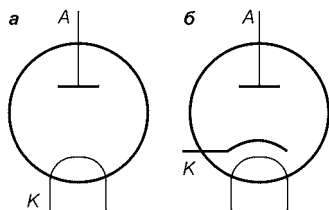


Рис. 16.5
Условное обозначение диодов
а — прямого накала; б — косвенного накала.

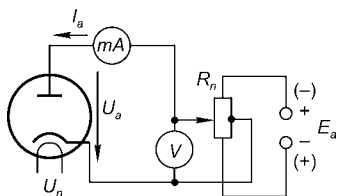


Рис. 16.6
Схема исследования характеристик диода

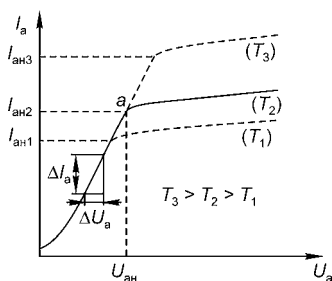


Рис. 16.7
Вольт-амперные
характеристики диода:

$I_{ан1}, I_{ан2}, I_{ан3}$ — ток насыщения;
 $U_{ан}$ — напряжение насыщения;
 T_1, T_2, T_3 — температура накала
катода.

С повышением прямого положительного анодного напряжения ток через лампу сначала растет медленно, а затем анодный ток возрастает быстрее. Точка a (для второй зависимости) характеристики соответствует такому режиму работы, когда анодный ток становится равным эмиссионному току. Это значит, что электронное облако у катода полностью рассеялось. Для диодов этот ток называют током насыщения $I_{ан}$, ему соответствует напряжение насыщения $U_{ан}$. Для изменения тока насыщения меняют температуру накала катода (рис. 16.7). В некоторых случаях для этой цели применяют модифицированные катоды.

Основными параметрами диода являются: крутизна характеристики, внутреннее сопротивление, допустимая мощность энергии, выделяющейся на аноде, максимальный анодный ток, допустимое обратное напряжение.

Крутизной характеристики называют отношение приращения анодного тока ΔI_a к соответствующему приращению анодного напряжения ΔU_a , которое у диодов разных типов составляет 1...50 мА/В.

Внутренним или дифференциальным сопротивлением диода называют величину, определяемую отношением приращения анодного напряжения к приращению анодного тока на рабочем участке характеристики (рис. 16.7).

Крутизна характеристики, так же как и дифференциальное сопротивление диода, на различных участках характеристики вследствие ее нелинейности неодинакова, поэтому принимают параметры на рабочем участке характеристики диода.

Выделяющаяся на аноде мощность $P_a = I_a U_a$ должна быть меньше *допустимой мощности* $P_{а доп}$, обусловленной бомбардировкой анода электронами. Для каждой лампы указывается предельное значение мощности $P_{а доп}$, рассеиваемой анодом, не допускающей его расплавление.



Для диодов значение этой мощности находится в пределах от долей ватта до десятков ватт.

Максимальный анодный ток $I_{a \max}$ ограничен током эмиссии катода, а также нагревом катода и анода. Для современных анодов значения $I_{a \max}$ находятся в пределах от 0,01 до 1 А.

Для каждой лампы указывают *наибольшее допустимое обратное напряжение*, которое может быть приложено к лампе в обратном направлении, не подвергая ее опасности пробоя. Если обратное напряжение превысит допустимое значение, то может развиваться самостоятельный разряд и наступит пробой промежутка между анодом и катодом. Это напряжение находится в пределах от десятков вольт до десятков киловольт.

К параметрам лампы относятся также *номинальное напряжение и ток накала*.

Диоды применяют кроме выпрямления переменного тока также для преобразования высокочастотных колебаний (высокочастотные диоды), для детектирования, модулирования, преобразования частот.

Обозначение электровакуумного диода (по ГОСТ 13393-67) состоит из следующих элементов: первый (число) — напряжение накала; второй (буква) — тип лампы: Д — диод, Ц — кенотрон, Х — двойной диод; третий (число) — порядковый номер данного типа прибора; четвертый (буква) — конструктивное оформление: С — стеклянная оболочка, К — керамическая оболочка, П — стеклянная миниатюрная пальчиковая.

16.5. ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ (ТРИОДЫ)

Триодом называют электронную лампу, у которой между анодом и катодом размещается третий электрод — сетка, которая управляет потоком электронов, т. е. током лампы. Управляющую сетку (см. рис. 16.8а) располагают между анодом и катодом вблизи последнего. Условное обозначение триода с косвенным нагревом катода изображено на рис. 16.8б.

Разность потенциалов между сеткой и катодом называют сеточным напряжением. Если в диоде на электроны, вылетающие из раскаленного катода, действует объемный

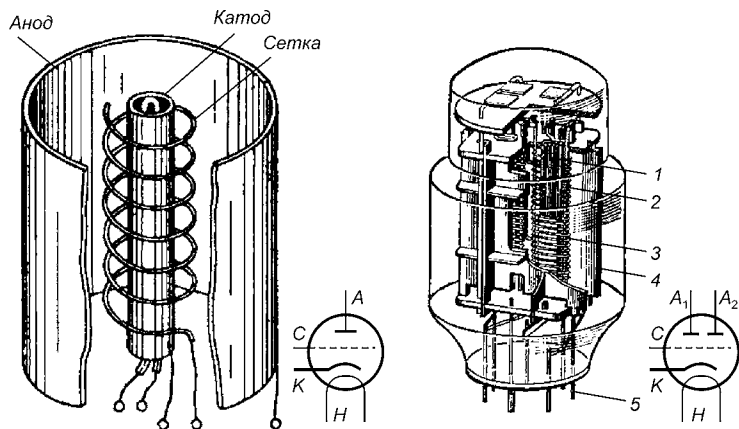


Рис. 16.8
Устройство и условное обозначение триодов

а — схематичное изображение триода; *б* — условное обозначение трехэлектродной электронной лампы; *в* — устройство двойного триода; *г* — обозначение двойного триода; 1 — подогреватель, 2 — катод, 3 — сетка, 4 — анод, 5 — внешние выводы.

заряд в области катода и электрическое поле, образованное анодным напряжением U_a , то в триоде электрическое поле создается не только анодным, но и сеточным напряжением U_c .

Так как сетка расположена ближе к катоду (примерно в сто раз ближе, чем к аноду), то действие сеточного напряжения на электрическое поле между анодом и катодом более сильное, чем действие поля, образованного анодным напряжением.

При сеточном напряжении $U_c = 0$ электрическое поле определяется анодным напряжением. При положительном напряжении на сетке на ускоряющее поле, созданное анодным напряжением, накладывается ускоряющее поле сетки. При этом напряженность поля между сеткой и катодом возрастает и анодный ток триода увеличивается.

На рис. 16.9*а* приведена схема электрической цепи, с помощью которой снимают характеристики триодов.

Однако при напряжении на сетке больше нуля часть электронов с катода попадает на сетку и образует в ее цепи сеточный ток, который оказывает вредное влияние на режим работы триода. Причем, если на сетке будет отрицательный потенциал, то на ускоряющее поле, со-

зданное анодным напряжением, между катодом и сеткой будет действовать результирующее тормозящее поле сетки, уменьшающее напряженность поля и, следовательно, анодный ток триода.

При неизменном анодном напряжении U_a результирующее поле между сеткой и катодом будет определяться потенциалом сетки. При небольшом отрицательном напряжении U_c результирующее поле становится ускоряющим, и между анодом и катодом триода будет существовать анодный ток. С увеличением отрицательного напряжения результирующее поле между сеткой и катодом ослабевает и анодный ток уменьшается. При некотором отрицательном напряжении сетки, называемом запирающим (рис. 16.9б), результирующее поле между сеткой и катодом становится тормозящим, и анодный ток будет равен нулю, т. е. триод запирается.

Зависимость анодного тока триода от анодного напряжения снимают при неизменном сеточном напряжении

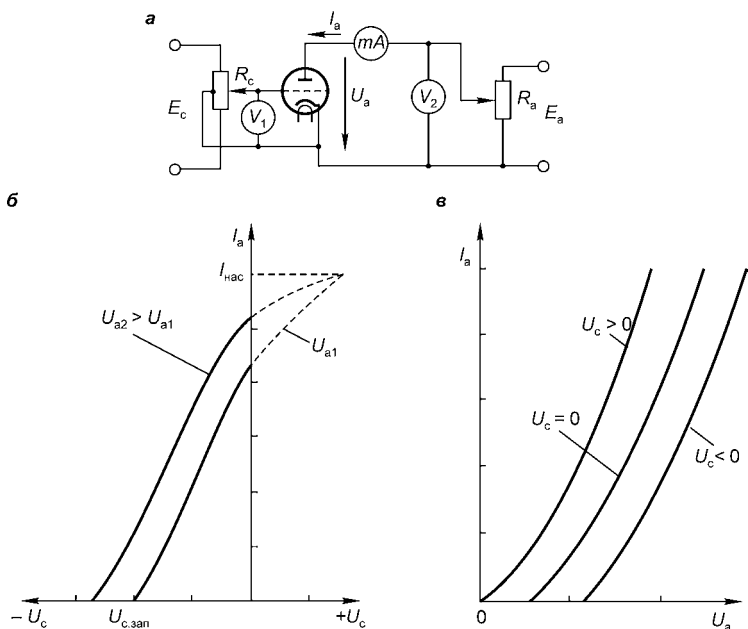


Рис. 16.9
Характеристики триода

a — схема для анализа; $б$ — анодно-сеточные характеристики; $в$ — анодные характеристики.

и называют *анодной характеристикой* (рис. 16.9в). При нулевом значении сеточного напряжения ($U_c = 0$) анодная характеристика триода практически не отличается от анодной характеристики диода. При положительном напряжении на сетке анодный ток увеличивается и характеристика располагается левее, причем тем выше, чем больше U_c . Анодная характеристика при отрицательном напряжении сетки сохранит вид и наклон и расположится правее характеристики, полученной при $U_c = 0$.

При незначительных анодных напряжениях электронный триод запирается отрицательным сеточным напряжением и отпирается, когда анодное напряжение достигнет значения U_{a1} . При этом ускоряющее анодное поле полностью компенсирует тормозящее поле сетки. Чем больше отрицательное напряжение сетки, тем больше анодное напряжение, при котором происходит отпирание электронной лампы.

К основным параметрам триодов, характеризующих их свойства, относятся крутизна, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

Крутизной анодно-сеточной характеристики S называют отношение приращения анодного тока к вызвавшему его приращению сеточного напряжения при неизменном анодном напряжении ($U_a = \text{const}$):

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}. \quad (16.5)$$

Крутизна триода количественно характеризует управляющие способности сетки и зависит от эмиссионной способности катода, плотности витков сетки и расстояния между сеткой и катодом. У современных триодов крутизна составляет 1...30 мА/В.

Внутренним сопротивлением R_i переменному току триода называют отношение приращения анодного напряжения к вызванному им приращению анодного тока при неизменном сеточном напряжении ($U_c = \text{const}$):

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}. \quad (16.6)$$

Внутреннее сопротивление зависит от электрических и конструктивных параметров лампы. У приборов внутреннее сопротивление составляет 0,5...100 кОм.

Коэффициентом усиления триода μ называют число, которое показывает, насколько сильнее изменение сеточного напряжения действует на анодный ток, чем изменение анодного напряжения:

$$\mu = - \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \quad (I_a = \text{const}). \quad (16.7)$$

Поскольку анодный ток не должен меняться, а увеличению сеточного напряжения соответствует уменьшение анодного напряжения, то коэффициент усиления будет отрицательным. Коэффициент усиления определяется по семейству анодных или анодно-сеточных характеристик и находится в пределах 10...30.

К недостаткам триода следует отнести малый коэффициент усиления, обусловленный слабым экранированием сеткой действия поля анода на электронный поток. Кроме того, триоды имеют большую емкость между анодом и управляющей сеткой C_{ac} , которая вредно влияет на работу триода на больших частотах и приводит к генерированию дополнительных колебаний.

16.6. ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕТРОДЫ, ПЕНТОДЫ И МНОГООЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ

Четырехэлектродные электронные лампы (тетроды) имеют две сетки — управляющую и экранирующую. Экранирующая сетка расположена между анодом и управляющей сеткой.

Принцип работы тетрода рассмотрим на примере усилителя (рис. 16.10).

На управляющую сетку C_1 подается входное напряжение $u_{вх}$, а на экранирующую сетку C_2 подается постоянное напряжение $E_{c2} \approx 0,5E_a$. В результате переменное электрическое поле анода преимущественно замыкается на экранирующую сетку, что ограничивает его действие на электронный поток. Следовательно, усилительные свойства тетрода значительно выше, чем у триода.

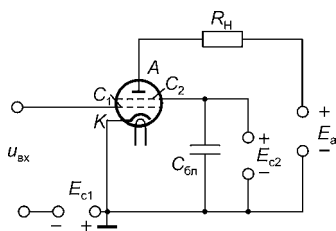


Рис. 16.10
Схема усилителя на тетроде

Недостатком триода является малый коэффициент усиления. Для его увеличения следует увеличить частоту намотки управляющей сетки, но при этом уменьшается запирающее напряжение и анодно-сеточные характеристики смещаются вправо, где работа усилительной лампы становится невозможной из-за сеточных токов. Кроме того, в триоде относительно велика проходная емкость C_{ac} , ухудшающая работу усилителя. Эти недостатки триода устраняются применением второй сетки C_2 .

Управляющая сетка в тетраде делается редкой с тем, чтобы запирающее напряжение было большим и анодно-сеточные характеристики располагались в левой части семейства кривых. Экранирующая сетка делается густой, она сильно экранирует катод и управляющую сетку от анодного поля. Поэтому влияние анодного напряжения на напряженность электрического поля вблизи катода оказывается слабым, так как его основное поле создается экранирующей сеткой, на которую и подается положительное напряжение (рис. 16.10).

Часть электронов, пролетая между нитками экранирующей сетки, достигает анода и образует анодный ток, другая их часть попадает на экранирующую сетку и образует сеточный ток малых значений. Ослабление поля между анодом и управляющей сеткой уменьшает проходную емкость C_{ac} между этими электродами во много раз, а ослабление анодного поля вблизи катода приводит к уменьшению влияния анодного напряжения на анодный ток, т. е. увеличивает коэффициент усиления. Поэтому коэффициент усиления и внутреннее сопротивление тетрада значительно больше, чем у триода, тогда как крутизна остается прежней.

Тем не менее, появление экранирующей сетки приводит к возникновению нового недостатка, а именно к появлению *динаatronного* эффекта — возникновению потока электронов вторичной эмиссии от анода к экранирующей сетке. Электроны, летящие с большой скоростью к аноду, ударяют в него и выбивают из его поверхности вторичные электроны. При определенном соотношении между напряжениями на аноде и экранирующей сетке вторичные электроны притягиваются этой сеткой. Это вызывает уменьшение анодного тока при одновременном увеличении тока экранирующей сетки. В результате

усиливаемый сигнал искажается, что ограничивает применение тетродов.

Для устранения динаatronного эффекта необходимо создать тормозящее поле в пространстве между анодом и экранирующей сеткой. Действие этого поля обеспечит возврат вторичных электронов на анод. Установка третьей защитной сетки C_3 (рис. 16.11) позволяет исключить действие динаatronного эффекта. В этом случае защитная сетка соединяется с катодом и обладает отрицательным потенциалом по отношению к аноду. Такой электронный прибор называют *пентодом*.

У пентода с введением защитной сетки значительно увеличиваются внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ . Для современных ламп внутреннее сопротивление достигает 1...2 мОм, а коэффициент усиления более 1000.

Многоэлектродные лампы состоят из четырех и более сеток, две из которых управляющие. Такое управление используется в преобразователях частоты, что позволяет осуществлять одновременное двойное управление анодным током.

У гептода (рис. 16.12) сетки C_1 и C_3 являются управляющими. Роль экранирующих сеток исполняют C_2 и C_4 , а сетка C_5 является защитной. Экранирующая сетка C_3 соединяется с катодом.

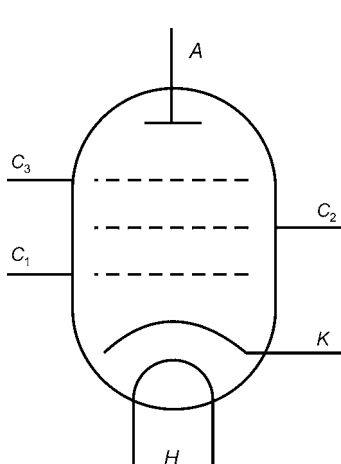


Рис. 16.11

Условное обозначение пентода

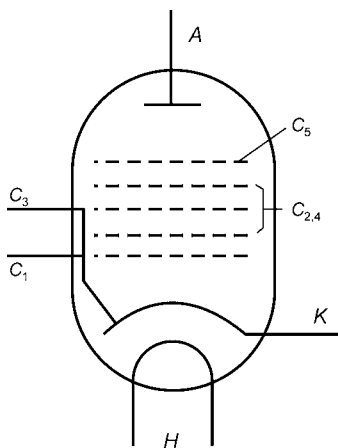


Рис. 16.12

Условное обозначение многоэлектродной лампы — гептода

Для уменьшения габаритов электронных устройств применяют комбинированные лампы, где в одном баллоне размещают несколько ламп. При этом каждая лампа выполняет свои функции самостоятельно.

16.7. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

Принцип действия газоразрядных (ионных) приборов основан на физическом явлении газового разряда смешанной проводимости (электронов, ионов, атомов).

Различают самостоятельный и несамостоятельный газовые разряды [2]. Если заряженные частицы в разрядном промежутке образуются за счет внешних факторов, то газовый разряд называют *несамостоятельным*. Если газовый разряд поддерживается только за счет энергии электрического поля, создаваемого при подаче напряжения на электроды, то разряд называют *самостоятельным*. Возникновение и особенности основных видов газового разряда изучают с помощью вольт-амперных характеристик (рис. 16.13).

Обобщенная вольт-амперная характеристика газового разряда имеет явно выраженную нелинейную зависимость. В связи с этим в зависимости от вида воздействия

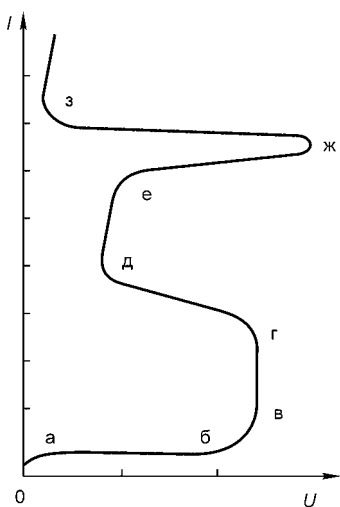


Рис. 16.13
Обобщенная вольт-амперная
характеристика

на газоразрядный промежуток и изменения вольт-амперной характеристики различают типы газового разряда. Так, начальный рост тока и последующее насыщение током, когда ток практически не меняется (участок *аб* на рис. 16.13) при значительном увеличении напряжения (до значения порядка сотен вольт) соответствует так называемому *темному разряду*.

Переход к тлеющему разряду характеризуется участком вольтамперной характеристики, где при практически постоянном напряжении при тлеющем разряде ток рез-

ко увеличивается (участок *вг*). В этом случае при насыщении разрядного промежутка положительными ионами в области катода создается большой перепад напряжения, создающий условия для локального усиления ионизационных процессов. Этим процессам соответствует *тлеющий разряд*, характеризующийся падением напряжения на разрядном промежутке и увеличением тока (участок *гд*). При возникновении этого типа разряда начинает формироваться явно выраженное катодное пятно с сужением линий тока на небольшом участке поверхности электрода.

Последующий рост напряжения и тока (участок *де*) свидетельствует о переходе к так называемому *нормальному тлеющему разряду*. Развитие этого типа разряда характеризуется увеличением катодного пятна. Таким образом, по мере развития тлеющий разряд охватывает всю поверхность катода. Участку вольт-амперной характеристики *еж* (рис. 16.13) соответствует *аномальный тлеющий разряд*. При этом увеличение напряжения создает напряженность поля порядка $10^8 \dots 10^{12}$ В/м, позволяющую (участок *жз*) инициировать развитие *дугового разряда* за счет автоэлектронной эмиссии электронов. Условия развития дугового разряда — это резкое снижение напряжения с увеличением тока и формированием катодного и анодного опорных пятен. При этом ток увеличивается от миллиампер до сотен ампер.

Основываясь на типах газового разряда, разработаны газоразрядные приборы. Одним из таких приборов является *газотрон* (или газотронный вентиль), который представляет собой *двухэлектродный газоразрядный прибор*, работающий в режиме несамостоятельного дугового разряда.

Газотрон применяют в выпрямительных схемах. Если электровакуумные диоды рассчитаны на работу при сравнительно небольших токах, измеряемых единицами или десятками миллиампер, а применение полупроводниковых диодов, способных работать при больших токах, ограничено пробивным напряжением в несколько киловольт, то газотрон может работать *при токах в сотни ампер и обратных напряжениях в десятки киловольт*.

Катод газотрона подогревается от постороннего источника и обеспечивает термоэмиссию электронов. Поэтому тип разряда в газотроне называют несамостоятельным.

Материалом для катода служит тугоплавкий металл (обычно вольфрам), который активируют барием или цезием. Анод изготавливают из металла или графита. Термоэлектронная эмиссия катода обеспечивает газотрону одностороннюю проводимость: при прямом включении прибора, когда плюс источника напряжения подводят к аноду, а минус — к катоду, эмитированные электроны устремляются к аноду и в цепи возникает ток. При обратной полярности ток отсутствует. Электроды размещают в баллоне, заполненном инертным газом или парами ртути. Под действием напряжения, приложенного в проводящем направлении, эмитированные электроны разгоняются и приобретают энергию, необходимую для ионизации молекул газа. Образовавшиеся при ионизации электроны вместе с эмитированными катодом электронами движутся к аноду, а положительные ионы — к катоду. Попадая на катод, ионы выбивают вторичные электроны. Следует отметить, что резкое возрастание ионного тока может привести к разрушению оксидного слоя катода из-за бомбардировки катода ионами. Чтобы не допустить роста тока выше определенного значения и предохранить катод от разрушения, последовательно с газотроном включают ограничительное сопротивление (иногда его роль может выполнять внутреннее сопротивление источника питания). Падение на-

пряжения в проводящем газотроне мало (около 10 В) и зависит от тока.

В связи с параметрами газотронов основная область их применения — выпрямление переменных токов в *высоковольтных цепях*. Срок службы газотронных вентилях с ртутным наполнением достигает 5000 ч. Относительно малое падение напряжения в проводящем направлении (сотые доли процента от выпрямляемого напряжения) и очень малые обратные токи делают эти приборы весьма экономичными. В схемах двухполупериодного выпрямления удобно применять вдвоенные газотроны, у которых в одном баллоне размещают два анода и два катода. Существенным недостатком мощных газотронов является

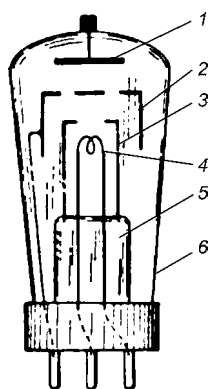


Рис. 16.14
Устройство
тиратрона

1 — анод; 2 — сетка;
3 — тепловой экран;
4 — катод; 5 — осно-
вание; 6 — баллон.

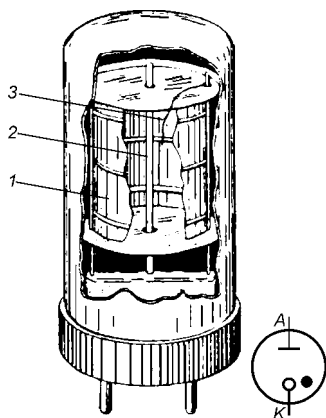


Рис. 16.15
Конструкция стабилизатора
и условное обозначение

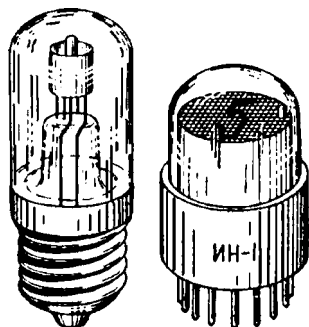


Рис. 16.16
Сигнальная газосветная
лампа и цифровой
газосветный индикатор

ся большая тепловая инерция, выражающаяся в том, что для разогревания катода до рабочей температуры требуется около 30 мин.

Тиратрон является ионным прибором с тремя или четырьмя электродами, моментом зажигания которого можно управлять. Различают тиратроны с горячим нагреваемым катодом (несамостоятельным дуговым разрядом, рис. 16.14) и с холодным катодом (работающие в режиме самостоятельного тлеющего разряда).

Тиратроны используют для преобразования тока, напряжения (выпрямители, инверторы), а также как бесконтактные реле в схемах автоматики, управления, защиты.

Стабилизатор представляет собой двухэлектродную газонаполненную лампу тлеющего разряда с холодным катодом. Катод 1 выполнен в виде полого цилиндра из никеля (рис. 16.15), внутреннюю поверхность катода активируют. Анод 2 изготавливают в форме стержня, а поджигающий электрод 3 — в виде проволоки.

Работает стабилизатор следующим образом. При достижении на защищаемом участке цепи напряжения больше допустимого значения стабилизатор начинает пропускать ток. При этом с увеличением тока через стабилизатор напряжение между электродами почти не меняется.

Стабилизатор обычно применяют для стабилизации напряжения маломощных источников питания радиоаппаратуры.

Газосветные сигнальные лампы и индикаторы работают в режиме тлеющего разряда. В баллоне, заполненном газом (обычно неоном), размещают два электрода цилиндрической формы (см. рис. 16.16). Внешний полый цилиндр служит катодом, а внутренний, расположенный по оси внешнего цилиндра, — анодом.

При наличии на электродах напряжения возникает тлеющий разряд и околокатодное пространство светится красным светом. Для изменения светового оттенка к неону добавляют другие газы: гелий, аргон. Газосветные сигнальные лампы изготавливают также с одинаковыми электродами в виде дисков. Тогда по окончании каждого полупериода напряжения анод и катод как бы меняются местами и при очень высоких частотах электроны, не успевая пройти межэлектродное расстояние, начинают совершать колебательные движения, ионизуя молекулы газа. Одновременно идет процесс рекомбинации молекул, и весь объем газа между электродами светится.

Газосветные лампы, изготовленные в виде тонких длинных стеклянных трубок, можно использовать в качестве вольтметров. Принцип их действия основан на том, что чем больше напряжение между анодом и катодом, тем выше столбик светящегося газа. Нанеся на поверхность трубки градуировочные деления, можно отсчитывать значения напряжения с точностью до 3%. Газосветные лампы широко применяют в качестве цифровых индикаторов (рис. 16.16), работающих в режиме тлеющего разряда, когда светится тонкий слой газа, примыкающий к катоду. Баллон индикаторной лампы наполняют неоном или смесью инертных газов, имеющей пониженное напряжение зажигания. Анод изготавливают из никелевой проволоки в виде сетки, через которую просматриваются расположенные один под другим десять катодов из хромовой или титановой проволоки, выполненные в виде цифр от нуля до девяти. Каждый катод имеет свой вывод. Подавая напряжение на анод и один из катодов, высвечивают нужную цифру. Для индикации многокатодные лампы тлеющего разряда позволяют вести счет и отображение импульсов в десятичной системе исчисления. На схемах газоразрядные приборы различных типов обозначают условными стандартными знаками.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

17.1. ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ СВОЙСТВА

Полупроводники, благодаря своим свойствам, занимают особое — промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Ряд характеристик полупроводников определяют их широкое применение в современных приборах. Технология производства полупроводниковых приборов развивается весьма быстрыми темпами. Создаются полупроводниковые приборы с улучшенными характеристиками, в том числе основанные на новых физических принципах.

Множество элементов и неорганических соединений и веществ можно отнести к полупроводникам — это химические элементы, такие как кремний, германий, индий, фосфор и др., оксиды, сульфиды, селениды и теллуриды, некоторые сплавы и ряд минералов. Весьма перспективными являются полупроводники на основе карбида кремния и арсенида галлия.

Полупроводники бывают кристаллические, аморфные и жидкие.

К полупроводникам относят вещества, которые находятся по удельной электрической проводимости между металлами и диэлектриками. При комнатной температуре удельная электрическая проводимость полупроводников составляет от 10^{-8} до 10^5 См/м (для металлов — $10^6 \dots 10^8$ См/м, для диэлектриков — $10^{-8} \dots 10^{-13}$ См/м). В полупроводниковой технике обычно используют только кристаллические полупроводники (монокристаллы с примесями не более одного атома примеси на 10^{10} атомов основного вещества).

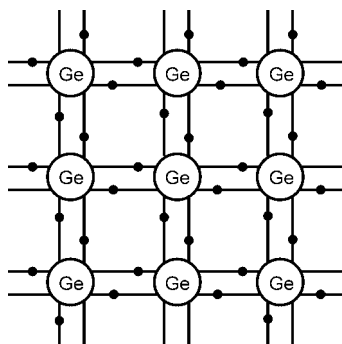


Рис. 17.1
Связи в кристаллической
решетке германия *Ge*

Основное отличие полупроводников от металлов — это возрастание удельной электрической проводимости при повышении температуры. У металлов удельная электрическая проводимость с ростом температуры падает.

Важным преимуществом при конструировании приборов является значительная зависимость электропроводности полупроводников от внешних воздействий: нагревания, облучения, электрического

и магнитного полей, давления, ускорения, а также от содержания незначительного количества примесей.

Свойства полупроводников хорошо поясняются с помощью зонной теории твердого тела. Согласно этой теории атомы веществ состоят из ядра и электронов, движущихся по замкнутой орбите вокруг ядра. Электроны в атоме группируются в оболочки. У основных полупроводниковых материалов, используемых для создания полупроводниковых приборов, — кремния и германия — кристаллическая решетка тетраэдрическая. Каждый валентный электрон, т. е. электрон, находящийся на внешней, незаполненной оболочке атома, в кристалле принадлежит не только своему, но и ядру соседнего атома. Все атомы в кристаллической решетке расположены на одинаковом расстоянии друг от друга и связаны ковалентными связями (ковалентной называют связь между парой валентных электронов двух атомов, на рис. 17.1 для германия она показана двумя линиями). Эти связи являются прочными, и чтобы их разорвать, нужно приложить энергию извне.

Поскольку энергия электрона W дискретна, электрон может двигаться только по той орбите, которая соответствует его энергии. Энергетические уровни, которые могут занимать электроны, иллюстрируются диаграммой на рис. 17.2*a*. Чем более удалена орбита от ядра, тем больше энергия электрона и тем более высок его энергетический уровень (I, II, III на рис. 17.2*a*). Все энергетиче-

ческие уровни разделены так называемыми запрещенными зонами ΔW , соответствующими запрещенной энергии для электронов. В энергетической зоне число разрешенных уровней равно числу атомов в кристалле. Ширина разрешенных зон обычно равна нескольким электрон-вольтам. Разрешенные зоны, в которых электроны отсутствуют, называются свободными (I на рис. 17.2а).

Свободная зона, в которой при температуре, равной нулю, электронов нет, а при более высокой температуре они могут в ней находиться, называют *зоной проводимости*. Разделение твердых тел на металлы, полупроводники и диэлектрики основано на ширине запрещенной зоны между валентной зоной (I, II) и зоной проводимости, а также на степени заполнения разрешенных энергетических зон (рис. 17.2б, где показаны соответственно энергетические уровни в металлах, полупроводниках и диэлектриках).

Ширина запрещенной зоны ΔW определяет *энергию активации собственной электропроводности*. Для металлов она равна нулю, для полупроводников менее 2 эВ, а для диэлектриков более 2 эВ.

Для того чтобы вещество обладало электропроводностью, оно должно содержать свободные носители заряда. В полупроводниках носителями заряда являются электроны и дырки. Носителями заряда в металлах являются электроны.

При температуре, равной нулю, в полупроводнике без примесей свободных носителей заряда нет. Однако

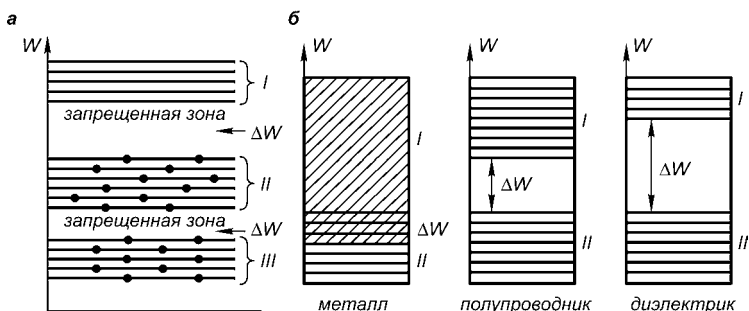


Рис. 17.2
Энергетические уровни

а — зоны энергетических уровней; б — энергетические уровни соответственно металла, полупроводника и диэлектрика.

при внешнем воздействии, например с повышением температуры, часть ковалентных связей может быть разорвана и валентные электроны, став свободными, могут покинуть свой атом. Потеря электрона превращает атом в положительный ион. В связях на том месте, где раньше был электрон, появляется свободное (вакантное) место — дырка.

Заряд дырки положительный и по абсолютному значению равен заряду электрона. Свободное место (дырку) может заполнить валентный электрон соседнего атома, на месте которого в ковалентной связи образуется новое свободное место (дырка), и т. д. Таким образом, одновременно с перемещением валентных электронов будут перемещаться и дырки. При этом освобождение электрона от атома приводит к ионизации, а последующее перемещение дырки означает поочередную ионизацию атомов, жестко закрепленных в кристаллической решетке.

Если электрическое поле отсутствует, электроны проводимости совершают хаотическое тепловое движение. Если полупроводник поместить во внешнее электрическое поле, то электроны и дырки, продолжая участвовать в хаотическом тепловом движении, начнут перемещаться (дрейфовать) под действием поля, что и создает электрический ток. При этом электроны перемещаются против направления электрического поля, а дырки — по направлению поля. Электропроводность полупроводника без примесей, возникающую за счет нарушения ковалентных связей, называют *собственной электропроводностью*.

Следуя зонной теории, все энергетические уровни валентной зоны при температуре, равной нулю, заняты электронами. Если электронам сообщить извне энергию, превышающую энергию активации ΔW , то часть валентных электронов перейдет в зону проводимости. Вследствие ухода электронов из валентной зоны в ней образуются дырки, число которых соответственно равно числу ушедших электронов (рис. 17.3, 1). Следовательно, в валентной зоне перемещение электронов (*электронная проводимость* или *n-проводимость*) вызывает перемещение в противоположном направлении дырок (*дырочная проводимость* или *p-проводимость*). Хотя в валентной зоне перемещаются электроны, обычно удобнее рассматривать



движение дырок. Образовавшиеся электронно-дырочные пары могут исчезнуть, если дырка заполняется электроном. В этом случае электрон станет несвободным и потеряет возможность перемещения, а избыточный положительный заряд иона атома окажется нейтрализованным. При этом одновременно исчезают и дырка, и электрон. Процесс воссоединения электрона и дырки называют рекомбинацией (рис. 17.3, 2).

Рекомбинацию в соответствии с зонной теорией можно рассматривать как переход электронов из зоны проводимости на свободные места в валентную зону. Переход электронов с более высокого энергетического уровня на более низкий уровень сопровождается высвобождением энергии, которая либо излучается в виде квантов света (фотонов), либо передается кристаллической решетке в виде тепловых колебаний (фононов).

Среднее время существования пары носителей заряда называют временем жизни носителей заряда. Среднее расстояние, которое проходит носитель заряда за время жизни, называют *диффузионной длиной носителя заряда* (L_p — для дырок, L_n — для электронов). При постоянной температуре (и при отсутствии других внешних воздействий) кристалл находится в состоянии равновесия: число генерированных пар носителей заряда равно числу рекомбинированных пар. Число носителей заряда в единице объема, т. е. их концентрация, определяет значение *удельной электрической проводимости*. Для полупроводника без примеси концентрация электронов n_i равна концентрации дырок p_i .

Полупроводники, обладающие наряду со своей собственной электропроводностью еще и *примесной электропроводностью*, называют полупроводниками, содержащими примесь. Примесная электропроводность может быть электронной или дырочной. Если в чистый германий (четырёхвалентный элемент) вводится примесь

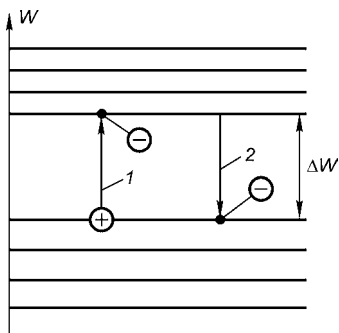


Рис. 17.3
Генерация носителей заряда
1 — образование пары носителей заряда; 2 — рекомбинация.

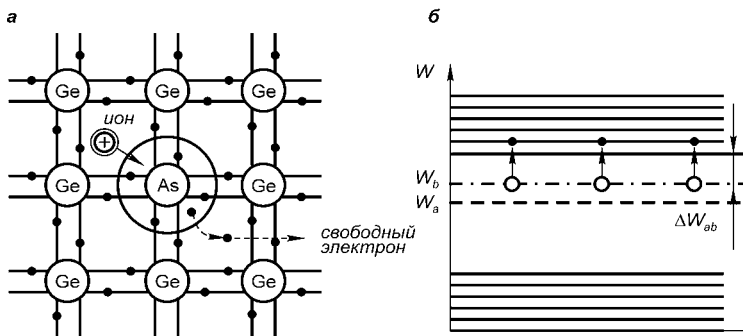


Рис. 17.4
Структура полупроводника с примесью

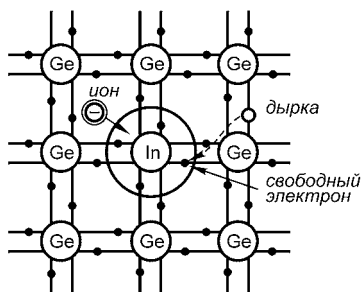
a — кристаллическая решетка с примесью пятивалентного мышьяка; *б* — энергетическая диаграмма.

пятивалентного элемента, например мышьяка (или сурьмы, фосфора) (рис. 17.4*a*), то атом мышьяка связывается в кристаллической решетке германия ковалентными связями с атомами германия. Но в связи могут участвовать только четыре валентных электрона мышьяка, а пятый электрон оказывается свободным. Следовательно, такая примесь увеличивает электронную проводимость (*n*-проводимость). Таким образом, в узле кристаллической решетки появляется положительно заряженный ион примеси, а в кристалле — свободный электрон. Примеси, атомы которых отдают свободные электроны, называют *донорными* (донорами).

В запрещенной зоне вблизи зоны проводимости создается разрешенный донорный энергетический уровень, на котором при температуре, близкой к нулю, располагаются свободные электроны. Для перевода электрона с примесного уровня в зону проводимости требуется меньше энергии (рис. 17.4*б*), чем для перевода электрона из валентной зоны. Энергию, затраченную электроном на преодоление расстояния от донорного уровня до зоны проводимости, называют *энергией ионизации* (активации) доноров ΔW_{ab} .

Внесение в полупроводник донорной примеси существенно увеличивает концентрацию свободных электронов, а концентрация дырок остается такой же, какой она была в собственном полупроводнике. В таком примесном полупроводнике электропроводность обусловлена в

а



б

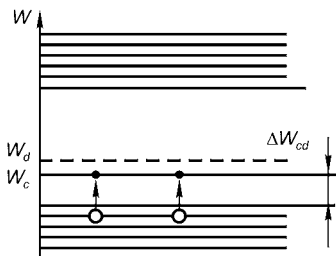


Рис. 17.5
Структура полупроводника с примесью

а — кристаллическая решетка с примесью трехвалентного индия; б — энергетическая диаграмма.

основном электронами, поэтому электроны являются *основными носителями заряда* (их концентрация высокая), а дырки — *неосновными носителями заряда*.

Если в германий ввести примесь трехвалентного элемента (например, индия), то для образования ковалентной связи с германием индию не хватит одного электрона — одна связь останется незаполненной. При незначительном повышении температуры в незаполненную валентную связь может перейти электрон соседнего атома германия, оставив на своем месте дырку (рис. 17.5а), которая может быть также заполнена электроном и т. д. Таким образом, дырка как бы перемещается в полупроводнике. Примесный атом индия превращается в отрицательный ион.

Примеси, атомы которых способны при возбуждении принять валентные электроны соседних атомов, создав в них дырку, называют *акцепторными*. На диаграмме энергетических зон полупроводника с акцепторной примесью (рис. 17.5б) в запрещенной зоне вблизи валентной зоны создается примесный энергетический уровень (акцепторный). При температурах, близких к нулю, этот уровень свободен, а при повышении температуры он может быть занят электроном валентной зоны, в которой после ухода электрона образуется дырка. Расстояние от потолка валентной зоны до акцепторного уровня называют энергией ионизации акцепторов ΔW_{cd} . Внесение в полупроводник акцепторной примеси существенно увеличивает концентрацию

дырок, а концентрация электронов остается такой же, какой она была в собственном полупроводнике. В этом примесном полупроводнике электропроводность обусловлена в основном дырками, ее называют *дырочной*, а полупроводники — полупроводниками *p*-типа. Дырки для полупроводника *p*-типа — основные носители заряда, а электроны — неосновные.

Таким образом, носители заряда, определяющие вид проводимости в примесном полупроводнике, называют основными (дырки в *p*-полупроводнике и электроны в *n*-полупроводнике), а носители заряда противоположного знака — неосновными.

17.2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

17.2.1. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

Созданную внутри монокристалла полупроводника на границе раздела двух сред с разным типом примесной электропроводности (*p*- и *n*-типа) «область» называют *электронно-дырочным переходом* или *p–n-переходом*, а прибор с одним *p–n-переходом* — *полупроводниковым диодом* или *вентилем*. Такие переходы изготавливают специальными технологическими приемами путем вне-сения примеси определенного типа (например, *n*-типа) в полупроводник с незначительным количеством примеси противоположного типа (*p*-типа). Свойства *p–n-перехода* положены в основу принципа действия подавляющего числа полупроводниковых приборов.

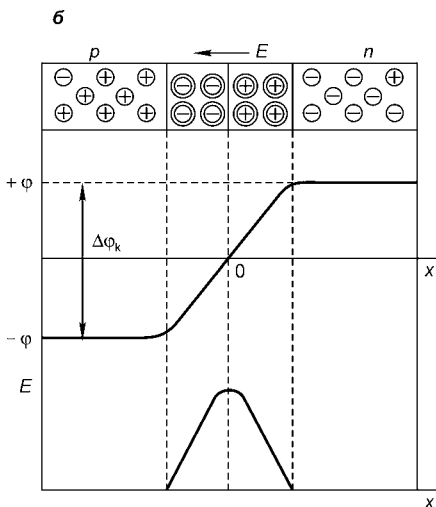
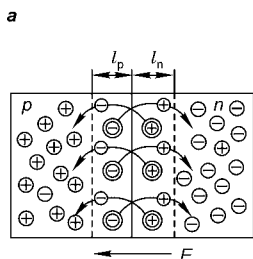
Если принять, что *p–n-переход* образован в результате соприкосновения (контакта) двух полупроводников *p*- и *n*-типов и концентрации электронов в области *n*-типа и дырок в области *p*-типа равны, то при комнатной температуре практически все атомы примесей полупроводника ионизированы. В этом случае в полупроводнике *p*-типа концентрация отрицательных ионов акцепторов N_a равна концентрации свободных дырок p_p , а в области *n*-типа концентрация положительных ионов доноров N_d равна концентрации свободных электронов n_n . Кроме того, в каждой области имеется небольшое количество неосновных носителей.

При создании p - n -перехода равенство между количеством ионов и свободных носителей заряда нарушается. Так как между областями p - и n -типов существует значительная разница в концентрации дырок и электронов, происходит диффузия дырок в область n -типа и электронов — в область p -типа. Как только дырка покинет область p -типа, в этой области вблизи границы раздела образуется нескомпенсированный отрицательный заряд иона акцепторной примеси, а с уходом электрона из области n -типа в ней образуется нескомпенсированный положительный заряд иона донорной примеси (рис. 17.6а, маленькие кружочки — свободные заряды; большие кружочки — ионы).

Некомпенсированные заряды образуются также и вследствие того, что часть электронов и дырок, попавших в смежную область, рекомбинирует, нарушая тем самым равновесие концентрации между свободными носителями заряда и неподвижными ионами примеси. В результате вблизи границы раздела областей создается *двойной объемный слой пространственных зарядов*, который и называют p - n -переходом. Этот слой обеднен основными (подвижными) носителями заряда в обеих частях, поэтому его удельное сопротивление велико по сравнению с областями p - и n -типов. Часто этот слой называют *запирающим*. Однако надо отметить, что концентрация

Рис. 17.6
Электронно-дырочный переход

а — p - n -переход, б — изменение потенциала в направлении, перпендикулярном плоскости p - n -перехода.



подвижных носителей в p - n -переходе изменяется плавно. Существенно обеднен подвижными носителями заряд только средний слой перехода, где их концентрация на несколько порядков меньше, чем в областях p - и n -типов. Поэтому обедненный, или запирающий, слой несколько уже p - n -перехода.

Объемные заряды по обе стороны границы раздела полупроводников имеют разные знаки и создают электрическое поле p - n -перехода. Это поле напряженностью E направлено от положительно заряженного слоя к отрицательно заряженному слою, т. е. от области n -типа к области p -типа, имеющим одинаковые размеры l_p и l_n (см. рис. 17.6а). В этом случае электрическое поле является тормозящим для основных носителей и препятствует дальнейшему диффузионному перемещению основных носителей через p - n -переход, стремясь возратить дырки в область p , а электроны в область n .

На рис. 17.6б показано изменение напряженности поля E и его потенциала вдоль оси x , перпендикулярной плоскости p - n -перехода. При этом нулевой потенциал будет на границе раздела областей. Возникающий в p - n -переходе потенциальный барьер равен контактной разности потенциалов $\Delta\varphi_k$, которую называют *высотой потенциального барьера*:

$$\Delta\varphi_k = \frac{\Delta W}{q}, \quad (17.1)$$

где ΔW — минимальная энергия, дополнительно сообщаемая электрону или дырке для перехода в смежную область; q — заряд электрона.

На высоту потенциального барьера влияет концентрация примесей (с увеличением концентрации увеличивается и потенциальный барьер). В предельном случае энергия ΔW достигает ширины запрещенной зоны. У германия потенциальный барьер равен 0,3...0,4 В, у кремния — 0,7...0,8 В.

При перемещении основных носителей заряда через p - n -переход в смежные области против поля p - n -перехода возникает диффузионный ток:

$$I_{\text{диф}} = I_{p_p} + I_{n_n}, \quad (17.2)$$

где I_{p_p} и I_{n_n} — токи, образованные соответственно дырками области p и электронами области n . С перемещением

основных носителей заряда начинается перемещение неосновных носителей — дырок p_n области n и электронов n_p области p . При этом перемещение происходит в направлении поля p – n -перехода, которое для них является ускоряющим. Поток неосновных носителей является *дрейфовым током* или *током проводимости*:

$$I = I_{p_n} + I_{n_p}, \quad (17.3)$$

где I_{p_n} и I_{n_p} — токи, образованные соответственно дырками n -области и электронами p -области.

При отсутствии внешнего поля устанавливается динамическое равновесие между потоками основных и неосновных носителей заряда и диффузионный и дрейфовый токи оказываются равными по абсолютному значению.

17.2.2. ПРЯМОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ P – N -ПЕРЕХОДА

Прямым подключением источника напряжения к диоду называют подключение, при котором плюс подключается к области p -типа, а минус к области n -типа (см. рис. 17.7а). Противоположное включение называют обратным включением. При этом электрическое поле источника напряжения напряженностью $E_{\text{и}}$ направлено навстречу контактному полю напряженностью E . Следовательно, напряженность результирующего электрического поля будет равна $E_p = E - E_{\text{и}}$.

Уменьшение напряженности электрического поля в p – n -переходе при прямом включении вызовет снижение высоты потенциального барьера на значение прямого напряжения U источника питания (рис. 17.7а). Это приводит к увеличению числа основных носителей заряда через потенциальный барьер и соответственно к росту диффузионного тока и уменьшению встречного дрейфового тока I_0 .

Изменение диффузионного тока с изменением напряжения происходит по экспоненциальному закону

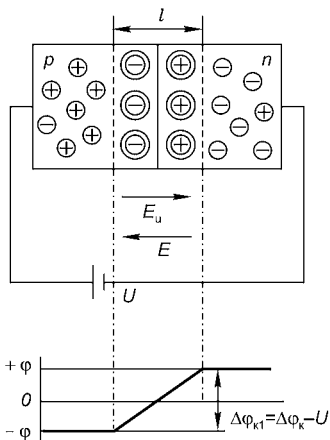
$$I_{\text{диф}} = I_0 e^{qU/(kT)}, \quad (17.4)$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура.

Тогда результирующий ток, называемый *прямым током* диода, будет равен

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{диф}} - I_0 = I_0 (e^{qU/(kT)} - 1). \quad (17.5)$$

а



б

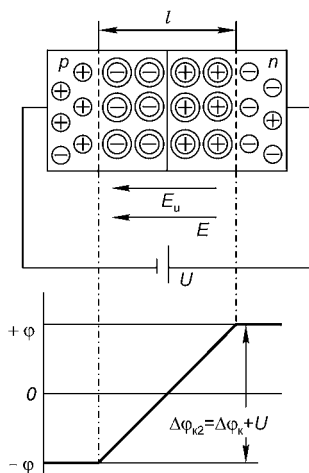


Рис. 17.7

Подключение источника питания к p - n -переходуа — прямое включение p - n -перехода; б — обратное включение p - n -перехода.

Как видно из (17.5), прямой ток зависит от приложенного напряжения, и даже небольшое напряжение, приложенное к p - n -переходу, вызывает большой ток. В результате действия внешнего поля в прямом направлении в области p - n -перехода происходит перераспределение концентрации носителей заряда. При этом дырки p -области и электроны n -области диффундируют вглубь p - n -перехода и рекомбинируют. В результате ширина p - n -перехода уменьшается, что снижает сопротивление запирающего слоя.

17.2.3.

ОБРАТНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ P - N -ПЕРЕХОДА

При обратном включении p - n -перехода (рис. 17.7б) электрическое поле источника напряжения напряженностью $E_{\text{и}}$ направлено в ту же сторону, что и контактное поле p - n -перехода напряженностью E . Тогда напряженность результирующего поля в переходе будет равна $E_p = E_{\text{и}} + E$. Это увеличение напряженности электрического поля в p - n -переходе повышает потенциальный барьер (рис. 17.7б) на значение обратного напряжения источника. Следствием повышения потенциального барье-



ра является уменьшение числа основных носителей заряда, способных преодолеть потенциальный барьер. Уменьшение диффузионного тока происходит по экспоненциальному закону, поэтому обратный результирующий ток через p - n -переход будет равен

$$I_{\text{обр}} = I_0(e^{-qU/(kT)} - 1). \quad (17.6)$$

Ток при обратном включении p - n -перехода называют обратным током. Для неосновных носителей заряда поле p - n -перехода является ускоряющим, поэтому дырки области n из прилегающих к p - n -переходу слоев дрейфуют в область p -типа, а электроны области p — в область n -типа. При этом через p - n -переход протекает только дрейфовый ток. Он незначителен, поскольку мала концентрация неосновных носителей заряда в обеих областях и велико сопротивление p - n -перехода. Ввиду тепловой генерации неосновных носителей заряда обратный ток еще называют *тепловым*. Его значение при данной температуре определяется скоростью тепловой генерации носителей заряда. Так как при обратном включении p - n -перехода увеличивается потенциальный барьер, увеличивается и ширина p - n -перехода. Это вызывает повышение сопротивления запирающего слоя.

Прямое и обратное включение p - n -перехода иногда называют *прямым* и *обратным смещением* диода.

17.2.4. ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА P - N -ПЕРЕХОДА

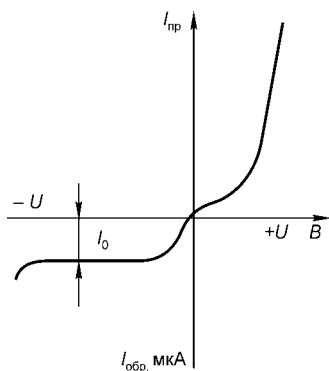
Зависимость тока p - n -перехода от приложенного к нему напряжения $I = f(U)$ называют вольт-амперной характеристикой. Она описывается уравнением

$$I = I_0(e^{\pm qU/(kT)} - 1). \quad (17.7)$$

Если p - n -переход смещен в прямом направлении, то напряжение U берут со знаком плюс, если в обратном — со знаком минус.

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода представлена на рис. 17.8а. Обратный ток обычно на несколько порядков меньше прямого тока. Поэтому p - n -переход обладает свойством односторонней проводимости. При повышении температуры прямой ток увеличивается.

а



б

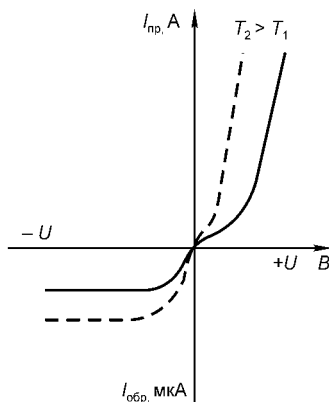


Рис. 17.8

Вольт-амперные характеристики диода

а — вольт-амперная характеристика p - n -перехода; б — вольт-амперные характеристики при разных температурах.

Но так как он зависит от концентрации основных носителей заряда, которая растет незначительно, то и это увеличение незначительно (рис. 17.8б). На обратный ток повышение температуры влияет существенно, поскольку он зависит от концентрации неосновных носителей заряда, которая при повышении температуры экспоненциально возрастает. При прямом смещении потенциальный барьер снижается и через него перемещаются основные носители заряда в смежную область, где они являются неосновными. Это явление называют *инжекцией*. Область, из которой инжектируются носители заряда, называют *эмиттером*, а область, в которую они инжектируются и где они являются неосновными, — *базой*.

В полупроводниковых приборах концентрации примесей в разных областях кристалла разные, а следовательно, отличаются и концентрации основных носителей заряда. Поэтому различают низкоомную и высокоомную области. Под действием поля p - n -перехода неосновные для данной области носители заряда перемещаются через p - n -переход в соседнюю область. Процесс выведения неосновных носителей заряда через переход под воздействием поля этого перехода при подключении p - n -перехода к источнику внешнего напряжения называют *экстракцией* (извлечением).

17.2.5. БАРЬЕРНАЯ ЕМКОСТЬ p - n -ПЕРЕХОДА

По обе стороны от p - n -перехода находятся ионизированные атомы донорной и акцепторной примесей, образующие отрицательные и положительные пространственные заряды. При изменении напряжения, приложенного к переходу, изменяется его ширина, а следовательно, и пространственный заряд. Поэтому плоскостной p - n -переход можно рассматривать как две пластины конденсатора с равными по значению, но противоположными по знаку зарядами ($Q_p = -Q_n$), т. е. p - n -переход обладает емкостью. Емкость, обусловленную перераспределением зарядов в переходе, называют *барьерной*. Заряд зависит от напряжения, но не пропорционален ему, и емкость определяется как отношение приращения пространственных зарядов в p - n -переходе к вызвавшему это приращение изменению напряжения:

$$C_0 = \frac{dQ}{dU}. \quad (17.8)$$

В зависимости от концентрации N донорной или акцепторной примесей можно найти заряд емкости:

$$Q = q \cdot N \cdot S \cdot l, \quad (17.9)$$

где S и l — соответственно площадь и ширина p - n -перехода.

Для несимметричного p - n -перехода при его прямом и обратном включении

$$l = l_0 \frac{\Delta\phi_k - U}{\Delta\phi_k}, \quad (17.10)$$

где $l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN}} \Delta\phi_k$ — ширина p - n -перехода в равновесном состоянии; ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 — электрическая постоянная.

Если подставить в (17.9) выражение (17.10) и продифференцировать его по напряжению, получим

$$C_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{l} \sqrt{\frac{\Delta\phi_k}{\Delta\phi_k + |U|}}. \quad (17.11)$$

Полученное выражение определяет значение емкости p - n -перехода от приложенного напряжения.

В тонких слоях около границы p - n -перехода возникает избыточная концентрация неосновных носителей.

Для нейтрализации этого избыточного заряда из прилегающих слоев отсасываются основные носители, число которых пополняется за счет источника. Таким образом, в каждой области у границы p – n -перехода возникают равные по значению, но противоположные по знаку заряды $Q_{\text{диф}}$. При изменении напряжения изменяется число инжектированных носителей, а следовательно, и заряд. Изменение заряда на границе перехода подобно изменению зарядов на обкладках конденсатора при изменении приложенного к нему напряжения. Емкость, связанную с изменением инжектированных носителей при изменении напряжения, называют *диффузионной* и определяют как отношение приращения инжектированного заряда в базе к вызвавшему его приращению напряжения:

$$C_{\text{диф}} = \frac{dQ_{\text{инж}}}{dU}. \quad (17.12)$$

Диффузионная емкость увеличивается с увеличением прямого тока. Кроме того, она тем больше, чем больше время жизни неосновных инжектированных носителей заряда, так как при этом меньше рекомбинация и больше носителей накапливается у границы p – n -перехода. При подключении к p – n -переходу обратного напряжения перераспределение зарядов вследствие экстракции незначительно, поэтому диффузионная емкость мала. При прямом напряжении диффузионная емкость значительно больше барьерной, а при обратном напряжении — наоборот. Поэтому при прямом напряжении учитывают $C_{\text{диф}}$, а при обратном — $C_{\text{б}}$.

17.2.6. ПРОБОЙ P – N -ПЕРЕХОДА

Резкое возрастание обратного тока, наступающее даже при незначительном увеличении обратного напряжения сверх определенного значения, называют пробоем перехода. Природа пробоя может быть различной: он может быть *электрическим*, при котором p – n -переход не разрушается и сохраняет работоспособность, и *тепловым*, при котором разрушается кристаллическая структура полупроводника.

Электрический пробой связан со значительным увеличением напряженности электрического поля в p – n -переходе (более 10^7 В/см). Наблюдаются два типа электрического пробоя. В полупроводниках с узким p – n -перехо-



дом (что обеспечивается высокой концентрацией примесей) возникает *туннельный пробой*, связанный с туннельным эффектом, когда под воздействием очень сильного поля носители заряда могут переходить из одной области в другую без затраты энергии через p - n -переход. Туннельный пробой наблюдается при обратном напряжении порядка нескольких вольт (до 10 В). В полупроводниках с широким p - n -переходом может произойти *лавинный пробой*. Его механизм состоит в том, что в сильном электрическом поле может возникнуть ударная ионизация атомов p - n -перехода; носители заряда на длине свободного пробега приобретают кинетическую энергию, достаточную для того, чтобы при столкновении с атомом кристаллической решетки полупроводника выбить электроны из ковалентных связей. Образовавшаяся при этом пара свободных носителей заряда (электрон-дырка) тоже примет участие в ударной ионизации. Процесс нарастает лавинообразно и приводит к значительному возрастанию обратного тока. Пробивное напряжение лавинного пробоя составляет десятки и сотни вольт.

Тепловой пробой возникает тогда, когда энергия, выделяемая в p - n -переходе при прохождении через него обратного тока, превышает энергию, которую способен рассеять p - n -переход. Происходит значительный перегрев перехода, и обратный ток, который является тепловым, резко возрастает, а перегрев увеличивается. Это приводит к лавинообразному увеличению тока, в результате чего и возникает тепловой пробой p - n -перехода.

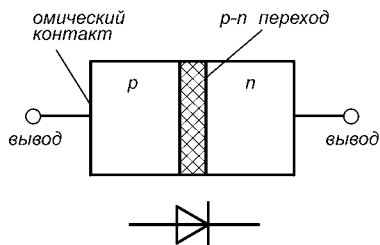
С практической точки зрения электрический пробой при приложении обратного напряжения не опасен для полупроводникового прибора. При отключении источника питания вентиляльные свойства электронно-дырочного перехода быстро восстанавливаются. Наоборот, тепловой пробой приводит к разрушению кристалла полупроводника и, как следствие, к аварийному режиму.

17.2.7.

РАЗНОВИДНОСТИ ДИОДОВ

Полупроводниковый диод — это полупроводниковый прибор с одним электрическим p - n -переходом. С помощью двух контактных соединений обеспечивается контакт металла с полупроводником, к которым присоединяются

а



б

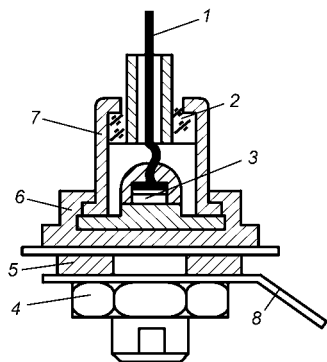


Рис. 17.9

Полупроводниковый диод

а — структура и обозначение; б — конструкция диода: 1 — вывод; 2 — стеклянная втулка; 3 — полупроводник; 4 — крепежная гайка; 5 — шайба; 6 — охлаждающее основание; 7 — корпус; 8 — вывод для пайки.

два вывода. Электрический переход чаще всего образуется между двумя полупроводниками с разным типом примесной электропроводности (p - или n -типа), одна из областей (низкоомная) является эмиттером, другая (высокоомная) — базой. Структура диода, его конструкция и условное обозначение в схемах показаны на рис. 17.9.

Классифицируют диоды по различным признакам:

1) по основному *полупроводниковому материалу* — кремниевые, германиевые, из арсенида галлия; в силовой электронике преимущественно используют кремниевые из-за более высокой допустимой температуры кристалла;

2) по *физической природе процессов* работы полупроводников — туннельные, лавинные, фотодиоды, светодиоды и др.;

3) по *технологии изготовления p - n -перехода* — сплавные, диффузионные и др.

Основной, с практической точки зрения, является классификация *по назначению диода*. В соответствии с ней различают выпрямительные, лавинные, импульсные диоды, стабилитроны, варикапы и др.

Применение диодов весьма разнообразное. Низкочастотные диоды малой и средней мощности используют в схемах питания радиоаппаратуры, а высокочастотные — в устройствах автоматики и вычислительной техники.

Диоды с высоким рабочим напряжением и током — силовые диоды — используют в мощных источниках питания в качестве выпрямителей и частотных преобразователей: в электротехнологических установках (сварочных, плазменных и др.), в системах автоматического управления производством (для тяговых электродвигателей, приводов станков и др.). Высокочастотные диоды применяют также в системах радиосвязи, радиолокации, телеизмерительной техники, а сверхвысокочастотные (СВЧ-диоды) — для модуляции и детектирования колебаний в диапазоне сотен мегагерц.

Коэффициентом выпрямления называют отношение прямого и обратного токов при одинаковом напряжении. Чем меньше емкость p - n -перехода, тем больше коэффициент выпрямления диода. Поскольку емкость p - n -перехода зависит от приложенного в обратном направлении напряжения, это дает возможность использовать в схемотехнике такие диоды — *вариакпы* в качестве переменной емкости.

Выпрямительные диоды. Такие диоды применяют в качестве вентилях, которые пропускают переменный ток только в одном направлении. Вентильные свойства диода зависят от того, насколько мал обратный ток. Для уменьшения обратного тока необходимо снижать концентрацию неосновных носителей, что может быть обеспечено за счет высокой степени очистки исходного полупроводника. Вольт-амперные характеристики p - n -перехода несколько отличаются от характеристик реальных диодов. Их вид зависит от рода основного полупроводникового материала, площади p - n -перехода и температуры. Прямые ветви вольт-амперных характеристик диодов, выполненных на основе германия и кремния, показаны на рис. 17.10а. Особенно сильно влияние температуры сказывается на обратной ветви характеристики (рис. 17.10б), так как с ростом температуры возрастает тепловой ток.

В германиевых диодах увеличение температуры на десять градусов вызывает увеличение обратного тока в два раза, в кремниевых диодах — в два с половиной раза. С ростом обратного тока увеличивается нагрев p - n -перехода, что может привести к тепловому пробую. Верхний предел рабочих температур для германиевых диодов составляет 85...100°C, для кремниевых — 200°C.

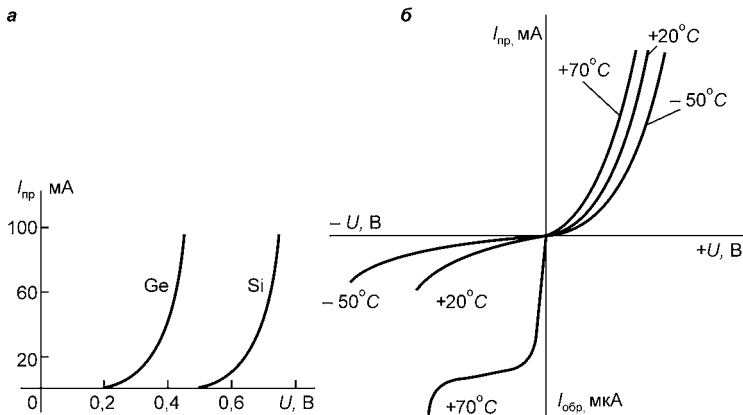


Рис. 17.10
Вольтамперные характеристики диодов

a — прямые ветви вольтамперной характеристики; *б* — характеристики в зависимости от температуры.

Использование выпрямительного диода иллюстрируется простейшей схемой однополупериодного выпрямителя — рис. 17.11. К диоду в общем случае может быть приложено как постоянное, так и переменное напряжение, поэтому для описания работы диода в первом случае используют статические характеристики и параметры, во втором случае — динамические.

Параметры диодов. *Статические параметры* — это прямой выпрямленный ток, наибольшее допустимое напряжение, обратное сопротивление, максимально допустимая мощность и др. *Динамические параметры* — дифференциальное сопротивление $R_d = dU/dI$, общая емкость диода C , емкость между выводами диода при заданных напряжении и частоте, которая включает в себя емкости C_b , $C_{диф}$ и емкость корпуса диода; граничная частота f , при которой выпрямленный ток уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Силовые диоды, как уже отмечалось, выбирают по предельным параметрам, которые включены в маркировку приборов.

Предельный ток, устанавливаемый предприятием-изготовителем, определяемый при максимально допустимой температуре полупроводниковой структуры T_{pn} , температуре корпуса T_k и параметрами прямой ветви вольтамперной характеристики (рис. 17.12):

$$I_{\Pi} = \frac{\sqrt{U_0^2 + 9,8R_{\text{д}} \frac{T_{\text{pn}} - T_{\text{k}}}{R_{\text{в}}}} - U_0}{4,9R_{\text{д}}}, \quad (17.13)$$

где U_0 , $R_{\text{д}}$ — пороговое напряжение и динамическое сопротивление предельной вольт-амперной характеристики силового диода (рис. 17.12), $R_{\text{в}}$ — максимальное значение внутреннего теплового сопротивления, °С/Вт.

Для установившихся режимов работы прибора тепловое сопротивление $R_{\text{T}} = R_{\text{в}} + R_{\text{в.о}} + R_{\text{о}}$ (см. рис. 17.13), где $R_{\text{в.о}}$ — тепловое сопротивление контакта «прибор–охладитель», $R_{\text{о}}$ — тепловое сопротивление охладителя при данных условиях охлаждения.

Для фактических параметров полупроводниковых приборов часто применяют следующую формулу для расчета предельного тока:

$$I_{\Pi} = \frac{\sqrt{U_0^2 + 4k_{\text{ф}}^2 \cdot R_{\text{д}} \frac{T_{\text{pn}} - T_{\text{о}}}{R_{\text{T}}}} - U_0}{2k_{\text{ф}}^2 R_{\text{д}}}, \quad (17.14)$$

где $k_{\text{ф}}$ — коэффициент формы тока, равный отношению действующего значения тока к среднему, $T_{\text{о}}$ — температура окружающей среды.

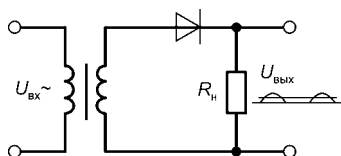
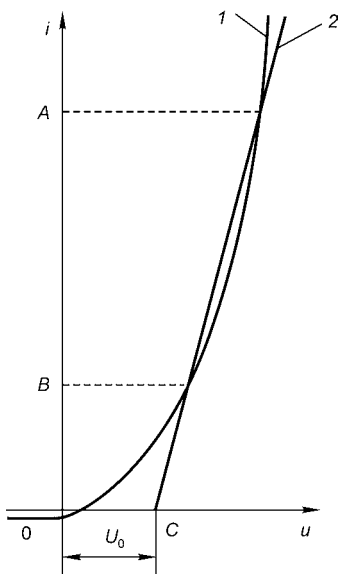


Рис. 17.11
Однополупериодная
схема выпрямления

Рис. 17.12
Прямая вольт-амперная
характеристика в открытом
состоянии и ее параметры

1 — качественный вид вольт-амперной характеристики; 2 — спрямленная вольт-амперная характеристика, проведенная через точки A и B на осях; OA — 4,71 предельного тока; OB — 1,57 предельного тока; OC — пороговое напряжение U_0 .



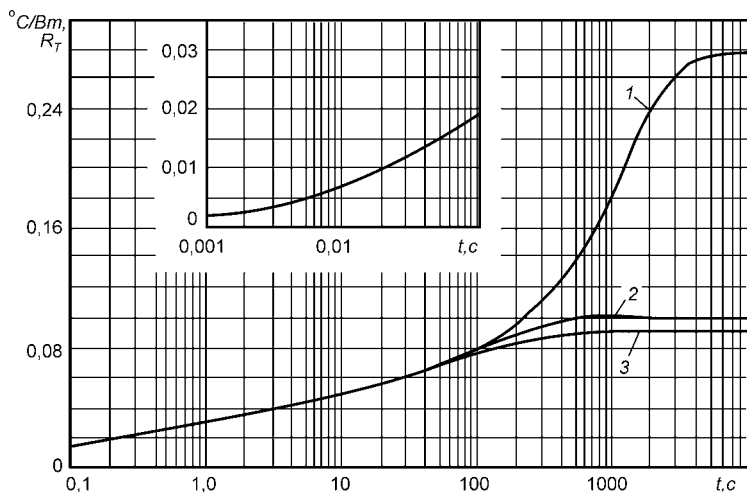


Рис. 17.13
 Тепловое сопротивление тиристора
 при различных скоростях обдува воздухом
 1 — $v = 0$; 2 — $v = 6$ м/с; 3 — $v = 12$ м/с.

Тепловое сопротивление R_T меняется в зависимости от типа охладителя и интенсивности охлаждения (рис. 17.13).

Повторяющееся напряжение. Связь параметров силовых полупроводниковых приборов по напряжению определяется по вольт-амперной характеристике (рис. 17.14). На характеристике диода показана область загиба вольт-амперной характеристики $U_{\text{заг}}$, для лавинных диодов это напряжение $U_{\text{л}}$. При этом рабочее напряжение должно быть ниже напряжения загиба $U_{\text{заг}}$, оно называется *повторяющимся напряжением* $U_{\text{п}}$. Для диодов $U_{\text{п}} = 0,75U_{\text{заг}}$.

Повторяющееся напряжение — это максимально допустимое мгновенное значение напряжения, прикладываемое к прибору в обратном или прямом закрытом направлениях. По этому напряжению устанавливают класс прибора по напряжению. Например, диод В200-10, у которого буква В — вентиль, далее 200 — предельный ток в амперах, вторая цифра — повторяющееся напряжение 1000 В, деленное на 100 — класс прибора по напряжению 10.

Кроме того у силовых диодов имеются и другие параметры: ударный ток, неповторяющееся напряжение $U_{\text{неп}} = 0,87U_{\text{заг}}$, прямое падение напряжения ΔU , обратный ток $I_{\text{обр}}$ и др.

Импульсные диоды. Диоды, предназначенные для работы в импульсных режимах, называют импульсными. Такие диоды используют, например, в вычислительных устройствах (в ключевых, логических схемах и др.). В импульсных режимах через промежутки времени, равные единицам или долям микросекунды, диоды переключаются с прямого напряжения на обратное напряжение. При этом каждое новое состояние диода не может устанавливаться мгновенно, поэтому существенное значение здесь приобретают так называемые переходные процессы.

При прямом напряжении прямоугольного импульса (рис. 17.15а) потенциальный барьер снижается и происходит инжекция электронов из эмиттера в базу (дырки базы также диффундируют в эмиттер, но их концентрация мала, поэтому их потоком можно пренебречь). Пришедшие в базу электроны не могут сразу рекомбинировать с дырками базы, поэтому происходит накопление электронов в базе. Чем больше прямой ток, тем больше электронов накапливается в базе. Число электронов зависит также от времени жизни носителей заряда: чем оно больше, тем меньше электронов рекомбинирует. При прямом напряжении сопротивление p - n -перехода хотя и нелинейно, но очень мало, поэтому

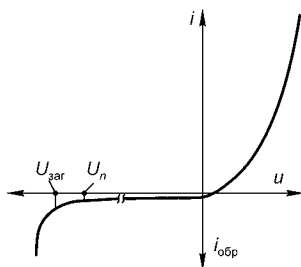


Рис. 17.14
Вольтамперная характеристика диода

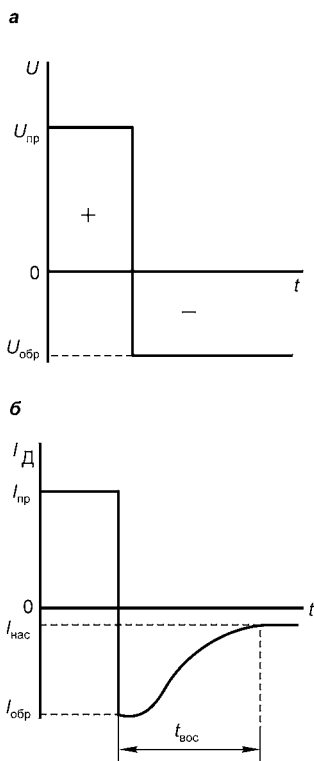


Рис. 17.15
Стилизованная диаграмма работы импульсного диода
а — импульс напряжения, подаваемый на диод; б — переходный процесс восстановления диода.

оно почти не влияет на ток, и импульс тока искажается очень незначительно (рис. 17.15б).

Как только напряжение изменится на обратное, обратный ток в первый момент будет значительным, а обратное сопротивление резко уменьшится. Это объясняется тем, что накопленные в базе носители заряда (электроны) начнут перемещаться в сторону p - n -перехода и, таким образом, образуют импульс обратного тока. Этот импульс будет тем больше, чем больше носителей зарядов накопилось в базе. Заряды, накопленные в базе, втягиваясь полем p - n -перехода, переходят в эмиттер, часть их рекомбинирует в базе с дырками (т. е. число их уменьшается и в течение определенного времени обратный ток достигает установившегося значения), и обратное сопротивление восстанавливается до нормального значения. Процесс уменьшения заряда в базе называют *рассасыванием*.

К току рассасывания добавляется зарядный ток барьерной емкости C_b p - n -перехода, возникающий под действием обратного напряжения, увеличивая тем самым импульс обратного тока. Время, в течение которого обратный ток изменяется от максимального значения до установившегося, называют *временем восстановления* обратного сопротивления (или тока) диода и обозначают $t_{\text{вос}}$. Это важный параметр импульсных диодов — чем он меньше, тем диод лучше. Обычно время восстановления составляет менее десятых долей микросекунды.

Для улучшения свойств импульсных диодов при их проектировании исходный материал выбирают с малым временем жизни носителей заряда (с более интенсивной рекомбинацией) и p - n -переход делают с малой площадью, чтобы снизить барьерную емкость C_b .

Точечные импульсные диоды слаботочные, их широко применяют в ЭВМ в качестве быстродействующих переключающих элементов. Плоскостные диоды работают при средних и больших импульсных токах.

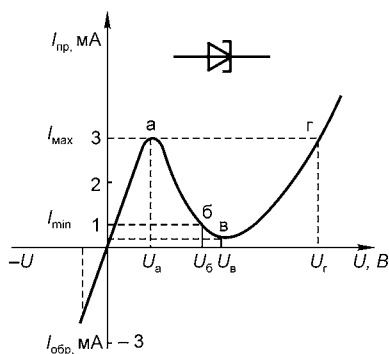
Основными параметрами импульсных диодов являются время восстановления $t_{\text{вос}}$ и барьерная емкость C_b , а также обратный ток $I_{\text{обр}}$ при определенном обратном напряжении $U_{\text{обр}}$, постоянное прямое напряжение при постоянном прямом токе, максимально допустимый импульсный прямой ток, максимально допустимое обратное напряжение и др.

Туннельные и обращенные диоды. *Туннельным диодом* называют полупроводниковый прибор, сконструированный на основе вырожденного полупроводника (т. е. полупроводника с большим содержанием примеси), в котором при обратном и небольшом прямом напряжении возникает туннельный эффект и вольт-амперная характеристика имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Устройство туннельных диодов почти не отличается от устройства других диодов, но для их изготовления применяют полупроводниковые материалы с большим содержанием примесей. Вследствие этого удельные сопротивления областей p - и n -типов очень малы, а ширина p - n -перехода составляет примерно 0,02 мкм, что в сто раз меньше, чем у других полупроводниковых диодов. Напряженность электрического поля в таких p - n -переходах достигает огромного значения — до 10^8 В/м.

Вольт-амперная характеристика туннельного диода и его условное обозначение показаны на рис. 17.16а.

Максимальному значению тока (точка a на рис. 17.16а) будет соответствовать такое состояние энергетических зон, при котором уровень Ферми в свободной зоне n -типа и потолок валентной зоны области p -типа будут находиться на одном уровне. Результирующий ток будет состоять из электронов области n -типа и направлен от области p -типа к области n -типа. При дальнейшем увеличении прямого

а



б

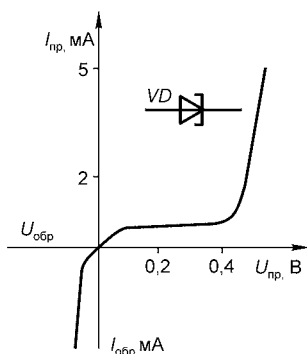


Рис. 17.16
Вольт-амперная характеристика
а — туннельного диода; б — обращенного диода.

напряжения туннельное перемещение электронов из n -области в p -область начнет убывать, т. е. будет убывать прямой ток. При этом убывание будет происходить до такого значения напряжения U_v , при котором нижняя часть свободной зоны n -области окажется на одном уровне с верхним уровнем валентной зоны p -области. Ток при этом будет иметь минимальное значение I_{\min} (см. рис. 17.16а).

Таким образом, на вольт-амперной характеристике туннельного диода появляется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (участок abv на рис. 17.16а). При еще большем увеличении напряжения ($U > U_v$) туннельные переходы электронов станут невозможны, но носители заряда будут преодолевать потенциальный барьер за счет диффузии, и прямой ток будет возрастать, как у обычных диодов. При подаче на туннельный диод обратного напряжения обратный туннельный ток будет резко возрастать. Обратный ток у туннельных диодов во много раз больше, чем у других диодов, поэтому они не обладают вентильным свойством. Следует отметить, что в туннельном диоде обратный и прямой токи обуславливаются также небольшим диффузионным током основных и дрейфовым током неосновных носителей заряда, поэтому результирующие обратный и прямой токи до точки v на вольт-амперной характеристике несколько больше (рис. 17.16а).

Основными параметрами туннельных диодов являются максимальные I_{\max} (точка a) и минимальные I_{\min} (точка v) значения токов на вольт-амперной характеристике и соответствующие им напряжения (U_a и U_v); значение напряжения U_r (точка z), соответствующего максимальному току в точке a , а также дифференциальное сопротивление $R_d = -dU/dI$, которое определяется примерно на середине участка с отрицательным сопротивлением (участок abv). К параметрам также относятся общая емкость диода и максимальная частота.

Туннельные диоды обладают усилительными свойствами и могут работать в схемах (на участке abv) как активные элементы. Они находят широкое применение в сверхбыстродействующих ЭВМ в качестве быстродействующих импульсных переключающих устройств (скорость переключения составляет доли наносекунды) и в генераторах высокочастотных колебаний. На туннельных диодах со-



здают схемы мультивибраторов, триггеров, которые служат основой для построения логических схем, запоминающих устройств, регистров и т. д. Туннельные диоды могут работать в широком диапазоне температур от 4 до 640 К, они просты по конструкции, малогабаритны. Туннельные диоды изготавливают на основе сильнолегированного германия или арсенида галлия, p - n -переход получают методом сплавления примесей.

Обращенный диод — диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении. Принцип действия обращенного диода основан на использовании туннельного эффекта. Однако в обращенных диодах концентрацию примесей делают меньше, чем в обычных туннельных диодах. Поэтому контактная разность потенциалов у обращенных диодов меньше, а толщина p - n -перехода больше. Это приводит к тому, что под действием прямого напряжения прямой туннельный ток не создается. Прямой ток в обращенных диодах создается инжекцией неосновных носителей зарядов через p - n -переход, т. е. прямой ток является диффузионным. При обратном напряжении через переход протекает значительный туннельный ток, создаваемый перемещением электронов сквозь потенциальный барьер из p -области в n -область. Рабочим участком вольт-амперной характеристики обращенного диода является обратная ветвь (рис. 17.16б).

Таким образом, обращенные диоды обладают выпрямляющим эффектом, но пропускное (проводящее) направление у них соответствует обратному включению, а запирающее (непроводящее) — прямому включению. Обращенные диоды применяют в импульсных устройствах, а также в качестве преобразователей сигналов (смесителей и детекторов) в радиотехнических устройствах.

Диоды Шоттки. Эти диоды обладают идеальными импульсными параметрами. Изготавливают диоды на основе контакта «металл-полупроводник». Рассмотрим образование такого контакта и его свойства (см. рис. 17.17). При контакте металла 1 с полупроводником 3 между ними возникает слой 2, который в зависимости от соотношения работы выхода электронов в металле и полупроводнике

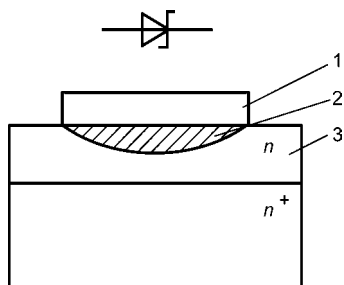


Рис. 17.17
Структура и обозначение
диода Шоттки

и от типа электропроводности полупроводника может быть обогащенным, инверсным или обедненным.

В случае, когда контакт металла образован с полупроводником n -типа, работа выхода электронов в металле $e\varphi_M$ больше работы выхода электронов в полупроводнике $e\varphi_n$ (под работой выхода электронов понимают работу, соответствующую разности энергий

между уровнем Ферми в веществе и уровнем энергии вне вещества около его поверхности, т. е. энергии, соответствующей верхней области свободной зоны).

При прямом включении (плюс подводится к металлу, минус к полупроводнику) высота потенциального барьера снижается, сопротивление образованного слоя уменьшается и через него электроны (основные носители для полупроводника) переходят в металл. Так как при этом не происходит инъекции дырок из металла в полупроводник, прямой ток обусловлен движением только основных носителей заряда полупроводника.

При обратном включении источника высота потенциального барьера повышается и его могут преодолевать только дырки (неосновные носители заряда для полупроводника), так как поле образованного слоя для них является ускоряющим. Поток дырок в металл создает обратный ток. Но так как концентрация дырок мала, то обратный ток также мал.

Таким образом, образованный на границе между металлом и полупроводником слой располагается в полупроводнике у границы с металлом. Этот слой является запирающим и обладает выпрямляющим свойством. Он не инжектирующий, что является большим преимуществом в сравнении с обычным p – n -переходом. Кроме того, в таком контакте можно обеспечить незначительную барьерную емкость. Эти уникальные свойства контакта «металл–полупроводник» позволяют создавать на его основе полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы) с идеальными характеристиками для работы в импульсных схемах.

Потенциальный барьер, полученный на контакте «металл–полупроводник», называют барьером Шоттки, а диоды на его основе — *диодами Шоттки* (их условное обозначение на схемах представлено на рис. 17.17). Базой диода является тонкий слой толщиной 1...1,5 мкм высокоомного полупроводника n -типа. Его наносят методом эпитаксиальной технологии на подложку — пластинку низкоомного полупроводника того же типа n^+ (так обозначают область с более высокой удельной проводимостью). Для обеспечения идеального контакта между металлом и полупроводником сам металл напыляют в вакууме на слой полупроводника. В качестве материала полупроводника чаще всего используют для n -полупроводника Si, а в качестве металла — Al, Au, Mo и др.

При этом исходят из того, что работа выхода металла должна быть больше работы выхода кремния. Из-за отсутствия инжекции «в базу» неосновных носителей в ней не происходят процессы накопления и рассасывания зарядов. Барьерная емкость вследствие малой площади и большой ширины запирающего слоя мала, она не превышает 1 пФ, поэтому длительность переходных процессов, обусловленная в диодах Шоттки только перезарядкой барьерной емкости, составляет десятые доли наносекунды. Диоды Шоттки можно использовать для работы на частоты до десятков гигагерц. Прямое напряжение диода Шоттки меньше прямого напряжения диодов с p – n -переходом на 0,2...0,3 В, что значительно снижает потери при больших токах.

Лавинные диоды, стабилитроны и стабисторы. Это полупроводниковые диоды, принцип работы которых основан на том, что при обратном напряжении на p – n -переходе в области электрического пробоя напряжение на нем изменяется незначительно при значительном изменении тока. Стабистор — полупроводниковый диод, напряжение на котором в области прямого напряжения почти не зависит от тока в заданном его диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения. Стабилитроны и стабисторы предназначены для стабилизации напряжений и используются в параметрических стабилизаторах напряжения в качестве источников опорных напряжений, в схемах ограничения перенапряжений в силовых цепях и др. Напряжение стабилизации

(пробивное напряжение) является рабочим. Оно зависит от свойств полупроводника, из которого изготавливают диод, а также технологии изготовления прибора.

С помощью специальных технологических мероприятий можно добиться того, чтобы напряжения пробоя отдельных проводящих участков (микроплазм) незначительно отличались друг от друга и от напряжения пробоя p - n -перехода. В этом случае на порядки возрастает

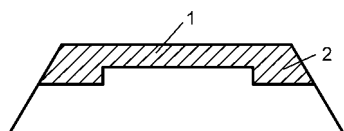


Рис. 17.18
Форма p - n -перехода
лавинного диода

1 — область диффузии бора; 2 — кольцевая область диффузии алюминия.

допустимая мощность при обратном токе. Диоды на основе таких переходов получили название *лавинных диодов*.

Лавинные диоды могут работать в условиях кратковременных перенапряжений, допуская существование обратного тока в несколько десятков ампер. Энергия при этом рассеивается в диоде, а напряжение равно напряжению лавинообразования.

В конструкции лавинного диода превышение пробивного напряжения достигнуто за счет специальной конфигурации p - n -перехода (рис. 17.18). В месте выхода на поверхность p - n -переход конструктивно выполнен более глубоким, что достигается *диффузией алюминия*. Переход в центральной части осуществляется *диффузией бора*.

Разновидностью лавинного диода является *стабилитрон*, работающий в режиме электрического пробоя p - n -перехода. При напряжении пробоя ток стабилитрона резко возрастает, а напряжение остается равным напряжению стабилизации. Так же, как и в лавинных диодах, в стабилитроне обеспечивается превышение напряжения пробоя по поверхности над объемным напряжением пробоя. Кремний, применяемый в стабилитронах, должен быть однородным по удельному сопротивлению.

Простейшая схема стабилизации напряжения приведена на рис. 17.19. В соответствии с обратной вольтамперной характеристикой диода — *стабилитрона* (рис. 17.19б) и с помощью гасящего резистора R_r (рис. 17.19а), при изменении входного напряжения $U_{вх}$ выходное напряжение $U_{вых}$ на нагрузке R_n с большой степенью точности поддерживается на заданном уровне при поддержании

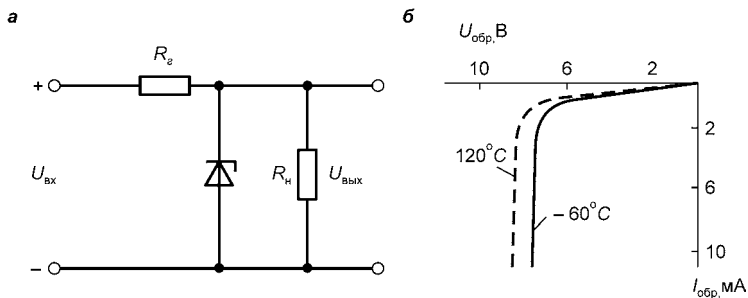


Рис. 17.19
Стабилизация напряжения

a — схема стабилизации напряжения; *б* — вольт-амперная характеристика стабилизатора.

температуры прибора. В этом случае, если входное напряжение возрастает, то увеличивается обратный ток и падение напряжения на гасящем резисторе R_r .

Основными параметрами стабилитронов являются напряжение на стабилитроне (от 3 до 400 В) при максимальном токе до 100 мА и допустимая рассеиваемая мощность в стабилитроне, которая достигает единиц ватт.

Альтернативой лавинному диоду является создание специальных *ограничителей перенапряжений (ОПН)*, работающих в цепях защиты. Ограничитель напряжения имеет структуру типа $p-n-p$. При приложении напряжения в одном из направлений один из $p-n$ -переходов смещается в обратном направлении и ограничитель напряжения работает как обычный стабилитрон. При перемене полярности приложенного напряжения в работу вступает другой $p-n$ -переход, и ограничение напряжения происходит в обратном направлении. На этом принципе разработаны также ограничители КСОН, допускающие выделение энергии до 10 Дж.

Варикапы. Это полупроводниковые диоды, в которых использовано свойство $p-n$ -перехода менять барьерную емкость при изменении обратного напряжения (рис. 17.20).



Рис. 17.20
Обозначение варикапа

Таким образом, варикап можно рассматривать как конденсатор с электрически управляемой емкостью. Основными параметрами этих приборов являются емкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении; коэффициент перекрытия по емкости — отношение емкости варикапа при двух заданных значениях

обратных напряжений; добротность — отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте сигнала к сопротивлению потерь при заданном значении емкости или обратного напряжения.

17.3. ТРАНЗИСТОРЫ

17.3.1. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

По конструктивным особенностям и принципу работы транзисторы подразделяют на два основных класса: биполярные и полевые. *Биполярным транзистором* называют полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими электрическими переходами и тремя (или более) выводами. Биполярный транзистор является аналогом лампового триода и может выполнять функции усилительные, генераторные и ключевые. Усилительные свойства биполярного транзистора обусловлены инжекцией и экстракцией неосновных носителей заряда.

Основой конструкции биполярного транзистора является пластина монокристалла полупроводника (рис. 17.21) с электропроводностью p - или n -типа, по обеим сторонам которой вплавлены полупроводники, обладающие другим типом электропроводности.

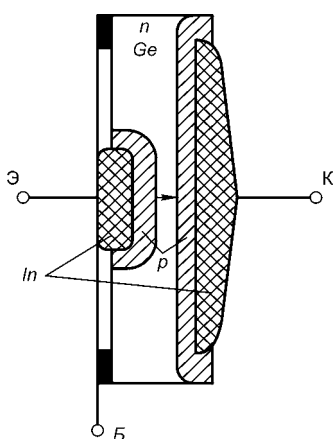


Рис. 17.21
Схематическое изображение
структуры транзистора

На границе раздела областей с разным типом электропроводности образуются p - n - или n - p -переходы. Каждая из областей, называемых эмиттером, коллектором и базой, снабжается омическим контактом, от которого делается вывод, обозначаемый \mathcal{E} , K и B соответственно. Стрелкой показано направление «движения» дырок (рис. 17.21). Транзистор укрепляют на кристаллодержателе и помещают в герметизированный корпус. Через стеклянные изоляторы проходят выводы.

Корпус может быть металлическим, пластмассовым или стеклянным.

Структурные схемы транзисторов показаны на рис. 17.22. Транзистор $p-n-p$ -типа представлен на рис. 17.22а. На рис. 17.22б показан транзистор с другим чередованием областей ($n-p-n$), на рис. 17.22в, г — соответствующие структурной схеме условные обозначения транзисторов. Разницы в принципе работы транзисторов обеих структур нет, но полярность подключения выводов к источнику питания противоположная.

Так как транзистор имеет симметричную структуру, конструктивно коллектор может быть эмиттером, однако в реальных конструкциях для обеспечения лучшей работы транзистора область коллектора делается большей по размерам. Из тех же соображений активная толщина базы делается небольшой (меньше диффузионной длины неосновных носителей). Переход «эмиттер–база» называют *эмиттерным*, «коллектор–база» — *коллекторным*. Назначение эмиттера — это инжекция (впрыскивание) в область базы неосновных для нее носителей заряда, для чего область эмиттера выполняют более насыщенной основными носителями (более низкоомной), чем область базы. Назначение коллектора — это экстракция (втягивание) носителей из базы.

Транзисторы классифицируют по различным признакам: по мощности — малой, средней, большой; по диапазону рабочих частот — низкой, средней, большой; по методу изготовления — сплавные, микросплавные, диффузионные, планарные и др.

Включение источников питания транзисторов. При включении транзистора в цепь один из его выводов делают общим для входной и выходной цепей. Поэтому цепи включения бывают: с общей базой (ОБ) (см. рис. 17.23а); с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 17.23б) и с общим коллектором (ОК) (рис. 17.23в). Наибольшее применение имеет схема включения с ОЭ. Схема включения с ОБ имеет ряд недостатков и используется реже.

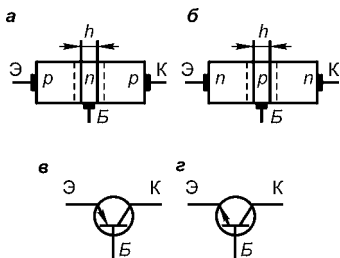


Рис. 17.22
Транзисторы

а — $p-n-p$ -проводимости; б — $n-p-n$ -проводимости; в, г — их обозначения (соответственно).

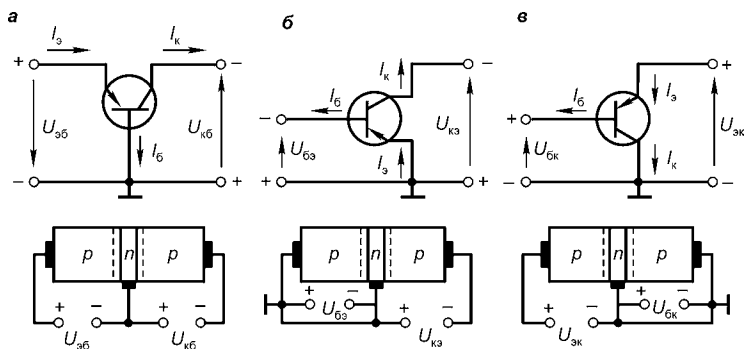


Рис. 17.23

Схемы включения $p-n-p$ -транзисторов и их структуры

а — с общей базой; б — с общим эмиттером; в — с общим коллектором.

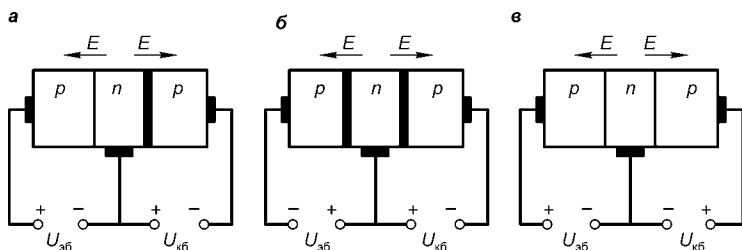


Рис. 17.24

Режимы работы транзистора

а — активный; б — нормальный; в — инверсный.

В зависимости от смещения, созданного на эмиттерном и коллекторном $p-n$ -переходах, транзистор может работать в трех режимах. Если один переход смещен в прямом направлении, а другой — в обратном, режим называют активным (рис. 17.24а). Если в прямом направлении включен эмиттерный переход, а коллекторный — в обратном, такое включение называют нормальным (рис. 17.24б). Если смещение на $p-n$ -переходах противоположное, включение называют инверсным (рис. 17.24в). В последнем случае коллектор выполняет роль эмиттера, а эмиттер — роль коллектора.

Так как размеры эмиттера меньше размеров коллектора, то при инверсном режиме включения эмиттер не сможет уловить значительную часть носителей заряда, инжектированных коллектором в базу, а также будет

нагреваться. Активный режим используется в усилительных цепях и в цепях генерирования, где транзистор выполняет функции активного элемента цепи. Если оба p - n -перехода смещены в обратном направлении, транзистор работает в *режиме отсечки* — *отключен*. Если оба p - n -перехода смещены в прямом направлении, транзистор работает в *режиме насыщения* — *включен*. Режимы отсечки и насыщения используют в ключевых режимах работы транзистора.

Работу биполярного транзистора в активном режиме рассмотрим на примере биполярного диффузионного сплавного транзистора со структурой p - n - p , включенного по схеме с ОБ в активном режиме (рис. 17.25).

При этом принимаем, что заряды распределены равномерно, транзистор заменен одномерной моделью, толщина базы незначительная, эмиттер насыщен акцепторной примесью, во много раз превышающей донорную примесь базы, и площадь эмиттера значительно меньше площади коллектора.

В активном режиме прямое смещение эмиттерного перехода создается за счет включения источника постоянного напряжения, а обратное смещение коллекторного перехода — за счет включения источника между коллектором и базой (рис. 17.25). Напряжение $-U_{эб}$ имеет небольшое значение, близкое к высоте потенциального барьера, и составляет доли вольта. Напротив, напряжение $U_{кб}$ на порядок больше напряжения $U_{эб}$ и ограничивается напряжением пробоя коллекторного перехода. При включении источников питания потенциальный барьер эмиттерного перехода снижается за счет напряжения $-U_{эб}$, а потенциальный барьер коллекторного перехода повышается за счет напряжения $-U_{кб}$. В результате дырки эмиттера легко преодолевают понизившийся потенциальный барьер и за счет диффузии инжектируются в базу, а электроны базы — в эмиттер. Дырки эмиттера диффундируют в базу и движутся в направлении к коллекторному

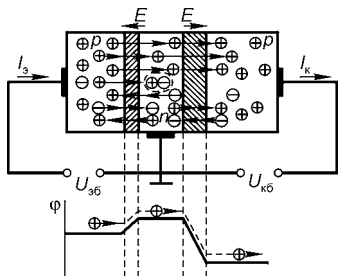


Рис. 17.25
Активный режим
работы транзистора

переходу за счет перепада плотности дырок по длине базы, большинство из них доходит до коллекторного перехода, но незначительная часть рекомбинирует с электронами базы. Для уменьшения потерь дырок на рекомбинацию базу делают тонкой. Поскольку поле коллекторного перехода для дырок является ускоряющим, они вытягиваются через коллекторный переход в коллектор, т. е. происходит экстракция дырок в коллектор. Распространяясь вдоль коллектора за счет перепада плотности дырок, дырки рекомбинируют с электронами, подходящими от источника питания.

Вследствие того, что потенциальный барьер коллекторного перехода велик, основные носители заряда коллектора (дырки) практически не могут уйти из коллектора в базу. Через транзистор происходит сквозное движение дырок от эмиттера через базу к коллектору, и лишь незначительная их часть из-за рекомбинации с электронами базы не доходит до коллектора. Часть электронов базы, рекомбинировавших с дырками эмиттера, восполняется электронами источника питания, которые поступают в базу. Наряду с основными носителями заряда через эмиттерный и коллекторный переходы движутся и неосновные для каждой из областей транзистора носители. На работу транзистора существенно влияет движение неосновных носителей через коллекторный переход: дырок базы — в коллектор и электронов кол-

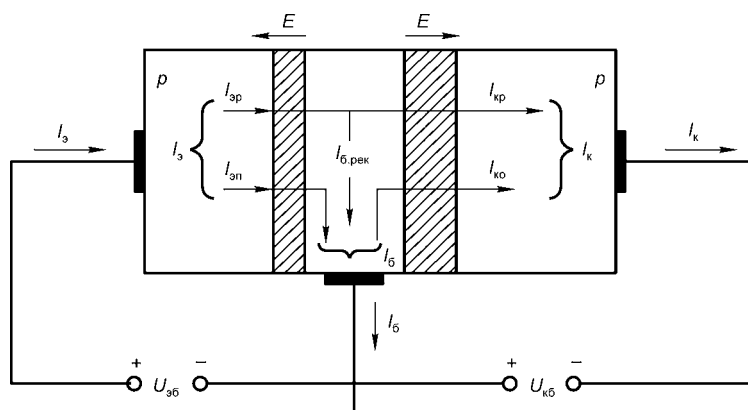


Рис. 17.26
Распределение токов в биполярном транзисторе

лектора — в базу. Их количество растет с повышением температуры, а также зависит от материала полупроводника.

Токи биполярного транзистора. В эмиттере дырки создают ток $I_{\text{эп}}$ (рис. 17.26), а в коллекторе это дырочная составляющая тока коллектора $I_{\text{кр}}$, которая меньше тока $I_{\text{эп}}$ на ток, вызванный рекомбинацией дырок в базе и называемый базовым током рекомбинации $I_{\text{б.рек}}$:

$$I_{\text{кр}} = I_{\text{эп}} - I_{\text{б.рек}}. \quad (17.15)$$

В усилительном режиме работы транзистора ток $I_{\text{б.рек}}$ нежелателен. Его уменьшение достигается уменьшением толщины базы так, чтобы ширина базы $h \leq L_p$, где L_p — диффузионная длина дырок. Чем меньше толщина базы, тем большее число дырок достигнет коллекторного перехода и тем больше дырочная составляющая тока $I_{\text{кр}}$. Потерю дырочного тока эмиттера на рекомбинацию в базе характеризует *коэффициент переноса дырок*

$$\beta_n = I_{\text{кр}}/I_{\text{эп}}. \quad (17.16)$$

Определить коэффициент переноса можно из соотношения

$$\beta_n \approx 1 - 0,5h^2/L_p^2. \quad (17.17)$$

Для германиевых транзисторов $\beta_n = 0,98...0,995$, где $L_p = 0,3$ мкм, $h \leq 0,3$ мкм.

Через эмиттер протекает электронный ток $I_{\text{эн}}$, обусловленный переходом в область эмиттера электронов базы:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{эп}} + I_{\text{эн}}. \quad (17.18)$$

Составляющая тока эмиттера $I_{\text{эн}}$ замыкается в цепи «база–эмиттер», не протекает через коллектор и вызывает дополнительный нагрев транзистора. Для того чтобы уменьшить ток $I_{\text{эн}}$, базу насыщают примесью во много раз меньше, чем эмиттер (примерно на два порядка). Долю дырочного тока в эмиттере $I_{\text{эп}}$ определяют коэффициентом инжекции:

$$\gamma = \frac{I_{\text{эп}}}{I_{\text{э}}}. \quad (17.19)$$

Этот коэффициент характеризует эффективность работы эмиттера. Для уменьшения электронной составляющей

эмиттерного тока базу насыщают примесью незначительно ($\gamma = 0,990 \dots 0,995$). В коллекторе и базе следует также учитывать обратный ток коллекторного перехода $I_{ко}$, образованный неосновными носителями областей базы и коллектора:

$$I_{\kappa} = I_{\kappa p} + I_{\kappa o}. \quad (17.20)$$

Поскольку концентрация неосновных носителей значительно больше в базе, чем в коллекторе, обратный ток коллекторного перехода состоит в основном из дырок базы. Значение тока $I_{\kappa o}$ является параметром транзистора, характеризующим его качество (чем меньше $I_{\kappa o}$, тем транзистор лучше).

Значения $I_{\kappa o}$ при нормальной температуре составляют $0,1 \dots 100$ мкА, причем у германиевых транзисторов ток $I_{\kappa o}$ примерно на порядок больше, чем у кремниевых.

Ток $I_{\varepsilon n}$ в базе, образованный электронами, инжектированными в эмиттер, ток рекомбинации $I_{б.рек}$ и обратный $I_{\kappa o}$ ток коллекторного перехода создают ток базы:

$$I_{б} = I_{\varepsilon n} + I_{б.рек} - I_{\kappa o}. \quad (17.21)$$

Исходя из проведенного анализа работы транзистора и с учетом (17.17) и (17.20) получим

$$I_{б} = I_{\varepsilon} - I_{\kappa}, \quad (17.22)$$

что соответствует первому закону Кирхгофа. Поскольку транзистор изготавливают так, чтобы обеспечить очень малое значение тока базы, ток коллектора незначительно отличается от тока эмиттера — $I_{\varepsilon} \approx I_{\kappa}$. Как только дырка покинет эмиттер и перейдет в базу, для восстановления равновесия заряда в эмиттере электрон покидает эмиттер. За счет этого в выводе эмиттера имеем электронный ток, а в выводе коллектора — ток электронов источника, компенсирующий увеличение дырок в коллекторе. В выводе базы при этом имеем ток электронов источника, восполняющий убыль электронов вследствие рекомбинации их с дырками эмиттера (рис. 17.26). Так как за положительное направление тока принимают направление положительных зарядов, то направление токов, показанное на рисунках стрелками, противоположно-



но направлению движения электронов. Таким образом, сквозной ток через транзистор направлен от эмиттера через базу к коллектору (его направление отражено в условном обозначении транзистора — стрелка от эмиттера в сторону базы).

Током коллектора можно управлять. Для этого следует изменить напряжение $U_{эб}$ источника питания цепи эмиттера. С увеличением напряжения базы снижается потенциальный барьер эмиттерного перехода и увеличивается ток эмиттера, а следовательно, и ток коллектора (при прочих равных условиях). Таким образом, ток эмиттера является управляющим, а ток коллектора — управляемым. Поэтому транзистор часто называют прибором, управляемым током. Отметим, что изменение обратного напряжения источника питания цепи коллектора практически не вызывает увеличения тока коллектора, так как поле коллекторного перехода является ускоряющим и не может изменять числа дырок, которые пересекают коллекторный переход.

Для улучшения качества работы транзистора необходимо стремиться к тому, чтобы коэффициенты γ и β_n были близки к единице. Однако их нельзя измерить, а можно только рассчитать теоретически. Поэтому для расчетов вводят *коэффициент передачи тока эмиттера*:

$$\alpha_{ст} = \frac{I_K - I_{ко}}{I_э} = \frac{I_{кр}}{I_э}, \quad (17.23)$$

где $I_{кр}$ — дырочный ток коллектора, $I_э$ — ток эмиттера. Как видно, этот коэффициент можно измерить, и его значение равно $\alpha_{ст} = \gamma\beta_n$.

Учитывая (17.23), получим

$$I_K = \alpha_{ст}I_э + I_{ко}, \quad (17.24)$$

$$I_б = (1 - \alpha_{ст})I_э - I_{ко}. \quad (17.25)$$

Из (17.24) видно, что, изменяя ток эмиттера, можно управлять током коллектора. При работе транзистора на переменном токе вводят понятие *дифференциального коэффициента усиления тока*, который определяют через приращения токов входной и выходной цепей транзистора. Для схемы с ОБ дифференциальный коэффициент усиления тока равен

$$\alpha_{\text{диф}} = \left. \frac{dI_{\text{к}}}{dI_{\text{э}}} \right|_{U_{\text{кб}} = \text{const}}, \quad (17.26)$$

или $\alpha_{\text{диф}} = \alpha_{\text{ст}} + I_{\text{к}} \frac{d\alpha_{\text{ст}}}{dI_{\text{э}}}$.

Коэффициент передачи тока базы биполярного транзистора. В схеме с ОЭ входным является ток базы $I_{\text{б}}$, а выходным — ток коллектора $I_{\text{к}}$. Определить коэффициент передачи тока базы можно из соотношения $I_{\text{к}} = \alpha_{\text{ст}} I_{\text{э}} + I_{\text{ко}}$, если подставить в него $I_{\text{э}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}}$. Тогда $I_{\text{к}} = \alpha_{\text{ст}}(I_{\text{б}} + I_{\text{к}}) + I_{\text{ко}}$. Для удобства анализа работы транзистора значение тока коллектора можно найти из формулы

$$I_{\text{к}} = \frac{\alpha_{\text{ст}}}{1 - \alpha_{\text{ст}}} I_{\text{б}} + \frac{I_{\text{ко}}}{1 - \alpha_{\text{ст}}}, \quad (17.27)$$

или

$$I_{\text{к}} = \beta_{\text{ст}} I_{\text{б}} + I_{\text{ко.э}}, \quad (17.28)$$

где $\beta_{\text{ст}} = \alpha_{\text{ст}} / (1 - \alpha_{\text{ст}})$ — статический коэффициент передачи тока базы в схеме с ОЭ, выраженный через статический коэффициент передачи тока эмиттера в схеме с ОБ, $I_{\text{ко.э}} = (1 + \beta_{\text{ст}}) I_{\text{ко}}$ — обратный ток коллектора в схеме с ОЭ. Тогда статический коэффициент передачи тока

$$\beta_{\text{ст}} = (I_{\text{к}} - I_{\text{ко}}) / (I_{\text{б}} + I_{\text{ко}}).$$

Дифференциальный коэффициент передачи тока базы

будет равен $\beta_{\text{диф}} = dI_{\text{к}} / dI_{\text{б}} \big|_{U_{\text{кэ}} = \text{const}}$, или

$$\beta_{\text{диф}} = \beta_{\text{ст}} + I_{\text{б}} \frac{d\beta_{\text{ст}}}{dI_{\text{б}}}. \quad (17.29)$$

Если $d\beta_{\text{ст}} / dI_{\text{б}} = 0$, то $\beta_{\text{диф}} = \beta_{\text{ст}} = \beta$, где β называют коэффициентом усиления; он является важным параметром транзистора, характеризующего его работу в режиме усиления.

Усилительные свойства биполярного транзистора зависят от схемы включения (ОБ, ОЭ, ОК). Транзистор усиливает либо ток, либо напряжение, либо то и другое.

В схеме с ОБ значение тока коллектора близко к значению тока эмиттера, т. е. усиления по току не происходит. Однако в этом случае имеется усиление по напряжению и, следовательно, по мощности.



В активном режиме коллекторный переход смещен в обратном направлении, его потенциальный барьер высок, поэтому инжекция дырок из коллектора в базу невозможна. Чтобы инжекция не происходила и при включении в коллекторную цепь резистора нагрузки с высоким сопротивлением, необходимо, чтобы при этом не изменился знак потенциала коллектора. Поскольку сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов, а также нагрузки соединены последовательно и ток через них почти одинаков, небольшое изменение тока эмиттера вызовет небольшое изменение напряжения в эмиттерной цепи, тогда как в коллекторной цепи это изменение будет весьма значительным, если сопротивление коллектора велико. В этом случае напряжение, а следовательно, и мощность возрастут во много раз.

При работе транзистора в усилительном режиме на его вход подается переменный сигнал, который нужно усилить. Напряжение источника питания постоянно, но переменное напряжение, подаваемое на коллектор (даже незначительное), приводит к большим изменениям (колебаниям) переменного напряжения на коллекторном резисторе, т. е. в схеме происходит усиление малого переменного входного сигнала.

В схеме с ОЭ происходит усиление и по току, и по напряжению. Входным током является ток базы, значительно меньший тока эмиттера. Изменяя входное напряжение, меняется высота потенциального барьера и число основных носителей заряда эмиттера через базу и соответственно через коллектор. Так как в базу от источника поступает меньше носителей, чем инжектируется из эмиттера в базу и коллектор, то незначительное увеличение тока во входной цепи вызывает существенное изменение тока в выходной цепи. Таким образом, транзистор, включенный по схеме с ОЭ, *характеризуется большим усилением по току*. При этом имеется и усиление по напряжению: так как выходное сопротивление велико, в цепь коллектора можно включить резистор коллектора с большим сопротивлением, напряжение на котором будет больше, чем входное. Соответственно происходит и усиление по мощности.

В схеме с ОК происходит усиление по току и по мощности, а усиление по напряжению отсутствует.

17.3.2. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Взаимосвязь между входными и выходными токами и напряжениями транзистора описывают статическими характеристиками, когда в цепи коллектора нет нагрузки. Эти характеристики используют при практических расчетах схем на транзисторах. К таким характеристикам относят *входные* $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$ характеристики, снимаемые при постоянном выходном напряжении $U_{\text{вых}} = \text{const}$, и *выходные* $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})$, снимаемые при постоянном токе на входе $I_{\text{вх}} = \text{const}$. В некоторых случаях применяют характеристики обратной связи и передачи тока.

В транзисторе токи взаимно связаны, поэтому статические характеристики для каждой из трех схем включения транзистора разные.

Для схемы с ОБ семейство *входных статических характеристик* представляет собой зависимости $I_3 = f(U_{36})$ для $U_{кб} = \text{const}$ (рис. 17.27а). По виду эти характеристики напоминают прямые ветви вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов. При небольших напряжениях ток изменяется по экспоненциальному закону, с ростом напряжения характер зависимостей становится прямолинейным. При $U_{кб} = 0$ характеристики совпадают с характеристикой p - n -перехода, включенного в прямом направлении.

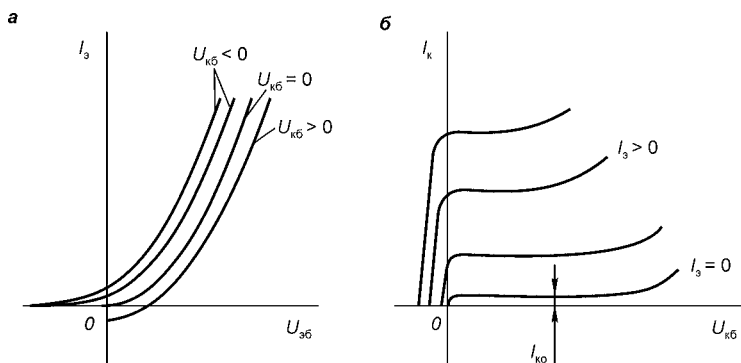


Рис. 17.27
Статические вольт-амперные
характеристики транзистора в схеме с общей базой
а — входные; б — выходные.

При увеличении напряжения на коллекторе при $U_{кб} > 0$ характеристика смещается вправо. Плотное расположение характеристик на рис. 17.27а обусловлено малым влиянием напряжения коллектора на ток эмиттера.

При напряжении $U_{эб} = 0$ и $U_{кб} \neq 0$ ток эмиттера не равен нулю. В этом случае транзистор работает в режиме отсечки для $U_{кб} < 0$ или в режиме насыщения для $U_{кб} > 0$.

Семейство *выходных статических характеристик* для схемы с общей базой представляет собой зависимость $I_k = f(U_{кб})$ при токе эмиттера $I_э = \text{const}$ (рис. 17.27б).

При увеличении тока эмиттера ток коллектора увеличивается при заданном напряжении на коллекторе. При $I_э = 0$ через коллектор замыкается обратный ток коллекторного перехода $I_{ко}$, который практически не зависит от напряжения на коллекторе. При напряжении на коллекторе, равном нулю ($U_{кб} = 0$), ток коллектора $I_k \neq 0$, так как ток эмиттера $I_э \neq 0$. При прямом напряжении на коллекторном переходе ($U_{кб} > 0$) ток с изменением напряжения резко меняется. В этом случае транзистор переходит в режим насыщения.

Выходное сопротивление в схеме с ОБ очень велико и достигает единиц мегаом, так как изменение напряжения на коллекторе почти не влияет на ток коллектора, значение которого определяется током эмиттера и обратным током коллекторного перехода $I_{ко}$.

Для схемы с ОЭ семейство *входных статических характеристик* представляется зависимостями $I_б = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ (см. рис. 17.28а). Ток базы представляет собой алгебраическую сумму токов, один из которых вызван рекомбинацией носителей заряда эмиттера и базы, другой является обратным током коллекторного перехода. Чем больше напряжение $U_{бэ}$, тем больше ток базы, так как при увеличении прямого напряжения на эмиттерном переходе снижается потенциальный барьер. Преодолеть его в этом случае может большее число основных носителей заряда эмиттера (дырок), и большее число их сможет рекомбинировать с электронами базы.

Рекомбинационная составляющая тока базы, являясь частью тока эмиттера, определяет характер входной характеристики для схемы с ОЭ, который близок к характеру входной характеристики для схемы с ОБ.

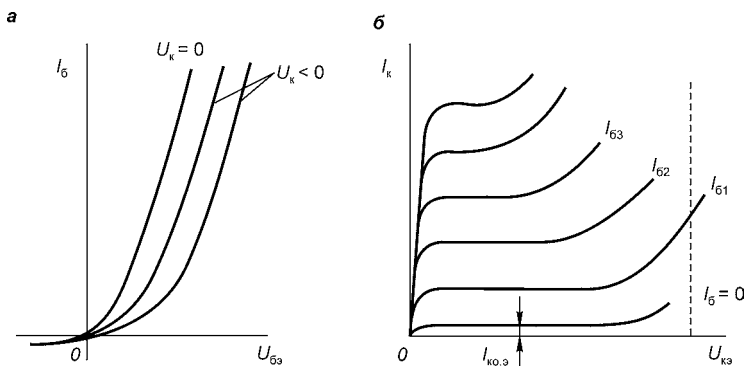


Рис. 17.28
Статические вольт-амперные
характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером
а — входные; б — выходные.

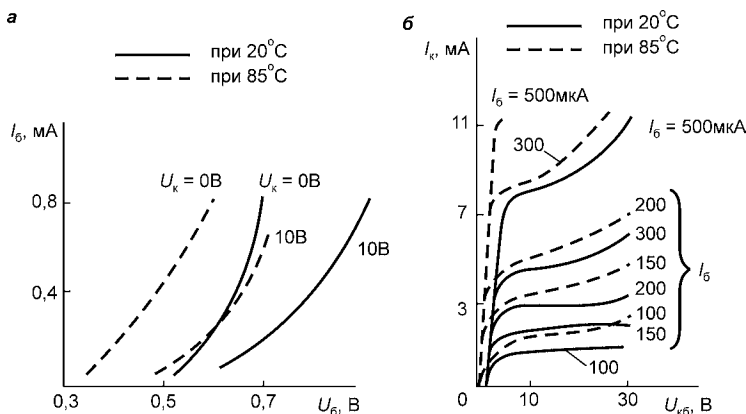


Рис. 17.29
Влияние температуры на характеристики транзистора,
включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ)
а — входные характеристики; б — выходные характеристики.

С увеличением значения напряжения на коллекторе ток базы уменьшается, и характеристики смещаются вправо от характеристики при $U_{кэ} = 0$.

Входное сопротивление транзистора, включенного по схеме с ОЭ, $r_{вх} = dU_{бэ}/dI_b$ при $U_{кэ} = \text{const}$ сравнительно мало, но гораздо больше, чем в схеме с ОБ.

Семейство выходных статических характеристик представляет собой зависимости $I_{кэ} = f(U_{кэ})$ при $I_{бэ} = \text{const}$ (рис. 17.28б).

Выходные характеристики не пересекают ось ординат и практически сходятся в начале координат, так как при напряжении на коллекторе, равном нулю, ток коллектора практически равен нулю. В начальной части характеристики имеют большую крутизну. Это объясняется тем, что при напряжениях на коллекторе $U_{кэ}$ меньших значения напряжения на базе $U_{бэ}$ коллекторный переход включен в прямом направлении (напряжение на коллекторном переходе равно $|U_{кэ}| - |U_{бэ}|$, рис. 17.28б). Поэтому достаточно незначительно изменить напряжение $U_{кэ}$, чтобы ток $I_{к}$ сильно изменился.

Температура окружающей среды существенно влияет как на входные, так и выходные характеристики транзистора (рис. 17.29). Это объясняется тем, что при увеличении температуры увеличивается энергия электронов, вследствие чего увеличивается концентрация свободных носителей заряда во всех областях транзистора, их подвижность и др. Особенно сильно возрастание температуры сказывается на обратном токе коллекторного перехода $I_{ко}$, который часто называют тепловым током.

17.3.3. H-ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Для расчета параметров транзисторов можно воспользоваться активным четырехполюсником как аналогом транзистора (рис. 17.30). Используя теорию четырехполюсника, установим связь между входными и выходными токами и напряжениями транзистора через H -параметры, которые описывают зависимости $u_1 = f(i_1, u_2)$ и $i_2 = f(i_1, u_2)$.

Для бесконечно малых приращений токов и напряжений можно записать

$$\left. \begin{aligned} du_1 &= \frac{\partial u_1}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial u_1}{\partial u_2} du_2, \\ di_2 &= \frac{\partial i_2}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial i_2}{\partial u_2} du_2. \end{aligned} \right\} \quad (17.30)$$

Если в (17.30) коэффициенты в виде частных производных обозначить буквами H , получим систему H -параметров:

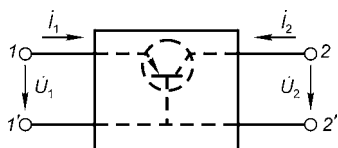


Рис. 17.30
Транзистор — активный
четыреполюсник

$$\left. \begin{aligned} du_1 &= H_{11}di_1 + H_{12}du_2, \\ di_2 &= H_{21}di_1 + H_{22}du_2. \end{aligned} \right\} \quad (17.31)$$

Если на статических характеристиках рассматривать небольшую область, то связь между постоянным током и напряжением с некоторым приближением можно считать линейной, а транзистор — линейным четырехполюсником. Тогда дифференциалы в выражении (17.31) можно заменить абсолютными значениями малых приращений токов и напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= H_{11}\Delta i_1 + H_{12}\Delta u_2, \\ \Delta i_2 &= H_{21}\Delta i_1 + H_{22}\Delta u_2. \end{aligned} \right\} \quad (17.32)$$

Полагая $u_2 = \text{const}$, $\Delta u_2 = 0$, получаем, что

$$H_{11} = \left. \frac{\Delta u_1}{\Delta i_1} \right|_{u_2 = \text{const}, \Delta u_2 = 0}, \quad (17.33)$$

т. е. H_{11} есть не что иное, как входное сопротивление при постоянном напряжении на выходе и при коротком замыкании (для переменного тока) на выходе.

Если $i_1 = \text{const}$, $\Delta i_1 = 0$, то

$$H_{12} = \left. \frac{\Delta u_1}{\Delta u_2} \right|_{i_1 = \text{const}, \Delta i_1 = 0}, \quad (17.34)$$

т. е. H_{12} — коэффициент обратной связи по напряжению (при холостом ходе для переменного тока со стороны входных зажимов и для постоянного тока во входной цепи). Он показывает, какая доля выходного переменного напряжения передается на вход за счет наличия внутренней обратной связи.

Если $u_2 = \text{const}$, $\Delta u_2 = 0$, то

$$H_{21} = \left. \frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} \right|_{u_2 = \text{const}, \Delta u_2 = 0}, \quad (17.35)$$

т. е. H_{21} — коэффициент усиления по току при постоянном напряжении на выходе и при коротком замыкании (для переменного тока) на выходе.

Параметр

$$H_{22} = \left. \frac{\Delta i_2}{\Delta u_2} \right|_{i_1 = \text{const}, \Delta i_1 = 0} \quad (17.36)$$

есть не что иное, как выходная проводимость при холостом ходе по переменному току со стороны входных зажимов и постоянном токе i_1 во входной цепи.

В результате H -параметры являются *дифференциальными* и характеризуют свойства транзистора в статическом режиме (при работе без нагрузки) в рабочей точке, положение которой на статических характеристиках определяется значениями постоянных напряжений (и соответственно токов) на входных и выходных зажимах транзистора. Определить H -параметры можно опытным путем, осуществляя режимы короткого замыкания и холостого хода по переменному току. В реальных условиях работы транзистора на его вход подключают источник преобразуемого транзистором сигнала. При этом переменные напряжения и токи этого источника накладываются на постоянные напряжения и токи, задающие положение рабочей точки. При достаточно малых синусоидальных сигналах транзистор работает на линейных участках статических характеристик и его можно рассматривать как линейный активный четырехполюсник, а малые амплитуды или действующие значения токов и напряжений синусоидальных сигналов можно рассматривать как малые приращения постоянных составляющих тока и напряжения. Однако при замене малых приращений синусоидальными сигналами следует учитывать, что мгновенные значения этих приращений есть функции времени и частоты, так как $\Delta u = U_m \cos(\omega t + \psi_1)$, а $\Delta i = I_m \cos(\omega t + \psi_2)$. Поэтому параметры — значения комплексные и будут определяться модулем H и аргументом φ . Однако при низкой частоте приближенно можно пренебречь реактивными составляющими сопротивлений и проводимостей.

Это позволяет рассматривать модули H -параметров. Для транзистора, представленного в виде четырехполюсника, они зависят от схемы включения транзистора. Для каждой из схем используют соответствующие индексы: для схемы с общей базой — Б, с общим эмиттером — Э, с общим коллектором — К.

Для схемы с ОЭ

$$U_1 = U_{бэ}, \quad U_2 = U_{кэ}, \quad I_1 = I_б, \quad I_2 = I_к, \quad (17.37)$$

тогда уравнения четырехполюсника имеют вид

$$\left. \begin{aligned} U_{6э} &= H_{11}I_6 + H_{12}U_{кэ}, \\ I_к &= H_{21}I_6 + H_{22}U_{кэ}. \end{aligned} \right\} \quad (17.38)$$

откуда значения H -параметров:

$$H_{11э} = \frac{U_{6э}}{I_6} \bigg|_{U_{кэ}=\text{const}} \quad (17.39)$$

— входное сопротивление при коротком замыкании выходной цепи;

$$H_{12э} = \frac{U_{6э}}{U_{кэ}} \bigg|_{I_6=\text{const}} \quad (17.40)$$

— коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе со стороны входной цепи;

$$H_{21э} = \frac{I_к}{I_6} \bigg|_{U_{кэ}=\text{const}} \quad (17.41)$$

— коэффициент передачи тока (усиления) при коротком замыкании выходной цепи;

$$H_{22э} = \frac{I_к}{U_{кэ}} \bigg|_{I_6=\text{const}}$$

— выходная проводимость при холостом ходе во входной цепи.

В схемах с ОБ и с ОЭ параметры $H_{21э}$ и $H_{21э}$ являются соответственно коэффициентами передачи тока базы и эмиттера. Так, в схеме с ОБ входной ток $I_1 = I_э$, выходной ток $I_2 = I_к$. Тогда

$$H_{21э} = \frac{I_к}{I_э} = \alpha. \quad (17.42)$$

В схеме с ОЭ

$$H_{21э} = \frac{I_к}{I_6} = \frac{I_к/I_э}{I_6/I_э} = \frac{I_к/I_э}{(I_э - I_к)/I_э} \approx \frac{\alpha_{ст}}{1 - \alpha_{ст}} \approx \beta. \quad (17.43)$$

В схеме с ОЭ параметры $H_{11э}$ и $H_{12э}$ определяют по входным статическим характеристикам (рис. 17.31а). Для этого из выбранной рабочей точки A на линейной части характеристики проводят до пересечения с соседней характеристикой прямую линию AA' — параллельно оси токов, а затем из точки A' линию $A'A''$ — параллельно оси напряжения. В полученном треугольнике $AA'A''$ катет AA' — приращение тока базы ΔI_6 , а катет $A'A''$ — прира-



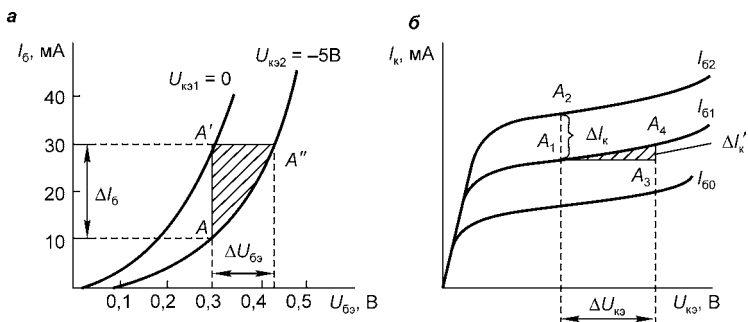


Рис. 17.31
Определение H -параметров по статическим характеристикам биполярного транзистора

a — входные характеристики; b — выходные характеристики.

щение напряжения базы $\Delta U_{бэ}$. Приращение напряжения коллектора $\Delta U_{кэ}$ — это разность напряжений, при которых снимались обе характеристики: $\Delta U_{кэ} = \Delta U_{кэ2} - \Delta U_{кэ1}$.

Из треугольника $AA'A''$ имеем $H_{11э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б}$ и $H_{12э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}}$ при $U_{кэ} = 0$.

Параметры $H_{21э}$ и $H_{22э}$ определяют по выходным статическим характеристикам (рис. 17.31б). Из рабочей точки A_1 проводят прямую, параллельную оси токов, до пересечения с соседней характеристикой и определяют приращение тока коллектора $\Delta I_к$ (отрезок A_1A_2) при $U_{кэ} = \text{const}$. Приращение тока базы при этом составляет $\Delta I_б = I_{б2} - I_{б1}$, отсюда $H_{21э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}$ при $U_{кэ} = \text{const}$.

Чтобы определить параметр $H_{22э}$, из рабочей точки A_1 проводят прямую линию, параллельную оси напряжений, на произвольное расстояние A_1A_3 , равное $\Delta U_{кэ}$, и определяют значение $\Delta I'_к$, равное отрезку A_3A_4 .

Таблица 17.1

H -параметры

Параметр	Схема с ОЭ	Схема с ОБ
H_{11}	Сотни ом — единицы килоом	Десятки ом
H_{12}	$10^{-3} \dots 10^{-4}$	$10^{-3} \dots 10^{-4}$
H_{21}	Десятки	$0,95 \dots 0,998$
H_{22}	$10^{-3} \dots 10^{-4}$ См	$10^{-4} \dots 10^{-5}$ См
$1/H_{22}$	Единицы—десятки килоом	Сотни килоом

В результате $H_{22\omega} = \Delta I'_k / \Delta U_{кз}$. Значения модулей H -параметров обычно приводят в справочниках, где указывают их усредненные значения. В таблице 17.1 дан порядок значений H -параметров для схем с ОЭ и с ОБ.

Частотные свойства транзисторов. При изменении частоты сигнала меняется время диффузии инжектированных в базу носителей заряда. Так, если транзистор имеет структуру p - n -типа и если передается сигнал низкой частоты, то период колебаний усиливаемого сигнала значительно больше времени диффузии. В этом случае концентрация инжектированных в базу носителей заряда убывает от эмиттерного перехода к коллекторному.

При передаче сигнала высокой частоты период усиливаемого сигнала становится соизмеримым со временем диффузии и закон изменения концентрации изменяется: в какие-то моменты времени появляются участки с максимальной концентрацией в середине базы, поэтому диффузия носителей происходит и в сторону эмиттерного перехода. Это вызывает усиление рекомбинации носителей заряда в базе, вследствие чего уменьшается эмиттерная составляющая тока, переданного в коллектор ($I_{кр}$), а следовательно, уменьшится коэффициент передачи тока эмиттера α . Инерционность процессов в базе приводит также к фазовому сдвигу между токами $I_{эр}$ и $I_{кр}$, поэтому H_{216} становится величиной комплексной.

При высоких частотах сигнала наблюдаются фазовые сдвиги между эмиттерным и коллекторным токами вследствие того, что движение носителей через базу в коллектор

будет происходить сравнительно медленно и изменения тока коллектора запаздывают по отношению к изменениям тока эмиттера. За счет сдвига фаз будет возрастать переменный ток базы, что снизит коэффициент передачи тока базы β , и коэффициент $H_{21\omega}$ при высокой частоте будет также комплексной величиной.

На рис. 17.32 представлены векторные диаграммы, которые поясняют, как с изме-

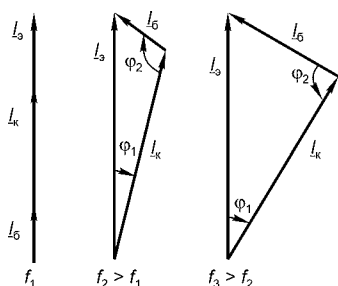


Рис. 17.32
Векторные диаграммы
фазовых сдвигов между
эмиттерными
и коллекторными токами

нением частоты изменяются сопротивления барьерных и диффузионных емкостей p - n -переходов. При этом чем выше частота, тем меньше емкостное сопротивление.

Барьерные емкости коллекторного и эмиттерного переходов включены параллельно p - n -переходам и примерно одинаковы. Шунтирующее действие коллекторной барьерной емкости больше, чем эмиттерной, так как сопротивление коллекторного перехода значительно выше, чем эмиттерного. Так как через барьерную емкость коллекторного перехода ответвляется часть тока, то ток коллектора уменьшается, а следовательно, уменьшаются коэффициент передачи (усиления) тока и коэффициент усиления по мощности.

С повышением частоты коэффициенты H_{21} эмиттера и базы становятся комплексными, изменяются как их модули, так и фазовый угол между входным и выходным токами. Коэффициент усиления по мощности также уменьшается и становится величиной комплексной. Чтобы оценить частотные свойства транзистора и возможность его работы в схеме с сигналами заданной частоты, вводят частотные параметры:

1) *предельную частоту коэффициента передачи тока эмиттера в схеме с ОБ* $f_{H_{21б}}$, где коэффициент передачи тока эмиттера уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с его значением на низкой частоте;

2) *предельную частоту коэффициента передачи тока базы в схеме с ОЭ* $f_{H_{21б}}$, где коэффициент передачи тока базы уменьшается в $\sqrt{2}$;

3) *граничную частоту передачи тока базы в схеме с ОЭ* $f_{гр}$, при которой модуль коэффициента передачи тока базы становится равным единице;

4) *максимальную частоту генерации* $f_{макс}$, при которой коэффициент усиления по мощности становится равным единице. Этот частотный параметр является особенно важным, так как устанавливает диапазон частот, в котором транзистор будет обладать способностью усиливать сигналы.

Параметры режимов отсечки и насыщения. Рассмотренные статические параметры являются параметрами транзистора в активном режиме. В режиме *отсечки* параметрами транзистора служат обратные токи коллекторного и эмиттерного переходов — $I_{ко}$ и $I_{эо}$. Ток $I_{ко}$

измеряют при заданном обратном напряжении «коллектор–база» и разомкнутом выводе эмиттера, ток $I_{\text{эо}}$ — при заданном обратном напряжении «эмиттер–база» и разомкнутом выводе коллектора. Статические параметры в режиме *насыщения* — это напряжения между выводами «коллектор–эмиттер» при заданных токах базы и коллектора и выводами «база–эмиттер» при заданных токах базы и коллектора.

17.3.4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Полевые транзисторы — это полупроводниковые приборы, усилительные свойства которых обусловлены потоком основных носителей заряда через проводящий канал, управляемых электрическим полем. В полевых транзисторах используют эффект воздействия поперечного электрического поля на проводимость канала, по которому движутся носители электрического заряда.

Полевые транзисторы предназначены для усиления мощности и преобразования электрических колебаний. В полевых транзисторах в образовании выходного тока участвуют носители только одного типа — дырки или электроны, поэтому они являются униполярными. Носители заряда являются основными для активной области — канала полевого транзистора. Существует два типа полевых транзисторов: с управляющим *p–n*-переходом и изолированным затвором (МДП-транзисторы, «металл–диэлектрик–полупроводник»).

Транзисторы с управляющим *p–n*-переходом. Рассмотрим упрощенную структуру и принцип действия транзистора с управляющим *p–n*-переходом (рис. 17.33а). Транзистор представляет собой пластину полупроводника *n*- или *p*-типа, на гранях которой созданы области противоположного типа электропроводности *З*, на границах между которыми образованы *p–n*-переходы. На торцевых сторонах пластины формируют омические контакты. Контакты областей *З* соединены между собой и образуют общий контакт. От всех трех контактов имеются выводы. Часть объема пластины полупроводника, расположенная между *p–n*-переходами, является активной частью транзистора — канал транзистора. Контакт, через который носители заряда входят в канал, называют

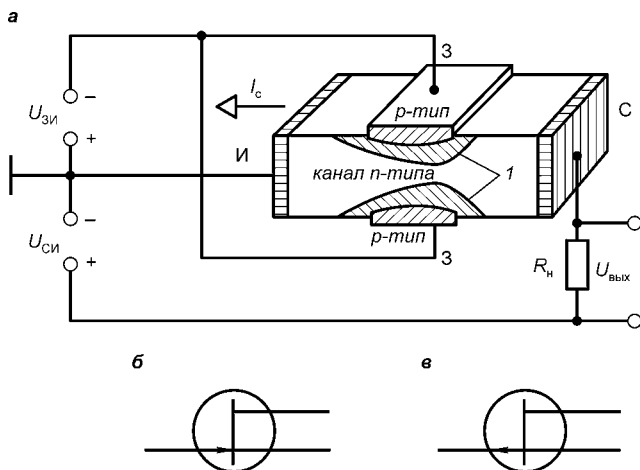


Рис. 17.33
Полевой транзистор

а — схематическое изображение; *б* — обозначение с каналом проводимости *n*-типа; *в* — обозначение с каналом проводимости *p*-типа; *1* — обедненный слой проводимости.

истоком (*И*); контакт, через который носители заряда вытекают, называют стоком (*С*); общий электрод от контактов областей 3 — затвором (*З*). На рис. 17.33а представлен транзистор на основе пластины полупроводника *n*-типа с областями на гранях *p*-типа.

На *p-n*-переходы подается обратное напряжение смещения (минус на затворе по отношению к истоку). Если бы канал был *p*-типа, а области на гранях *n*-типа, то полярность была бы обратной. При изменении напряжения $U_{зи}$ изменяются ширина *p-n*-перехода, а следовательно, и сечение канала и его электрическое сопротивление. Таким образом, с помощью напряжения $U_{зи}$ можно управлять сопротивлением канала.

Если между истоком и стоком включить источник напряжения $U_{си}$ так, чтобы потенциал стока был положительным относительно истока, то через канал начнет дрейф основных для канала носителей заряда (электронов) от истока к стоку, т. е. в канале появляется ток I_c (направление тока от стока к истоку). Включение источника $U_{си}$ влияет и на ширину *p-n*-переходов, так как напряжение на *p-n*-переходе оказывается разным в области стока и истока. Потенциал канала меняется по его

длине: потенциал истока равен нулю, повышаясь в сторону стока, потенциал стока равен $U_{\text{СИ}}$. Напряжение смещения на p - n -переходе вблизи истока равно $|U_{\text{ЗИ}}|$, вблизи стока $|U_{\text{ЗИ}}| + U_{\text{СИ}}$, т. е. ширина p - n -перехода больше со стороны стока, а сечение канала и, следовательно, сопротивление его минимальное вблизи стока (1 — на рис. 17.33а). Таким образом, током через канал можно управлять путем изменения напряжений $U_{\text{ЗИ}}$ (изменяет сечение канала) и $U_{\text{СИ}}$ (изменяет ток и сечение по длине канала).

Обратное напряжение смещения $U_{\text{ЗИ}}$, при котором наступает режим отсечки и транзистор оказывается запертым (тока в нем нет, $I_{\text{С}} = 0$), называют *напряжением отсечки* $U_{\text{ЗИотс}}$. При этом значении напряжения p - n -переходы смыкаются и поперечное сечение канала становится равным нулю.

Напряжение на стоке, при котором суммарное напряжение $|U_{\text{ЗИ}}| + U_{\text{СИнас}}$ становится равным напряжению отсечки $U_{\text{ЗИотс}}$, называют напряжением насыщения $U_{\text{СИнас}}$. Следовательно,

$$U_{\text{СИнас}} = |U_{\text{ЗИотс}}| - |U_{\text{ЗИ}}|. \quad (17.44)$$

Режиму насыщения соответствует условие, когда $U_{\text{СИ}} > U_{\text{СИнас}}$. При этом почти прекращается рост тока $I_{\text{С}}$, несмотря на увеличение напряжения $U_{\text{СИ}}$. Это объясняется тем, что одновременно увеличивается обратное напряжение на затворе $U_{\text{ЗИ}}$ (17.44), вследствие чего канал сужается, что уменьшает ток $I_{\text{С}}$ до установившегося значения.

Сравнивая оба режима, можно заключить, что в режиме отсечки сопротивление канала стремится к бесконечности, и при $R_{\text{к}} = \infty$ ток $I_{\text{С}} = 0$, а в режиме насыщения дифференциальное сопротивление

$$R_{\text{Кдиф}} = dU_{\text{СИ}}/dI_{\text{С}} \rightarrow \infty,$$

а ток $I_{\text{С}}$ с ростом $U_{\text{СИ}}$ остается без изменения.

Полевые транзисторы, как и биполярные, имеют три схемы включения (рис. 17.34): с общим истоком ОИ (а), общим стоком ОС (б) и с общим затвором ОЗ с каналом n -типа (в). Основной схемой включения является схема с ОИ (см. рис. 17.33а).

Основными статическими характеристиками транзистора с управляющим p - n -переходом являются выход-



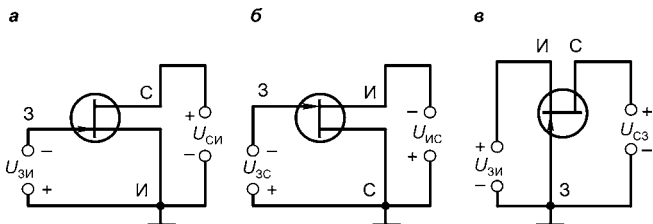


Рис. 17.34
Схемы включения транзисторов

а — с общим истоком ОИ; б — с общим стоком ОС; в — с общим затвором ОЗ.

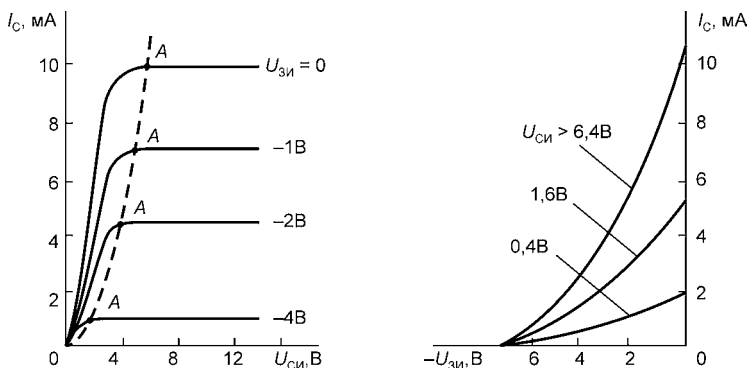


Рис. 17.35
Статические характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом
а — стоковые; б — прямой передачи.

ные (стоковые) и характеристики прямой передачи (сток-затворные).

Стоковые характеристики — это зависимости $I_C = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$ (рис. 17.35а).

В динамическом режиме на работу транзистора существенное влияние оказывают зарядные емкости p - n -переходов (входная и проходная). Входная емкость — это часть барьерной емкости p - n -перехода между затвором и истоком, а проходная — часть барьерной емкости p - n -перехода между затвором и стоком. Зарядка и последующая разрядка емкостей происходит не мгновенно, что и обуславливает инерционность прибора, а следовательно, влияет на частотные свойства полевых транзисторов.

С повышением $U_{СИ}$ ток I_C увеличивается почти прямолинейно и при достижении $U_{СИ} = U_{СИ\text{нас}}$ (точки А) рост

I_C прекращается. Насыщение наступает при минимальных значениях $U_{СИ}$ и больших $|U_{ЗИ}|$.

На рис. 17.35б показано семейство характеристик прямой передачи зависимости $I_C = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$.

Основными параметрами транзисторов с управляющим p - n -переходом являются:

1) *крутизна стокозатворной характеристики*, представляющая отношение изменения тока стока к изменению напряжения на затворе при коротком замыкании при меняющемся токе на выходе транзистора в схеме с ОИ:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}}. \text{ Крутизна характеризует управляющее}$$

действие затвора. Ее измеряют при $U_{ЗИ} = 0$ и $U_{СИ} = U_{СИ\text{нас}}$ по характеристике прямой передачи. Значения обычно составляют несколько миллиампер на вольт;

2) *входное дифференциальное сопротивление*

$$R_{\text{вх.диф}} = \left. \frac{dU_{ЗИ}}{dI_3} \right|_{U_{СИ} = \text{const}},$$

где I_3 — ток затвора, вызванный движением неосновных носителей через p - n -переход. Так как концентрация неосновных носителей невелика, то обратный ток мал и почти не зависит от напряжения $|U_{ЗИ}|$. Поэтому входное сопротивление очень велико и составляет $10^8 \dots 10^{10}$ Ом;

3) *выходное дифференциальное сопротивление* (дифференциальное сопротивление цепи стока)

$$R_{\text{вых.диф}} = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ} = \text{const}}.$$

Это сопротивление равно $10^5 \dots 10^7$ Ом;

4) *напряжение отсечки* $U_{ЗИ\text{отс}}$ — это напряжение на затворе при $I_C = 0$ и $U_{СИ} > 0$;

5) *междуэлектродные емкости*: $C_{ЗИ}$ — затвор–исток, $C_{ЗС}$ — затвор–сток, $C_{СИ}$ — сток–исток. Эти емкости измеряют при разомкнутых по переменному току остальных выводах.

Транзисторы с изолированным затвором. Транзисторы этого типа, как отмечалось ранее, называют также МДП-транзисторами (металл–диэлектрик–полупроводник) или МОП-транзисторами (если в качестве диэлектрика используют окисел, например диоксид кремния SiO_2).

Последний тип транзистора еще называют типом MOSFET, у него управление осуществляется через затвор, изолированный от p - n -перехода тонким слоем оксида. МДП-транзисторы бывают двух типов: со встроенным каналом и с индуцированным. Основу МДП-транзистора со встроенным каналом

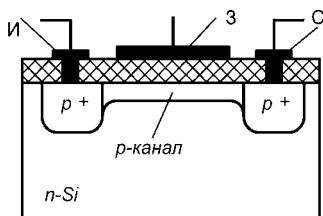


Рис. 17.36
Структура МДП-транзистора

(рис. 17.36) составляет слабо насыщенная примесью пластина полупроводника с электропроводностью n - или p -типа (на рис. 17.36 — n -Si), в которой созданы две сильно насыщенные примесью области противоположного типа электропроводности (на рисунке p^+). Расстояние между p^+ -областями — 1 мкм. Они соединены тонким слоем полупроводника того же типа электропроводности, что и p^+ -области. Однако этот слой слабо насыщен примесью (p -канал). Поверхность пластины полупроводника покрыта слоем диэлектрика толщиной 0,1 мкм. На слой диэлектрика над каналом нанесен металлический контакт — затвор 3. Области p^+ также имеют металлические контакты, один из которых называют истоком И, другой — стоком С. Обычно для пластины полупроводника используют кремний, а в качестве диэлектрика — пленку диоксида кремния, выращенную на поверхности кремния путем окисления его при высокой температуре.

На рис. 17.37 показаны схемы включения МДП-транзистора: с общим истоком ОИ (а); с общим стоком ОС (б); с общим затвором ОЗ (в); полярность выводов на рисунке не показана, так как она зависит от режима работы транзистора.

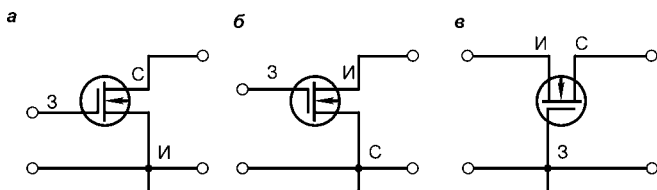


Рис. 17.37
Схемы включения МДП-транзистора

а — с общим истоком ОИ; б — с общим стоком ОС; в — с общим затвором ОЗ.

Принцип работы МДП-транзистора со встроенным каналом рассмотрим на примере схемы с ОИ (рис. 17.37а). В полупроводнике $З$ у его поверхности в электрическом поле в зависимости от его полярности происходит обеднение или обогащение приповерхностного слоя носителями заряда. Направление электрического поля определяется знаком потенциала на затворе относительно пластины полупроводника.

Если на затвор подан положительный потенциал $U_{зи}$, электрическое поле будет выталкивать дырки из канала и проводимость канала уменьшится. Если на затвор подан отрицательный потенциал, то дырки начнут втягиваться в канал и обогащать его основными носителями, проводимость канала увеличится. В первом случае транзистор работает в режиме обеднения, во втором случае — в режиме обогащения. Если исток и сток подсоединить к источнику питания $U_{си}$, то начнется дрейф дырок через канал — появится ток стока I_c , значение которого зависит от напряжений $U_{си}$ и $U_{зи}$. При появлении тока в канале создается падение напряжения. Потенциал истока равен нулю, а потенциал стока равен $-U_{си}$ (как и в транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом). На границе пластины n -типа с областями p -типа и каналом p -типа образуется переход, который смещен в обратном направлении. Так как в МДП-транзисторах затвор изолирован от полупроводника пленкой диэлектрика, то эти транзисторы могут работать как при положительном, так и при отрицательном напряжении $U_{зи}$.

Статические характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом p -типа показаны на рис. 17.38: выходные (стоковые) — на рис. 17.38а, характеристика пе-

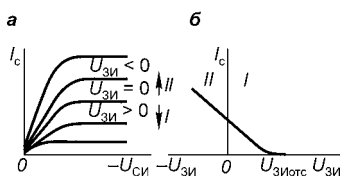


Рис. 17.38

Статические характеристики
МДП-транзисторов

а — выходные; б — передачи.

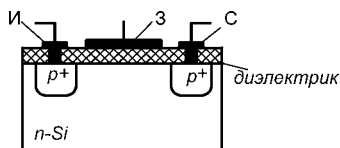


Рис. 17.39

Структура МДП-транзистора
с индуцированным каналом

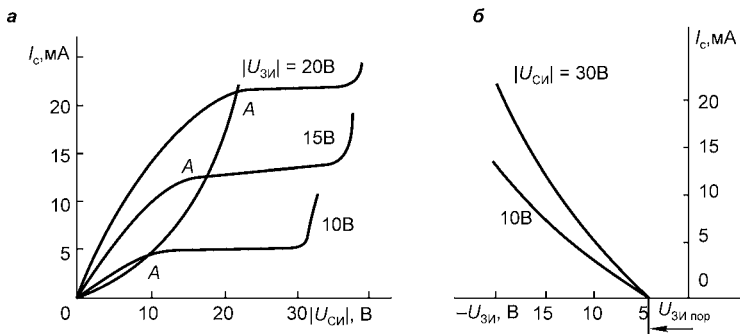


Рис. 17.40
Статические характеристики МДП-транзистора
с индуцированным каналом
а — выходные; б — передачи.

редачи (стокзатворная) — на рис. 17.38б. Область I — режим обеднения, область II — режим обогащения.

В МДП-транзисторах с индуцированным каналом (рис. 17.39) канал не создается в процессе изготовления, а образуется под воздействием электрического поля.

Если к транзистору с ОИ подключить напряжение $U_{си}$, то в цепи стока появится обратный ток p – n -перехода, значение которого очень мало. При подключении в цепь затвора напряжения $U_{зи}$ так, чтобы потенциал затвора относительно истока и пластины был обязательно отрицательным (для транзистора на рис. 17.39), под действием электрического поля под затвором приповерхностный слой пластины полупроводника обеднится. Если $U_{зи}$ достигнет так называемого *порогового* напряжения ($U_{зи} = U_{зи\text{пор}}$), то слой полупроводника под затвором настолько обеднится, что произойдет его *инверсия* — образуется объединенный канал p -типа. Если напряжение между стоком и истоком $U_{си} \neq 0$, то в канале возникнет ток стока. Увеличивая напряжение на затворе $U_{зи} > U_{зи\text{пор}}$, можно менять толщину и поперечное сечение канала проводимости и тем самым его сопротивление, а следовательно, и ток I_c . На значение I_c влияет также напряжение $U_{си}$.

Семейство *выходных статических характеристик* (рис. 17.40а) аналогично семейству выходных характеристик транзистора с управляющим p – n -переходом. Однако характеристика для напряжения $U_{зи} = 0$ в этом

случае отсутствует, так как канал индуцируется только при $U_{\text{ЗИ}} > U_{\text{ЗИпор}}$.

Характеристики передачи (рис. 17.40б) — это зависимости $I_{\text{С}} = f(U_{\text{ЗИ}})$, снятые при $U_{\text{СИ}} = \text{const}$. Характеристики сдвинуты относительно нуля координат на $U_{\text{ЗИпор}}$.

Параметры МДП-транзисторов те же, что и для транзисторов с управляющим p - n -переходом. В качестве параметра используют также *крутизну характеристики (по подложке)*:

$$S_{\Pi} = \left. \frac{dI_{\text{Снас}}}{dU_{\Pi}} \right|_{U_{\text{ЗИ}} = \text{const}, U_{\text{СИ}} = \text{const}}.$$

С помощью этого параметра учитывается влияние напряжения на пластине на ток стока ($S_{\Pi} < S$).

Условные обозначения полевых МДП-транзисторов представлены на рис. 17.41, причем на рис. 17.41а, в даны условные обозначения транзистора со встроенным n - и p -каналом, а на рис. 17.41б, г — с индуцированным n - и p -каналом.

МДП-транзисторы с индуцированным каналом используют чаще, чем транзисторы со встроенным каналом.

Применение полевых транзисторов. Полевые транзисторы нашли широкое применение в радиоэлектронике. МДП-транзисторы имеют очень высокое входное сопротивление ($R_{\text{вх}} > 10^{14}$ Ом). Транзисторы с управляющим p - n -переходом имеют более низкое входное сопротивление (до 10^{11} Ом при комнатной температуре). Кроме того, параметры МДП-транзисторов меньше зависят от температуры, чем параметры биполярных транзисторов (так как принцип их работы основан на использовании только основных носителей).

Полевые транзисторы могут работать при низких температурах (вплоть до близких к абсолютному нулю), имеют высокую стабильность параметров во времени при воздействии различных внешних факторов. Обладают вы-

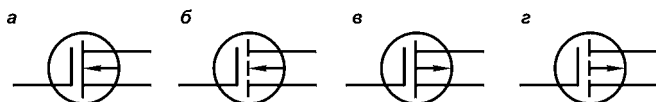


Рис. 17.41

Обозначения МДП-транзисторов

а — с встроенным n -каналом; б — с индуцированным n -каналом; в — со встроенным p -каналом; г — с индуцированным p -каналом.

сокой радиационной устойчивостью (на порядок больше, чем кремниевые биполярные), что важно при использовании транзисторов в космической технике, и низким уровнем шумов в области частот до 10 Гц. Коэффициент шума составляет 0,1 дБ при сопротивлении источника сигнала 1 МОм.

При использовании полевых транзисторов в интегральных микросхемах (интегральные микросхемы — компактные многофункциональные электронные устройства в одном корпусе) удастся получать высокую плотность расположения элементов (на порядок выше, чем в схемах на биполярных транзисторах). В монолитных интегральных схемах на МДП-транзисторах их можно использовать в качестве резисторов (МДП-транзисторы, работающие на ненасыщенных участках статических характеристик). Полевые транзисторы применяют в логических схемах, так как большие матрицы из этих элементов располагаются очень компактно. Их широко используют в цифровых вычислительных машинах. Однако, несмотря на целый ряд преимуществ полевых транзисторов по сравнению с биполярными, они не могут заменить их полностью. Это, в частности, связано с малым коэффициентом усиления полевых транзисторов. Рабочий диапазон частот полевых транзисторов значительно меньше, чем биполярных: их чаще всего используют до частот в несколько мегагерц. В гибридных приборах совместно используются и полевые, и биполярные транзисторы, что позволяет создавать схемы с улучшенными свойствами. Полевые транзисторы применяют в схемах усилителей, генераторов и коммутирующих элементов.

17.4. ТИРИСТОРЫ

17.4.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ТИРИСТОРОВ И ИХ РАЗНОВИДНОСТИ

Тиристор — это четырехслойный полупроводниковый прибор, имеющий два устойчивых состояния: закрытое и открытое.

В настоящее время эти приборы получили широкое распространение в преобразователях электрической энергии и бесконтактной пускорегулирующей аппаратуре.

К преимуществам тиристоров относятся: большой срок службы, высокий КПД, малая чувствительность к вибрации и механическим перегрузкам, способность работать при низких (прямых) и высоких (обратных) напряжениях, а также при очень больших токах, достигающих единиц килоампер. Основное свойство тиристора, обеспечивающее ему самые разнообразные применения в автоматике, электронике, энергетике — это способность находиться в двух устойчивых состояниях: закрытом и открытом. В закрытом состоянии сопротивление тиристора составляет десятки мегаом, и он практически не пропускает ток при напряжениях единиц тысяч вольт, а в открытом состоянии сопротивление тиристора незначительно. Падение напряжения на нем — около 1 В при токах в сотни ампер. Переход тиристора из одного состояния в другое происходит за очень короткое время. Разновидностями тиристоров являются *динистор*, *симметричный тиристор* и *фототиристор*. Среди них выделяют *динисторы*. Этот прибор является разновидностью тиристора с двумя электродами (выводами). У него отсутствует управляющий электрод. Переход динистора из одного состояния в другое осуществляется изменением значения или полярности напряжения на выводах.

Тиристор снабжен тремя электродами. Управляющий электрод позволяет с помощью небольшого сигнала управления (импульса напряжения) перевести тиристор из закрытого состояния в открытое при неизменном (заданном) напряжении на основных электродах. Обратный переход из открытого состояния в закрытое с помощью управляющего напряжения невозможен.

Структура тиристора содержит четыре ($p-n-p-n$) или пять ($p-n-p-n-p$) слоев. В последнем случае тиристор называют *симметричным (симистор)*.

Четырехслойная структура тиристора изображена на рис. 17.42а. Тиристор содержит три $p-n$ -перехода Π_1 , Π_2 , Π_3 . Чтобы повысить эффективность управляющего сигнала, слой, к которому подключен управляющий электрод, делают тоньше остальных.

При отсутствии напряжения на управляющем электроде и при отрицательном напряжении на аноде относительно катода электронно-дырочные переходы Π_1 и Π_3

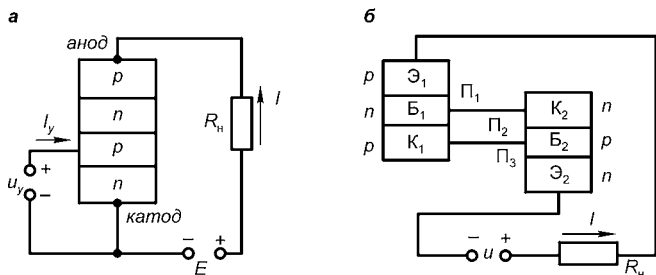


Рис. 17.42
Тиристор

а — структура; б — двухтранзисторный аналог.

оказываются включенными в обратном направлении, а переход Π_2 — в прямом направлении. При этом протекает очень малый ток. Наличие тока I_y через управляющий переход в этом случае не изменяет общего состояния структуры, и тиристор остается запертым. Если к p - n - p - n -структуре приложено прямое напряжение (плюс на аноде), переходы Π_1 и Π_3 смещаются в прямом направлении, а переход Π_2 — в обратном. При отсутствии напряжения на управляющем электроде тиристор остается запертым, и все напряжение оказывается приложенным к переходу Π_2 .

Четырехслойную структуру тиристора можно представить в виде двух соответствующим образом соединенных транзисторов p - n - p - и n - p - n -типов (рис. 17.42б). Как видно из схемы, к переходам Π_1 и Π_3 подведено прямое напряжение, а к переходу Π_2 — обратное. Если бы не было переходов Π_1 и Π_3 , тиристор стал бы диодом и через переход Π_2 замыкался бы обратный ток I_0 .

При наличии переходов Π_1 и Π_3 управляющий ток тиристора I_y является базовым током транзистора T_2 (рис. 17.43). Этот ток усиливает инжекцию носителей со стороны эмиттера \mathcal{E}_2 , так что коллекторный ток I_{K2} равен $I_{K2} = \alpha_2 I_{\mathcal{E}2}$ или $I_{K2} = \beta_2 I_{B2}$ (α и β — коэффициенты передачи тока эмиттера и тока базы соответственно). Одновременно ток I_{K2} является также базовым током I_{B1} транзистора T_1 . Этот базовый ток обуславливает инжекцию носителей эмиттера \mathcal{E}_1 .

Ток I_{K1} равен $I_{K1} = \alpha_1 I_{\mathcal{E}1}$ или $I_{K1} = \beta_1 I_{B1}$, где $\beta_1 = \alpha_1 / (1 - \alpha_1)$. Из рис. 17.43 видно, что $I_{B2} = I_{K1} + I_y$, следовательно, обратная связь в этой схеме положительна. Если

можно выделить несколько характерных участков. При малых значениях напряжения U ток в цепи, а следовательно, и коэффициенты α_1 и α_2 малы, при этом $I \approx I_0$ и тиристор ведет себя как диод, включенный в обратном направлении (участок 1). При достижении напряжением критического значения $U_{\text{вкл}}$ (точка 2) коэффициенты α_1 и α_2 быстро возрастают, и ток скачком переходит на возрастающую ветвь характеристики (участок 4). При этом он превышает некоторое значение тока удержания тиристора в открытом состоянии $I_{\text{уд}}$. Участок 3 характеристики соответствует незначительному росту тока даже при снижении напряжения. Это свидетельствует о том, что на данном участке тиристор имеет *отрицательное* сопротивление. Смена напряжения на тиристоре на обратное приводит к обратному смещению переходов Π_1 и Π_3 (участок 5). При этом имеет место обратный ток утечки тиристора. При увеличении обратного напряжения до некоторого значения происходит пробой переходов (участок 6), который может привести к разрушению тиристора. Характерным значением тока является *ток включения* $I_{\text{вкл}}$, при котором сопротивление тиристора становится отрицательным.

Удерживать тиристор во включенном состоянии можно, увеличив анодный ток выше некоторого значения — тока *удержания* $I_{\text{уд}}$ (на вольтамперной характеристике ток удержания соответствует переключению тиристора в проводящее состояние при токе управления, равном нулю).

Динистор — это тиристор с двумя электродами. Его включение и выключение происходит за счет изменения значения и полярности прикладываемого напряжения.

Если к электроду А динистора (рис. 17.45) приложить положительное относительно электрода К напряжение, то к переходам Π_2 и Π_4 будет приложено прямое, а к переходам Π_1 и Π_3 — обратное напряжение. При постепенном увеличении приложенного напряжения в переходе Π_3 будет достигнуто напряжение лавинного пробоя, и любое дальнейшее возрастание напряжения будет вызывать значительный ток через переход Π_3 . Ток через переход Π_1 очень мал, так как к нему в данном случае приложено обратное напряжение. Следовательно, ток в левой части прибора должен преодолевать сопротивление слоя p_1 .

Так как в приборе переход Π_4 шунтирован, то наличие на нем прямого напряжения будет зависеть от тока, протекающего вдоль области p_2 .

При малых токах до момента, пока переход Π_3 не работает в режиме лавинного пробоя, на переходе Π_4 действует незначительное прямое напряжение, и он представляет большое сопротивление, т. е. практически через него не инжектируются носители заряда в область p_2 .

При развитии в переходе Π_3 лавинного пробоя начинается инжекция носителей заряда в область p_2 . Это равносильно случаю, когда к $n-p-n-p$ -структуре приложено прямое напряжение. При перемене полярности приложенного напряжения аналогично будет происходить включение правой части структуры.

Таким образом, пятислойную структуру с зашунтированными крайними переходами можно рассматривать как две $p-n-p-n$ -структуры, включенные параллельно, но ориентированные в противоположных направлениях.

Вольт-амперная характеристика симметричного переключателя имеет вид, приведенный на рис. 17.46.

На основе пятислойной структуры динистора (симметричного переключателя) разработан прибор, переключающийся при подаче управляющего сигнала — *симметричный тиристор (симистор)*.

Схематическое изображение структуры симистора показано на рис. 17.47а. Управляющий электрод расположен в центре структуры, а верхние металлические контакты левой и правой частей электрически связаны между собой. Переходы Π_1 и Π_4 шунтируются металлическими контактами с целью обеспечения их низкой эффективности при протекании малых токов.

Если прибор находится в закрытом состоянии, то на электрод А подано положительное относительно электрода К напряжение. Подача на управляющий электрод положительного относительно электрода А напряжения обуславливает инжекцию электронов через переход Π_5 , кото-

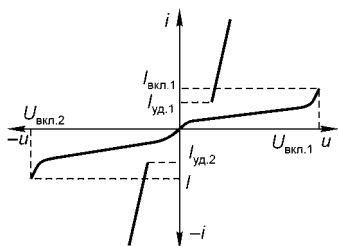
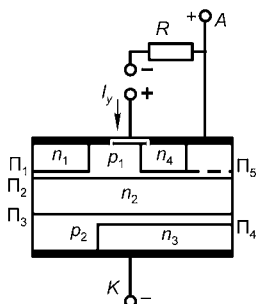


Рис. 17.46
Вольт-амперная характеристика симметричного переключателя (динистора)

৯



6

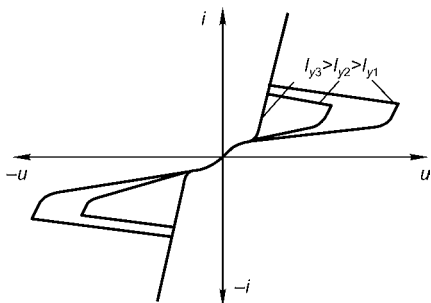


Рис. 17.47
Симистор

a — структура; b — вольт-амперная характеристика в зависимости от тока управления.

рые, диффундируя к переходу P_2 , понижают потенциал области n_2 относительно области p_1 и вызывают инжекцию дырок из слоя p_1 в слой n_2 . Дырки диффундируют к переходу P_3 и переносятся полем этого перехода в слой p_2 , двигаясь вдоль этого слоя к контакту. В результате появления дырочного тока возникает падение напряжения между слоями p_2 и n_3 , достаточное для того, чтобы через переход P_4 стали интенсивно инжектироваться электроны в область p_2 . Таким образом, создаются условия для переключения правой половины структуры в проводящее состояние.

Если к электроду *A* приложить отрицательный относительно электрода *K* потенциал, прибор будет вести себя как обычный тиристор с зашунтированным эмиттерным переходом, т. е. при подаче положительного напряжения на управляющий электрод в проводящее состояние переключится левая половина структуры. В результате структура симистора переключается в любом направлении при приложении к управляющему электроду положительного напряжения по отношению к аноду. Следует отметить, что с увеличением тока управления можно исключить область отрицательного сопротивления (рис. 17.47б).

При определенном значении тока управления $I_{у3}$ вольт-амперная характеристика примет вид спрямленной характеристики. Аналогичную зависимость от тока управления можно отнести и к несимметричному тиристор.

Внешнее световое воздействие на полупроводник позволило создать новый тип тиристора — *фототиристор*,

отпирание которого производится с помощью светового потока. В фототиристорах используется так называемый *внешний эффект*, который состоит в том, что при облучении фотокатода светом возникает явление фотоэлектронной эмиссии. При этом ток фотоэмиссии прямо пропорционален световому потоку (закон Столетова):

$$I_{\Phi} = k\Phi, \quad (17.46)$$

где I_{Φ} — ток фотоэмиссии, Φ — световой поток, k — интегральная чувствительность фотокатода.

Согласно фотонной теории света, лучистая энергия излучается и поглощается не как непрерывный поток, а определенными порциями — квантами. Энергия W кванта (фотона) зависит от частоты излучения $\nu_{\text{и}}$:

$$W = h\nu_{\text{и}},$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Когда поток фотонов попадает на фотокатод, энергия фотонов передается свободным электронам, которые, совершая определенную работу выхода W_0 , покидают катод с начальной скоростью v_0 . В соответствии с уравнением Эйнштейна

$$h\nu_{\text{и}} = W_0 + \frac{m_e v_0^2}{2},$$

из которого следует, что электрон может покинуть катод, если работа выхода меньше энергии кванта.

В полупроводнике, напротив, действует *внутренний эффект*, где под действием световой энергии возникают подвижные носители зарядов — пары «электрон–дырка». При этом энергия фотона идет на перемещение электрона из валентной зоны в зону проводимости, и сопротивление полупроводника уменьшается. Именно на использовании этих явлений строится конструкция фототиристора, фотодиода и др. элементов.

На рис. 17.48 дано схематическое изображение p – n – p – n -структуры, управляемой светом. При отсутствии освещения, когда на анод подано положительное по отношению к катоду напряжение, переходы Π_1 и Π_3 смещены в прямом направлении, а переход Π_2 — в обратном, т. е. прибор находится в запертом состоянии. При освещении полупроводника в освещаемой области происходит генерация пар «электрон–дырка». Электроны, воз-

никающие у поверхности области p_2 , диффундируют к переходу Π_2 и, будучи основными носителями в области p_2 , свободно проходят этот переход в область n_1 . При увеличении интенсивности излучения количество этих носителей возрастает, приводя к возрастанию коэффициентов усиления по току α_1 и α_2 эквивалентных транзисторов разного типа. При некоторой интенсивности излучения суммарный коэффициент усиления становится равным единице, и прибор переключается в проводящее состояние.

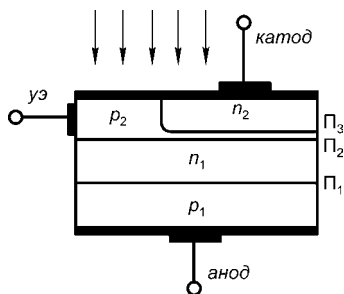


Рис. 17.48
Структура фототиристора

Конструктивно фототиристор отличается от обычного наличием окна в корпусе прибора, пропускающего поток света. При этом для обеспечения максимальной чувствительности пластина кремния должна ориентироваться перпендикулярно световому потоку.

Управление фототиристором обеспечивается интенсивностью излучения, мощность которого зависит от спектральной чувствительности прибора.

17.4.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ТИРИСТОРОВ

Изготовление структуры различной проводимости может быть реализовано диффузией, сплавлением, выращиванием полупроводниковых пленок. Наибольшее распространение при получении многослойных структур получила диффузионная технология. После очистки монокристалла кремния толщиной до 0,7 мм и диаметром до 70 мм (для силовых приборов средней мощности) производится диффузионный процесс внесения примеси p -типа. При изготовлении тиристоров повторной диффузией внедряют примеси n -типа. При изготовлении многослойных структур должно выполняться определенное соответствие между донорами атомов N_d и примесью, как стилизованным образом показано на рис. 17.49. Для повышения предельного напряжения приборов эмиттерный переход

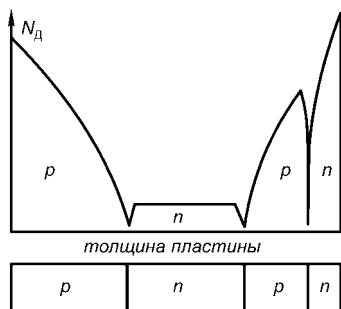


Рис. 17.49
Распределение концентраций примесей при изготовлении многослойных структур

шунтируется конструктивно малым сопротивлением. Кремниевую шайбу прибора для отвода теплоты напаивают на вольфрамовый диск, по периметру которого снимается фаска. Съем фаски под определенным углом к плоскости кремниевой шайбы обеспечивает уменьшение напряженности электрического поля на p - n -переходах в местах выхода их на боковую поверхность.

Конструкция силовых полупроводниковых приборов должна обеспечивать удобство их использования, эксплуатационную надежность, минимальные массу и габаритные размеры, надежную герметичность корпуса, хороший электрический и тепловой контакт между отдельными элементами, надежное соединение с охладителями. Важным показателем конструкции приборов при их использовании в силовых устройствах является удобство их соединения между собой.

Конструктивное исполнение силовых полупроводниковых приборов должно обеспечивать простое и надежное соединение с охладителем.

По виду конструкции корпуса все силовые полупроводниковые приборы делятся на штыревые, с плоским основанием, таблеточные и выполненные совместно с системой охлаждения. На рис. 17.50а приведена конструкция штыревого прибора.

К основанию корпуса 1 припаян элемент, состоящий из кремниевой пластины 3, помещенной между двумя вольфрамовыми дисками. На верхнем вольфрамовом диске имеется отверстие, служащее для размещения молибденовой пластины, к которой припаян внутренний управляющий вывод 2, соединенный через изолированную стальную втулку 4 с наконечником управляющего электрода 5. К верхнему вольфрамовому диску припаяна чашечка 6, в которую впаивается внутренний гибкий вывод 7, соединенный внутри стальной втулки с силовым внешним гибким выводом 8, снабженным наконечни-

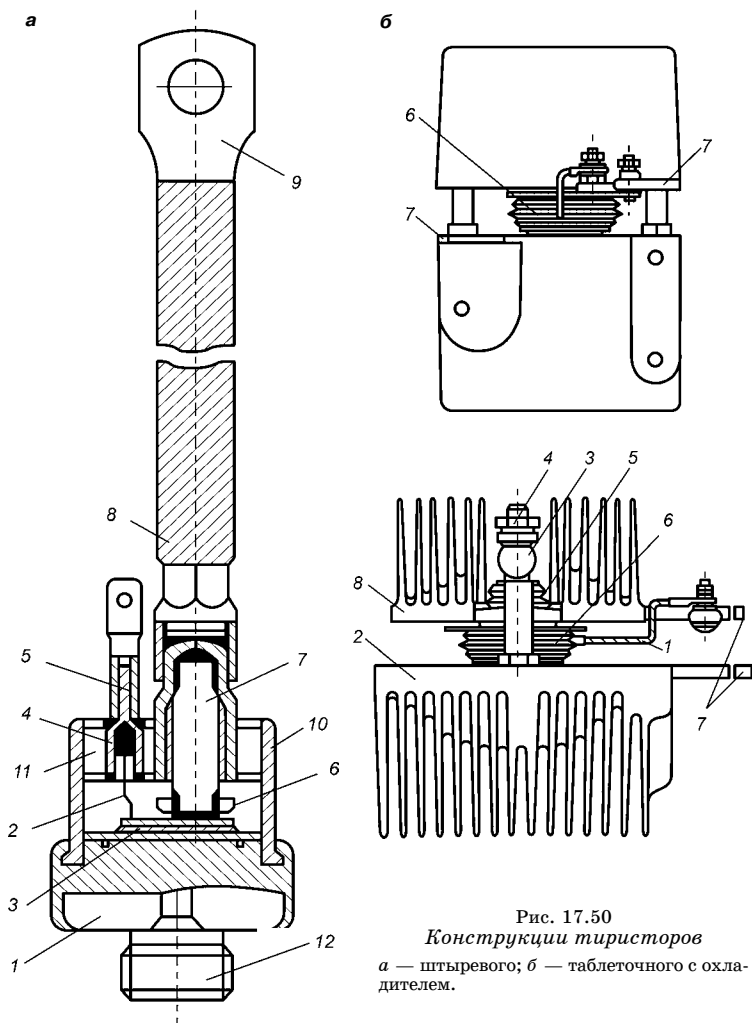


Рис. 17.50
Конструкции тиристоров

а — штыревого; *б* — таблеточного с охладителем.

ком 9. В основании имеется кольцевая выточка, в которую непосредственно перед установкой корпуса 10 закладывается кольцевая фторопластовая прокладка, что вместе с завальцовкой стыка крышки и основания обеспечивает необходимую степень герметизации. Выводы катодного и управляющего электродов осуществляют через металlostеклянную крышку 11. Основание корпуса изготавливают совместно с нарезным болтом 12, который навинчивают на охладитель-радиатор.

На рис. 17.50б приведена конструкция таблеточного тиристора с охладителем. Тиристор выполнен в виде таблетки 6 в гофрированном керамическом корпусе, обеспечивающем защиту полупроводникового элемента от загрязнений и механических повреждений. Управляющий электрод 1 тиристора выведен на боковую поверхность корпуса. Таблеточный прибор помещен между двумя охладителями 2 и 8 таким образом, что торцевые металлические поверхности тиристора соприкасаются с охладителями, создавая электрический и тепловой контакт. Необходимое прижимающее усилие таблетки к охладителю обеспечивается тарельчатыми пружинами 4 и передается через траверсу 3 на изолятор 5 и далее на верхний охладитель 8. Подключение тиристора к электрической цепи производится посредством токоведущих пластин 7. Иногда для лучшего контакта тиристора с охладителями между ними помещается тонкая прокладка из мягкого токопроводящего материала (индия, олова и др.). Электрические потери, возникающие в приборе при прохождении через него тока, обуславливают выделение теплоты, которая отводится с помощью охладителей. Качество охладителя характеризуется его тепловым сопротивлением. Тепловое сопротивление показывает, на сколько градусов температура поверхности охладителя, соприкасающейся с прибором, больше температуры охлаждающего агента при отводе охладителем от прибора единицы мощности. Чем меньше тепловое сопротивление охладителя, тем большую мощность можно отвести от прибора, тем больше предельный ток прибора.

Наибольшее распространение получили два способа охлаждения: воздушное, которое в свою очередь может быть естественным и принудительным, и водяное. При естественном воздушном охлаждении теплопередача осуществляется за счет теплопроводности через граничный слой воздуха, соприкасающийся с поверхностью охладителя, и последующей свободной конвекции, а также за счет лучистого обмена. Теплопередача при принудительном воздушном охлаждении осуществляется в основном за счет вынужденной конвекции. При воздушном охлаждении применяются охладители, имеющие развитую за счет ребер поверхность (рис. 17.50б). Материалами для охладителей служат медь и алюминий. В послед-

нее время все чаще применяются алюминиевые охладители, имеющие меньшую массу и стоимость. Однако ввиду значительной электрохимической разности потенциалов «медь–алюминий» возникает (особенно во влажной среде) коррозия алюминия, вызывающая возрастание электрического и теплового сопротивлений контакта между прибором и охладителем. Для устранения этого недостатка поверхность охладителя, к которой прилегает основание прибора, покрывают специальным составом, исключающим коррозию. Кроме того, для отвода тока здесь используют медный пластинчатый вывод, который прокладывают между прибором и охладителем. Для более полного использования приборов таблеточной конструкции применяют двустороннее охлаждение, при котором охладители устанавливают на обоих основаниях прибора. В этом случае требуется строгое соблюдение правил монтажа прибора совместно с охладителями, так чтобы поверхность соприкосновения таблетки с охладителями была наибольшей.

При монтаже приборов штыревого типа на охладителях должен обеспечиваться определенный закручивающий момент, что достигается применением специальных моментных ключей. Величина необходимого закручивающего момента обычно приводится в информационных материалах предприятий-изготовителей. При меньшем закручивающем моменте возрастает тепловое сопротивление всей системы, что, естественно, приводит к снижению допустимого тока нагрузки прибора. Необходимый закручивающий момент болта должен быть также задан для приборов прижимной конструкции (например, тиристора таблеточной конструкции).

В случае принудительного воздушного охлаждения тепловое сопротивление охладителя зависит от скорости движения охлаждающего воздуха. Следует помнить также, что при обдуве приборов с ребристыми охладителями направление потока воздуха должно быть строго параллельным ребрам охладителя (допускается отклонение на 10°). В противном случае эффективность охлаждения резко снижается, и как следствие этого уменьшается допустимый ток нагрузки прибора.

Водяное охлаждение является более эффективным по сравнению с воздушным. Повышенные требования к воде,

применяемой в качестве охлаждающего агента (удельное электрическое сопротивление воды не должно быть меньше определенного значения и др.), усложнение конструкции вентильных блоков за счет штуцеров и резиновых шлангов, а также устройств, обеспечивающих принудительную циркуляцию воды, усложняют применение водяного охлаждения.

17.4.3. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ (ТИРИСТОРОВ)

Как уже отмечалось, система номинальных параметров практически вытеснена системой предельных параметров. Остановимся на наиболее востребованных параметрах силовых кремниевых тиристоров.

Предельные параметры тока. Анодный ток тиристора определяется значением $I_a = \pi I_n$, где I_n — *предельный ток тиристора*, максимально допустимое среднее за период значение тока, длительно протекающего через прибор. Значение этого тока устанавливает класс тиристора по току. Его расчет проводят по формуле (17.14). При этом важным является классификационное значение предельного тока $I_{n.о}$ прибора, определяемое при заданном типе охладителя и условиях охлаждения (скорости и расходе охлаждающего агента). Этот параметр приводят в информационных материалах.

Ток рабочей перегрузки. При работе тиристора в схемах управления двигателями, прокатными станами возможно возникновение токов перегрузки (технологический ток), которые возникают в цепях управления на короткий промежуток времени (например, при пуске асинхронных двигателей). Для этого и введен в классификацию параметр — ток рабочей перегрузки $I_{р.пер}$. Это ток нагрузки непосредственно после режима с током, меньшим предельного в данных условиях работы, длительное существование которого вызвало бы превышение максимально допустимой температуры полупроводниковой кремниевой структуры (190°C), но который ограничен по времени так, что превышение температуры не произойдет. На рис. 17.51 приведено семейство характеристик тока рабочей перегрузки тиристора Т-320

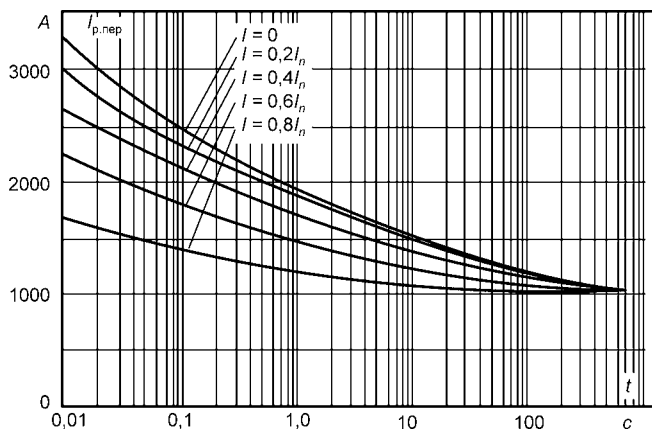


Рис. 17.51
Зависимости тока рабочей перегрузки тиристора Т-320 от времени протекания

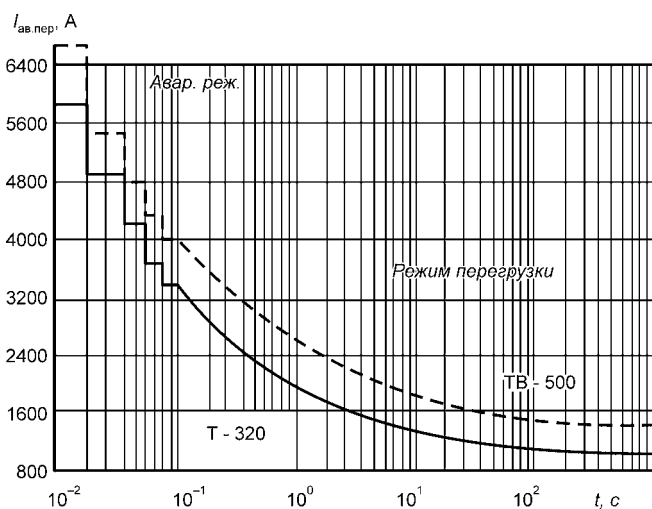


Рис. 17.52
Зависимости тока аварийной перегрузки от времени протекания

(предельный ток $I_{\pi} = 320$ А) в зависимости от длительности тока и предварительной нагрузки.

Ток аварийной перегрузки $I_{\text{ав.пер}}$ — это ток, который вызывает превышение максимально допустимой температуры полупроводниковой структуры, но воздействие которого предполагается лишь ограниченное число раз

за время срока службы прибора как результат необычных условий работы схемы (например, аварийных условий). При этом возможна временная потеря запирающих свойств прибора, что необходимо учитывать и принимать меры, исключающие повреждение прибора.

В этом случае прибегают к снижению допустимого значения приложенного напряжения в обратном направлении на 20%. Из представленных на рис. 17.52 зависимостей для тиристоров Т-320 и тиристора с водяным охлаждением ТВ-500 видно, что тиристоры допускают кратковременную аварийную перегрузку.

Ударный ток — это максимально допустимая амплитуда импульса аварийного тока синусоидальной формы длительностью 10 мс при заданной начальной температуре полупроводниковой структуры без последующего приложения напряжения. По этому параметру устанавливается токовая защита тиристоров.

Предельные параметры напряжения. Допустимые значения напряжения тиристоров характеризуют их воз-

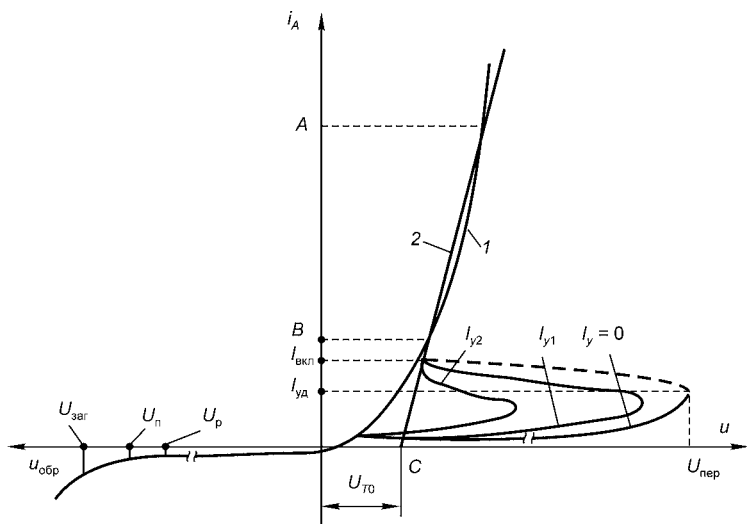


Рис. 17.53

Вольт-амперная характеристика тиристора

1 — прямая вольт-амперная характеристика; 2 — ABC — спрямленная характеристика; i_A — анодный ток тиристора; $I_{y2} > I_{y1}$ — ток управления тиристором; $U_{т0}$ — пороговое напряжение включения прибора; $I_{вкл}$ — минимальный анодный ток включения тиристора; $I_{уд}$ — минимальный ток (удержания), при котором тиристор еще остается во включенном состоянии.

возможности применения в высоковольтных цепях с допустимыми перенапряжениями. На рис. 17.53 представлена вольт-амперная характеристика тиристора с обозначением основных предельных параметров тиристоров. Классифицируют прибор по значению *повторяющегося напряжения* — это максимально допустимое мгновенное значение напряжения, прикладываемого к прибору в обратном или прямом закрытом направлениях, учитывая все повторяющиеся переходные напряжения, но исключая все неповторяющиеся переходные напряжения. Повторяющееся напряжение $U_{\text{п}}$ (рис. 17.53) обычно является функцией схемы преобразователя (например, перенапряжения при восстановлении прямого или обратного напряжения после коммутации) и увеличивает мощность энергии, выделяемой в приборе. Класс прибора указывают на маркировке цифрой, равной $U_{\text{п}}/100$.

Максимальное обратное напряжение (напряжение лавинообразования для лавинных приборов и ограничителей напряжения). Это напряжение, соответствующее области загиба обратной или прямой ветви вольт-амперной характеристики прибора $U_{\text{заг}}$ (рис. 17.53), когда даже при небольшом приращении напряжения резко увеличивается обратный ток или ток утечки.

Неповторяющееся напряжение — это максимально допустимое мгновенное значение любого неповторяющегося переходного напряжения, прикладываемого к прибору в обратном или прямом закрытом направлениях. Неповторяющееся напряжение обычно определяется внешней по отношению к преобразователю причиной (например, грозовые или внутренние перенапряжения в питающей сети переменного тока). Считается, что прикладываемое перенапряжение не повторяемое.

Рекомендуемое рабочее напряжение — это амплитудное значение напряжения $U_{\text{р}}$ синусоидальной формы, прикладываемого к прибору в обратном (или прямом) направлении при отсутствии повторяющихся и неповторяющихся напряжений.

Напряжение переключения — это прямое напряжение $U_{\text{пер}}$, при котором тиристор переходит из закрытого состояния в открытое при разомкнутой цепи управления.

К предельным параметрам следует отнести предельное допустимое значение *скорости нарастания прямого*

напряжения $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{кр}$, при котором не происходит переключение прибора при заданном напряжении и разомкнутой цепи управления, а также критическое значение скорости нарастания прямого тока $\left(\frac{di}{dt}\right)_{кр}$, не вызывающее необратимые процессы в структуре прибора.

Динамические параметры тиристоров. Это параметры, характеризующие процессы включения и выключения тиристора и определяющие частотные возможности прибора. К ним относятся, в первую очередь, времена включения и выключения тиристора.

Время включения $t_{вк}$ — это время от момента подачи управляющего импульса до момента снижения анодного напряжения на приборе до 10% начального значения при работе прибора на активную нагрузку (рис. 17.54а).

Время выключения $t_{в}$ — это время от момента, когда прямой ток через прибор при заданной крутизне спада достиг своего нулевого значения, до момента, когда прибор способен выдерживать не переключаясь прикладываемое в прямом направлении напряжение с определенными амплитудой и скоростью нарастания (рис. 17.54б).

К основному недостатку тиристоров следует отнести их ограниченные возможности при работе на повышенных частотах (в среднем менее 20 кГц), что обусловлено относительно большим временем выключения приборов.

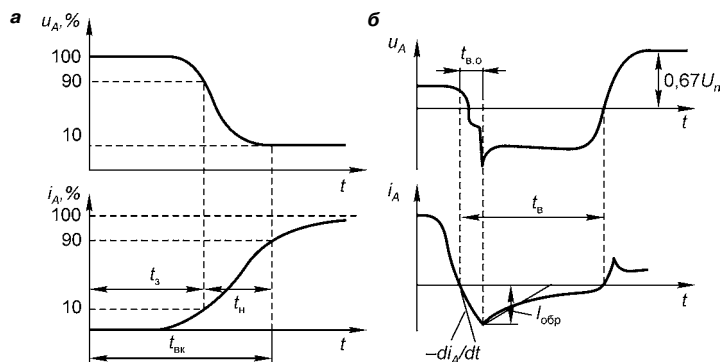


Рис. 17.54

Динамические характеристики тиристоров

а — включения; б — выключения; t_3 — время задержки включения тиристора; t_n — время спада напряжения; $t_{в.о}$ — время восстановления запирающих свойств; $-\frac{di_A}{dt}$ — скорость спада анодного тока; $I_{обр}$ — обратный ток.

17.5. КОМБИНИРОВАННЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Ограниченные возможности по созданию транзисторов MOSFET (полевых транзисторов с изолированным затвором) большой мощности, имеющих большое сопротивление в открытом состоянии, предопределили создание комбинированного прибора нового типа. Новый прибор был создан в 1980-е годы и получил название *биполярный транзистор с изолированным затвором*. В результате различных модификаций этого прибора разработано комбинированное устройство, удачно сочетающее MOSFET на входе и биполярный транзистор на выходе. Это позволило соединить преимущества данных элементов в один прибор, именуемый IGBT (insulated gate bipolar transistor). В настоящее время это наиболее совершенный полупроводниковый прибор, производимый серийно. Хотя быстроедействие расширило возможности его использования в высокочастотных режимах до 150 кГц (у MOSFET до 10^6 Гц), предельная мощность остается ниже, чем у транзисторов.

17.5.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ IGBT

Биполярно-полевая структура IGBT сочетает в себе принцип полевого управления и биполярный механизм переноса тока. Транзистор является полностью управляемым — его включение и выключение осуществляется подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком. Его обозначение и эквивалентная схема показаны на рис. 17.55.

Стандартная трехслойная структура IGBT IV поколения представлена на рис. 17.56. Она имеет относительно низкие потери в статическом режиме работы и выполнена по технологии «утопленного канала» (trench-gate technology).

Структура включает в себя отмеченный на рисунке полевой транзистор MOSFET с n -каналом и биполярный транзистор p - n - p -типа. Полевой (входной) транзистор образован слоями: n -исток,

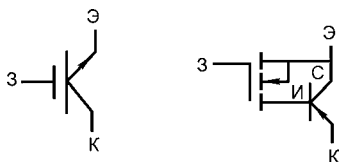


Рис. 17.55
Обозначение и эквивалентная
схема IGBT соответственно

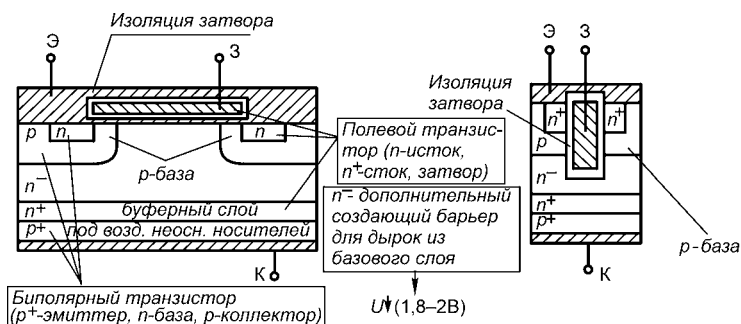


Рис. 17.56
Структура планарного IGBT

n^+ -сток и «металлическая пластина — затвор». Выходной биполярный транзистор образован слоями: p^+ -эмиттер, n -база и p -коллектор.

Процесс включения IGBT происходит в два этапа: после подачи положительного напряжения между затвором и истоком происходит открытие полевого транзистора, при этом формируется n -канал между истоком и стоком. При положительном напряжении в n -слой инжектируются неосновные носители заряда — это позволяет управлять проводящим каналом. Далее движение зарядов из n -области в p -область приводит к открытию биполярного транзистора и возникновению тока от эмиттера к коллектору. Таким образом, происходит управление полевым транзистором. Выключение IGBT производится снятием напряжения на затворе или приложением обратного напряжения. Примененная в IV поколении IGBT технология позволила снизить сопротивление между p -базами и соответственно уменьшить падение напряжения на приборе в проводящем состоянии до 1,8...2,0 В.

В результате технологического добавления к MOSFET биполярного транзистора образуется структура из транзисторов VT_1 и VT_2 , имеющая внутреннюю положительную обратную связь, так как взаимно ток коллектора VT_2 влияет на ток базы VT_1 и наоборот (рис. 17.57). Коэффициенты передачи тока эмиттера транзисторов VT_1 и VT_2 соответственно равны β_1 и β_2 . Так как $I_{K2} = \beta_2 I_{\text{э}2}$, $I_{K1} = \beta_1 I_{\text{э}1}$, получим

$$I_{\text{э}} = I_{K1} + I_{K2} + I_{\text{с}}. \quad (17.47)$$

Таким образом, ток стока полевого транзистора

$$I_c = I_a(1 - \beta_1 - \beta_2). \quad (17.48)$$

Ток стока I_c полевого транзистора можно определить через его усилительную характеристику, называемую крутизной, и через напряжение затвора $U_{зз}$. В этом случае ток коллектора транзистора IGBT

$$I_k = I_a = \frac{SU_{зз}}{1 - (\beta_1 + \beta_2)} = S_{э\text{кв}} U_{зз}, \quad (17.49)$$

где $S_{э\text{кв}} = \frac{S}{1 - (\beta_1 + \beta_2)}$ — эквивалентная крутизна IGBT, значительно превосходящая крутизну MOSFET.

Управлять коэффициентами β_1 и β_2 можно регулировкой R_1 и R_2 на этапе изготовления транзистора.

Достоинством IGBT является значительное снижение последовательного сопротивления (по сравнению с MOSFET) силовой цепи в открытом состоянии. Благодаря этому снижаются тепловые потери на замкнутом ключе. Исследования также показывают, что у транзистора IGBT отсутствует участок вторичного пробоя, характерный для классических биполярных транзисторов. Быстродействие IGBT ниже быстродействия транзисторов MOSFET, а значит, их трудно использовать в источниках питания с высокими частотами преобразования. Однако IGBT быстрее биполярных транзисторов. Ограничение общей скорости переключения биполярных транзисторов с изолированным затвором кроется в конечном времени жизни неосновных носителей в базе $p-n-p$ -транзистора.

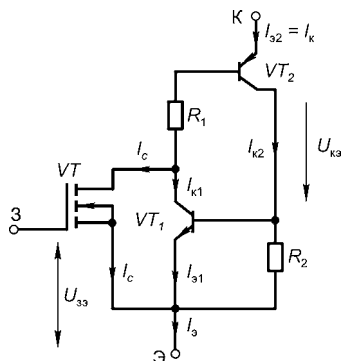


Рис. 17.57
Эквивалентная (технологическая) схема IGBT

17.5.2.

ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ IGBT

Рассмотрим основные параметры и характеристики транзисторов с изолированным затвором в системе обозначений заводов-изготовителей. В скобках приводится русская версия обозначений.

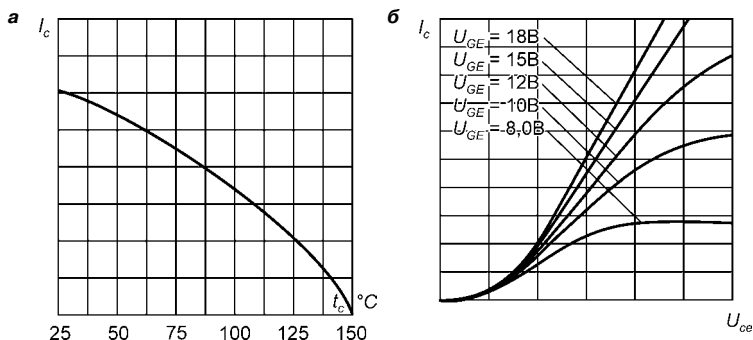


Рис. 17.58
Зависимости тока коллектора

а — от температуры корпуса; *б* — от напряжения «коллектор–эмиттер» и от напряжения на затворе.

Длительный (постоянный) ток коллектора — I_c (I_K) (нормирован при 25 $^{\circ}\text{C}$ и при 100 $^{\circ}\text{C}$). Максимальный ток через транзистор приводится для заданной температуры корпуса. Его качественная зависимость от температуры корпуса t_c показана на рис. 17.58*а*. Как уже отмечалось, управление каналом проводимости IGBT осуществляется положительным напряжением затвора U_{GE} . Типичная зависимость тока коллектора от напряжения «коллектор–эмиттер» и напряжения затвора показана на рис. 17.58*б*.

Импульсный ток коллектора — I_{cm} (I_{KM}). IGBT может пропускать импульсный кратковременный ток, в 7...10 раз превышающий постоянный ток I_c . На этот параметр ориентируются специалисты при использовании приборов в высокочастотных схемах.

Допустимое напряжение «коллектор–эмиттер» — U_{ce} ($U_{KЭ}$). Это максимально допустимое значение напряжения, прикладываемое к прибору, исключаяющее пробой цепи «коллектор–эмиттер».

Максимальная мощность рассеяния P_D (нормируется при 25 $^{\circ}\text{C}$ и при 100 $^{\circ}\text{C}$). Максимально допустимую мощность прибора рассчитывают по формуле

$$P_D = \frac{t_j - t_a}{R_{jc}}, \quad (17.50)$$

где R_{jc} — тепловое сопротивление (структура–корпус, аналогично см.: § 17.2.7, рис. 17.13, тепловое сопротивление R_T), t_j — температура структуры, t_a — температу-

ра окружающей среды. Температура структуры может находиться в пределах 55...150°C.

Пробивное напряжение «коллектор–эмиттер» $U_{(br)ces}$ ($U_{кэ.пр}$). Этот параметр характеризует нижний предел пробивного напряжения. Следует отметить, что пробой характеризуется положительным температурным коэффициентом. Это значит, что с понижением температуры пробивное напряжение снижается. Здесь следует иметь в виду то, что допустимое обратное напряжение IGBT составляет 15...20 В. Поэтому прибор предохраняют от обратного напряжения диодом, включенным встречно-параллельно IGBT (рис. 17.59).

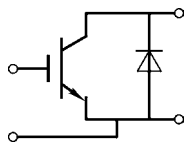


Рис. 17.59
Встречно-параллельное подключение диода для защиты IGBT от обратного напряжения

Напряжение насыщения «коллектор–эмиттер» — $U_{ce(on)}$ ($U_{кэ(нас)}$). Этот параметр характеризует статические потери проводимости в открытом состоянии. Технические условия нормируют значения U_{ce} на предельном и среднем токе при температуре 25°C, а также на предельном токе при температуре 150°C.

Пороговое напряжение затвора — U_{ge} ($U_{зэ}$). Это значение напряжения на затворе, при котором появляется ток в коллекторе (рис. 17.58б). Пороговое напряжение уменьшается с повышением температуры.

Ток коллектора при нулевом напряжении на затворе — I_{ces} ($I_{кэ0}$). Это ток утечки силовой цепи закрытого транзистора. Аналогичный параметр устанавливают и для других полупроводниковых приборов.

Время включения t_{on} ($t_{вк}$) и выключения IGBT t_{off} ($t_{в}$) определяют динамические характеристики приборов и характеризуются по аналогии с тиристорами временем задержки включения, временем нарастания, временем спада тока (см. рис. 17.60).

Время задержки включения $t_d^{(on)}$ (t_3) определяют как время между подачей на затвор отпирающего импульса и 10% нарастания тока коллектора. *Время нарастания t_r ($t_н$)* определяют нарастанием тока коллектора от 10% до 90% от своего номинального значения. *Время задержки выключения $t_d^{(off)}$* определяют как время между подачей запирающего импульса на затвор и нарастанием на 10% относительно номинального значения напряжения

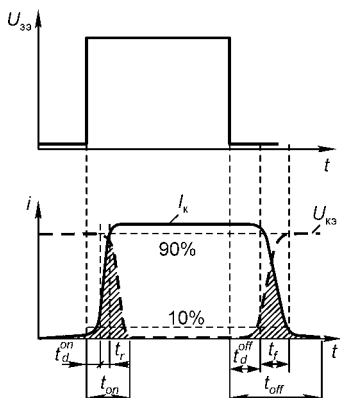


Рис. 17.60
Временные параметры IGBT

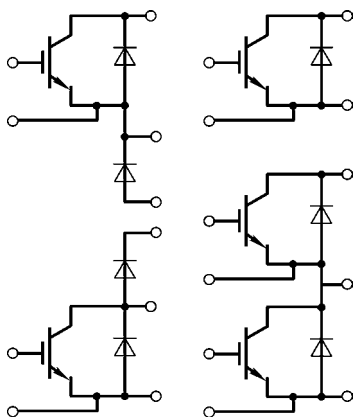


Рис. 17.61
Принципиальные схемы
модульных сборок
с применением IGBT

на коллекторе. Время спада t_f определяют как время уменьшения тока коллектора от 90% до 10% от своего номинального значения.

Открытие транзистора IGBT происходит следующим образом. Пока напряжение «затвор–эмиттер» равно нулю, транзистор закрыт, поскольку для начала процесса открывания транзистора нет необходимости открывать управляющий MOSFET-транзистор полностью. Время начала открытия IGBT совпадает с моментом достижения напряжения на затворе порогового уровня U_{ge} . Это время будет определяться временем заряда емкости затвора. После этого транзистор начнет открываться. В силу действия внутренней положительной обратной связи транзистор резко, подобно ключу (компаратору), откроется за время t_r . При этом время нарастания является наименьшим среди других временных параметров переключения, определяющих динамические свойства транзистора.

Процесс закрывания транзистора протекает не так быстро, как открывания. После того, как запирающий импульс подан на затвор, MOSFET-транзистор достаточно быстро закроется и ток в цепи стока упадет до нуля. Однако, поскольку в базе транзистора $p-n-p$ еще не рассосались неосновные носители, ток силовой цепи «кол-

ллектор–эмиттер» поддерживается на том же уровне в промежуток времени $t_d^{(off)}$. Затем транзистор резко начинает закрываться, но так называемый «хвост» тока не дает ему сделать это быстро, растягиваясь на время t_f .

Энергетические потери в транзисторе при переключении (коммутации) меньше, чем в статическом режиме. Оценка мощности статических потерь производится произведением напряжения «коллектор–эмиттер» и тока коллектора: $P_{пр} = U_{ce}I_c$.

Для исключения паразитных индуктивностей и емкостей при сборке схем с использованием IGBT заводы-изготовители приборов выпускают модульные сборки, удобные для последующего использования. Примеры таких модулей показаны на рис. 17.61.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

18.1. ОБЩАЯ СТРУКТУРА ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Выпрямителями называют преобразователи переменного тока в постоянный. Они широко применяются в энергетических и электронных устройствах для питания этих устройств постоянным током.

Для преобразования переменного тока в постоянный ток используют полупроводниковые диоды (вентили). При необходимости регулирования параметров нагрузки выпрямителя используют тиристоры и IGBT-модули.

В структуру выпрямителя входят (рис. 18.1): силовой трансформатор, преобразователь переменного тока в однонаправленный (постоянный) пульсирующий ток, сглаживающий фильтр. Нагрузка может быть подключена непосредственно после преобразования переменного тока в постоянный или после сглаживающего фильтра.

Силовой трансформатор служит для преобразования переменного напряжения сети. В зависимости от назначения используется повышающий или понижающий напряжение трансформатор. Преобразователь переменного тока в пульсирующий постоянный обладает односторонней проводимостью используемых полупроводниковых приборов. Сглаживающий фильтр служит для преобразования выпрямленного пульсирующего тока в ток, близкий по форме к постоянному току.

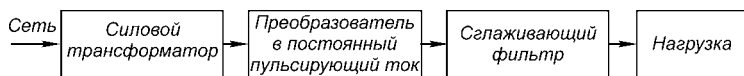


Рис. 18.1
Блок-схема выпрямителя

Современные выпрямители различают по типу используемых вентилях, схеме их включения и числу фаз используемой сети переменного напряжения. Выпрямители подразделяют также на неуправляемые и управляемые. Для питания блоков электронной аппаратуры, как правило, применяют выпрямители малой мощности с питанием от однофазной сети переменного тока, а для силовых устройств — от трехфазной сети. В тех случаях, когда необходимо получить повышенное постоянное напряжение, применяют умножители напряжения. Если первичным источником питания является источник постоянного напряжения, то постоянное напряжение с необходимыми параметрами вырабатывает специальный преобразователь-инвертор.

18.2. ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫЙ ОДНОФАЗНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Однофазный трансформатор преобразует переменное напряжение сети u_c (рис. 18.2а) в переменное напряжение u_2 вторичной обмотки трансформатора. За счет односторонней проводимости диода D ток i_2 имеет место только в положительные полупериоды напряжения u_2 и, следовательно, имеет пульсирующую форму (рис. 18.2б).

Постоянная составляющая этого тока I_0 определяется средним значением тока i_2 в нагрузке R_n за период. *Средним значением тока* является среднее арифметическое значение всех мгновенных значений за период:

$$I_0 = \int_0^{T/2} \frac{i_2 dt}{T} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_2 dt. \quad (18.1)$$

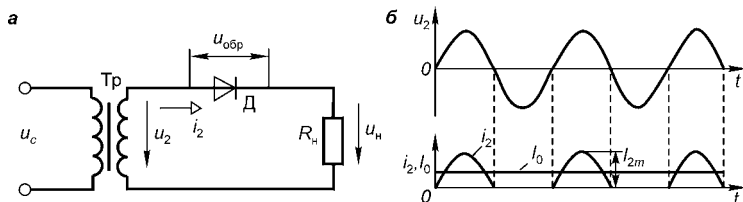


Рис. 18.2

Однополупериодный выпрямитель

a — схема; *б* — диаграмма работы; i_2 — выпрямленный ток; I_0 — постоянная составляющая тока.

Так как за полупериод $i_2 = I_{2m} \sin \omega t$, то

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_{2m} \sin \omega t dt. \quad (18.2)$$

В литературе по преобразовательной технике иногда можно увидеть следующую запись среднего тока:

$$I_0 = \frac{I_{2m}}{\omega T} \int_0^{T/2} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2I_{2m}}{\omega T}. \quad (18.3)$$

Так как $\omega T = 2\pi$, то $I_0 = I_{2m}/\pi = 0,318 I_{2m}$.

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения на нагрузке R_n по закону Ома:

$$U_0 = I_0 R_n = 0,318 I_{2m} R_n. \quad (18.4)$$

Установим соотношение между U_0 и действующим значением напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора u_2 . Если принять, что падение напряжения на диоде значительно меньше падения напряжения на нагрузке, то $U_{2m} \approx I_{2m} R_n$. Следовательно, среднее значение напряжения будет равно

$$U_0 = 0,318 U_{2m} = \frac{U_{2m}}{\pi}. \quad (18.5)$$

Так как $U_{2m} = \sqrt{2} U_2$, получим

$$U_0 = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} = 0,45 U_2. \quad (18.6)$$

Исходным параметром для расчета выпрямителей является среднее значение напряжения U_0 . Подставляя это значение в (18.6), определяют действующее значение напряжения U_2 на вторичной обмотке трансформатора. Далее при известном напряжении сети U_c определяют коэффициент трансформации силового трансформатора $k = U_c/U_2$.

Выбор диода для работы в схеме рис. 18.2а определяют по допустимому значению прикладываемого в обратном направлении напряжения $U_{обр}$ и значению тока в нагрузке R_n . В период отрицательного полупериода напряжения u_2 диод D находится под действием обратного напряжения, максимум которого равен U_{2m} . Тогда $U_{обр} = U_{2m} = 3,14 U_0$.

Исходя из этого, при выборе диода для работы в схеме однополупериодного выпрямления необходимо ори-



ентироваться на класс диода по напряжению. Для высоковольтных выпрямителей в случае необходимости можно включить последовательно необходимое количество диодов.

Среднее значение тока выпрямителя не должно превышать максимально допустимый ток через диод $I_{\text{п}}$, тогда $I_0 < I_{\text{п}}$. Если при этом нет диода на такой ток, можно включить параллельно необходимое количество диодов.

Поскольку форма выпрямленного тока существенно отличается от идеальной формы постоянного тока, то важным параметром, характеризующим работу выпрямителя, является *коэффициент пульсации напряжения*

$$k_{\text{п}} = \frac{U_{1m}}{U_0}, \quad (18.7)$$

где U_{1m} — амплитуда первой гармоники переменного напряжения на нагрузке выпрямителя. Так как для однополупериодного выпрямителя напряжение первой гармоники равно

$$U_{1m} = \frac{U_{2m}}{2} = \frac{\pi U_0}{2} = 1,57 U_0, \quad (18.8)$$

то на основании (18.7) получаем $k_{\text{п}} = 1,57$.

Полученное значение коэффициента пульсации свидетельствует о недостатке однонаправленной однополупериодной схемы выпрямления. Кроме того, в этой схеме значение постоянной составляющей тока очень мало: $I_0 = 0,636 I_2$, так как $I_{2m} = 2I_2$, где I_2 — действующее значение тока за период. Поэтому трансформатор явно недогружен.

18.3. ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Существует несколько схем однофазных выпрямителей. Наиболее широкое применение получили двухполупериодные схемы. Из них известны однофазная двухнаправленная (см. рис. 18.3а) и однофазная мостовая (рис. 18.3б) схемы включения диодов. Первая схема включает в себя силовой трансформатор со средней отпайкой на вторичной обмотке и два диода. Когда в точке а

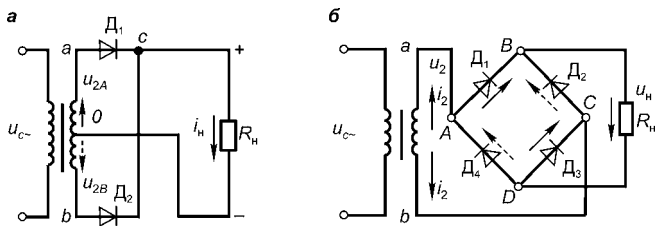


Рис. 18.3
Однофазные схемы выпрямителей
а — двухнаправленная; б — мостовая.

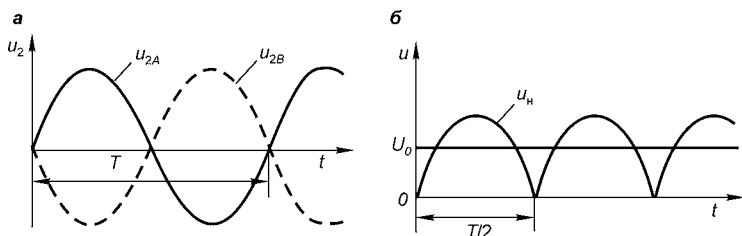


Рис. 18.4
Зависимости напряжений в двухнаправленной схеме выпрямления
а — в фазах вторичной обмотки; б — на нагрузке.

на вторичной обмотке потенциал положительный, ток имеет направление «диод D_1 — нагрузка R_H — отпайка 0 вторичной обмотки». Если потенциал положителен в точке b вторичной обмотки, ток имеет направление «диод D_2 — точка c (катод диода D_1) — нагрузка R_H — отпайка 0 вторичной обмотки».

На рис. 18.4а показаны зависимости напряжения вторичной обмотки трансформатора со средней отпайкой от времени, а на рис. 18.4б — изменения тока нагрузки, поясняющие работу выпрямителя. Как следует из работы выпрямителя, направление тока в нагрузке считается неизменным. Вторичная обмотка трансформатора двухфазная, и каждая фаза работает половину периода. Напряжения u_{2A} и u_{2B} сдвинуты по фазе на половину периода (рис. 18.4а). Напряжение на нагрузке u_H в любой момент равно мгновенному значению ЭДС фазы, работающей в данный момент (рис. 18.4б). Достоинством данной схемы является малое число вентилях (D_1, D_2). Недостатком схемы является необходимость вывода сред-

ней отпайки вторичной обмотки трансформатора и большое обратное напряжение диода $U_{обр} = 2U_{2m} = 3,14U_0$.

Наиболее широкое распространение получила мостовая схема двухполупериодного выпрямителя (рис. 18.3б). Схема содержит четыре диода, к одной диагонали моста подключается вторичная обмотка силового трансформатора, а к другой — нагрузка R_H . При положительном потенциале в точке a вторичной обмотки трансформатора ток имеет направление «точка a вторичной обмотки трансформатора — точка A — диод D_1 — точка B — нагрузка R_H — точка D — диод D_3 — точка C — точка b вторичной обмотки трансформатора». При изменении направления ЭДС и тока во вторичной обмотке трансформатора ток имеет направление «положительный потенциал в точке b вторичной обмотки трансформатора — точка C — диод D_2 — точка B — нагрузка R_H — точка D — диод D_4 — точка A — точка a вторичной обмотки трансформатора». Таким образом, ток в нагрузке не меняет направления. Кривые изменения напряжения u_H и тока i_H имеют такой же вид, что и в двухполупериодной схеме. Аналогична и амплитуда пульсаций $U_{2m} = 0,67U_0$. Но в мостовой схеме нет необходимости в отпайке средней точки вторичной обмотки трансформатора. Меньше, чем в схеме на рис. 18.3а, обратное напряжение: $U_{обр} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2 = 1,57U_0$.

Постоянная составляющая тока нагрузки мостовой схемы (рис. 18.3б) так же, как и двухнаправленной схемы, определяется, как и в схеме однополупериодного выпрямителя, средним значением тока I_0 , но составляющая тока в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении (рис. 18.5):

$$I_0 = 2I_{2m}/\pi = 0,636 I_{2m}. \quad (18.9)$$

Так как во вторичной обмотке трансформатора ток i_2 синусоидальный, то $I_{2m} = \sqrt{2}I_2$ и, согласно (18.9), $I_0 = 0,9I_2$.

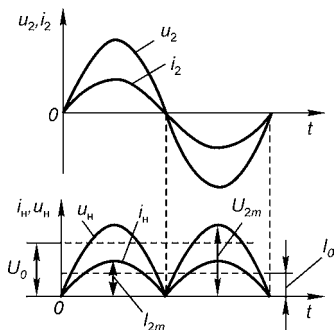


Рис. 18.5
Графики напряжения
и тока в мостовой схеме

18.4. ТРЕХФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Трехфазные выпрямители применяют в устройствах большой и средней мощности. На рис. 18.6а представлена *трехфазная однонаправленная схема* выпрямления. Вторичные фазные обмотки трехфазного трансформатора соединены звездой. К фазам a' , b' и c' вторичной обмотки трансформатора подключены диоды D_1 , D_2 , D_3 , катоды которых присоединяют к нейтральной точке трансформатора N . Между нейтральной точкой трансформатора N и катодами диодов — точкой O' включена нагрузка R_H .

Ток в каждом диоде существует только тогда, когда потенциал на его аноде выше потенциала на катоде. Это возможно в течение $1/3$ периода, когда напряжение в данной фазе выше напряжений в двух других фазах (рис. 18.6б). Так, например, когда $u_{2a} > u_{2b}$ и $u_{2a} > u_{2c}$, диод D_1 открыт, а диоды D_2 и D_3 заперты, так как потенциалы их катодов выше потенциалов анодов. Под действием напряжения u_{2a} ток замыкается через обмотку фазы a , диод D_1 и нагрузку R_H . В следующую треть периода открыт диод D_2 и т. д. На рис. 18.6б показан характер изменения напряжений фаз, соответствующий любому состоянию диодов. Если считать диоды идеальными, то напряжение на нагрузке равно напряжению фазы с открытым диодом, и, следовательно, ток в нагрузке изменяется по тому же закону. При этом ток в нагрузке всегда больше нуля, как

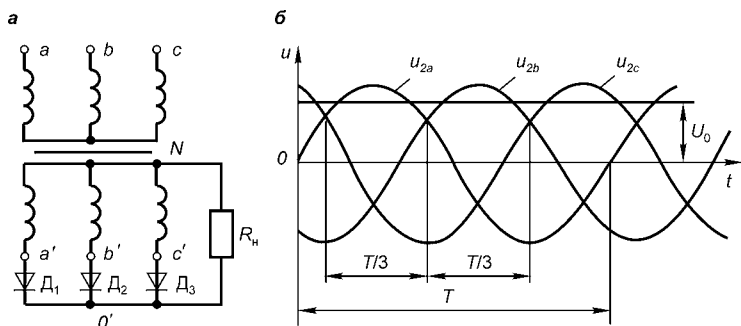


Рис. 18.6

Трехфазный однонаправленный трехпульсный выпрямитель

a — принципиальная схема; b — фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора.

это имело место в схемах одно- и двухполупериодных выпрямителей. Таким образом, пульсация тока в трехфазном выпрямителе относительно невелика и коэффициент пульсации $k_{\text{п}} = 1,25$, а среднее значение выпрямленного тока в нагрузке $I_0 = 0,827 I_{2m}$.

В каждом диоде ток существует в течение $1/3$ периода, и поэтому его среднее значение $I_{\text{ср}} = I_0/3$. Выпрямленное напряжение на нагрузке будет равно

$$U_0 = 0,827 U_{2m}. \quad (18.10)$$

Так как $U_{2m} = \sqrt{2} U_2$, где U_2 — действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора, то $U_0 = 1,17 U_2$.

Максимальное значение обратного напряжения на каждом диоде определяется амплитудой линейного напряжения $U_{\text{обр}} = \sqrt{3} U_{2m}$, а так как согласно (18.10) $U_{2m} = 1,21 U_0$, то $U_{\text{обр}} = 2,09 U_0$.

Недостатком данной схемы является то, что в обмотках каждой фазы ток не меняет своего направления. При применении трехстержневой магнитной системы трансформатора размагничивание магнитопровода каждой фазы происходит током соседних фаз, в противном случае произойдет намагничивание сердечника трансформатора, сопровождаемое резким увеличением потерь в трансформаторе.

На рис. 18.7 представлена *трехфазная мостовая схема* выпрямителя (трехфазная двунаправленная шестипульсная), известная еще как схема Ларионова. Применяется такой выпрямитель преимущественно в мощных установках. При включении первичной обмотки по схеме треугольника фазные токи в первичной обмотке не имеют постоянной составляющей, что является преимуществом при больших потребляемых мощностях.

Диаграммы, поясняющие работу выпрямителя, приведены на рис. 18.8. За один период фазного напряжения ($\omega t = 2\pi$) на вторичных обмотках трансформатора укладывается 6 проводящих участков последовательных групп тиристоров.

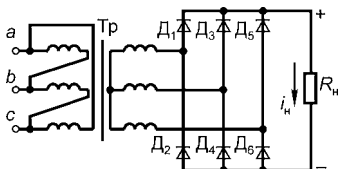


Рис. 18.7
Трехфазный мостовой
выпрямитель

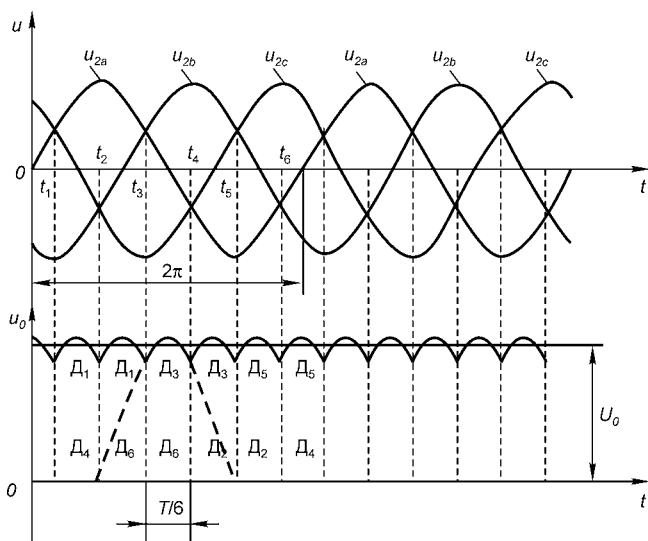


Рис. 18.8

Диаграмма работы трехфазного мостового выпрямителя

В интервале времени t_1-t_2 пропускают ток в прямом направлении диоды D_1 и D_4 , так как наивысший положительный потенциал имеет анод фазы a , а наибольший отрицательный потенциал имеет катод фазы b . Соответственно в интервале t_2-t_3 пропускают ток диоды D_1 и D_6 , в интервале t_3-t_4 — D_3 , D_6 , в интервале t_4-t_5 — D_3 , D_2 , в интервале t_5-t_6 — D_5 , D_2 и в последнем интервале периода — D_5 , D_4 .

Таким образом, напряжение на нагрузке имеет вид шести пульсаций за период, а интервал проводимости каждого диода составляет $2\pi/3$. При этом совместная работа двух диодов составляет $\pi/6$. Тогда частота пульсаций напряжения u_0 составляет $6f_c = 300$ Гц.

Среднее значение напряжения на нагрузке выпрямителя:

$$U_0 = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_2}{\pi}, \quad (18.11)$$

где U_2 — действующее значение фазного напряжения на вторичных обмотках трансформатора.

Среднее значение выпрямленного напряжения практически равно максимальному линейному напряжению питающей сети:

$$U_0 = U_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \approx 0,95 U_{ab.m}, \quad (18.12)$$

где $U_{ab.m}$ — максимальное линейное напряжение вторичной обмотки.

Среднее значение тока нагрузки:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_H} = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_2}{\pi \cdot R_H}. \quad (18.13)$$

Среднее значение тока в диодах выпрямителей (D_1 – D_6):

$$I_{D1-D6} = \frac{I_0}{3}. \quad (18.14)$$

Максимальное значение обратного напряжения на диодах:

$$U_{обр.m} = U_{ab.m} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 = 1,045 U_0. \quad (18.15)$$

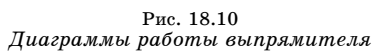
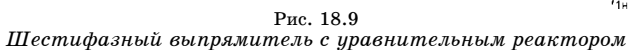
Максимальное значение первой гармоники переменной составляющей напряжения на выходе выпрямителя составляет сумму напряжений двух последовательных групп диодов (соответственно верхней и нижней $U_{0,(1m.н)}$, $U_{0,(1m.в)}$):

$$U_{0,(1m)} = \sqrt{U_{0,(1m.в)}^2 + U_{0,(1m.н)}^2}. \quad (18.16)$$

Из диаграммы видно, что пульсация выпрямленного напряжения значительно меньше, чем в трехфазной однопольной (трехпульсной) схеме выпрямления, и составляет $k_{пс} = 0,057$.

Шестифазный выпрямитель (см. рис. 18.9) образован двумя трехфазными однополупериодными выпрямителями, включенными на параллельную работу через уравнительный реактор. Размагничивание магнитопровода обеспечивается противофазными напряжениями $u_{2a} - u_{2x}$, $u_{2b} - u_{2y}$, $u_{2c} - u_{2z}$ обмоток, расположенных парно на соответствующих трех стержнях магнитопровода. Это достигнуто объединением в нейтральной точке одной звезды начал обмоток, а в нейтральной точке второй звезды — концов обмоток.

Несмотря на одинаковое направление токов в каждой паре обмоток, расположенных на соответствующих стержнях магнитопровода, результирующий магнитный поток каждого стержня не содержит постоянной составляющей.



Представленная схема может работать в двух режимах:

- 1) двойного трехфазного выпрямления;
- 2) шестифазного однополупериодного выпрямления.

В первом случае (*двойного трехфазного выпрямления*) две половинки схемы работают независимо друг от друга. В режиме шестифазного выпрямления происходит повышение напряжения на выходе выпрямителя на 15% по сравнению с режимом двойного трехфазного выпрямления.

Анализ электромагнитных процессов можно провести с помощью временных диаграмм, показанных на рис. 18.10.

На первой диаграмме (*а*) построены кривые для двух трехфазных систем вторичных напряжений, являющихся противофазными, а именно для систем из u_{2a} , u_{2b} , u_{2c} и u_{2x} , u_{2y} , u_{2z} . Здесь же приведены диаграммы токов i_{2a} , i_{2x} во вторичных обмотках *a* и *x* трансформатора, расположенных на одном стержне магнитопровода. Эти токи повторяют анодные токи вентилях VD'_1 и VD''_1 .

На второй диаграмме (*б*) цифрами размечены интервалы проводящего состояния вентилях в двух катодных группах ($1'-3'-5'$ и $3''-5''-1''$). Положительные полуволны напряжений первой трехфазной системы образуют кривую выпрямленного напряжения $u'_{н0}$ левой половины схемы, а аналогичная вторая трехфазная система — кривую выпрямленного напряжения $u''_{н0}$ правой половины схемы.

Мгновенные значения выпрямленных напряжений различны из-за сдвига их пульсаций на половину периода пульсаций. Различие пульсаций двух трехфазных выпрямителей требует включения их на параллельную работу через реактор, называемый уравнительным. Этот реактор, во-первых, воспринимает разницу пульсаций в выпрямленных напряжениях, ограничивает уравнительный ток между трехфазными выпрямителями и, во-вторых, позволяет получить на нагрузке, подключаемой к средней точке уравнительного реактора, напряжение $u_{н0}$, равное (по методу наложения) полусумме выпрямленных напряжений каждой половины схемы. Из-за указанного сдвига их пульсаций на половину своего периода напряжение на нагрузке имеет шестикратную, т. е. удвоенную, частоту пульсаций. Кривые выпрямленного

тока i_n при допущении идеальности фильтра не содержат пульсаций.

На третьей диаграмме (в) приведена кривая уравнивающего напряжения u_p , равного разнице выпрямленных напряжений левой и правой половин выпрямителя. Форма кривой уравнивающего тока в контуре, образованном двумя половинами схемы, определяется интегралом от уравнивающего напряжения. При построении кривой уравнивающего тока i_p принято, что он сдвинут на четверть периода в сторону отставания от выпрямленного напряжения.

Индуктивность уравнивающего реактора выбирают из условия ограничения уравнивающего тока на уровне 1...2% от номинального значения выпрямленного тока. На диаграмме (г) приведено изменение напряжения на индуктивной нагрузке выпрямителя.

На пятой временной диаграмме (д) приведена кривая анодного тока вентиля VD'_1 с учетом пульсаций от уравнивающего тока, который накладывается на половину от выпрямленного тока, разделившегося пополам в двух ветвях уравнивающего реактора. При этом деление тока происходит за счет напряжения взаимоиндукции уравнивающего реактора. Здесь же приведена кривая обратного напряжения на вентиле $U_{b\max}$, имеющая ту же форму, как и у других трехфазных выпрямителей.

После определения формы кривых анодных токов вентилях на первой диаграмме строятся токи во вторичных обмотках трансформатора, которые в однополупериодных схемах выпрямления совпадают с соответствующими анодными токами.

На шестой диаграмме (е) показаны кривые напряжения u_{1A} на первичной обмотке фазы А трансформатора и кривая тока i_{1A} . При этом пульсации от уравнивающего тока не проявляются, так как два вторичных тока i_{2a} и i_{2x} находятся в противофазе и в результирующем магнитном потоке стержня магнитопровода отсутствуют.

Расчетные соотношения для режима *двойного трехфазного выпрямления* работы выпрямителя получают с помощью построенных временных диаграмм токов и напряжений в указанной далее последовательности.

1. Среднее значение выпрямленного напряжения при среднем значении напряжения на уравнительном реакторе, равном нулю:

$$U_{\text{н0}} = \frac{3\sqrt{6} \cdot U_2}{2\pi}.$$

2. Среднее значение анодного тока вентиля:

$$I_a = \frac{I_{\text{н}}}{6}.$$

3. Действующее значение анодного тока вентиля:

$$I_{\text{ан}} = \frac{I_{\text{н}}}{2\sqrt{3}}.$$

4. Максимальное значение анодного тока:

$$I_{a \text{ max}} = \frac{I_{\text{н}}}{2}.$$

5. Максимальное значение обратного напряжения на вентиле:

$$U_{b \text{ max}} = \frac{2\pi}{3} U_2.$$

6. Установленная максимальная мощность вентиляей:

$$P_b = 6 \frac{U_{b \text{ max}} \cdot I_{a \text{ max}}}{P_{\text{н0}}},$$

где $P_{\text{н0}}$ — активная мощность нагрузки.

7. Действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора:

$$I_2 = I_{\text{ан}} = \frac{I_{\text{н}}}{2\sqrt{3}}.$$

8. Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора:

$$I_1 = \frac{I_{\text{н}} \cdot \sqrt{2/3}}{2K_T},$$

где K_T — коэффициент трансформации.

9. Полная мощность шести вторичных обмоток трансформатора:

$$S_2 = 6U_2 I_2 = \frac{2\pi}{3\sqrt{2}} P_{\text{н0}}.$$

10. Полная мощность трех первичных обмоток трансформатора:

$$S_1 = 3U_1 I_1.$$

11. Установленная мощность трансформатора:

$$S_y = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1,26 P_{\text{н0}}.$$

Уравнительный реактор работает на частоте напряжения 150 Гц. Установленная мощность реактора, работающего на этой частоте, составляет

$$S_p = 0,07P_{н0}.$$

12. Значение коэффициента преобразования выпрямителя по напряжению (аналогично определяется для трехфазного выпрямителя с соединением вторичных обмоток в звезду):

$$K_{\text{пн}} = \frac{U_{н0}}{U_1} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} K_T.$$

13. Коэффициент преобразования выпрямителя по току с уравнительным реактором в два раза выше из-за параллельного соединения двух половин схемы:

$$K_{\text{пт}} = \frac{I_{\text{н}}}{I_1} = \frac{2\pi}{3} \sqrt{\frac{3}{2}} K_T = 2,56 K_T.$$

Качество выпрямленного напряжения в трехфазной схеме с уравнительным реактором существенно выше, чем в предыдущих схемах, из-за меньшей его амплитуды пульсаций и большей в два раза частоты пульсаций (шестикратной вместо трехкратной).

В режиме *шестифазного однополупериодного выпрямления* при малых значениях выпрямленного тока невозможно создать требуемый ток намагничивания уравнительного реактора для обеспечения его работы. Среднее значение выпрямленного напряжения положительных полуволн шестифазной системы напряжений:

$$U_{н0} = \sqrt{2} \frac{6}{\pi} U_2 \sin(\pi/6) = 1,35 U_2.$$

По сравнению с режимом двойного трехфазного выпрямления напряжение на выходе выпрямителя возрастает на 15%. Ввиду малости загрузки выпрямителя током возрастает значение максимального обратного напряжения на вентиле, которое равно удвоенному значению амплитуды вторичного напряжения:

$$U_{b\text{max}} = 2\sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \frac{4\pi}{3\sqrt{6}} U_{н0} = 2,42 U_{н0},$$

что приводит к такому же увеличению и установленных мощностей вентилях.



18.5. УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Выше были рассмотрены схемы выпрямителей, в которых регулирование выпрямленного напряжения и тока можно осуществлять или в цепи переменного тока с помощью автотрансформатора, или в цепи выпрямленного тока с помощью потенциометра или реостата. Но эти способы управления имеют существенные недостатки. Во-первых, они обладают низким КПД из-за значительных потерь в регулировочных устройствах, и, во-вторых, в них невозможно применять современные схемы автоматического регулирования.

В настоящее время широко распространены выпрямители с управляемыми полупроводниковыми приборами. Управляемые выпрямители выполняются по тем же схемам, что и неуправляемые выпрямители.

Проанализируем работу простейшего управляемого двухполупериодного выпрямителя (рис. 18.11а). Данная схема аналогична рассмотренной ранее (см. рис. 18.3б), только два диода в ней заменены на тиристоры T_1 и T_2 .

В выпрямителе момент открытия тиристоров совпадает с началом положительной полуволны напряжения u_2 , и ток в нагрузке существует в течение всего этого полупериода. Тиристоры открываются только при подаче на них управляющего импульса. Из рис. 18.11б видно, что начало действия управляющего импульса i_y сдвинуто во времени на t_y относительно начала периода напряжения u_y и ток в нагрузке существует в течение времени $T/2 - t_y$. Следовательно, уменьшается и среднее значение тока $I_{0\alpha}$ по сравнению со средним значением тока при включении тиристора в начале периода при $t = 0$.

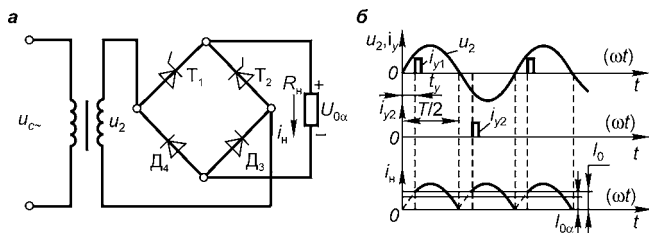


Рис. 18.11
Управляемый выпрямитель
а — схема; б — диаграмма работы.

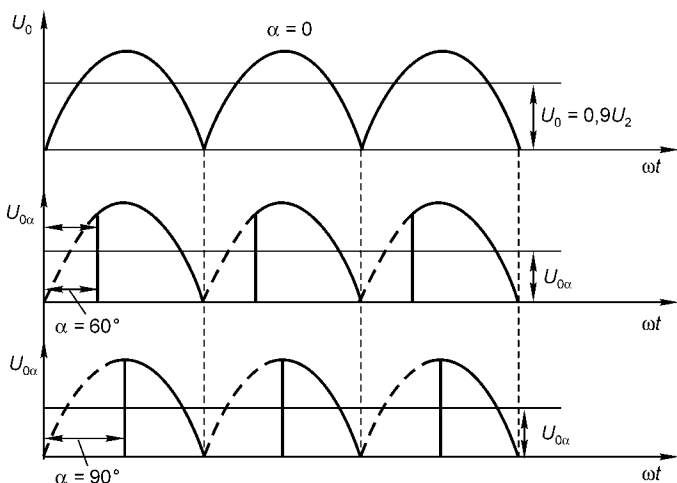


Рис. 18.12
 Диаграмма, поясняющая работу управляемого выпрямителя

Время подачи управляющего импульса, так называемый угол управления α , устанавливает подачу на управляющий электрод тиристора положительного управляющего импульса. Если угол управления равен нулю ($\alpha = 0$), средние значения напряжения на нагрузке U_0 и тока I_0 будут максимальными (рис. 18.11б). При увеличении угла управления напряжение $U_{0\alpha}$ и ток $I_{0\alpha}$ будут уменьшаться (рис. 18.12).

Когда угол управления достигнет максимума $\alpha = 180^\circ$, напряжение и ток в нагрузке станут равными нулю. Зависимость напряжения или тока от угла управления называют регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя. Средние выпрямленные напряжение $U_{0\alpha}$ и ток $I_{0\alpha}$ в нагрузке определяют из выражений

$$\left. \begin{aligned} U_{0\alpha} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t dt, \\ I_{0\alpha} &= I_0 \frac{1 + \cos \alpha}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (18.17)$$

Таким образом, появляется возможность автоматически регулировать средние значения тока и напряжения на нагрузке, изменяя момент подачи управляющего импульса.

По аналогии с рассмотренным выше принципом управления выпрямителем работают и трехфазные выпрямители. Тиристорные трехфазные выпрямители применяют для питания постоянным током мощных технологических установок. Однако сложность в управлении тиристорами зачастую ограничивает надежность этих устройств. Более проста в управлении трехфазная схема с использованием IGBT (рис. 18.13).

При конструировании трехфазного мостового управляемого выпрямителя используют модули, в которые входит IGBT и встречно-параллельно включенный диод, предохраняющий прибор от обратного напряжения. IGBT работают попарно, так же, как и клапаны в аналогичной неуправляемой схеме выпрямителя.

Дестабилизирующими факторами в работе выпрямителя являются входное напряжение и сопротивление нагрузки, которые изменяются в процессе работы устройства. Для автоматического поддержания постоянного напряжения на нагрузке при изменении дестабилизирующих факторов в определенных пределах используются стабилизаторы напряжения. Подобные устройства с использованием стабилизаторов рассматривались ранее. Однако эффективно работают параметрические или компенсационные стабилизаторы, в которых используют биполярные транзисторы, имеющие нелинейные вольтамперные характеристики.

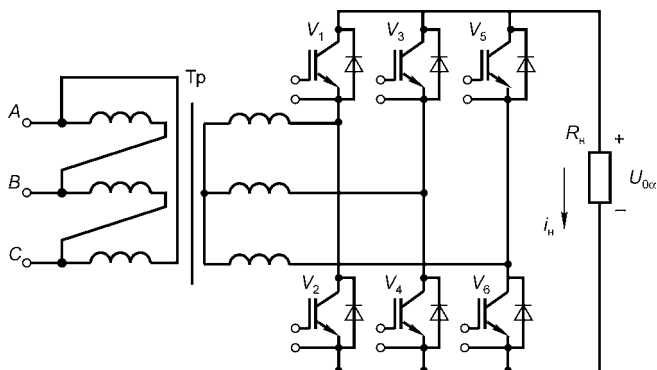


Рис. 18.13
Управляемая трехфазная двунаправленная
шестипульсная схема выпрямителя

18.6. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Напряжение, получаемое на выходе рассмотренных выше выпрямительных схем, является или пульсирующим (трехфазный выпрямитель), или импульсным (одно- и двухполупериодный выпрямитель). Для того чтобы выпрямленное напряжение имело требуемую (с необходимым коэффициентом пульсации) форму, применяют сглаживающие фильтры. Количественно работа фильтра характеризуется коэффициентом сглаживания пульсаций q , который показывает, во сколько раз уменьшается пульсация при прохождении сигнала через данный фильтр: $q = k_{\pi} / k'_{\pi}$, где k_{π} и k'_{π} — коэффициенты пульсации сигнала до фильтра и после фильтра. Наряду с малым значением коэффициента пульсации в фильтре не должно быть значительных потерь постоянной составляющей выпрямленного напряжения.

Сглаживающие фильтры подразделяют на емкостные, резисторно-емкостные, индуктивные и индуктивно-емкостные (рис. 18.14).

Наиболее простым является *емкостной фильтр*, который состоит из конденсатора C_{Φ} , включенного параллельно нагрузке (рис. 18.15а). Работа фильтра основана на способности конденсатора быстро заряжаться, запасая электрическую энергию, а затем относительно медленно отдавать ее в нагрузку.

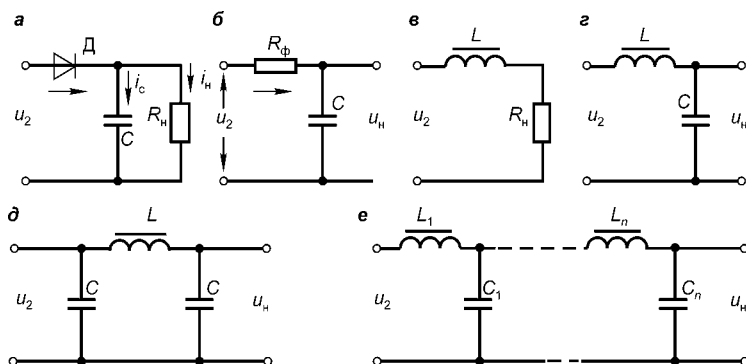


Рис. 18.14

Схемы сглаживающих фильтров

а — емкостные; *б* — резисторно-емкостные; *в* — индуктивные; *г* — индуктивно-емкостные; *д* — П-образные; *е* — многосвязные индуктивно-емкостные.

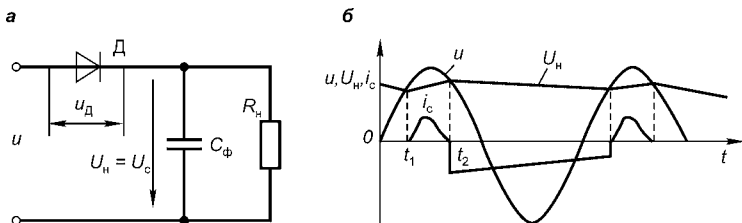


Рис. 18.15
Емкостной фильтр

a — схема; *б* — графики напряжений и тока.

Когда напряжение на диоде D , равное разности напряжения источника и напряжения на конденсаторе, положительно ($u_D = u - U_c > 0$), то диод открыт и конденсатор C_ϕ заряжается. Как видно из графика на рис. 18.15б, зарядка конденсатора происходит в интервале времени t_1 – t_2 . Так как сопротивление диода D весьма мало, конденсатор успевает зарядиться почти до напряжения источника питания u . Когда $u_D = u - U_c < 0$, диод закрыт и конденсатор медленно разряжается через нагрузку R_n до тех пор, пока напряжение источника питания u снова не станет больше U_c .

Время разрядки конденсатора увеличивается с увеличением постоянной времени $\tau = C_\phi R_n$, которая показывает, как будет уменьшаться напряжение на конденсаторе.

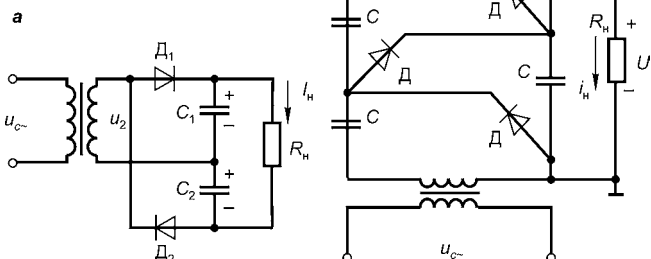
Емкостные фильтры, как правило, используют в выпрямителях малой мощности.

Индуктивные фильтры применяют в силовых устройствах большой мощности. Сглаживание пульсаций напряжения индуктивными фильтрами будет происходить при условии, если индуктивное сопротивление дросселя много больше сопротивления нагрузки: $\omega L \gg R_n$. Наиболее часто применяют Г-образные схемы фильтров (рис. 18.14з). Для этих фильтров должно выполняться условие $\omega L \gg \frac{1}{\omega C}$. Ко-

эффициент сглаживания таких фильтров $q = \omega^2 LC - 1$.

Типовой схемой выпрямителя с применением емкостных фильтров является *умножитель напряжения*. На рис. 18.16а показана схема удвоителя напряжения. В один из полупериодов напряжения, когда открыт диод D_1 , конденсатор C_1 заряжается почти до u_2 . В это время диод D_2 закрыт. В следующий полупериод открывается диод D_2 и происходит зарядка конденсатора C_2 . При этом

Рис. 18.16
Умножители напряжения
а — удвоитель; б — многокаскадный.



диод D_1 закрыт. Так как конденсаторы C_1 и C_2 включены последовательно, напряжение на нагрузке R_n удваивается. При соответствующем выборе параметров схемы разрядка конденсаторов через сопротивление нагрузки происходит достаточно медленно.

Развитием данной схемы является многокаскадная схема умножения напряжения (рис. 18.16б), часто используемая в высоковольтной технике. Используя ее, можно получать на выходе выпрямителя напряжения, кратные двум амплитудным величинам напряжения трансформатора.

18.7. ВЫПРЯМИТЕЛИ НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ

Выпрямители, выполненные на диодах, имеют КПД, не превышающий 0,85...0,9. В некоторых случаях, в особенности для питания схем микроэлектроники и микропроцессоров, требуются более экономичные выпрямители. В некоторых схемах требуемое выпрямленное напряжение может составлять 1,5...5 В, тогда, используя диоды, у которых падение напряжения достигает 0,8 В, КПД выпрямителя будет низким.

Применение синхронного выпрямителя (СВ) на полевых МДП-транзисторах с падением напряжения 0,1...0,2 В позволяет повысить КПД до 0,96 и более (рис. 18.17).

Времена переключения МДП-транзисторов измеряются долями и единицами наносекунд, что на один-два порядка превосходит быстродействие биполярных транзисторов. Входные емкости полевых транзисторов больше вы-

ходных, но значительно меньше, чем у соответствующих биполярных транзисторов. Основные требования к МДП-транзисторам для применения в выпрямительных схемах заключаются в следующем:

1) прибор должен быть полностью закрыт при нулевом потенциале затвора или при подаче на затвор запирающего потенциала;

2) сток и исток прибора должны быть взаимозаменяемыми, т. е. прибор должен отпираться в обратном направлении так же хорошо, как и в прямом.

По способу управления схемы СВ с полевыми транзисторами делятся на две группы:

1) с управлением по цепи «затвор–сток» (рис. 18.18а);

2) с управлением по цепи «затвор–исток» (рис. 18.18б).

В свою очередь по способу включения транзисторов синхронные выпрямители бывают прямого и инверсного включения. Чаще используют схемы инверсного включения.

При работе выпрямителей на напряжение более 10...15 В используют транзисторы с индуцированным каналом, так как на затвор подается напряжение более 5 В. Такие схемы обладают повышенной помехоустойчивостью. При использовании встроенного канала (рис. 18.18) напряжение на затворе меняется от нуля до 5 В.

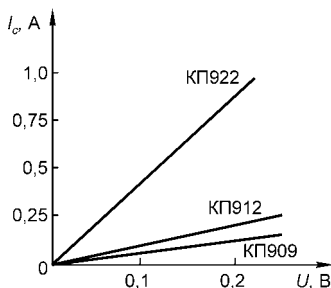


Рис. 18.17
Вольт-амперные характеристики МДП-транзисторов

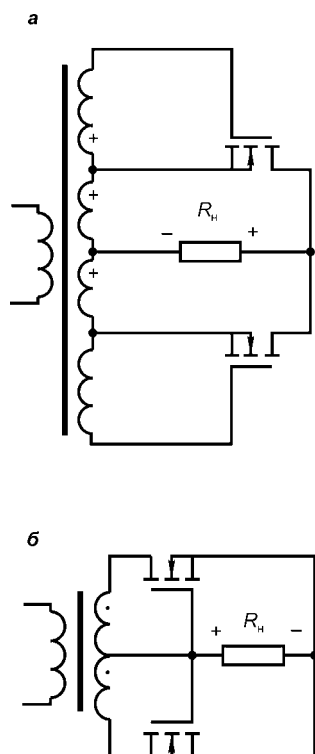


Рис. 18.18
Выпрямители
на МДП-транзисторах

а — управление по цепи «затвор–сток»; б — управление по цепи «затвор–исток».

УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

19.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Электрическим усилителем называют устройство, в котором при изменении маломощного усиливаемого сигнала происходит усиление мощности в цепи нагрузки. Усиливаемый сигнал, подаваемый на вход усилителя, осуществляет управление процессом преобразования энергии. В результате выходной сигнал является функцией входного сигнала. Мощность выходного сигнала за счет энергии источника питания во много раз больше мощности усиливаемого сигнала. Мощность усиленных сигналов выделяется в нагрузке, которую включают в выходную цепь усилителя.

Усилитель можно представить в виде четырехполюсника 2 (рис. 19.1) со своим источником питания, к входным зажимам которого подключен источник сигнала 1, а к выходным — нагрузка 3. Если один усилительный элемент усилителя не обеспечивает нужного усиления сигнала, используют несколько усилительных элементов (многокаскадные усилители). Один усилительный элемент и отнесенные к нему элементы называют *усилительным каскадом*.

Усилители можно условно подразделить на три типа: *усилители напряжения, тока и мощности*. Условность такого подразделения связана с тем, что любой усили-

тель в конечном итоге увеличивает мощность.

По характеру усиливаемых сигналов различают *усилители гармонических и импульсных сигналов*. По час-

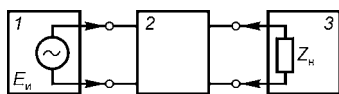


Рис. 19.1
Усилитель в виде
четырёхполюсника

тотному диапазону различают усилители постоянного тока, переменного тока, низкой частоты (усилители звуковой частоты), высокой частоты, промежуточной частоты, широкополосные усилители. Кроме того, усилители различают в зависимости от используемых элементов.

Основные характеристики и параметры усилителей.

К ним относятся *входные параметры усилителя* — входное напряжение $U_{\text{вх}}$, ток $I_{\text{вх}}$, мощность сигнала $P_{\text{вх}}$ и входное сопротивление усилителя $R_{\text{вх}}$.

Выходные параметры усилителя — выходная мощность сигнала $P_{\text{вых}}$, выделяемая в нагрузку, выходные напряжение $U_{\text{вых}}$ ($U_{\text{н}}$) или ток $I_{\text{вых}}$ ($I_{\text{н}}$), определяемые при работе усилителя на расчетное сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$. Тогда $U_{\text{н}} = R_{\text{н}} I_{\text{н}}$, $P_{\text{н}} = I_{\text{н}} U_{\text{н}} = I_{\text{н}}^2 R_{\text{н}} = U_{\text{н}}^2 / R_{\text{н}}$.

Коэффициент усиления по напряжению:

$$\underline{K}_U = \underline{U}_{\text{н}} / \underline{U}_{\text{вх}}. \quad (19.1)$$

Коэффициент усиления по току:

$$\underline{K}_I = \underline{I}_{\text{н}} / \underline{I}_{\text{вх}}. \quad (19.2)$$

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = P_{\text{н}} / P_{\text{вх}}. \quad (19.3)$$

Коэффициенты \underline{K}_U и \underline{K}_I — комплексные величины, поскольку выходные и входные напряжения и токи сдвинуты по фазе относительно друг друга из-за реактивных составляющих сопротивлений в цепях усилителя и нагрузки:

$$\underline{K} = K e^{j\varphi}, \quad (19.4)$$

где K — модуль коэффициента усиления; φ — фазовый сдвиг между выходным и входным напряжениями (токами) усилителя.

Если усилитель является многокаскадным, то общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$\underline{K} = \underline{K}_1 \underline{K}_2 \dots \underline{K}_n. \quad (19.5)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) выходной цепи усилительного элемента — отношение мощности в нагрузке $P_{\text{н}}$ к потребляемой выходной цепью мощности от источника питания $P_{\text{п}}$:

$$\eta = P_{\text{н}} / P_{\text{п}}. \quad (19.6)$$

Входной сигнал любой формы можно представить как сумму гармонических составляющих сигнала, имеющих различные частоты и усиливающихся неодинаково, т. е. с различными коэффициентами усиления в течение неодинакового времени, что приводит их к временным сдвигам на выходе усилителя, т. е. возникают искажения, которые называют *фазовыми*. Частотные искажения оцениваются по *амплитудно-частотной (частотной) характеристике (АЧХ)* усилителя, представляющей собой зависимость модуля коэффициента усиления K от частоты f (или от угловой частоты ω).

Собственные шумы (помехи) усилителя — это сигналы на выходе усилителя, существующие и при отсутствии усиливаемых сигналов на его входе. Напряжение собственных шумов усилителя ограничивает его чувствительность. Из-за наличия шумов нельзя усиливать сколь угодно малые сигналы.

Собственные шумы возникают в основном за счет теплового, беспорядочного движения электронов в элементах схемы и хаотического теплового движения носителей заряда в области базы биполярных транзисторов. Собственные шумы оценивают по *коэффициенту шума*, равному отношению мощности шума на выходе усилителя $P_{ш.вых}$ к мощности шума на его входе $P_{ш.вх}$, умноженному на коэффициент усиления по мощности K_P :

$$k_{ш} = \frac{P_{ш.вых}}{P_{ш.вх}} K_P. \quad (19.7)$$

Динамический диапазон усилителя характеризует диапазон напряжений сигнала, которые данный усилитель может усиливать без внесения помех и искажений, и равен отношению максимального напряжения входного сигнала $U_{вх.макс}$ к его минимальному напряжению $U_{вх.мин}$:

$$D_{yc} = \frac{U_{вх.макс}}{U_{вх.мин}}. \quad (19.8)$$

Динамический диапазон усилителя определяют по *амплитудной характеристике усилителя* — зависимости установившегося значения выходного напряжения $U_{вых}$ от входного $U_{вх}$ (рис. 19.2).

Нелинейные искажения — это искажения формы усиленного сигнала на выходе вследствие нелинейности вольтамперных характеристик отдельных элементов схемы усилителя (усилительных элементов, катушек индуктивности с ферромагнитными сердечниками, трансформаторов и т. д.). Причиной появления значительных нелинейных искажений могут быть и неправильный выбор начального положения рабочей точки транзистора, чрезмерно большая амплитуда входного сигнала. Нелинейные искажения при подаче на вход усилителя чисто синусоидального сигнала вызывают появление на его выходе высших гармонических составляющих, которые искажают форму входного сигнала.

Оцениваются нелинейные искажения по *коэффициенту гармоник* (в процентах):

$$K_{\Gamma I} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} 100, \quad (19.9)$$

$$K_{\Gamma U} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} 100,$$

где $I_1, I_2, \dots, I_n, U_1, U_2, \dots, U_n$ — соответственно действующие (амплитудные) значения первой, второй, ..., n -й гармоник выходного тока и напряжения.

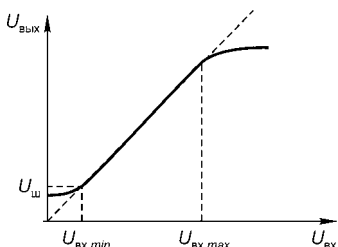


Рис. 19.2
Амплитудная
характеристика усилителя
 $U_{ш}$ — напряжение шумов.

19.2. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЯХ

Обратной связью (ОС) называют передачу усиленного сигнала из выходной цепи усилителя во входную цепь.

На рис. 19.3 показана структурная схема усилителя с обратной связью. Цепь обратной связи характеризуется коэффициентом передачи, или коэффициентом обратной связи β_y , показывающим, какая часть выходного сигнала передается на вход усилителя. На практике $\beta_y < 1$. Обратная связь может быть *внутренней* (она проявляется в усилителе из-за физических свойств

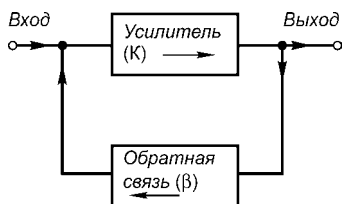


Рис. 19.3
Структурная схема усилителя с обратной связью

усилительных элементов), *паразитной* (из-за образования паразитных емкостных и индуктивных связей между выходной и входной цепями) и *искусственной* (ее создают специально). Внутренняя и паразитная ОС являются нежелательными, и их пытаются устранить. Искусственную

ОС применяют с целью уменьшения нелинейных искажений и стабилизации положения начальной рабочей точки режима работы усилителя (точки покоя). Для этого с помощью обратной связи на вход подают напряжение точно в противофазе с ЭДС источника сигнала. Такую ОС называют *отрицательной*.

Если напряжение обратной связи подать точно совпадающим по фазе с ЭДС источника сигнала, то сигнал на входе увеличится. Такую ОС называют *положительной*. Ее используют, например, в автогенераторах для поддержания автоколебаний.

В зависимости от того, каким образом цепь ОС присоединена к выходу и входу усилителя, различают следующие виды ОС: *обратную связь по напряжению* — цепь ОС соединяют с выходом схемы параллельно нагрузке так, что напряжение ОС пропорционально напряжению на нагрузке усилителя (рис. 19.4а); *обратную связь по току* — цепь ОС соединяют с выходом схемы последовательно с нагрузкой так, что напряжение ОС пропорционально току в нагрузке (рис. 19.4б); *обратную связь последовательную* — цепь ОС подключают со стороны входа, где она соединена последовательно с источником сигнала (рис. 19.4в); *обратную связь параллельную* — цепь ОС со стороны входа соединена параллельно с источником сигнала (рис. 19.4г). Существуют также комбинированные (смешанные) обратные связи: ОС одновременно по току и напряжению, а также ОС, одновременно выполненная последовательной и параллельной.

Обратную связь называют *частотно-независимой*, если отношение напряжений на выходе и входе цепи ОС не зависит от частоты (цепь ОС не содержит индуктивностей

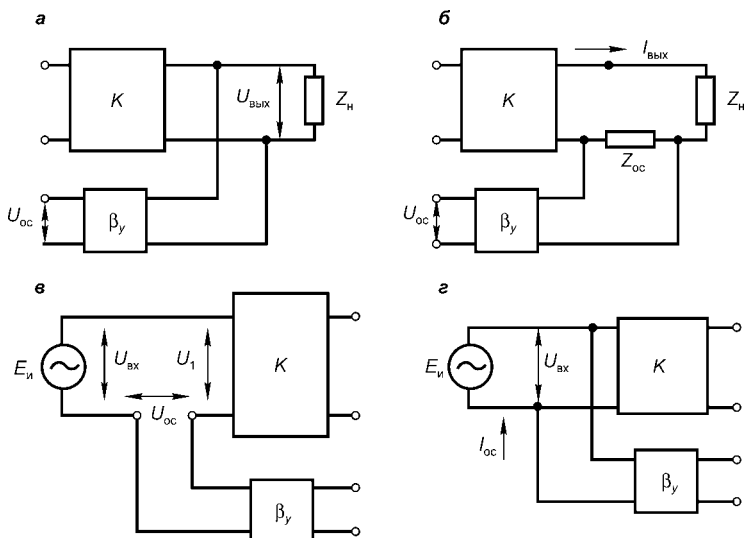


Рис. 19.4
Обратные связи

а — по напряжению; б — по току; в — последовательная; г — параллельная.

и емкостей). В противном случае ОС называют *частотно-зависимой*. Если между напряжением ОС и ЭДС источника сигнала сдвиг фаз отличается от 0° и от 180° , то ОС называют *комплексной*. Замкнутый контур, образуемый цепью обратной связи и частью схемы усилителя, к которой эта цепь присоединена, называют *петлей* обратной связи.

Отрицательная ОС влияет на основные показатели усилителя и в первую очередь на коэффициент усиления. Если имеется последовательная ОС по напряжению (рис. 19.4а, в), то напряжение ОС, подаваемое во входную цепь усилителя, будет равно

$$U_{oc} = \beta_y U_{вых}. \quad (19.10)$$

Тогда действующее значение первой гармоники напряжения будет равно

$$U_1 = U_{вх} - U_{oc} = U_{вх} - \beta_y U_{вых} \quad (19.11)$$

или

$$U_{вх} = U_1 + \beta_y U_{вых}. \quad (19.12)$$

Если ОС отсутствует, то $U_{\text{вх}} = U_1$ и коэффициент усиления усилителя будет равен

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_1}. \quad (19.13)$$

При наличии отрицательной ОС будем иметь

$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_1 + \beta_y U_{\text{вых}}}. \quad (19.14)$$

Из (19.13) и (19.14) следует, что при наличии ОС коэффициент усиления усилителя будет равен

$$K_{\text{ос}} = \frac{K}{1 + \beta_y K}. \quad (19.15)$$

Следовательно, отрицательная ОС снижает коэффициент усиления в $1 + \beta_y K$ раз. Значение $\beta_y K$ характеризует усиление цепи обратной связи, а значение $1 + \beta_y K$ называют *глубиной отрицательной ОС*.

Все вышеописанное справедливо не только для последовательной ОС по напряжению, но и для всех других видов отрицательной ОС. Введение отрицательной ОС повышает стабильность коэффициента усиления усилителя при изменении режима усилительного элемента, частоты, амплитуды сигнала и т. д. Отрицательная ОС позволяет расширить полосу пропускания сигнала, снижает уровень нелинейных искажений, фон и шумы, возникающие внутри усилителя. В зависимости от типа отрицательной ОС можно уменьшать или увеличивать входное и выходное сопротивления. Так, введение отрицательной последовательной ОС по напряжению увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивление усилителя, что в ряде случаев значительно улучшает его показатели. Поэтому, несмотря на снижение коэффициента усиления при введении отрицательной обратной связи, ее широко используют в усилителях различного назначения.

При положительной ОС коэффициент усиления увеличивается. Тогда

$$K_{\text{посл}} = \frac{K}{1 - \beta_y K}, \quad (19.16)$$

из чего следует, что положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления усилителя в $1 - \beta_y K$ раз. Это значение называют *глубиной положительной ОС*.

19.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Динамическими называют характеристики усилителя, работающего на нагрузку, состоящую из смешанной (активно-индуктивной и др.) нагрузки. С помощью динамических выходных характеристик можно установить зависимость выходного тока от напряжения на выходе усилителя для различных значений входного напряжения. При этом вход и выход схемы усилителя (рис. 19.5а) подключены к источнику напряжения смещения E_6 и E_k .

Когда сигнал на входе отсутствует, в усилителе существует постоянный ток. Зависимость $U_k = f(I_k)$ при $R_k = \text{const}$, $E = \text{const}$ — это прямая линия, которую можно построить по двум точкам. Первую точку на оси ординат $I_k = E_k/R_k$ определяют при $U_k = 0$, а точку $I_k = 0$ — при $U_k = E_k$ на оси абсцисс. Проведенную между этими точками линию называют нагрузочной линией постоянного тока или *нагрузочной прямой постоянного тока*.

На рис. 19.6 построены две нагрузочные линии постоянного тока, соответствующие двум значениям сопротивления нагрузки R_{k1} , R_{k2} и напряжению E_k . Наклон прямых определяется соответственно углами α_1 и α_2 , где $\alpha_1 = \text{arccctg } R_{k1}$, $\alpha_2 = \text{arccctg } R_{k2}$.

Нагрузочные линии накладывают на семейство выходных статических характеристик транзистора, точки пересечения с которыми определяют зависимость $I_k = f(U_k)$ для заданных значений R_k , E_k и различных значений тока базы I_6 (рис. 19.6).

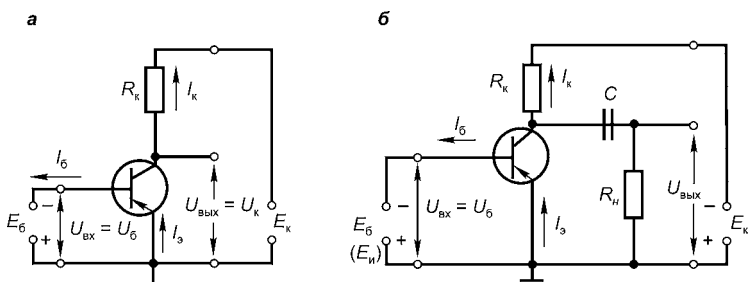


Рис. 19.5
Усилители

а — без разделительного конденсатора; б — с разделительным конденсатором.

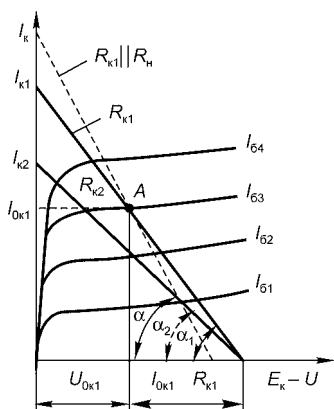


Рис. 19.6
Выходные характеристики
транзистора с нагрузочными
линиями

ми выходными характеристиками на семейство входных статических характеристик, поскольку входные статические характеристики для разных значений U_k отличаются очень незначительно. Обычно в качестве динамической входной характеристики используют усредненную входную статическую характеристику (кривая 1 на рис. 19.7б).

В многокаскадных усилителях выходные цепи нагружены разделительным конденсатором и входным сопротивлением следующего каскада (см. рис. 19.5б).

Входная динамическая характеристика — это зависимость $I_{вх} = f(U_{вх})$ в динамическом режиме. Для схемы усилителя с транзистором, включенным по схеме с общим эмиттером ОЭ (рис. 19.5), — это зависимость $I_б = f(U_б)$. Графически ее строят путем переноса точек пересечения нагрузочной прямой со статическими

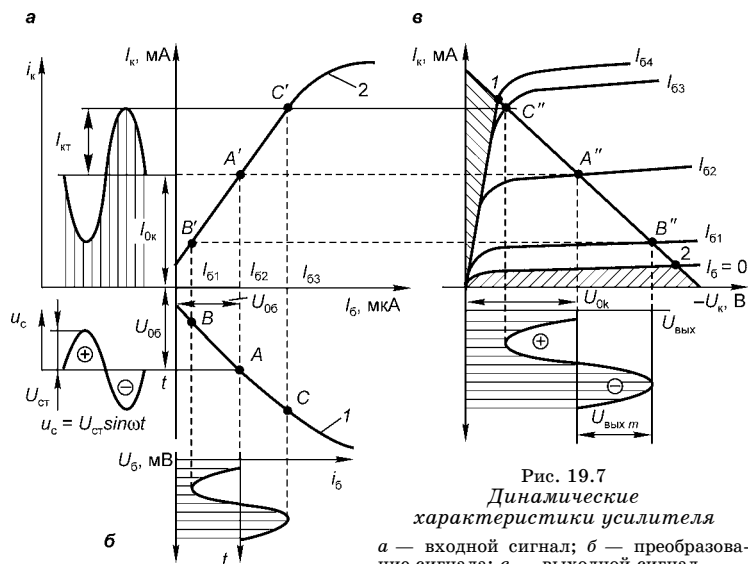


Рис. 19.7
Динамические
характеристики усилителя
а — входной сигнал; б — преобразова-
ние сигнала; в — выходной сигнал.

Проходная динамическая характеристика — это зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ или $I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$ в динамическом режиме. Для усилителя с транзистором, включенным по схеме с ОЭ, это зависимость $I_{\text{к}} = f(U_{\text{б}})$ или $I_{\text{к}} = f(I_{\text{б}})$. Вид проходной характеристики $I_{\text{к}} = f(I_{\text{б}})$ показан на рис. 19.7а (кривая 2).

19.4. ПРИНЦИП РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ

Принцип работы усилителя рассмотрим на примере усилительного каскада (см. рис. 19.5а). В отсутствие усиливаемого сигнала при подаче на эмиттерный и коллекторный переходы напряжения смещения в цепях транзистора существуют постоянные токи $I_{\text{об}}$ во входной цепи и $I_{\text{ок}}$ в выходной цепи (ноль в индексах означает, что рассматривается режим по постоянному току). На входных и выходных зажимах устанавливают соответственно напряжение $U_{\text{об}}$, равное напряжению смещения на эмиттерном переходе, и $U_{\text{ок}}$, определяемое ЭДС источника питания $E_{\text{к}}$ и сопротивлением резистора $R_{\text{к}}$. Эти значения токов и напряжений определяют положение начальной рабочей точки на статических характеристиках.

Если на вход усилителя подается сигнал синусоидальной формы $u_{\text{с}} = U_{\text{см}} \sin \omega t$ (рис. 19.7а), то он алгебраически суммируется с постоянным напряжением смещения на эмиттерном переходе, и рабочая точка A располагается между точками B и C .

В отрицательные полупериоды напряжение сигнала складывается с отрицательным напряжением смещения. Напряжение смещения базы увеличивается, в результате чего увеличивается ток базы и коллекторный ток и рабочая точка плавно перемещается из положения A и A' соответственно в положение C и C' .

В положительные полупериоды напряжение сигнала, складываясь с отрицательным напряжением смещения, снижает напряжение смещения базы, поэтому токи базы и коллектора уменьшаются, а рабочая точка плавно перемещается в положение B и B' (рис. 19.7б), на выходной характеристике соответственно C'' и B'' . Токи $i_{\text{б}}$ и $i_{\text{к}}$ изменяются по фазе вместе с изменением мгновенного значения суммарного напряжения $U_{\text{об}} + u_{\text{с}}$. В цепи

«источник ЭДС — коллекторный переход» существует пульсирующий ток, состоящий из постоянной $I_{0к}$ и переменной i_k составляющих тока такой же формы, как и входной сигнал. Переменная составляющая тока создаст на резисторе R_k падение напряжения, амплитуда которого U_{Rm} равна амплитуде выходного сигнала $U_{вых.m}$. При этом напряжение на резисторе изменяется синфазно, а выходное напряжение находится в противофазе с напряжением сигнала (см. рис. 19.7в). При большом сопротивлении R_k амплитуда выходного сигнала значительно больше амплитуды напряжения входного сигнала. Таким образом, в приборе происходит усиление как напряжения, так и тока входного сигнала, а следовательно, и мощности. КПД усилителя, как уже отмечалось, равен отношению мощности сигнала на выходе $P_{вых}$ к мощности P_0 энергии, потребляемой активным элементом от источника питания.

В этом случае $P_{вых} = 1/2 \cdot U_{вых.m} I_{вых.m} = 1/2 \cdot U_{km} I_{km}$, где U_{km} , I_{km} — соответственно амплитуды коллекторных значений напряжения и тока.

Так как мощность энергии, потребляемой усилителем, равна $P_0 = P_{0к} I_{0к}$, то КПД усилителя будет равен

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_0} = \frac{1}{2} \frac{U_{km} I_{km}}{U_{0к} I_{0к}}, \quad (19.17)$$

причем, поскольку $U_{km} < U_{0к}$, $I_{km} < I_{0к}$, КПД усилителя (по схеме с ОЭ) меньше 50%.

19.5. РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ

Для того чтобы форма переменной составляющей тока на выходе усилителя совпадала с формой подаваемого на вход сигнала, зависимость между ними должна быть линейной. Поскольку транзистор является нелинейным элементом, возможно искажение сигнала. Наличие или отсутствие искажения зависит как от амплитуды сигнала, так и от выбора положения начальной рабочей точки на нагрузочной линии.

Выбор положения начальной рабочей точки влияет также на КПД усилителя. В момент, когда сигнал отсутствует, вся энергия источников питания идет только на нагрев $p-n$ -переходов. Если начальная рабочая точка ле-



жит на середине прямолинейного участка, а амплитуда сигнала такова, что рабочая точка, перемещаясь, не выходит за пределы прямолинейного участка входной характеристики, искажения сигнала не происходит. КПД в этом случае меньше 50%. В зависимости от положения начальной рабочей точки на характеристиках активных элементов и амплитуды усиливаемого сигнала различают *три основных режима работы* усилительного каскада *A, B, C*, а также *ключевой режим D*. Режимы работы активных элементов часто называют *классами* усиления. Количественно режимы усиления для синусоидального сигнала характеризуют *углом отсечки* Θ , выраженным в градусах или радианах.

В режиме *A* для транзистора, включенного по схеме с ОЭ, начальная рабочая точка *A* находится примерно в середине линейной части проходной характеристики $I_k = f(U_6)$, а амплитуда сигнала такова (рис. 19.8*a*), что ток в выходной цепи существует в течение всего периода сигнала. При этом угол отсечки равен $\Theta = 180^\circ$. Рабочая точка *A*, перемещаясь по нагрузочной линии, не выходит за пределы точек *1* и *2* на нагрузочной линии (см. рис. 19.7*в*, точка *A*). При работе ниже точки *2* транзистор переходит из активного режима работы в режим отсечки, а при работе выше точки *1* — в режим насыщения. Из-за большого тока КПД в этом режиме низкий,

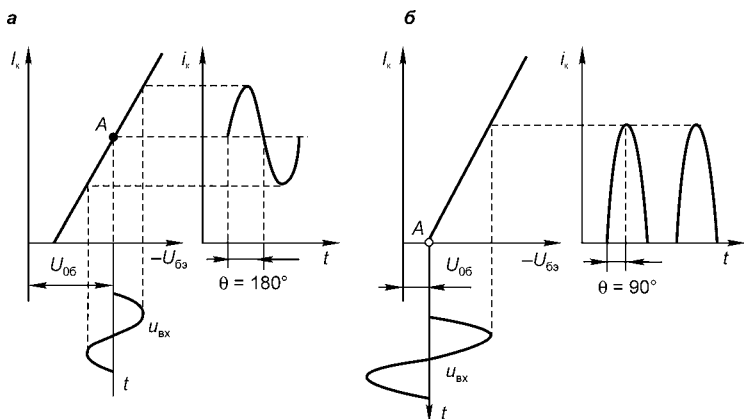


Рис. 19.8
Режимы работы усилителя
a — режим *A*; *б* — режим *B*.

менее 50%. Это основной недостаток рассматриваемого режима. В режиме *A* усилитель работает почти без искажений, а форма выходного сигнала соответствует форме входного. Режим *A* используют в основном в каскадах предварительного усиления.

В условиях *режима B* начальная рабочая точка *A* лежит в начале проходной характеристики (рис. 19.8б). Ток коллектора замыкается через усилитель, работающий в активном режиме лишь в течение отрицательного (для транзистора типа *p-n-p*) полупериода входного напряжения, во время же другого полупериода тока нет, т. е. транзистор закрыт, рабочая точка *A* находится ниже точки 2 на нагрузочной линии — в области отсечки (см. рис. 19.7в, точка *A*). Угол отсечки Θ составляет 90° . КПД усилителя, работающего в режиме *B*, значительно выше, чем для режима *A*, поскольку меньше ток $I_{0к}$.

В режиме *B* усилитель имеет высокий КПД (до 80%), однако усиливается только один полупериод входного сигнала. Кроме того, сигнал сильно искажается. Для усиления сигнала в течение всего периода используют двухтактные схемы, когда одно плечо схемы работает в положительный полупериод, а другое — в отрицательный.

В *режиме C* начальная рабочая точка *A* располагается правее начальной точки проходной характеристики (рис. 19.9). Угол отсечки Θ менее 90° . В отсутствие входного сигнала тока через транзистор нет. При подаче сигнала ток коллектора существует в течение времени, меньшем отрицательного полупериода напряжения входного сигнала, причем искажение сигнала больше, чем в режиме *B*. КПД усилителя, работающего в режиме *C*, выше, чем в режиме *B*, так как ток $I_{0к}$ отсутствует.

Режим *C* применяют в мощных резонансных усилителях.

Режим D называют ключевым. Транзистор в этом режиме работы усилителя находится либо в состоянии отсечки, либо в состоянии насыщения. В первом случае ток через активный элемент равен нулю, во втором — равно нулю падение напряжения

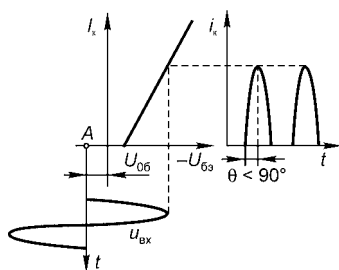


Рис. 19.9
Режим *C* работы усилителя

между выходными зажимами усилителя. КПД в этом режиме выше, чем в режиме *C* (близок к единице), потери энергии малы. Этот режим используют только для усиления прямоугольных сигналов.

19.6. СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ УСИЛИТЕЛЯ

Основные свойства усилительного каскада, определяющие КПД, нелинейные искажения, мощность сигнала на нагрузке определяются положением начальной рабочей точки. Поэтому изменение положения начальной рабочей точки должно находиться в заданных пределах.

Если же активным элементом является биполярный транзистор, то изменение температуры или замена активного элемента могут повлиять на значение коэффициента усиления по току и значение теплового тока (обратного тока коллекторного перехода). Если используется полевой транзистор, то влияние скажется на напряжении отсечки и крутизне характеристики. Поэтому схема подачи смещения фиксированным током нецелесообразна, особенно если активным элементом является биполярный транзистор по схеме с ОЭ, наиболее часто применяемый в усилителях большой мощности.

При подаче смещения фиксированным напряжением изменение температуры структуры прибора и замена транзистора в меньшей степени влияют на ток коллектора (при использовании в качестве активного элемента биполярного или полевого транзисторов), поэтому такие схемы находят большее применение в промышленности. Для того чтобы обеспечить работоспособность усилительного каскада при изменении температурных условий в режиме *A*, используют схемы стабилизации положения начальной рабочей точки.

Различают эмиттерную и коллекторную стабилизации. Эмиттерную стабилизацию осуществляют введением в схему последовательной отрицательной ОС по постоянному

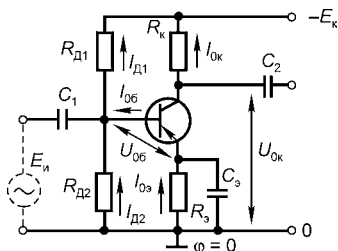


Рис. 19.10
Схема эмиттерной стабилизации работы усилителя

току (см. рис. 19.10). Напряжение обратной связи снимается с резистора R_3 , который включен в цепь эмиттера. Напряжение смещения, приложенное к эмиттерному переходу, равно

$$U_{06} = R_{Д2}I_{Д2} - R_3I_{03}. \quad (19.18)$$

С изменением характеристики транзистора изменится ток коллектора $I_{0к}$, а следовательно, и ток эмиттера I_{03} .

С увеличением этих токов начальная рабочая точка на выходной динамической характеристике должна была бы подняться вверх (см. рис. 19.7в), но этого не произойдет, так как напряжение смещения уменьшится (по формуле (19.18)), а вместе с этим уменьшатся и токи транзистора. Следовательно, начальная рабочая точка останется на прежнем уровне. Для исключения влияния отрицательной обратной связи по переменному току на коэффициент усиления параллельно резистору R_3 включен конденсатор C_3 . Если конденсатор C_3 отсутствует, то переменная составляющая эмиттерного тока создает на резисторе падение напряжения $u_3 = R_3i_3$, что снижает усиливаемое напряжение $u_6 = u_{вх} - R_3i_3$, а следовательно, и коэффициент усиления. Чтобы переменная составляющая на всех частотах усиливаемого напряжения не проходила через резистор, емкость конденсатора C_3 должна быть большой и емкостное сопротивление $1/(2\pi fC_3) \ll R_3$.

Коллекторная стабилизация (рис. 19.11а) осуществляется введением параллельной отрицательной ОС по напряжению. Напряжение подается через резистор R_{06} , который включают между коллектором и базой транзистора. При этом напряжение на коллекторе $U_{0к} = E_k - R_k(I_{06} + I_{0к}) = U_{06} + R_{06}I_{06}$. Поскольку напряжение U_{06} мало по сравнению с напряжением на резисторе R_{06} , то им можно пренебречь. Тогда

$$R_{06}I_{06} = E_k - R_k(I_{0к} + I_{06}). \quad (19.19)$$

Из уравнения (19.19) следует, что при изменении параметров транзистора и, следовательно, увеличении тока $I_{0к}$ напряжение на резисторе, равное $R_{06}I_{06}$, уменьшается, а значит, и уменьшается ток I_{06} . Это вызывает уменьшение тока $I_{0к}$.

Чтобы исключить отрицательную ОС по переменной составляющей коллекторного напряжения (что вызвало



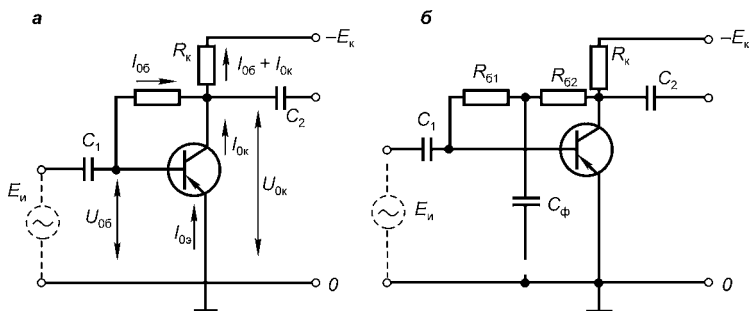


Рис. 19.11

Коллекторная стабилизация работы транзистора

а — принципиальная схема с резисторной обратной связью; *б* — принципиальная схема с конденсаторной обратной связью.

бы снижение коэффициента усиления усилителя), в цепь базы включают конденсатор C_{ϕ} (рис. 19.11б).

При этом резистор R_{06} заменяют двумя резисторами с примерно равными сопротивлениями и конденсатор одной обкладкой включают между ними, а вторую обкладку соединяют с заземленной точкой, в результате чего переменная составляющая напряжения не попадает на резистор R_{61} . При этом сопротивление конденсатора $1/\omega C_{\phi}$ должно быть значительно меньше (в десятки раз) сопротивления $R_6 = R_{61} + R_{62}$.

Коллекторная стабилизация проще и экономичней эмиттерной, но уступает ей по диапазону стабилизируемых температур транзистора (стабилизация осуществляется в пределах изменения температуры не более, чем на $20...30^\circ$, и при изменениях статического коэффициента передачи по току не более чем в $1,5...2$ раза).

В транзисторных схемах общую точку заземляют и ее потенциал принимают равным нулю, а потенциалы других точек схемы определяют относительно нулевого потенциала.

19.7.

ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ В УСИЛИТЕЛЬНОМ КАСКАДЕ

К особенностям различных способов включения транзисторов в схемах следует отметить то, что в схеме с *общей базой* ОБ усиления по току не происходит ($K_I = I_K/I_{\text{э}} < 1$). Коэффициент усиления по напряжению

равен $K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{R_K I_K}{R_{\text{вх}} I_3}$ и, поскольку $R_K \gg R_{\text{вх}}$, $I_K \approx I_3$, то коэффициент усиления по напряжению велик. Тогда коэффициент мощности $K_P = K_I K_U \approx K_U$. В схеме соединений с *общим эмиттером* ОЭ коэффициент усиления по току $K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = I_K/I_6$, а так как $I_6 \ll I_K$, то усиление по току значительное. Увеличение входного напряжения вызывает уменьшение выходного напряжения, так как полярности напряжений противоположны и сдвиг фаз составляет 180° . Входное сопротивление для схемы с ОЭ значительно больше, чем в схеме с ОБ. При включении по схеме с ОЭ происходит значительное усиление и по напряжению, и по мощности (усиление по току от десятков до сотен, по напряжению — несколько сотен, по мощности — до десятков тысяч). Схемы с ОЭ являются наиболее используемыми.

В схеме с общим коллектором ОК выходное напряжение приложено к эмиттерному переходу, при незначительном его увеличении происходит значительное изменение тока эмиттера, поэтому выходное сопротивление невелико (до сотен ом). Коэффициент усиления по току $K_I = I_3/I_6 = \frac{1}{1-\alpha}$ больше, чем в схеме с ОЭ. Коэффициент усиления по напряжению $K_U < 1$, так как $U_{\text{бэ}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}$, т. е. входное напряжение должно быть выше выходного. Усиление по мощности в схеме с ОК небольшое, оно значительно меньше, чем в схемах с ОБ и ОЭ. Поскольку в схеме с ОК $K_U \approx 1$ и фазы входного и выходного напряжений совпадают, схему с ОК называют *эмиттерным повторителем*.

19.8. ВЫХОДНОЙ КАСКАД УСИЛИТЕЛЯ

В устройствах автоматики нагрузкой выходного каскада усилителя низкой частоты может быть электромагнитное реле, электродвигатель или какой-нибудь иной исполнительный механизм.

Выходной каскад, так же как и предварительный каскад, может быть изготовлен на транзисторе по схеме с общим эмиттером. Следует отметить, что, так как сопротивление нагрузки R_n обычно гораздо меньше внутреннего сопротивления коллекторной цепи $R_{\text{вн.к}}$, мощность,



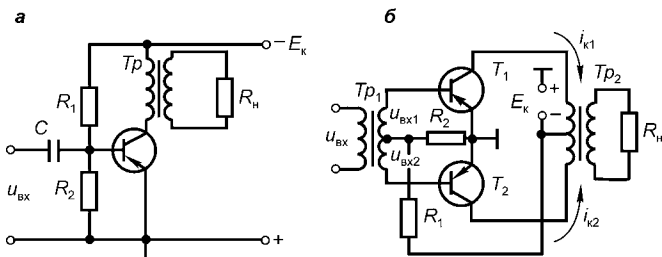


Рис. 19.12
Схемы усилителей

а — однотактного; б — двухтактного.

которая выделяется на нагрузке, включенной непосредственно в цепь коллектора, будет весьма мала. Для того чтобы эта мощность была максимально возможной, необходимо выполнить условие $R_H = R_{вн.к}$, т. е. сопротивление нагрузки должно быть равно внутреннему сопротивлению источника полезного сигнала. Для этого на практике применяют согласующие трансформаторы (рис. 19.12а). Подобные схемы однотактного транзисторного усилителя мощности с общим эмиттером применяются в том случае, если выходная мощность невелика. При этом нагрузка R_H включается через согласующий трансформатор Tr . Для согласования внутреннего сопротивления коллектора и нагрузки определяется коэффициент трансформации k согласующего трансформатора Tr .

Так как $U_1/U_2 = W_1/W_2 = I_2/I_1 = k$, то вносимое в цепь коллектора сопротивление (сопротивление нагрузки, приведенное к первичной цепи) будет равно

$$R'_H = R_H k^2. \quad (19.20)$$

Если принять $R'_H = R_{вн.к}$, то коэффициент трансформации будет равен

$$k = \sqrt{R_{вн.к} / R_H},$$

т. е. трансформатор должен быть *понижающим*, так как $R_H < R_{вн.к}$.

Схемы предварительного и выходного каскадов усилителя низкой частоты работают в *режиме А*. При таком режиме начальное положение рабочей точки выбирают в середине нагрузочной прямой. Амплитуда переменной составляющей коллекторного тока при этом меньше тока

$I_{0к}$ коллектора. Работа в режиме А характеризуется минимальными нелинейными искажениями и низким КПД (порядка 40%). В этом режиме обычно работают все предварительные и маломощные выходные каскады усилителей с одним транзистором или одной электронной лампой.

В том случае, когда необходимо получить большую выходную мощность, применяют двухтактные усилители с двумя транзисторами или с двумя лампами. Такой усилитель состоит из двух одинаковых половин (рис. 19.12б), каждая из которых аналогична усилителю, представленному на рис. 19.12а. Особенность двухтактной схемы состоит в том, что ее можно использовать в таком режиме, когда ток $I_{0к}$ коллекторных цепей близок к нулю. Этот режим соответствует *режиму В*. При работе в таком режиме КПД усилителя может достигать 70%. Рабочая точка размещается в области токов базы, близких к нулю. В результате обе половины схемы работают поочередно, причем каждая открывается во время действия положительных полупериодов входных напряжений, так как они сдвинуты по фазе на 180°. Импульсы тока баз и коллекторов также сдвинуты на 180°. В магнитопроводе трансформатора Tr_2 образуется магнитный поток, близкий к синусоидальному.

19.9. МНОГОКАСКАДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Усилители, применяемые на практике, состоят из нескольких каскадов, при этом каждый отдельный каскад в составе усилителя выполняет свои функции. На рис. 19.13а приведена структурная схема многокаскадного усилителя, а на рис. 19.13б — схема двухкаскадного усилителя с RC -связью, применяемая на практике (указаны только основные элементы).

Входное устройство служит для передачи сигнала от источника во входную цепь каскада предварительного усиления. В качестве входного устройства могут быть использованы конденсаторы, резисторы, трансформаторы. Так, например, входными устройствами на рис. 19.13б являются конденсаторы C_1 и C_2 . Конденсатор C_1 включают для того, чтобы исключить прохождение постоянной составляющей тока и напряжения смещения первого активного элемента (транзистора) в источник сигнала.

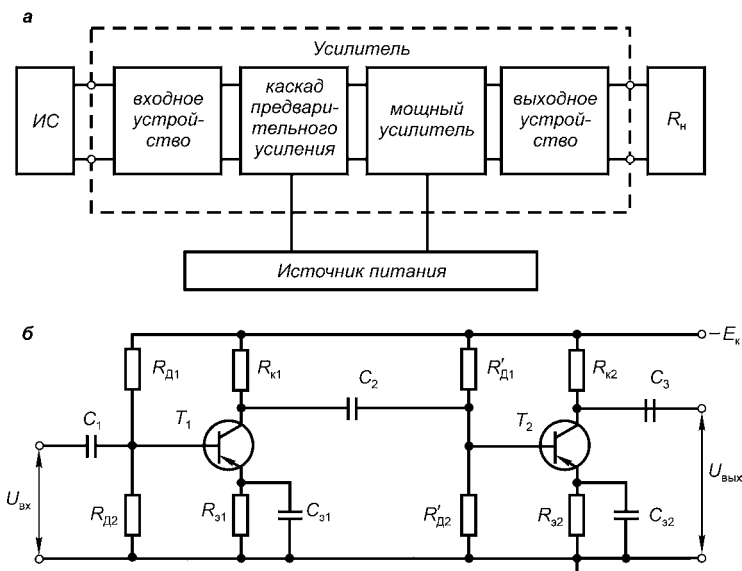


Рис. 19.13
Двухкаскадный усилитель с RC-связью

а — структурная схема; *б* — принципиальная схема.

ла, а также чтобы постоянная составляющая тока от источника сигнала не поступала на вход активного элемента. Конденсатор C_2 — входное устройство для второго каскада, он осуществляет связь каскадов.

Каскады предварительного усиления служат для усиления тока, напряжения или мощности сигнала до значения, необходимого для подачи на вход мощного усилителя. Для уменьшения нелинейных искажений в них почти всегда используется *режим А*, а транзисторы обычно включают по схеме с ОЭ.

Мощный усилитель предназначен для выделения в нагрузке требуемой мощности и может состоять из нескольких каскадов. Иногда мощный усилитель называют *оконечным*. Усилительный элемент в них может работать как в режиме *А*, так и в режиме *В*. Транзисторы, работающие в силовых цепях, включают по схемам с ОЭ, а в слаботочных цепях — по схемам с ОЭ и с ОБ.

Выходное устройство необходимо для передачи сигнала из выходной цепи последнего усилителя в электроприемник. В качестве выходного устройства используют

трансформаторы, конденсаторы и резисторы. Трансформаторы служат, например, для согласования выходного сопротивления последнего усилителя с сопротивлением нагрузки (см. § 19.8). На рис. 19.13б выходным устройством первого каскада является конденсатор C_2 . Конденсаторы и резисторы используют для разделения постоянных составляющих тока и напряжения выходной цепи усилителя и нагрузки.

Межкаскадные связи служат для передачи сигнала от источника сигнала на вход первого усилителя, от выхода одного каскада на вход другого и от выходной цепи последнего усилителя на нагрузку, осуществляя функции разделительных элементов. При этом через них напряжения питания подаются на зажимы усилительных устройств.

Основные виды межкаскадных связей — гальваническая, резисторная, емкостная, трансформаторная и дроссельная. Иногда используют комбинации этих связей. Прохождение постоянной составляющей сигнала обеспечивает только гальваническая связь, поэтому этот вид связи может быть применен и в усилителях постоянного тока. Гальваническая связь может быть непосредственной и потенциометрической. Усилительные каскады называют по типу использованной в нем связи: каскад с RC -связью (рис. 19.13б), трансформаторный каскад и т. д.

19.10. ИМПУЛЬСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Импульсному (ключевому) режиму работы транзистора соответствует два крайних состояния: транзистор или заперт, или полностью открыт. В этом режиме транзисторы используют как бесконтактные переключающие устройства. Рассмотрим работу схемы, приведенной на рис. 19.14а.

В интервалы времени $0-t_1$, t_2-t_3 и т. д. (рис. 19.14б), когда напряжение $U_{\text{вх}}$ равно нулю, переход «эмиттер–база» заперт и ток коллектора равен нулю. Следовательно, напряжение на коллекторе равно напряжению источника питания $-E_{\text{к}}$ (рис. 19.14б), и транзистор заперт. Когда на вход схемы подают отрицательные запускающие импульсы (интервалы времени t_1-t_2 , t_3-t_4), переход «эмиттер–база» открывается, и в коллекторной цепи существует ток. Амплитуду импульсов $U_{\text{и}}$ выбирают такой, чтобы



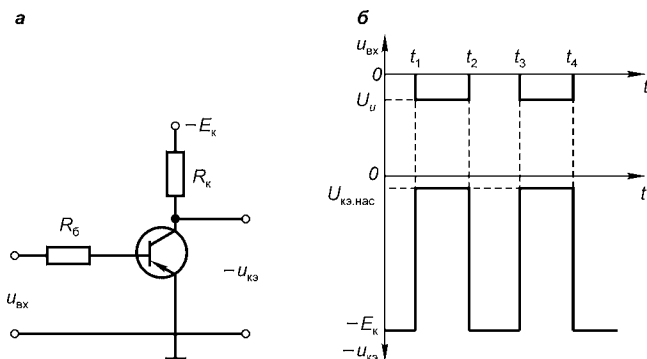


Рис. 19.14
Ключевой режим работы транзистора

а — принципиальная схема; б — диаграмма, поясняющая работу в ключевом режиме.

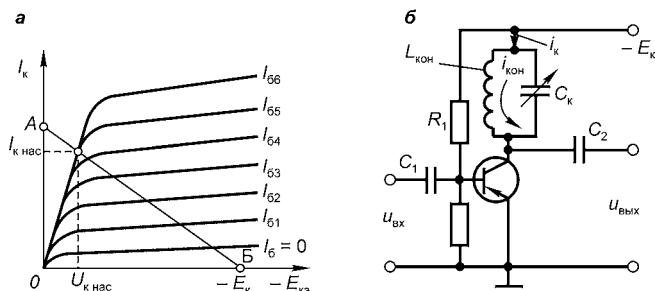


Рис. 19.15
Резонансный усилитель

а — семейство вольт-амперных характеристик; б — схема; АБ — нагрузочная линия для импульсного режима работы.

коллекторный ток при заданных R_k и E_k достигал максимального значения, равного току насыщения $I_{k, \text{нас}} = E_k / R_k$ (рис. 19.15а). При этом напряжение на коллекторе $U_{k, \text{нас}}$ близко к нулю (рис. 19.14б), т. е. транзистор полностью открыт. Разновидностью усилителей, работающих в импульсном режиме, являются так называемые избирательные или резонансные усилители (рис. 19.15б).

В этих усилителях в качестве нагрузки коллекторной цепи используют параллельный колебательный $L_k C_k$ -контур, настроенный на частоту сигнала f_c . Для сигнала с резонансной частотой или близкой к ней частотами контур имеет большое сопротивление $R_{k, \text{рез}}$. Таким образом, контур позволяет выделить резонансное напряжение.

19.11. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Усилителями постоянного тока (УПТ) называют такие приборы, у которых с помощью медленно изменяющихся входных электрических сигналов усиливаются не только переменные, но и постоянные составляющие входных напряжения и тока. Низшая рабочая частота таких усилителей нулевая, а верхняя может быть очень высокой (несколько мегагерц).

Усилители постоянного тока — наиболее распространенный тип усилительных устройств в вычислительной технике, а также устройств автоматического управления. Они имеют много разновидностей (дифференциальные, операционные, усилители с преобразованием сигнала и др.). Амплитудно-частотная характеристика УПТ имеет вид, представленный на рис. 19.16, и ограничена частотной полосой пропускания ($0-f_n$). Исходя из назначения УПТ, связь между каскадами должна осуществляться таким образом, чтобы обеспечивалось прохождение постоянной составляющей, поэтому для межкаскадной связи нельзя использовать конденсаторы и трансформаторы. Усилители не должны содержать также блокировочных и разделительных конденсаторов. Связь между каскадами осуществляется или через резисторы, или непосредственно с помощью соединительных проводников (гальваническая межкаскадная связь).

В УПТ необходимо обеспечить условие, чтобы в отсутствие входного сигнала на выходе отсутствовали как переменная, так и постоянная составляющие сигнала, иначе нарушится пропорциональность между входным и выходным напряжениями. Однако если не будут приняты соответствующие меры, это требование в УПТ не будет соблюдаться. Отклонение напряжения на выходе усилителя от

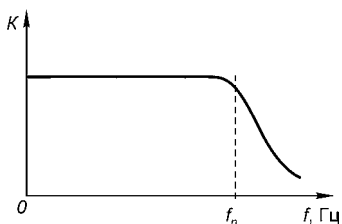


Рис. 19.16
Амплитудно-частотная
характеристика

начального (нулевого) значения в отсутствие сигнала называется *дрейфом усилителя*. Основными причинами дрейфа являются температурная и временная нестабильность параметров усилительных элементов, резисторов и источников питания, а также низкочастотные шумы и помехи. Дрейф

нуля искажает усиливаемые сигналы, может нарушить работу цепи настолько, что она будет неработоспособна.

Для компенсации дрейфа нуля, возникающего за счет изменения температуры, применяют специальные *термокомпенсационные схемы*, а на входе усилителя — *дифференциальные каскады*. Иногда усилитель предварительно прогревают, чтобы все его элементы к началу работы имели постоянную температуру. Для исключения дрейфа, являющегося следствием нестабильности источников питания, последние стабилизируют с помощью электронных, магнитных и других стабилизаторов. УПТ в основном выполняют в виде гибридных и полупроводниковых интегральных микросхем. Усилители могут быть одноктактными и двухтактными (дифференциальными). В настоящее время усилители постоянного тока выполняют по дифференциальной схеме.

19.11.1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

По структуре дифференциальные усилители (ДУ) являются усилителями постоянного тока. В микроэлектронике они являются одним из универсальных элементов линейных интегральных микросхем. Другое их название — *параллельно-балансные каскады*. Их используют с целью обеспечения значительного снижения дрейфа нуля в усилителях постоянного тока. Принцип работы балансной схемы можно пояснить на примере четырехплечевого моста, показанного на рис. 19.17а. Если выполняется условие $R_1/R_2 = R_4/R_3$, т. е. мост сбалансирован, то в нагрузочном сопротивлении R_n ток равен нулю. Баланс не нарушится и в том случае, если будут изменяться E и сопротивления резисторов плеч моста, но при условии, что соотношение между сопротивлениями резисторов сохраняется. На рис. 19.17б представлена схема простейшего дифференциального каскада. Эта схема аналогична схеме рис. 19.17а, если резисторы R_2 и R_3 заменить транзисторами T_1 и T_2 и принять, что $R_1 = R_{к1}$, а $R_4 = R_{к2}$. Сопротивления резисторов $R_{к1}$ и $R_{к2}$ выбирают равными, а транзисторы T_1 и T_2 — с идентичными характеристиками. В этом случае схема будет симметрична.

Как и в случае четырехплечевого моста, в отсутствие сигнала напряжение на выходе $U_{вых12}$ равно нулю, так как

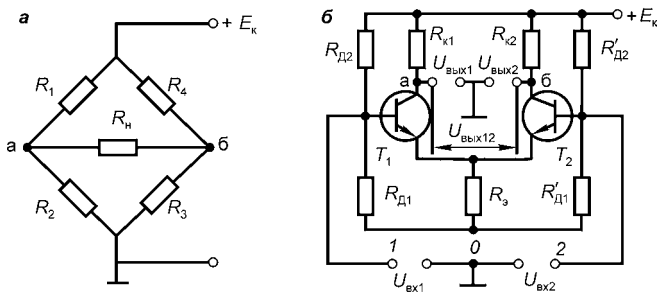


Рис. 19.17

Принцип работы дифференциального усилителя

а — четырехплечевой мост; б — принципиальная схема дифференциального усилителя.

токи и потенциалы коллекторов транзисторов T_1 и T_2 равны. Поскольку схема симметрична, всякое изменение характеристик транзисторов (за счет изменения температуры или из-за старения) вызовет одинаковое изменение токов в обоих плечах, поэтому разбаланса схемы не произойдет и дрейф выходного напряжения будет практически равен нулю.

Как изменится состояние цепи при подаче на входы 1 и 2 ДУ сигналов, равных по значению и синфазных или равных по значению, но с противоположными фазами (дифференциальных)? В первом случае потенциалы баз транзисторов T_1 и T_2 изменятся следующим образом: $\Delta U_{б1} = \Delta U_{б2} = U_{вх1} = U_{вх2}$. На такое же значение изменятся потенциалы эмиттеров. Ток через резистор R_3 поровну распределится между плечами ДУ, и потенциалы коллекторов изменятся на одно и то же значение. Напряжение на выходе будет равно нулю ($U_{вых12} = 0$). Таким образом, идеально симметричный ДУ не пропускает на выход синфазный сигнал. Во втором случае, если на вход ДУ поданы дифференциальные сигналы $|U_{вх1}| = |U_{вх2}|$, входное напряжение между точками 1 и 2 будет равно разности этих сигналов $U_{вх12} = U_{вх1} - U_{вх2}$. Поскольку схема симметрична, часть напряжения, равная $U_{вх12}/2$, будет приложена к эмиттерному переходу одного транзистора (со знаком плюс), а другая часть — к эмиттерному переходу другого транзистора (со знаком минус). Потенциал эмиттера одного транзистора увеличится, а другого уменьшится на $U_{вх12}/2$, соответственно, приращения токов в плечах схемы будут одинаковы, но разных знаков. Потенциал коллектора од-

ного транзистора увеличится, а другого уменьшится на одно и то же значение. На выходе схемы между точками *a* и *б* появится разность потенциалов, а следовательно, выходное напряжение $U_{\text{вых}12} = U_{\text{вых}1} - U_{\text{вых}2}$.

Таким образом, дифференциальный сигнал, поданный на вход ДУ, вызывает появление усиленного сигнала на выходе. Поскольку рассмотренный тип усилителей реагирует только на дифференциальный сигнал, его называют *дифференциальным усилителем*.

В идеальных ДУ за счет подавления синфазного сигнала дрейфа нуля не существует, так как напряжение дрейфа обоих плеч является синфазным сигналом для симметричных цепей ДУ. Помехи и наводки, действующие одновременно на оба входа, часто являются синфазными составляющими входного сигнала, но поскольку абсолютная симметрия плеч ДУ практически невозможна, то полностью подавить синфазную составляющую входного сигнала не удастся. В применяемом на практике ДУ дрейф нуля существует, но он очень незначителен по сравнению с дифференциальным (полезным) сигналом. Коэффициент усиления дифференциального сигнала при идеальной симметрии схемы, когда отсутствует синфазная составляющая входного сигнала, будет равен

$$K_{\text{д}} = \frac{U_{\text{вых}12}}{U_{\text{вх}1} - U_{\text{вх}2}}, \quad (19.21)$$

где выходное напряжение $U_{\text{вых}12} = U_{\text{вых}1} - U_{\text{вых}2}$.

В применяемом на практике ДУ и синфазной составляющей сигнала

$$U_{\text{вых}12} = K_{\text{д}}(U_{\text{вх}1} - U_{\text{вх}2}) + K_{\text{с}} \frac{U_{\text{вх}1} + U_{\text{вх}2}}{2}, \quad (19.22)$$

где $K_{\text{д}} = \frac{U_{\text{вых}12}}{(U_{\text{вх}1} + U_{\text{вх}2})/2}$ — коэффициент усиления синфазного сигнала, когда дифференциальный сигнал отсутствует.

Качество дифференциального усилителя оценивают коэффициентом подавления синфазного сигнала

$$K_{\text{п.с}} = K_{\text{д}}/K_{\text{с}}, \quad (19.23)$$

который характеризует эффективность дифференциального усилителя. Коэффициент подавления синфазного

сигнала должен быть больше $10^4 \dots 10^5$ или находиться в пределах 80...100 дБ. В интегральных микросхемах добиваются практически идеальной симметричности плеч ДУ.

19.11.2. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель постоянного тока с дифференциальным входным каскадом. Он обладает высоким и стабильным коэффициентом усиления (от 1000 до 100 000), широкой полосой пропускания ($f = 10 \dots 100$ МГц), высоким входным сопротивлением ($R > 10$ кОм), малым выходным сопротивлением ($R_{\text{вых}} < 100$ Ом), малым дрейфом нуля, высоким коэффициентом подавления синфазных сигналов, несимметричным выходом.

Таким образом, под термином «операционный усилитель» понимают высокоэффективный универсальный усилитель.

Условное обозначение ОУ показано на рис. 19.18а, а его амплитудная характеристика — на рис. 19.18б. На рис. 19.19а показана схема включения ОУ. Вход 1, обозначенный знаком плюс, называют *неинвертирующим* (прямым), так как сигнал на выходе и сигнал на этом входе имеют одинаковую полярность. Вход 2, обозначенный знаком минус, называют *инвертирующим*, так как сигнал на выходе по отношению к сигналу на этом входе имеет противоположную полярность.

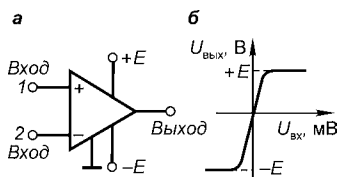


Рис. 19.18
Операционный усилитель
а — условное обозначение; б — амплитудная характеристика.

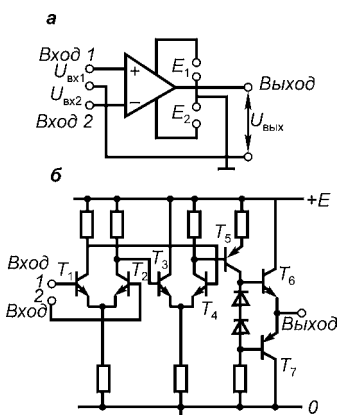


Рис. 19.19
Операционный усилитель
а — схема включения; б — принципиальная схема.

Горизонтальные участки амплитудной характеристики соответствуют полностью открытому (насыщенному) режиму работы ОУ. При изменении напряжения входного сигнала на этих участках характеристики напряжение остается без изменений. Наклонному линейному участку амплитудной характеристики соответствует пропорциональная зависимость выходного напряжения от входного, а наклон характеристики определяется коэффициентом усиления ОУ.

На рис. 19.19б показана принципиальная схема ОУ. Питание осуществляется от двух последовательно включенных источников (источник питания со средней точкой), напряжения которых одинаковы, но знаки относительно заземленной точки разные. Этим обеспечивается нулевой сигнал на выходе в отсутствие входного сигнала и возможность получить выходной сигнал или положительной, или отрицательной полярности. Сигнал можно подавать от симметричного источника, соединенного с общим (нулевым) проводом, или от двух отдельных источников, один из которых подключают к инвертирующему входу и общему проводу, другой к неинвертирующему входу и общему проводу. С целью повышения стабильности работы усилителя входной сигнал подают на неинвертирующий вход, а к инвертирующему входу подключают обратную связь ОС. В этом случае можно получать устройства с различными свойствами, которые будут определяться параметрами цепи ОС. С помощью такого ОУ можно осуществлять математические операции (умножение, интегрирование, дифференцирование). Многообразие функций, которые может выполнять ОУ, сделало его основным универсальным устройством аналоговых (линейных) интегральных микросхем. На базе ОУ успешно работают триггер Шмитта, мультивибратор, компаратор и другие устройства.

В структуру типовой схемы ОУ, показанной на рис. 19.19б, входят два дифференциальных каскада: один — на транзисторах T_1 и T_2 , другой — на транзисторах T_3 и T_4 (каскады предварительного усиления). В схему также входят переходный одностактный каскад на транзисторе T_5 и выходной каскад на транзисторах T_6 и T_7 , выполненный по схеме эмиттерного повторителя с дополнительной симметрией. Диоды в схеме выполняют роль нелинейных сопротивлений, обеспечивающих температурную стабильность работы транзисторов.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

20.1.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Наиболее часто преобразователи классифицируют в зависимости от вида коммутации (естественной и принудительной). В преобразователях с естественной коммутацией работа полупроводниковых приборов происходит под действием переменного напряжения источника питания. Коммутация в преобразователях с принудительной коммутацией происходит с помощью дополнительных коммутирующих контуров.

В зависимости от промышленного назначения и от режима работы преобразователи разделяют на следующие типы:

1) преобразователи, обеспечивающие передачу энергии в обоих направлениях и связывающие цепь переменного тока с цепью постоянного тока (см. гл. 18); применяют в выпрямительном и инверторном режимах с естественной коммутацией;

2) преобразователи, связывающие цепь постоянного тока с цепью переменного тока; применяют преимущественно в инверторном режиме с принудительной коммутацией;

3) преобразователи, разделяющие две цепи постоянного тока; применяют в режимах переключения постоянного тока с принудительной коммутацией;

4) преобразователи, разделяющие две цепи переменного тока одной частоты; применяют в режимах прерывания переменного тока с естественной или принудительной коммутацией;

5) преобразователи, связывающие цепи переменного тока с разной частотой; применяют в режимах преобра-

зования частоты с естественной и принудительной коммутацией (непосредственный преобразователь частоты);

б) преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока, преобразователи постоянного тока с промежуточным высокочастотным звеном; применяют в комбинированных режимах, обусловленных комбинацией различных преобразователей.

В состав перечисленных преобразователей также входят устройства управления, регулирования и защиты, определяющие и режимы работы преобразователей.

Схемы управления требуют незначительного потребления энергии. Это формирователи управляющих сигналов, импульсные устройства, датчики, усилители сигналов, формирователи опорных напряжений и др.

Схемы защиты зависят от особенности используемой элементной базы преобразователей и применяемой схемы, а также от влияния примыкающих к ним электрических сетей.

20.2. ИНВЕРТОРЫ

Инверторы преобразуют энергию постоянного тока в энергию переменного тока с заданной частотой и амплитудой выходного напряжения. Ограничения по генерируемой частоте определяются динамическими характеристиками используемых полупроводниковых приборов. В промышленности используются преимущественно однофазные и трехфазные инверторы.

Различают три типа автономных инверторов: инверторы тока, резонансные инверторы, инверторы напряжения. Наиболее часто используют *инвертор напряжения*. Его функциональные возможности весьма разнообразны: это возможность обратного преобразования переменного напряжения в постоянное напряжение, возможность являться активным фильтром тока и напряжения, а также компенсатором реактивной мощности. Инвертор напряжения может быть регулятором переменного напряжения и др.

Инвертор тока — это тип автономного инвертора, характеризующийся двумя отличительными энергетическими признаками:

1) входная цепь обладает свойствами источника постоянного тока, а выходная цепь — свойствами источника

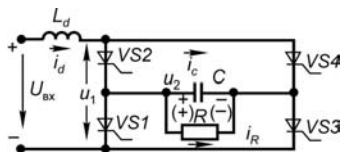


Рис. 20.1

Тиристорный инвертор тока

u_1 — напряжение на инверторе; u_2 — напряжение на нагрузке инвертора.

переменного тока (периодически переключаемая силовыми полупроводниковыми приборами с изменением полярности постоянного тока);

2) нагрузкой инвертора тока должна быть цепь со свойствами источника напряжения, т. е. с малым внутренним динамическим сопротивлением, допускающим существование в нем переменного тока.

Наиболее распространенная схема инвертора приведена на рис. 20.1. Входное напряжение $U_{вх}$ питания постоянного тока подается через сглаживающий реактор L_d . В качестве коммутирующих элементов используются тиристоры, работающие параллельно: одно плечо инвертора — $VS1$, $VS4$ и другое плечо — $VS2$, $VS3$.

При подаче управляющего сигнала на тиристоры $VS1$, $VS4$ ток замыкается через них, при этом коммутирующий конденсатор заряжается (слева «минус» — справа «плюс»). В соответствии с изменением напряжения на конденсаторе изменяется ток i_R в нагрузке R . При подаче управляющего сигнала на тиристоры $VS2$, $VS3$ последние включаются, а тиристоры $VS1$, $VS4$ запираются ввиду приложения к ним обратного напряжения. Конденсатор перезаряжается (в соответствии с полярностью в скобках на рис. 20.1).

Емкость конденсатора выбирают из условия, при котором тиристоры при выключении должны восстановить свои запирающие свойства:

$$C \geq (1 \dots 1,4) \frac{i_R t_b}{U_c}, \quad (20.1)$$

где t_b — время выключения тиристора, U_c — напряжение на конденсаторе.

На рис. 20.2 приведен инвертор напряжения с выходом на постоянном токе, выполненный на IGBT-транзисторах. Источником постоянного тока, как правило, является неуправляемый выпрямитель, подключенный к однофазной или трехфазной сети переменного тока, а его выходное напряжение через (см. клеммы «+» и «-») сглаживающий фильтр $L_{ф1}$, $C_{ф}$ подается на вход транзисторного инвертора, который преобразует напряжение посто-

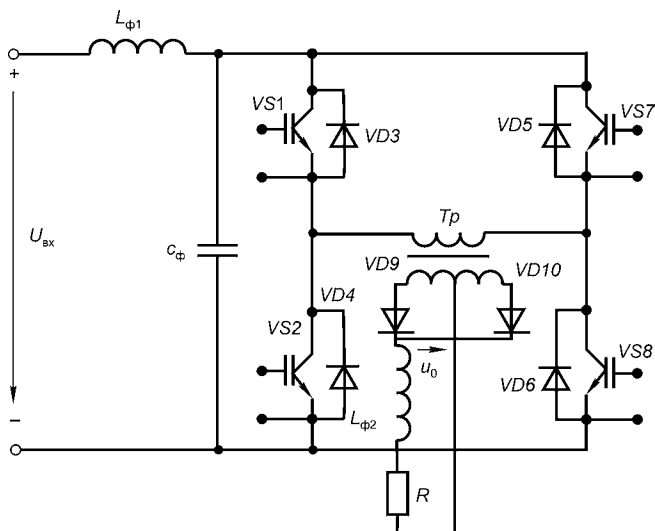


Рис. 20.2
Транзисторный инвертор напряжения
с выходом на постоянном токе

янного тока в высокочастотное (50...100 кГц) напряжение переменного тока. Силовой согласующий высокочастотный трансформатор Tp , неуправляемый выпрямитель на диодах $VD9$, $VD10$, сглаживающий дроссель $L_{\phi 2}$ обеспечивают постоянный сглаженный ток в нагрузке R . Регулирование режима работы инвертора осуществляется системой управления транзисторами $VS1$, $VS2$, $VS7$, $VS8$.

Инвертор напряжения работает следующим образом: с изменением с помощью импульсов управления продолжительности нахождения в открытом состоянии транзисторов $VS2$ и $VS7$ изменяется действующее значение напряжения, приложенного к первичной обмотке трансформатора Tp , и, следовательно, изменится и выходное напряжение u_0 выпрямителя на диодах $VD9$, $VD10$, и ток нагрузки I_{R0} . На временном интервале открытого состояния транзисторов $VS1$ и $VS8$ ток в нагрузке существует за счет энергии источника питания постоянного тока $U_{вх}$. Среднее значение выходного напряжения выпрямителя U_0 и тока нагрузки I_0 при принятии идеальными характеристики элементов схемы равны

$$U_0 = \frac{U_{вх} \cdot w_2 \cdot 2t_{uy}}{w_1 \cdot T}, \quad (20.2)$$

$$I_0 = I_{R0} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot w_2 \cdot 2t_{\text{uy}}}{w_1 \cdot T \cdot R}, \quad (20.3)$$

где w_1 — число витков первичной обмотки; w_2 — число витков вторичной обмотки трансформатора Tr ; t_{uy} — длительность импульса управления; T — период следования управляющих импульсов транзисторов $VS1$, $VS2$, $VS7$, $VS8$; R — сопротивление нагрузки.

В трехфазных инверторах полярности фазных напряжений на стороне переменного тока должны циклически меняться. Трехфазные схемы строятся при помощи трех однофазных инверторов, работающих со сдвигами по фазе на 120° .

Инверторы применяют в качестве источников питания специализированных электротехнологических установок, в частности для установок индукционного нагрева и получения высокочастотной индукционной плазмы. Широко используют инверторы с регулируемой выходной частотой для питания асинхронных двигателей.

20.3. ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Переключатель постоянного тока — это электронный аппарат, предназначенный для регулирования энергии приемника (нагрузки) постоянного тока и разделения двух цепей постоянного тока. Основной целью применения переключателей постоянного тока является регулирование потока энергии от источника постоянного тока к нагрузке.

В зависимости от принципа работы переключатели (полупроводниковые аппараты) постоянного тока бывают следующих двух типов:

- 1) переключатели постоянного тока для нечастых коммутаций (включения и выключения) электрических цепей;
- 2) переключатели, предназначенные для частых коммутаций электрических цепей.

В первом случае полупроводниковый аппарат выполняет защитную функцию при перегрузке и аварийных режимах. Во втором случае аппарат применяется для регулирования мощности энергии, потребляемой электроприемником, посредством периодического подключения и отключения электрической цепи.



В качестве коммутационного элемента в схеме прерывателя, как правило, используется транзистор или тиристор. Для отключения цепи постоянного тока необходимо снизить ток через тиристор до значения, меньшего тока удержания тиристора в открытом состоянии. Это достигается с помощью вспомогательной цепи коммутации.

Поэтому переключатели постоянного тока относятся к группе преобразователей с принудительной коммутацией. Коммутирующее напряжение обычно обеспечивается конденсатором, в некоторых случаях от независимого источника питания. Коммутационное положительное напряжение, как правило, прикладывается к катоду основного тиристора с помощью вспомогательного тиристора (рис. 20.3).

Переключение тиристора $VS1$ в проводящее состояние осуществляют подачей на управляющий электрод положительного сигнала управления или подключением с помощью ключа S_1 к аноду тиристора через ограничительное сопротивление R_0 . После снятия управляющего сигнала тиристор остается включенным неограниченное время, если ток в нагрузке R_n не снизится до значения меньше тока удержания силового тиристора $VS1$.

Принудительное выключение силового тиристора осуществляется цепью искусственной коммутации $C-VS2$. При этом включение тиристора $VS2$ может осуществляться в режиме оперативного управления ключом S_2 или автоматически, если ток нагрузки превысит допустимое значение.

Работа цепи принудительного выключения тиристора $VS1$ осуществляется следующим образом. При включенном тиристоре $VS1$ конденсатор C заряжается практически до напряжения источника питания $U_{вх}$ с полярностью, указанной на рисунке. Подача управляющего сигнала на тиристор $VS2$ в оперативном режиме осуществляется подключением анода тиристора через ограничительное сопротивление ключом S_2 . В аварийном режиме, если напряжение на резисторе $R_{ш}$ превысит порог срабатывания

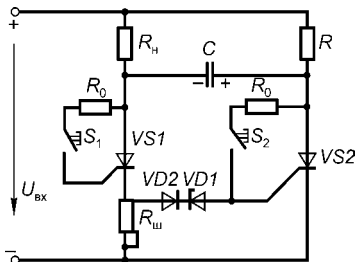


Рис. 20.3
Переключатель
постоянного тока

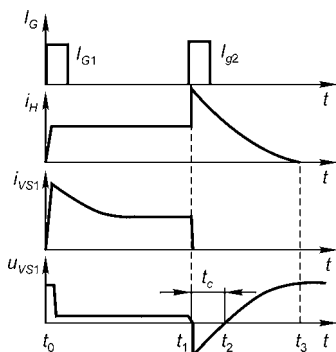


Рис. 20.4
 Диаграмма работы переключателя постоянного тока

I_{G1} , I_{G2} — импульсы управления тиристорами.

обесточивания нагрузки. После выключения тиристора происходит перезаряд конденсатора. При этом время перезаряда должно быть больше времени t_c восстановления запирающих свойств тиристора (рис. 20.4).

Скачок тока в цепи нагрузки обусловлен тем, что при включении тиристора $VS2$ источник питания и заряженный конденсатор окажутся включенными последовательно. Быстродействие отключения переключателя характеризуется временем $t = t_3 - t_1$, в течение которого конденсатор перезаряжается до напряжения источника питания. Время заряда конденсатора зависит от постоянной времени $\tau = RC$. Резистор R выбирают из условия ограничения тока до значения меньше тока удержания тиристора $VS2$ во включенном состоянии.

20.4. ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переключатели переменного тока с естественной или принудительной коммутацией предназначены для разделения цепей переменного тока одной частоты (рис. 20.5).

Различают два типа переключателей переменного тока в зависимости от режима их работы:

- 1) переключатели переменного тока для нечастых коммутаций (включения и выключения) электрических цепей;
- 2) переключатели, предназначенные для частых коммутаций электрических цепей.

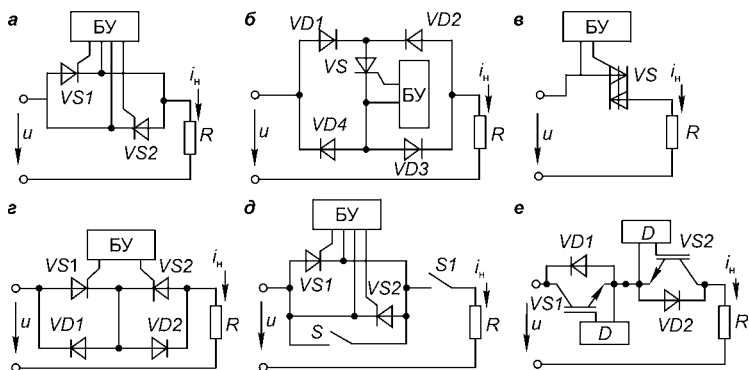


Рис. 20.5
Переключатели переменного тока

Кроме того, переключатели могут выполнять функцию регулирования мощности энергии на нагрузке. В этом случае их называют регуляторами переменного тока.

Ввиду широкого применения переключателей существует большое многообразие вариантов их исполнения. Силовая часть переключателя переменного тока может быть выполнена по схеме со встречно-параллельным включением тиристоров (рис. 20.5а), при различном сочетании тиристоров и диодов (рис. 20.5б, в) и на основе симметричного тиристора (симистора) (рис. 20.5в) или транзистора с изолированным затвором (рис. 20.5е). Эффективное сочетание контактной силовой системы ($S, S1$) с блоком тиристоров (комбинированные переключатели, рис. 20.5д) позволяет осуществлять коммутацию тока практически без образования электрической дуги. В этом случае предварительно включаются тиристоры, а затем происходит замыкание контактов S . С размыканием контактов S , когда напряжение на возникающей электрической дуге достигнет напряжения, достаточного для включения тиристоров, ток появится в шунтирующей полупроводниковой цепи, а контактная цепь с S обесточится.

После перехода значения тока в тиристорной цепи через нуль гальванический разрыв цепи обеспечивается разъединителем $S1$.

Перспективными из представленных силовых блоков переключателей представляются схемы, использующие встречно-параллельно включенные тиристоры и модули

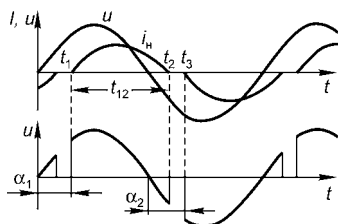


Рис. 20.6
 Диаграмма работы
 однофазного регулятора
 переменного тока

с транзисторами. Они содержат меньше полупроводниковых приборов и соответственно отличаются меньшими габаритами и стоимостью. Переключатель на транзисторах отличается легкостью управления с помощью стандартных драйверов D в отличие от специальных блоков управления тиристорами (БУ).

Представленные схемы переключателей переменного тока осуществляют естественную коммутацию электрической цепи. После снятия импульса управления ток прервется при переходе через нуль.

Особенностью полупроводниковых переключателей является возможность регулирования энергии, передаваемой от источника питания к нагрузке. Это обеспечивается прерывистым режимом работы тиристора (см. § 18.5). Увеличение угла регулирования α приводит к уменьшению времени существования тока t_{12} и росту искажения кривой напряжения на нагрузке u_n и за счет этого к изменению его действующего значения и первой гармоники (рис. 20.6). При этом ухудшается и качество потребляемого из сети тока из-за роста сдвига фазы тока относительно напряжения (увеличение потребления реактивной мощности) и за счет ухудшения его формы вследствие уменьшения длительности протекания.

Улучшение качества выходного напряжения достигается в трехфазных регуляторах переменного напряжения, основные схемы которых приведены на рис. 20.7.

Схема на рис. 20.7а (три однофазных регулятора при отсутствии нейтрального провода) характеризуется луч-

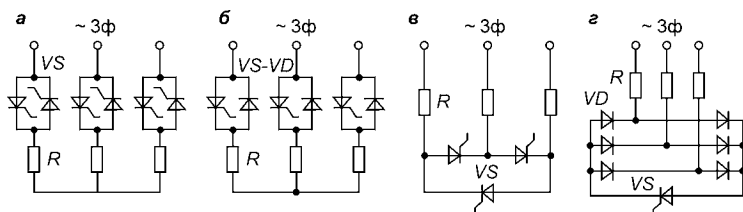


Рис. 20.7
 Трехфазные переключатели (регуляторы)

шим качеством выходного фазного напряжения. Более простая схема регулятора (рис. 20.7б) характеризуется худшим качеством выходного напряжения, проявляющимся в неодинаковости форм полуволн фазного напряжения. Схемы регуляторов, показанные на рис. 20.7в, г, применимы при условии доступности подключения ко всем шести выводам трехфазной нагрузки.

Для регуляторов переменного напряжения наиболее важна регулировочная характеристика. При работе на активную нагрузку это зависимость действующего значения выходного напряжения регулятора от угла регулирования α . Для однофазного регулятора регулировочная характеристика описывается следующим уравнением:

$$\frac{U_{н1}}{U_1} = \frac{1}{U_1} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U_1 \sin \vartheta)^2 d\vartheta} = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}, \quad (20.4)$$

где $U_{н1}$ — действующее значение первой гармоники напряжения на нагрузке; U_1 — действующее значение первой гармоники входного напряжения.

График регулировочной характеристики показан на рис. 20.8.

Как видно из графика, действующее значение первой гармоники выходного напряжения регулятора относительно действующего значения первой гармоники входного напряжения в зависимости от угла управления α имеет падающий вид.

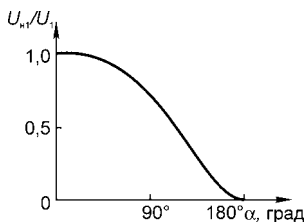


Рис. 20.8
Регулировочная характеристика

Существующее многообразие преобразователей обусловлено потребностью промышленности в управлении производственным процессом. При этом используют разветвленную сеть потребителей, работающих по своему нагрузочному графику. С целью повышения качества электрической энергии разработаны и различные способы совершенствования преобразователей, уменьшающие влияние на электрическую сеть. К таким преобразователям можно отнести резонансные преобразователи, где последовательно с конденсатором (см. рис. 20.1) подключается реактор и с включением тиристоров образуются колебательный контур. Возможен и другой

способ регулирования переменного напряжения в такой схеме — широтно-импульсное при естественной коммутации. Использование регуляторов с вольтодобавкой позволяет сгладить форму напряжения на нагрузке.

20.5. КОМПЕНСАТОРЫ РЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ

Выпрямители, регуляторы переменного напряжения, непосредственные преобразователи частоты имеют несинусоидальный входной ток, сдвинутый по фазе в сторону отставания от напряжения сети. Поэтому вентильные преобразователи, потребляя из сети активную мощность, искажают форму кривой напряжения питающей сети и вносят в нее реактивную мощность. Колебания реактивной мощности приводят к колебаниям уровня напряжения в сети.

Для решения этой проблемы используют специальные преобразовательные устройства, позволяющие управлять генерированием отдельных или всех неактивных составляющих полной мощности, имеющих в питающей сети и которые надо полностью или частично компенсировать. Такие преобразовательные устройства получили название вентильных компенсаторов неактивных составляющих полной мощности. К этим преобразователям относятся компенсаторы реактивной мощности, компенсаторы мощности искажений (активные фильтры), компенсаторы неактивных составляющих полной мощности.

20.5.1. КОНДЕНСАТОРНЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

На рис. 20.9а представлен компенсатор, добавляющий в питающую сеть емкостной реактивный ток. В этом случае используют коммутацию групп конденсаторов с помощью встречно-параллельно соединенных тиристоров. В установившемся режиме ток в конденсаторе опережает напряжение на четверть периода. Если включать тиристоры в моменты переходов тока емкости через нуль, т. е. в максимумы положительной и отрицательной полуволн напряжения, то не будет искажения тока емкости (рис. 20.9б).

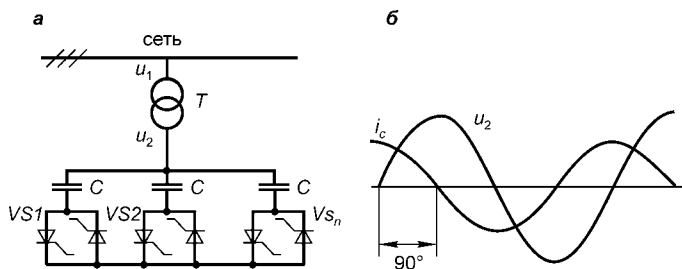


Рис. 20.9
Конденсаторный компенсатор реактивной мощности
а — принципиальная схема; б — диаграмма.

К достоинствам такого компенсатора следует отнести простоту изготовления, а к недостаткам — дискретность регулирования реактивной мощности, выдаваемой в питающую сеть, и некоторую задержку подключения очередных ступеней. Если последовательно с конденсаторами ввести реакторы для ограничения тока заряда конденсатора при его включении в произвольный момент времени, то указанной динамической задержки не потребуется.

20.5.2. КОМПЕНСАТОРЫ С УПРАВЛЯЕМЫМИ РЕАКТОРАМИ

В тех случаях, когда в сетях или линиях электропередачи требуется компенсация их емкостных токов, используют компенсатор индуктивной реактивной мощности в виде реактора, регулируемого встречно-параллельными группами тиристоров. Схема такого компенсатора и диаграммы его токов для двух значений угла регулирования α приведены на рис. 20.10. При плавном регулировании угла α нелинейно изменяется значение первой гармоники тока компенсатора. При этом появляются высшие гармоники тока нечетных порядков 3, 5, 7, 9, 11, 13.

Для исключения гармоник в токе, кратных трем, в трехфазных сетях компенсаторы соединяют в звезду без нейтрального провода. Тогда форма кривой тока компенсатора становится в каждой полуволне двухимпульсной (см. рис. 20.11). Однако при этом компенсатор лишается способности компенсировать реактивные мощности несимметрии каждой фазы (по первым гармоникам).

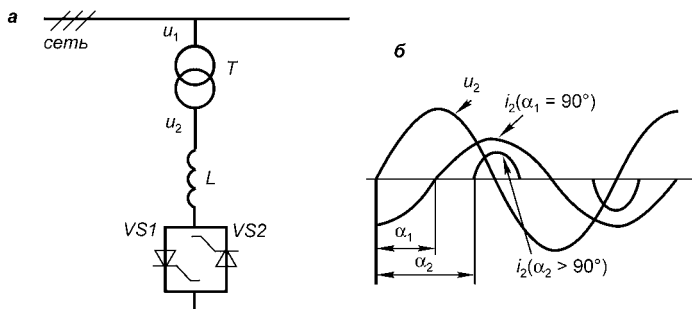


Рис. 20.10
Компенсатор с управляемым реактором
а — принципиальная схема; б — диаграмма.

Другая возможность управлять напряжением на реакторе, а значит, и его током для случая трехфазного компенсатора связана с включением реактора в цепь постоянного тока на выходе выпрямителя, как показано на рис. 20.12а. Один реактор для цепи постоянного тока выполнить дешевле, чем три реактора для цепи переменного тока, но при этом исключается возможность регулирования реактивных мощностей в отдельных фазах трехфазной сети. Входной ток такого компенсатора аналогичен входному току трехфазного мостового выпрямителя, работающего на индуктивную нагрузку. Отсутствие активного сопротивления в нагрузке выпрямителя (кроме малого активного сопротивления обмотки реактора и внутреннего сопротивления выпрямителя) требует значений углов регулирования выпрямителя α около 90° для получения малого выпрямленного напряжения с целью компенсации потерь в сопротивлениях. При этом фаза входного тока выпрямителя, определяемая углом α , также равна 90° .

Выпрямитель потребляет из сети реактивную мощность, значение которой регулируется небольшим изменением угла вблизи 90° за счет изменения выпрямленного тока (рис. 20.12б). Если постоянная времени цепи реактора существенно больше периода пульсаций выпрямленного напряжения, то регулирование значений входного тока выпрямителя (его первой гармоники) происходит почти

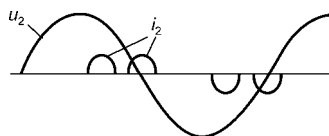


Рис. 20.11
Работа компенсатора
при соединении в звезду
без нейтрального провода

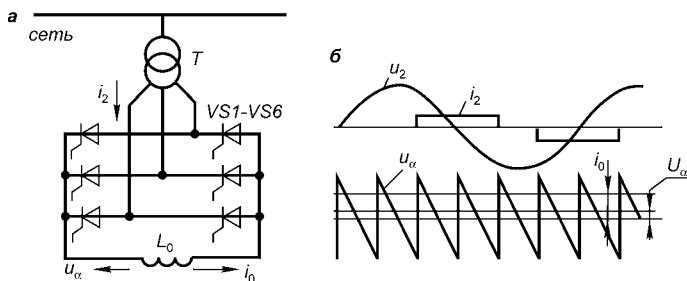


Рис. 20.12
Трехфазный компенсатор

а — принципиальная схема; *б* — диаграмма работы.

без искажения его формы, т. е. без дополнительной генерации высших гармоник по отношению к 5-й, 7-й, 9-й, 11-й, ... высшим гармоникам входного тока трехфазного мостового выпрямителя.

20.5.3. КОМБИНИРОВАННЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Конденсаторные компенсаторы компенсируют отстающий реактивный ток сети, а реакторные компенсаторы — опережающий реактивный ток сети. Комбинированные компенсаторы реактивной мощности компенсируют любой из этих токов. Пример такого компенсатора показан на рис. 20.13*а*. Он состоит из конденсатора и параллельно включенного с ним реакторного компенсатора. Векторная диаграмма для первых гармоник напряжения и токов компенсатора приведена на рис. 20.13*б*. Фаза реактивного тока на входе компенсатора ($+90^\circ$ или -90°) определяется соотношением значений нерегулируемого тока конденсатора и регулируемого тока реактора.

Рассмотренные компенсаторы позволяют изменять реактивную мощность путем изменения параметров реактивных элементов или с помощью тиристорного регулятора изменением напряжения на этих элементах.

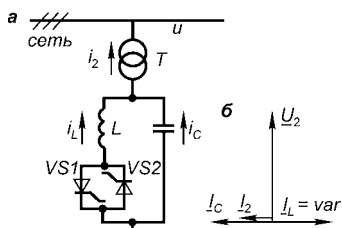


Рис. 20.13
Комбинированный компенсатор реактивной мощности

а — принципиальная схема; *б* — векторная диаграмма.

20.5.4. КОМПЕНСАТОРЫ С ВЕНТИЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ РЕАКТИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Использование силовых полупроводниковых приборов при создании статического автономного инвертора тока (рис. 20.14а) или инвертора напряжения (рис. 20.14б) позволяет на их основе получать источник реактивного напряжения.

Трехфазный параллельный инвертор тока выполнен на запираемых (GTO) тиристорах, а трехфазный инвертор напряжения — на IGBT-транзисторах. Оба инвертора работают в режиме с выходными токами, сдвинутыми на 90° относительно напряжения, т. е. в режиме источников реактивного напряжения. Активную мощность потерь энергии в инверторах можно компенсировать потреблением небольшой активной мощности из сети за счет сдвига фазы тока относительно напряжения инвертора на угол немного меньший 90° . Так задаются требуемые уровни постоянного тока в сглаживающем реакторе L_0 .

Реакторы L не только определяют значение первой гармоники тока компенсатора, но и сглаживают высшие гармоники, обусловленные несинусоидальностью выходных напряжений инвертора тока и инвертора напряжения компенсатора. При этом реактивный элемент L_0 в цепи постоянного напряжения автономного инвертора тока и электролитический конденсатор C_0 в цепи постоянного напряжения инвертора напряжения являются источниками реактивного напряжения.

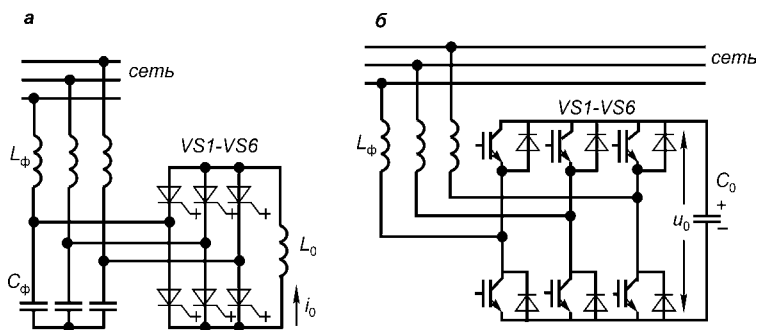


Рис. 20.14

Компенсаторы с вентильным источником реактивного напряжения
а — на запираемых тиристорах; б — на транзисторах с изолированным затвором.

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА

21.1.
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСЫ
И ИХ ПАРАМЕТРЫ

В различных областях электроники — в преобразовательной технике, в электронно-вычислительной, в радиолокации, в системах теле-, радиосвязи и др. широко применяют устройства и блоки управления, работающие в импульсном режиме.

Импульсным режимом работы называют такой режим, при котором устройство вырабатывает или находится под воздействием электрической величины, имеющей характер импульсов и перепадов.

Импульсом называют электрическую величину (напряжение, ток, мощность), которая в течение короткого промежутка времени изменяется от одного постоянного значения до некоторого другого постоянного значения.

Перепадами называют быстрые (скачкообразные) изменения электрической величины между двумя уровнями.

Форма импульсов (см. рис. 21.1) может быть прямоугольной (*a*), трапецеидальной (*б*), линейно изменяющейся (треугольной, *в*), экспоненциальной (*г*), комбинированной (*д*), состоящей из двух импульсов разной частоты синусоидальной формы или экспоненциально затухающих прямоугольных импульсов и др.

Форма реальных импульсов несколько отличается от представленных на рисунке импульсов из-за влияния, например, реактивных элементов в электрической цепи. Так, наиболее часто встречающиеся прямоугольные импульсы обычно имеют реальную форму, показанную на рис. 21.2*a*. Участки *ab* и *вг* быстрого нарастания и спада напряжения называются соответственно *фронтом* и *срезом* (спадом) импульса, участок *бв*, на котором напряжение

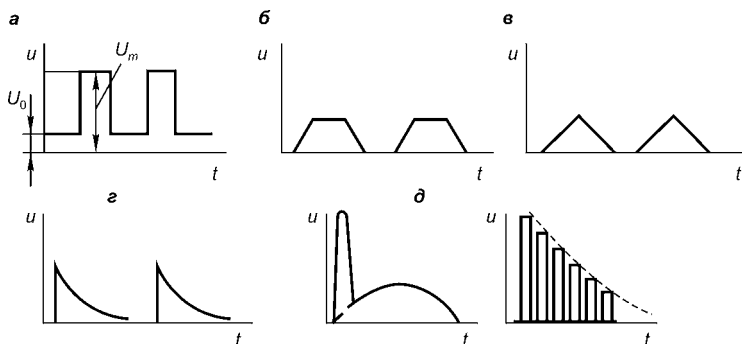


Рис. 21.1
Формы импульсов

а — прямоугольная; *б* — трапецидальная; *в* — треугольная; *г* — экспоненциальная; *д* — комбинированные.

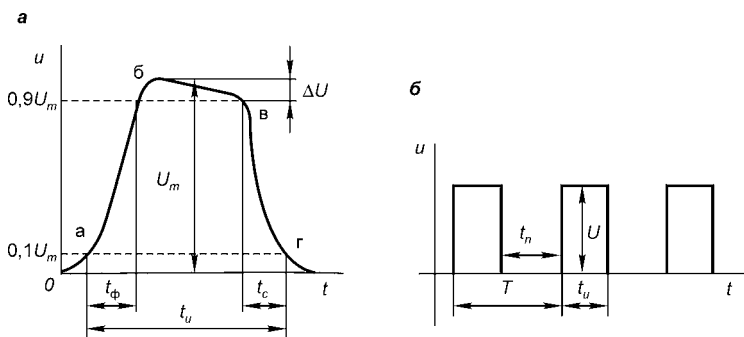


Рис. 21.2
Параметры импульсов

а — параметры трапецидального импульса; *б* — параметры серии импульсов.

изменяется сравнительно медленно, называют *вершиной*. Наибольшее напряжение импульса U_m называют амплитудой (высотой) импульса.

Прямоугольный импульс характеризуют *длительностью импульса* $t_{и}$, которая графически определяется на уровне $0,1U_m$, *длительностью фронта* t_{ϕ} и *длительностью среза* t_c , которые, в свою очередь, определяются между уровнями от $0,1U_m$ до $0,9U_m$. Изменение напряжения на вершине импульса ΔU называют *завалом вершины*.

Если импульсы следуют друг за другом через равные промежутки времени T , их называют периодической последовательностью импульсов (рис. 21.2б). Дополнительными параметрами периодической последовательности

импульсов являются: *период повторения импульсов* T , *частота повторений* $f = 1/T$, *скважность импульсов* $q = T/t_{\text{и}}$ — отношение периода повторения к длительности импульса. Интервал времени между окончанием одного импульса и началом следующего называют *паузой*: $t_{\text{п}} = T - t_{\text{и}}$.

Электрический сигнал — это физическая величина (ток, напряжение, электрическая мощность), параметры которой содержат информацию. Сигналы в виде импульсов широко используются при управлении тиристорами в различных преобразователях и в современных цифровых вычислительных машинах.

При анализе работы импульсных устройств и передаче импульсных сигналов (например, сигнал на рис. 21.1*б*) важно знать спектральный состав этих сигналов. Под спектром понимают диапазон частот, в котором сосредоточено 95% энергии сигнала (рис. 21.1*б* — экспоненциально затухающие прямоугольные импульсы). В этом случае полоса пропускания устройства, генерирующего эти импульсы, определяется динамическими характеристиками полупроводниковых приборов генератора.

21.2. ИНТЕГРИРУЮЩИЕ И ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ ЦЕПИ

Для правильного функционирования различных элементов и устройств требуются импульсы вполне определенной формы, отличной от прямоугольной, имеющие заданные длительность и амплитуду. Они предназначены для управления преобразователями, представления чисел и управления элементами вычислительных устройств, устройств обработки информации и др.

Вследствие этого возникает необходимость предварительно преобразовывать импульсы задающего генератора. Характер преобразования может быть разнообразным. Может потребоваться изменить амплитуду или полярность, длительность задающих импульсов, осуществить их задержку во времени. Преобразования в основном осуществляются с помощью линейных цепей — четырехполюсников, которые могут быть пассивными и активными. Пассивные четырехполюсники не содержат в своем составе источников питания, активные используют энергию

внутренних или внешних источников питания. С помощью линейных цепей осуществляются такие преобразования, как дифференцирование, интегрирование, укорочение импульсов, изменение амплитуды и полярности, задержка импульсов во времени. Операции дифференцирования, интегрирования и укорочения импульсов выполняются соответственно дифференцирующими, интегрирующими и укорачивающими цепями. Изменение амплитуды и полярности импульса может производиться с помощью импульсного трансформатора, а задержка его во времени — посредством линии задержки.

Интегрирующая цепь приведена на рис. 21.3 в виде простейшей цепи (пассивного четырехполюсника), с помощью которой можно выполнить операцию интегрирования входного электрического сигнала, поданного на зажимы 1–1'. Снимается выходной сигнал с зажимов 2–2'.

По второму закону Кирхгофа уравнение для мгновенных значений токов и напряжений выглядит следующим образом:

$$u_{\text{вх}}(t) = i(t)R + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt. \quad (21.1)$$

В соответствии с (21.1) ток меняется по закону

$$i(t) = \frac{u_{\text{вх}}(t)}{R} - \frac{1}{RC} \int_0^t i(t) dt. \quad (21.2)$$

Если постоянная времени $\tau = RC$ большая, то $i(t) = u_{\text{вх}}(t)/R$.

Напряжение на выходе интегрирующей цепочки (на зажимах 2–2') равно

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt = \frac{u_{\text{вх}}}{RC}. \quad (21.3)$$

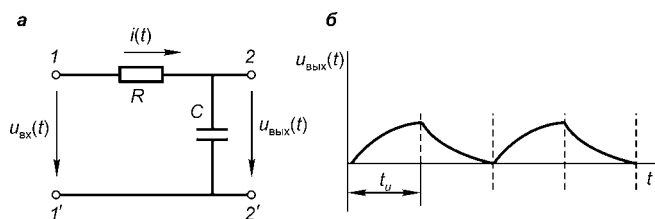


Рис. 21.3
Интегрирующая цепь

а — схема; б — временная диаграмма.

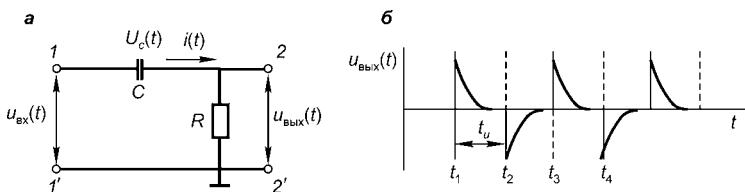


Рис. 21.4
Дифференцирующая цепь
а — схема; б — временная диаграмма.

Временная диаграмма выходного напряжения показана на рис. 21.3б.

Дифференцирующая цепь реализуется с помощью цепи, схема которой приведена на рис. 21.4а (пассивного четырехполюсника). С помощью схемы можно выполнять операцию дифференцирования.

По второму закону Кирхгофа уравнение для мгновенных значений напряжений для этой схемы выглядит аналогично уравнению (21.1). В этом уравнении, пренебрегая из-за малости сопротивлением R и соответственно слагаемым $i(t)R$, мгновенное значение тока будет равно

$$i \approx C \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}. \quad (21.4)$$

Тогда выходное напряжение на зажимах 2–2' будет равно

$$u_{\text{вых}}(t) = i(t)R = RC \frac{u_{\text{вх}}(t)}{dt}. \quad (21.5)$$

С помощью анализируемой цепи выполняют операции дифференцирования входного напряжения и умножения его на коэффициент пропорциональности, равный постоянной времени $\tau = RC$. Форма выходного напряжения дифференцирующей цепи при подаче на вход серии прямоугольных импульсов приведена на рис. 21.4б. В этом случае выходное напряжение теоретически должно представлять собой знакопеременные импульсы бесконечно большой амплитуды и малой (близкой к нулю) длительности. Однако вследствие различия свойств реальной и идеальной дифференцирующих цепей, а также конечной крутизны фронта импульса на выходе, получают импульсы, амплитуда которых меньше амплитуды входного сигнала, а длительность их определяется как $t_{\text{и}} \approx (3...4)\tau = (3...4)RC$.

Форма выходного напряжения зависит от параметров входного сигнала и постоянной времени дифференцирующей цепи. В момент t_1 входное напряжение приложено к резистору R , так как напряжение на конденсаторе скачком изменяться не может. Затем напряжение на конденсаторе возрастает по экспоненциальному закону, а напряжение на резисторе R (выходное напряжение) снижается по экспоненциальному закону и становится равным нулю в момент t_2 , когда зарядка конденсатора закончится. При малых значениях τ длительность выходного напряжения мала. Когда напряжение на входе становится равным нулю, конденсатор начинает разряжаться через резистор. Таким образом формируется импульс обратной полярности.

Пассивные интегрирующие и дифференцирующие цепи имеют следующие недостатки: обе математические операции реализуются приближенно, с известными погрешностями, при введении корректирующих звеньев сильно снижается амплитуда выходного импульса.

Эти недостатки упраздняются в активных дифференцирующих и интегрирующих устройствах. Одним из возможных способов реализации этих устройств является применение операционных усилителей.

Схема *активного дифференцирующего устройства* на операционном усилителе $A1$ приведена на рис. 21.5а. К *Входу 1* подключен конденсатор C , а в цепь обратной связи включен резистор R_{oc} . Так как входное сопротивление велико ($R_{вх} \rightarrow \infty$), то входной ток замыкается по пути *Вход 1*– C – R_{oc} – Z_H –2 (на рисунке направление обозначено стрелками).

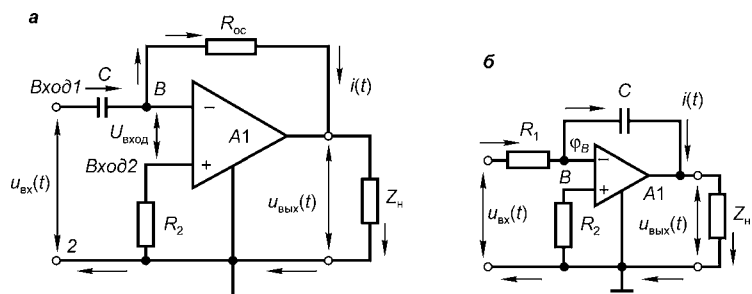


Рис. 21.5
Активные устройства на операционном усилителе
а — дифференцирующее; б — интегрирующее.

Поскольку напряжение $u_{\text{вх}}$ очень мало, коэффициент усиления $K_u \rightarrow \infty$, потенциал точки B схемы практически равен нулю. Следовательно, ток на входе равен

$$i(t) = -u_{\text{вх}}(t)/R_{\text{ос}}. \quad (21.6)$$

Ток на выходе одновременно является зарядным током конденсатора $dq = Cdu_{\text{вх}}(t)$, тогда

$$i(t) = Cdu_{\text{вх}}(t)/dt. \quad (21.7)$$

В результате совместного решения (21.6) и (21.7) получим

$$u_{\text{вых}}(t) = -R_{\text{ос}}C \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}. \quad (21.8)$$

Таким образом, выходное напряжение операционного усилителя является произведением производной входного напряжения по времени и постоянной времени $\tau = R_{\text{ос}}C$.

Схема *активного интегрирующего устройства* на операционном усилителе, приведенная на рис. 21.5б, отличается от дифференцирующего устройства тем, что конденсатор C и резистор R_1 меняются местами. Ток зарядки конденсатора $i(t) = u_{\text{вх}}(t)/R_1$. Так как напряжение на конденсаторе практически равно выходному напряжению ($\varphi_B = 0$), а операционный усилитель изменяет фазу входного сигнала на выходе на угол, равный π , получим

$$u_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{R_1C} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt. \quad (21.9)$$

Выходное напряжение активного интегрирующего устройства определяется произведением определенного интеграла от входного напряжения по времени на обратное значение постоянной времени.

21.3. РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА

Для работы различных импульсных устройств часто требуется обеспечить подачу на их вход или в другие цепи импульсов напряжений прямоугольной формы требуемой амплитуды и длительности. Крутые перепады напряжения (тока) могут создаваться нелинейными системами в результате возникновения в них *регенеративных*

процессов (процессов, протекающих лавинообразно под воздействием положительной обратной связи).

Устройства, в которых в результате регенеративных процессов возникают крутые перепады напряжения и тока, называют *регенеративными импульсными устройствами*. Среди них наибольшее распространение получили устройства, основанные на использовании усилителей с положительной обратной связью. По построению и назначению регенеративные импульсные устройства подразделяют на две большие группы. Первая из них — это генераторы, вырабатывающие импульсы напряжения требуемой амплитуды и длительности, форма которых близка к прямоугольной. Вторая группа — это триггеры, вырабатывающие перепады напряжения. Триггеры имеют два устойчивых состояния, из которых они выходят под воздействием запускающих импульсов.

В состав генераторов входят времязадающие цепи (обычно в виде RC -цепей). В генераторах импульсов в течение регенеративного процесса формируется фронт импульса, затем во времязадающей цепи начинает протекать релаксационный процесс (поэтому эти генераторы иногда называют релаксационными). На стадии релаксационного процесса формируется рабочая часть импульса — вершина. Длительность этого процесса определяет длительность импульсов и частоту их повторения. Затем вновь наступает регенеративный процесс, протекающий в противоположном направлении, во время которого формируется срез вырабатываемого импульса. За ним начинает снова протекать релаксационный процесс, длительность которого определяет интервал времени между генерируемыми импульсами. Далее процесс повторяется. При этом генераторы не имеют ни одного состояния устойчивого равновесия, вследствие чего они непрерывно генерируют импульсы. Однако возможен режим, в котором генераторы имеют одно состояние устойчивого равновесия. Итак, релаксационный генератор может работать в одном из режимов: автоколебательном, ждущем, синхронизации и деления частоты. Релаксационные генераторы можно разделить на два типа: мультивибраторы и блокинг-генераторы. Наиболее часто используются мультивибраторы, поэтому далее рассмотрим этот тип генераторов.

21.3.1. МУЛЬТИВИБРАТОРЫ

Мультивибраторы вырабатывают импульсы почти прямоугольной формы, имеющие широкий спектр частоты. Схемы мультивибраторов строятся на усилителях с положительной обратной связью и включают формирующие RC -цепочки. В качестве активных элементов в них используют транзисторы (рис. 21.6а). Мультивибраторы выпускают как на отдельных (дискретных) элементах, так и в интегральном исполнении. При построении мультивибратора на операционных усилителях обратная связь выполняется как по инвертирующему входу, так и по неинвертирующему входу. Они бывают симметричные и несимметричные.

Рассмотрим мультивибратор на биполярных транзисторах, работающий в автоколебательном режиме. Рассмотрим схему с коллекторно-базовыми связями. Она представляет собой двухкаскадный усилитель на биполярных транзисторах $T1$ и $T2$. База одного транзистора соединена с коллектором другого через конденсаторы C_1 и C_2 , которые обеспечивают положительную обратную связь. Резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$ осуществляют подачу напряжения смещения на базы соответственно транзисторов $T1$ и $T2$ и образуют времязадающие цепи. Схема симметрична по структуре, параметры симметричных элементов одинаковы, а именно $R_{к1} = R_{к2}$, $R_{б1} = R_{б2}$, $C_1 = C_2$, а транзисторы $T1$ и $T2$ одного типа. Такой мультивибратор называют симметричным. При рассмотрении процессов,

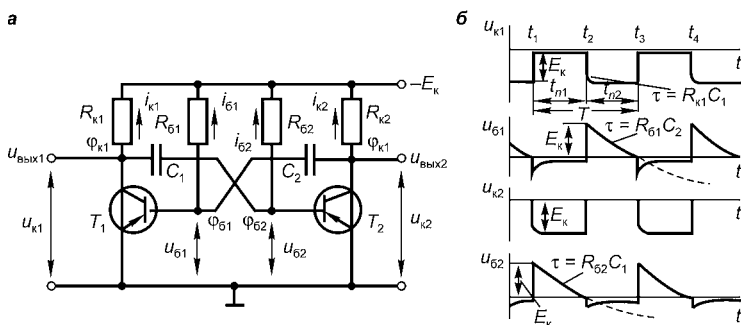


Рис. 21.6
Мультивибратор

а — схема; б — диаграмма, поясняющая его работу.

происходящих в мультивибраторе, надо помнить, что потенциалы баз и коллекторов каждого транзистора равны соответственно

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{61} &= -E_K + R_{61} i_{61}; \quad \varphi_{62} = -E_K + R_{62} i_{62}, \\ \varphi_{K1} &= -E_K + R_{K1} i_{K1}; \quad \varphi_{K2} = -E_K + R_{K2} i_{K2}. \end{aligned} \right\} \quad (21.10)$$

Напряжения на конденсаторе u_{C3} и u_{Cp} и токи i_3 и i_p во время зарядки и разрядки изменяются по закону

$$\left. \begin{aligned} u_{C3} &= E_K (1 - e^{-t/\tau_3}); \quad i_3 = \frac{E_K}{R_K} e^{-t/\tau_3}, \\ u_{Cp} &= E_K e^{-t/\tau_p}; \quad i_p = \frac{E_K}{R_K} e^{-t/\tau_p}, \end{aligned} \right\} \quad (21.11)$$

где $\tau_3 = R_K C$ — постоянная времени цепи зарядки конденсатора; $\tau_p = R_6 C$ — постоянная времени цепи разрядки конденсатора.

При работе импульсных устройств наряду с зарядкой и разрядкой конденсатора имеет место процесс перезарядки, когда предварительно заряженный конденсатор подключается через резистор встречно к источнику питания. В этом случае конденсатор сначала разряжается, а после того, как напряжение на нем станет равным нулю, заряжается по той же цепи до напряжения противоположной полярности.

Так как схема симметрична, то в исходном состоянии при подаче напряжения питания E_K коллекторные токи i_K , базовые токи i_6 , напряжения на коллекторах u_K , базах u_6 и на конденсаторах u_C будут одинаковы. При малейшем нарушении симметрии в цепи наступит самовозбуждение.

Если при включении цепи ток коллектора i_{K1} транзистора $T1$ скачком возрос, то увеличится падение напряжения на резисторе R_{K1} , а потенциал коллектора φ_{K1} станет менее отрицательным. При этом напряжение на коллекторе u_{K1} получит положительное приращение. Это приращение полностью приложится к напряжению u_{62} на базе транзистора $T2$, так как напряжение на конденсаторе скачком измениться не может. Вследствие этого потенциал базы φ_{62} транзистора $T2$ станет менее отрицательным, и его ток коллектора i_{K2} уменьшится. Это приведет к уменьшению напряжения на резисторе R_{K2} , и потенциал коллектора φ_{K2} станет более отрицательным.



Таким образом лавинообразный процесс изменения токов и напряжений коллектора за счет положительной обратной связи будет повторяться и приведет к открытию транзистора $T1$ и закрытию транзистора $T2$. Во время регенеративного процесса формируется крутой фронт импульса. В дальнейшем происходит «опрокидывание» схемы — закрытый транзистор открывается, открытый закрывается. Изменение режима работы транзисторов происходит за счет того, что заряд конденсаторов будет изменять свое состояние — один заряжаться, другой перезаряжаться. Переходный процесс при зарядке и разрядке конденсаторов называют *релаксационным*.

Параметры генерируемого импульса. Если предположить, что импульс формируется при закрывании транзистора, а пауза — при открывании, то *амплитуда импульса* будет равна $U_m \approx |E_k|$.

Длительность импульса. После того как один из транзисторов (например, $T2$) закрывается, происходит перезарядка конденсатора C_1 , присоединенного к коллектору открытого транзистора $T1$. Перезарядка длится с момента t_1 до t_2 (рис. 21.6б), когда потенциал базы транзистора $T2$ станет равным нулю (напряжение на перезаряжаемом конденсаторе упадет до нуля). В это время транзистор $T2$ откроется, и формирование вершины импульса закончится. Таким образом, длительность импульса определяется временем разрядки в процессе перезарядки конденсатора C_1 (аналогично, это время равно времени разрядки конденсатора C_2). Поэтому конденсаторы C_1 и C_2 называют *временязадающими*. Длительность импульса равна $t_{п1} = t_2 - t_1$. Спустя это время потенциал базы транзистора $T2$ станет примерно равным нулю.

Период колебаний равен $T = t_{п1} + t_{п2} = 1,4R_6C$.

Принципиальная схема симметричного мультивибратора на операционном усилителе и диаграмма его работы приведены на рис. 21.7. Положительная обратная связь обеспечивается резистором R_3 , а отрицательная обратная связь — резистором R_1 .

Автоколебательный режим работы мультивибратора создается благодаря подключению к инвертирующему входу (–) операционного усилителя временязадающей цепи из конденсатора C_1 и резистора R_1 . В начальный момент времени напряжение на входе $u_{вх}$ равно нулю, что

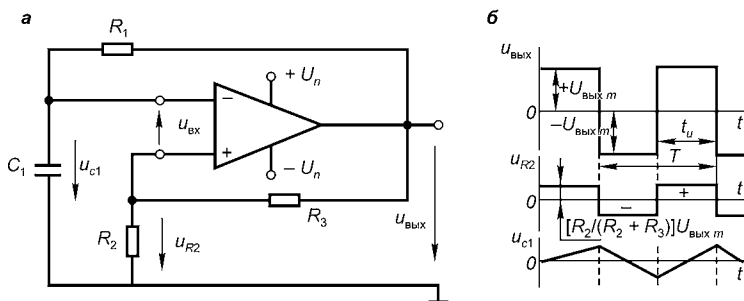


Рис. 21.7
Симметричный мультивибратор
а — схема; б — временная диаграмма.

изменяет напряжение на выходе $+U_{\text{ВЫХ } m}$. Напряжение на резисторе R_2 становится равным $[R_2/(R_2 + R_3)]U_{\text{ВЫХ } m}$. С этого момента времени происходит перезаряд конденсатора, и к окончанию импульса напряжение достигнет максимального значения (рис. 21.7б). В результате произойдет переключение (опрокидывание) операционного усилителя в противоположное состояние. При этом конденсатор будет перезаряжаться. Далее процесс повторяется при смене полярности напряжения.

21.3.2. ТРИГГЕРЫ

Триггерами называют устройства, обладающие двумя состояниями устойчивого равновесия и способные под воздействием внешнего управляющего сигнала скачком переходить из одного устойчивого состояния в другое.

Триггеры выполняют как на отдельных элементах, так и методами интегральной технологии. Их широко используют в различных устройствах, в которых они выполняют функции переключающих, счетных, пороговых и запоминающих элементов. Они составляют 20...40% оборудования ЭВМ. Несмотря на то, что в настоящее время триггеры на дискретных схемах выполняют редко, физические процессы удобнее рассмотреть на таких схемах. На практике наиболее часто встречаются схемы с коллекторно-базовыми связями (симметричные) и с эмиттерной связью (несимметричные). В качестве активного элемента используют биполярные и полевые транзисторы, туннельные диоды.

Рассмотрим схему триггера с коллекторно-базовыми связями на биполярных транзисторах с независимым смещением (рис. 21.8). Она структурно близка к рассмотренной ранее схеме мультивибратора и представляет собой двухкаскадный усилитель постоянного тока с положительной обратной связью, осуществляемой через цепи R_1C_1 и R_2C_2 , которые соединяют коллектор одного транзистора с базой другого. Схема полностью симметрична. Поэтому параметры элементов схемы равны, а транзисторы одного типа.

Отличие от симметричного мультивибратора состоит в том, что в схеме триггера имеется источник смещения ($E_6 > 0$), запирающий транзисторы (благодаря чему триггеры имеют два устойчивых состояния равновесия).

Параметры триггера подбирают такими, чтобы открытый транзистор находился в режиме насыщения, а закрытый — в режиме отсечки. Отметим, что открытый транзистор имеет потенциал коллектора близкий к нулю (уровень 0). Закрытый транзистор имеет потенциал коллектора, близкий к напряжению источника смещения (уровень 1).

Несмотря на то что триггер симметричен, при подаче на него напряжения питания один транзистор обязательно окажется закрытым, а другой — открытым, так как абсолютную симметрию в реальных схемах обеспечить невозможно и в схеме при включении сразу же начнется лавинообразный процесс, который происходит почти мгновенно и заканчивается переходом одного транзистора в режим отсечки, а другого — в режим насыщения. Это состояние

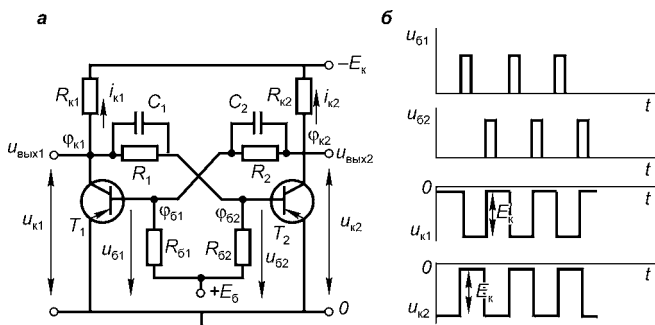


Рис. 21.8
Триггер

а — принципиальная схема; б — временная диаграмма.

триггера устойчивое и длится до тех пор, пока на вход триггера не будет подан запускающий импульс.

Импульс запуска осуществляет переход триггера в другое устойчивое состояние, при котором открытый ранее транзистор закрывается, а закрытый — открывается. На выходах триггера при этом формируется перепад напряжений. Рассмотрим происходящие при этом процессы.

Если транзистор $T1$ триггера в исходном состоянии открыт, а транзистор $T2$ закрыт, и на базу открытого транзистора подать запускающий импульс положительной полярности (рис. 21.8а), то через некоторый малый промежуток времени транзистор выйдет из режима насыщения и перейдет в активный режим. При этом ток базы, а следовательно, и коллектора транзистора $T1$ уменьшится, что вызовет изменение потенциала коллектора:

$$u_{к1} = -E_{к} + R_{к1}i_{к1},$$

т. е. он станет более отрицательным. Отрицательный скачок напряжения на коллекторе вызовет примерно такой же скачок напряжения на базе закрытого транзистора $T2$ и под действием изменившегося на его базе напряжения транзистор $T2$ из режима отсечки перейдет в активный режим. Таким образом, за очень малый промежуток времени оба транзистора оказываются в активном режиме, в котором они обладают усилительными свойствами.

За счет положительной обратной связи в схеме начнется регенеративный процесс. Ток коллектора $i_{к}$ закрывающегося транзистора $T1$ будет уменьшаться, потенциал коллектора транзистора $T1$ будет более отрицательным.

Небольшой отрицательный скачок напряжения на коллекторе транзистора $T1$ через резистор обратной связи R_1 приложится к базе транзистора $T2$ и приоткроет его. Это вызовет значительное увеличение тока коллектора $i_{к2}$ транзистора $T2$ за счет большого коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером. Потенциал коллектора транзистора $T2$, равный $\varphi_{к2} = u_{к2} = -E_{к} + R_{к}i_{к2}$, станет положительнее, и напряжение на коллекторе транзистора $T2$ будет значительно больше вызвавшего его отрицательного скачка напряжения на коллекторе транзистора $T1$. Усиленный положительный скачок напряжения через резистор обратной связи R_2 приложится к базе транзис-

тора $T1$ и ускорит его закрывание и т. д. Процесс будет развиваться лавинообразно и закончится закрыванием открытого транзистора $T1$ и открыванием закрытого транзистора $T2$. Чтобы вывести схему из этого устойчивого состояния, нужно подать запускающий импульс на базу открытого теперь транзистора $T2$. Имеющиеся в схеме конденсаторы C_1 и C_2 шунтируют резисторы R_1 и R_2 . Это объясняется тем, что в устойчивом состоянии, когда, например, транзистор $T1$ открыт, а транзистор $T2$ закрыт, конденсаторы заряжены соответственно до напряжений $u_{C1} \approx 0$ и $u_{C2} = -E_k$. Во время лавинообразного процесса их состояние практически не изменяется. Но как только открытый транзистор $T1$ закроется и напряжение на его коллекторе станет равно $-E_k$, разряженный конденсатор C_1 начнет заряжаться. Тогда в цепи базы открывающегося транзистора $T2$ появится большой зарядный ток, который добавится к току в базе. Это значительно ускорит процесс открывания транзистора $T2$.

Конденсатор C_2 после «опрокидывания» схемы будет перезаряжаться, и напряжение на нем к концу перезарядки станет равным $u_{C2} \approx 0$. При лавинообразном процессе формирования импульса напряжение на конденсаторе не изменяется. Напряжения на коллекторе одного транзистора почти полностью прикладываются к базе другого транзистора. Если бы не было конденсаторов, часть напряжения распределялась бы между резисторами R_1 и R_2 , соответственно токи и броски напряжения были бы меньше, а процесс переключения затягивался. На рис. 21.8б показаны входные импульсы $u_{вх1}$, $u_{вх2}$ и напряжения $u_{к1}$, $u_{к2}$ на коллекторах транзисторов $T1$ и $T2$. Амплитуда выходного импульса равна перепаду напряжения на коллекторе при переходе триггера из одного устойчивого состояния в другое. Когда транзистор открыт, напряжение на его коллекторе $u_{к1} \approx 0$; когда транзистор закрыт, $u_{к2} = -E_k$. Таким образом, амплитуда выходного импульса будет равна примерно E_k .

Триггер переводят из одного устойчивого состояния в другое путем подачи на его входы или выходы запускающих импульсов. Существует два способа запуска: раздельный и общий.

Раздельный запуск осуществляют подачей импульсов одной полярности поочередно на базы транзисторов

(входы триггеров). Импульс, поданный на один из входов, устанавливает триггер в одно из устойчивых состояний. Импульс, подаваемый на другой вход, устанавливает триггер в противоположное устойчивое состояние.

Схема триггера с раздельным запуском характеризуется подачей запускающих импульсов на базы транзисторов через диоды.

Триггер с раздельным запуском называют *RS-триггером*. *RS-триггер* имеет два входа и два выхода. Входы, на которые подают запускающие импульсы, называют установочными и обозначают *R* и *S*. Буква *S* означает раздельный вход установки в состояние 1, буква *R* — раздельный вход установки в состояние 0. Выходы обозначают *Q* и \bar{Q} .

Счетный запуск триггера. При счетном запуске импульсы одной полярности подают на общий вход *C-триггера*, и каждый из импульсов приводит к опрокидыванию триггера. Возможны два варианта подачи запускающего импульса: на базы (рис. 21.9) и на коллекторы. Конденсаторы C_{31} и C_{32} соединены вместе, образуя общий вход. Конденсаторы связи C_1 и C_2 включены для ускорения процесса переключения триггера. Входной импульс положительной полярности, подаваемый на вход триггера, продифференцируется цепочкой $R_{32}C_{32}$, и из образованных двух остроконечных импульсов сигнал положительной полярности через диод *VD2*, находящийся в проводящем состоянии, поступит в базу насыщенного транзистора. С помощью резисторов R_{31} и R_{32} прикладывается отрицательный потенциал соответственно к аноду диода *VD1* или *VD2* с коллектора закрытого транзистора.

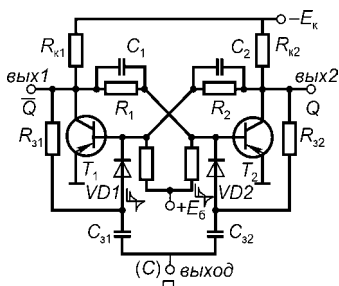


Рис. 21.9
Счетный запуск триггера

При этом диод закрывается и отключает цепь базы транзистора от цепи запуска. В дальнейшем работа триггера определяется процессом включения транзисторов и аналогична работе симметричного триггера.

Однако на процесс опрокидывания триггера существенно влияет длительность запускающих импульсов. Если им-

пульс, например, очень короткий, то за время его действия транзистор не успевает выйти из насыщения и триггер не опрокинется. Максимальная частота переключения триггера со счетным запуском примерно вдвое меньше, чем при раздельном запуске, поэтому раздельный запуск предпочтительнее. Триггер со счетным запуском называют T -триггером (буквой T обозначают счетный вход). Выпускают триггеры, имеющие один, два, три входа и более. Например, JK -триггер имеет пять входов и может работать как RS -триггер.

Наименьший интервал времени между запускающими импульсами, вызывающими бесперебойное переключение импульса, называют разрешающим временем $T_{\text{раз}}$. Значение, обратное разрешающему времени, характеризуется быстродействием триггера (Гц):

$$F_{\text{Б}} = \frac{1}{T_{\text{раз}}}. \quad (21.12)$$

Быстродействие триггера определяет наибольшее возможное число бесперебойных переключений триггера за одну секунду при неизменном интервале $T_{\text{раз}}$ между запускающими импульсами и достигает значений порядка 100 МГц. Эффективность многих электронных устройств зависит от быстродействия триггеров. На быстродействие триггера влияет скорость переключения транзисторов, работающих в схеме в ключевом режиме. Для повышения быстродействия используют высокочастотные транзисторы, ключи.

21.4. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В цифровых устройствах, устройствах автоматики и обработки информации используют логические операции. Логическая операция — это преобразование по правилам алгебры логики (булевой алгебры) входной цифровой информации в выходную информацию.

Логическое устройство, выполняющее одну определенную логическую операцию над входными сигналами, называют *логическим элементом*.

В алгебре логики истинность суждения или высказывания о результатах той или иной логической операции

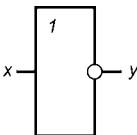
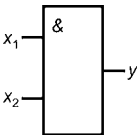
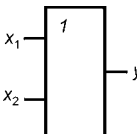
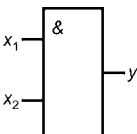
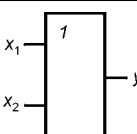
обозначают символом 1, ложность — 0. Таким образом, логические переменные в алгебре логики, отражающие результаты логической операции, принимают два значения: единицу и ноль. Их называют *двоичными переменными*. Чтобы реализовать алгебру логики на электронных элементах, необходимо значение параметров этих элементов перевести на язык алгебры логики (0 или 1). Задавать значения параметров можно уровнем напряжения или полярностью импульсов.

Если сигналы подают в виде высокого (положительной или отрицательной полярности) и низкого (близкого к нулю) уровня напряжения, то такой способ подачи сигнала называют *потенциальным*. Если высокому уровню напряжения U^1 присваивают значение «единица», а низкому U^0 — «ноль», то логику называют *положительной*, в обратном случае — *отрицательной*. Разность уровней единицы и нуля называют *логическим перепадом*. Чтобы четко разделить один уровень от другого, он должен быть значительным.

Если сигналы подают в импульсной форме, то такой способ подачи сигнала называют *импульсным*. При этом логической единице соответствует наличие импульса, логическому нулю — отсутствие импульса (положительная логика). Сигналы, соответствующие 1 (или 0), могут быть на входе и выходе разными. Наибольшее распространение получили потенциальные логические элементы, так как их можно изготавливать по технологии интегральных микросхем.

Элементарные логические элементы. Основными и наиболее простыми логическими элементами являются элементы, выполняющие операции отрицания (**НЕ**), конъюнкции (**И**), дизъюнкции (**ИЛИ**). Каждая из этих операций и логических элементов имеет и другое название (табл. 21.1). В этой таблице приведены названия логических элементов, обозначения логических операций, как читаются операции и как обозначают логические элементы. Таблица истинности содержит правила выполнения операции (в таблице для случая двух входов и одного выхода). В каждой ее строке записывают состояние сигналов на входах (x_1 , x_2) и результат логической операции на выходе (y). В общем случае логический элемент может иметь n входов и n выходов.

Логические операции

Название логической операции	Как читается	Обозначение логической операции и таблица истинности					Название логического элемента, реализующего операцию	Обозначение логического элемента
		x_1	0	0	1	1		
		x_2	0	1	0	1		
Логическое НЕ; логическое отрицание; инверсия	не x	x	0		1		Инвертор	 $y = \bar{x}$
		\bar{x}	1		0			
Конъюнкция; логическое умножение; логическое И	x_1 и x_2	$x_1 \cdot x_2$	0	0	0	1	Конъюнктор	 $y = x_1 \cdot x_2$
Дизъюнкция; логическое сложение; логическое ИЛИ	x_1 или x_2	$x_1 \vee x_2, x_1 + x_2$	0	1	1	1	Дизъюнктор	 $y = x_1 \vee x_2$
Логическое И-НЕ; штрих Шеффера; отрицание конъюнкции	—	$x_1 x_2$	1	1	1	0	Элемент Шеффера; элемент И-НЕ	 $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$
Логическое ИЛИ-НЕ; стрелка Пирса; функция Вебба; отрицание дизъюнкции	—	$x_1 \downarrow x_2$	1	0	0	0	Элемент Пирса; элемент ИЛИ-НЕ	 $y = \overline{x_1 \vee x_2}$

Логические элементы выполняют как на дискретных приборах, так и методами интегральной технологии. Для большинства серий интегральных микросхем базисной системой являются логические элементы **И-НЕ** и **ИЛИ-НЕ**. Их выпускают в виде отдельных микроминиатюрных устройств в герметичном корпусе. Логические элементы **И** и **ИЛИ** могут выполняться на резисторах, диодах, биполярных и полевых транзисторах и туннельных диодах. Элемент **НЕ** выполняют на транзисторах. В зависимости от исполнения различают логические элементы следующих типов: резисторно-транзисторной логики (РТЛ), диодно-транзисторной (ДТЛ), транзисторно-транзисторной (ТТЛ). Кроме того, различают логические элементы на полевых транзисторах и другие специальные логические элементы.

Логический элемент **НЕ** (табл. 21.1) имеет один вход и один выход и выполняет операцию **НЕ**. Он представляет собой усилительный каскад на биполярном или полевом транзисторе, работающий в ключевом режиме. На рис. 21.10 показан элемент **НЕ** на биполярном транзисторе, включенном по схеме с ОЭ. Элемент предназначен для работы с сигналами положительной полярности в положительной логике. Транзистор T закрыт отрицательным потенциалом, приложенным к базе и подаваемым от источника E_6 .

При подаче на вход элемента сигнала низкого уровня $U_{\text{вх}} = U^0$, соответствующего логическому 0, транзистор остается закрытым, коллекторный ток равен нулю, т. е. в резисторе R_K тока нет, и напряжение на выходе $U_{\text{вых}} =$

$= +E_K$ имеет высокий уровень U^1 , соответствующий логической 1.

При высоком уровне напряжения на входе ($U_{\text{вх}} = U^1$) транзистор находится в режиме насыщения, появляется коллекторный ток и на резисторе R_K создается падение напряжения, примерно равное E_K , а на выходе напряжение примерно равно нулю ($U_{\text{вых}} = U^0$), что соответствую-

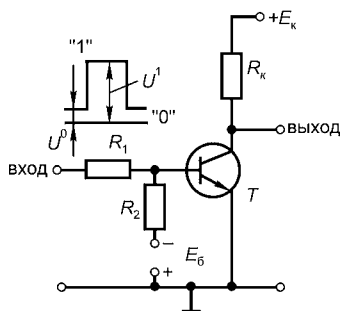


Рис. 21.10
Принципиальная схема
логического элемента **НЕ**

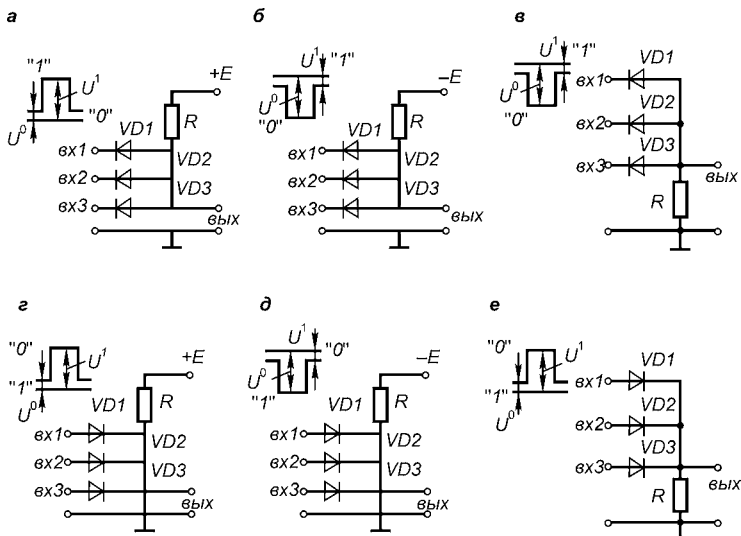


Рис. 21.11
Принципиальные схемы логических элементов **И**

ет логическому нулю. Это означает, что если $x = 0$, то $y = 1$, а если $x = 1$, то $y = 0$. Таким образом, элемент выполняет операцию отрицания.

Логический элемент **И** (табл. 21.1) может иметь два (или более) входа и один выход. Рассмотрим работу элемента **И**, выполненного на диодах. Элемент, предназначенный для работы с сигналами в виде напряжений (или импульсов) положительной полярности, показан на рис. 21.11а. Он имеет три входа и один выход. Элемент реализует операцию **И**, если сигнал 1 появляется на выходе только тогда, когда одновременно на всех входах присутствует сигнал 1. При этом если хотя бы на одном входе присутствует сигнал, соответствующий логическому нулю, он должен передаваться через открытый диод на выход и обеспечивать запирающие токи тех диодов, на которые со стороны входа воздействуют сигналы, соответствующие логической 1. Будем считать, что сопротивление открытого диода $R_{д.отк} \ll R$, а потенциалы сигнала и источника питания E схемы имеют значения, удовлетворяющие соотношению $U^0 < E < U^1$.

Если на одном из входов цепи, например $vx1$, действует сигнал U^0 , то диод $VD1$ будет открыт и ток будет

направлен по цепи « $+E$, резистор R , диод $VD1$, источник U^0 ». Все напряжение источника $+E$ приложится к резистору R , и на выходе напряжение окажется равным U^0 , т. е. сигнал на выходе — логический нуль. На остальных входах действует высокий потенциал U^1 , поэтому диоды закрыты, так как их аноды подсоединены к зажимам на выходе с низким потенциалом U^0 , а катоды — к высокому положительному потенциалу U^1 .

Если на всех входах действует напряжение U^1 , то все диоды будут закрыты, тока в цепи не будет и падение напряжения на резисторе R равно нулю. На выходе напряжение $E > U^0$, что соответствует логической 1. Таким образом, если хотя бы на один из входов воздействует сигнал, соответствующий логическому нулю, сигнал на выходе также соответствует логическому нулю. Сигнал на выходе соответствует логической 1, только если сигналы на всех входах соответствуют логической единице.

На рис. 21.11б, з, д показаны элементы, предназначенные для работы с сигналами отрицательной полярности в положительной логике и положительной (рис. 21.11з) и отрицательной (рис. 21.11д) полярности в отрицательной логике. Отметим, что один тот же элемент может работать как от положительных, так и от отрицательных сигналов, но полярность включения источника питания для положительных сигналов должна быть положительной ($+E$), для отрицательных сигналов — отрицательной ($-E$). Наиболее распространены элементы, показанные на рис. 21.11а, в.

Логический элемент **И** может работать и без источника питания. В этом случае возможны два варианта включения диода, причем элемент на рис. 21.11в реализует операцию **И** только от сигналов отрицательной полярности в положительной логике, а элемент на рис. 21.11е — только от сигналов положительной полярности в отрицательной логике.

Логический элемент **ИЛИ** (табл. 21.1) может иметь два (и более) входа, один выход и работать как при потенциальных, так и импульсных сигналах. Для того чтобы логический элемент реализовал операцию **ИЛИ**, необходимо, чтобы сигнал на выходе имел значение 1 только тогда, когда хотя бы на одном из входов действует сигнал 1. При этом сигнал 1 на входе должен обеспечивать

запирание всех диодов, на которые со стороны входа воздействует сигнал 0. Соотношение потенциалов источника сигналов низкого U^0 и высокого U^1 уровней и источника питания E схемы такое же, как и в схеме элемента **И**: $U^0 < E < U^1$ (если $U^1 < E$, то диоды будут всегда закрыты и выходное напряжение не будет изменяться). Сопротивление диода в открытом состоянии $R_{д.отк} \approx 0$.

Если на все входы подано низкое напряжение U^0 , все диоды закрыты, так как потенциал их анодов ниже потенциала катодов, следовательно, напряжение на выходе равно $E < U^1$, т. е. на выходе сигнал соответствует логическому 0. При подаче хотя бы на один из входов высокого напряжения U^1 откроется соответствующий диод, который подключен к этому входу, а так как сопротивление открытого диода равно нулю, то потенциал на выходе соответствует U^1 (логическая 1). Если в это время на какие-то диоды со стороны входа будет подан низкий потенциал U^0 , они окажутся закрытыми, так как их катодам сообщится высокий потенциал. Таким образом, на выходе сигнал будет соответствовать логической 1, если хотя бы на одном из входов сигнал соответствует логической 1.

Элемент **ИЛИ**, предназначенный для работы от сигналов положительной полярности в отрицательной логике, показанный на рис. 21.12а, и элемент **И** на рис. 21.11г одинаковы. Таким образом, можно отметить, что элемент **ИЛИ** в положительной логике может выполнить операцию **И** в отрицательной логике, и наоборот.

Элемент **ИЛИ**, как и элемент **И**, может не содержать источника питания. Элемент на рис. 21.12б предназначен

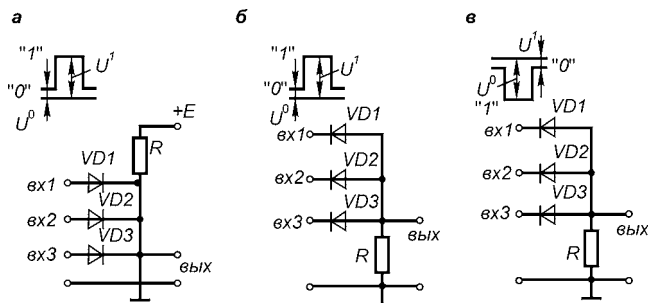


Рис. 21.12

Принципиальные схемы логических элементов **ИЛИ**

для работы от сигналов положительной полярности в положительной логике, а на рис. 21.12в — от сигналов отрицательной полярности в отрицательной логике. Сравнение этих элементов **ИЛИ** с элементами **И** на рис. 21.11в, г подтверждает, что оба элемента могут выполнять обе операции — и **И**, и **ИЛИ**: элемент **И** (**ИЛИ**) — в положительной логике, в отрицательной логике — **ИЛИ** (**И**). Операции **ИЛИ-НЕ** и **И-НЕ** образуются путем инверсии результатов, получаемых при выполнении операции **ИЛИ** и **И** соответственно:

$$\text{ИЛИ-НЕ}(x_1, x_2) = \overline{x_1 + x_2} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2, \quad (21.13)$$

$$\text{И-НЕ}(x_1, x_2) = \overline{x_1 \cdot x_2} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2, \quad (21.14)$$

что видно из таблицы истинности для двух элементов (табл. 21.2).

Элемент, выполняющий операцию **И-НЕ** в положительной логике (табл. 21.3), в отрицательной логике выполнит операцию **ИЛИ-НЕ** (табл. 21.4).

Логические элементы в интегральном исполнении предназначены для работы с сигналами в потенциальной

Таблица 21.2

Таблица истинности

Входные переменные		ИЛИ	И	ИЛИ-НЕ	И-НЕ
x_1	x_2	$y = x_1 + x_2$	$y = x_1 \cdot x_2$	$y = \overline{x_1 + x_2}$	$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$
0	0	0	0	1	1
0	1	1	0	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	1	1	0	0

Таблица 21.3

Таблица истинности

x_1	x_2	y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Таблица 21.4

Таблица истинности

x_1	x_2	y
1	1	0
1	0	0
0	1	0
0	0	1

форме. Они могут выполняться по логике разных типов. Тип логики влияет на характеристики элемента. В интегральных микросхемах чаще используют кремниевые транзисторы $n-p-n$ -типа. В режиме насыщения напряжение между эмиттером и коллектором таких транзисторов сравнительно велико (0,4 В и выше).

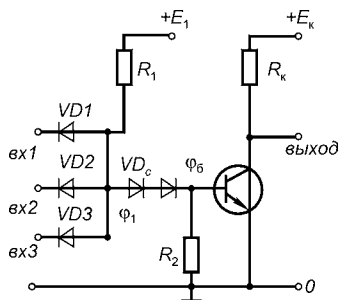


Рис. 21.13
Логический элемент **И-НЕ**

Логический элемент **И-НЕ** диодно-транзисторной логики (ДТЛ). Входные сигналы подаются на элемент **И**, выходной сигнал снимается с элемента **НЕ**. Таким образом, на выходе элемента **И-НЕ** сигналом будет логическая 1, если на входе элемента **НЕ** присутствует сигнал, соответствующий логическому 0. Чтобы это имело место, хотя бы на один вход элемента **И** должен быть подан сигнал, соответствующий логическому 0. Логический элемент **И-НЕ** для сигналов положительной полярности показан на рис. 21.13. Он включает в себя два элемента: диодный элемент **И** и транзисторный элемент **НЕ**. При этом у элемента **НЕ** отсутствует источник смещения E_6 .

Если на все входы подано напряжение U^1 (логическая 1), все диоды будут закрыты и ток в цепи направлен по цепи «источник E_1 , резистор R_1 , открытые диоды VD_c , база транзистора». Вследствие падения напряжения на резисторе R_1 потенциал ϕ_1 окажется несколько ниже потенциала $+E_1$, диод VD_1 откроется и потенциал базы ϕ_0 транзистора окажется меньше потенциала ϕ_1 на значение падения напряжения на диодах VD_c (но выше 0,6 В, так что транзистор будет находиться в режиме насыщения). На выходе элемента **НЕ** установится низкое напряжение U^0 , соответствующее логическому 0.

Если хотя бы на один вход, например $vx1$, будет подано напряжение U^0 , то соответствующий диод $VD1$ будет открыт и потенциал будет равен $\phi_1 \approx U^0$. Ток от источника E_1 будет направлен через резистор R_1 . Часть тока замкнется через открытый диод $VD1$, потенциал U^0 , источник E_1 , а часть тока — через смещающие диоды VD_c , резистор R_2 и источник E_1 . Потенциал базы составит

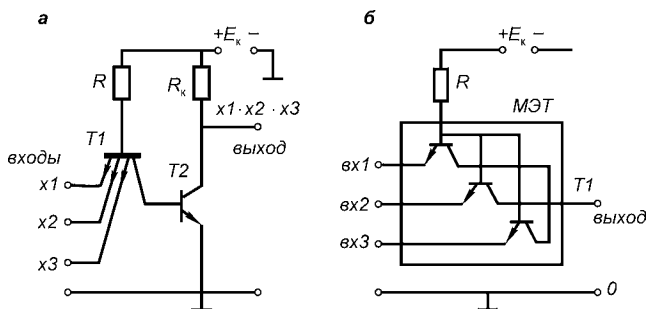


Рис. 21.14
Логический элемент **И-НЕ** логики ТТЛ

а — принципиальная схема; *б* — схема замещения многоэмиттерного транзистора *T1*.

$\varphi_6 = U_{60}$ и будет ниже потенциала φ_1 на значение падения напряжения на смещающих диодах VD_c .

При этом элемент рассчитывают таким образом, чтобы падение напряжения на диодах VD_c было таким, чтобы $\varphi_6 = U_{60} > 0$, но значительно меньше 0,6 В. В этом случае транзистор будет закрыт и на выходе элемента **НЕ** напряжение окажется равным $E_k > U^0$, т. е. получим логическую 1.

Логический элемент **И-НЕ** транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) показан на рис. 21.14а. Он состоит из двух частей: элемента **И** на многоэмиттерном транзисторе *T1* и элемента **НЕ** на транзисторе *T2*. Коллектор *T1* соединен с базой транзистора *T2*. Многоэмиттерный транзистор с тремя входами является аналогом трех транзисторов *T1*, подключенных ко входу логического элемента (рис. 21.14б) и выполняющих функции входных диодов по аналогии со схемой **И** на диодах. По сравнению с ДТЛ-элементами логика ТТЛ обладает более высоким быстродействием. Логический элемент выполнен по технологии интегральных микросхем, поэтому он не содержит реактивных элементов и работает от сигналов в виде напряжений положительной полярности.

Если на все входы элемента (рис. 21.14) подать напряжение U^1 , то все эмиттерные переходы сместятся в обратном направлении. Потенциал коллектора транзистора *T2* окажется близким к нулю, переход «база–коллектор» окажется смещенным в прямом направлении за счет источника $+E_k$. Транзистор *T1* будет находиться в инверс-

ном режиме, транзистор $T2$ — в режиме насыщения. Коллекторный ток транзистора $T1$ замыкается через базу транзистора $T2$, оставляя последний в режиме насыщения. Таким образом, на выходе логического элемента будет напряжение низкого уровня U^0 , т. е. логический 0. Если на один из входов подано напряжение U^0 , то потенциал базы транзистора $T1$ станет выше потенциалов эмиттера и коллектора, поэтому $T1$ окажется в режиме насыщения и ток базы замкнется через эмиттерные переходы $T1$ и будет отсутствовать в его коллекторе, а следовательно, и в базе $T2$. Поэтому транзистор $T2$ будет закрыт, а на его выходе будет напряжение высокого уровня (логическая 1). Таким образом, элемент выполняет операцию **И-НЕ**, так как сигнал логического нуля на выходе может быть только тогда, когда на все входы будет подан сигнал логической единицы.

Для повышения нагрузочной способности логических элементов ДТЛ и ТТЛ используют схемы со сложным инвертором (логический элемент **И-НЕ**, рис. 21.15а). Операция **И** выполняется входным многоэмиттерным транзистором $T1$. Инвертирование фазы сигнала осуществляется сложным инвертором на транзисторах $T2, T3, T4$ (для данного типа элемента питание осуществляется источником постоянного напряжения $E = 5$ В). Элемент работает от входных импульсов напряжения прямоугольной формы с уровнями: $U^1 = 3,3$ В — логическая 1; $U^0 = 0,1$ В — логический 0.

Если на оба входа относительно общей заземленной шины одновременно поданы положительные импульсы

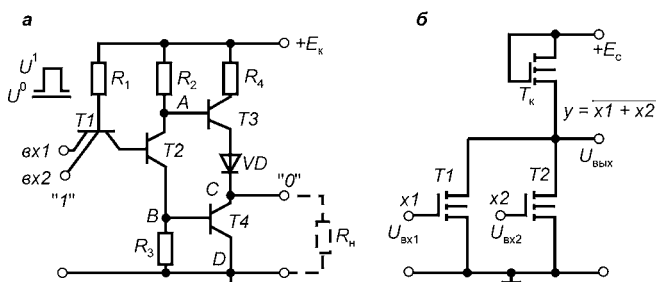


Рис. 21.15

Логические элементы **И-НЕ** и **ИЛИ-НЕ** логики ТТЛ

а — логический элемент **И-НЕ** со сложным инвертором; б — логический элемент **ИЛИ-НЕ** на МОП-транзисторах.

напряжения ($U^1 = 3,3 \text{ В}$), оба эмиттерных перехода транзистора $T1$ закрыты, так как они имеют обратное смещение. Транзисторы $T2$ и $T4$ находятся в режиме насыщения. Ток замыкается по цепи (рис. 21.15а) «открытый коллекторный p - n -переход транзистора $T1$, эмиттерно-базовые переходы насыщенных транзисторов $T2$ и $T4$, земля». Многозмиттерный транзистор $T1$ находится в инверсном режиме включения. Так как транзистор $T2$ открыт и находится в насыщении, между точками A и B элемента имеется малый перепад напряжения, из которого вычитается падение напряжения на диоде VD . В силу этого транзистор $T3$ надежно закрыт и находится в режиме отсечки. Насыщенный транзистор $T4$, представляя собой в этом режиме эквипотенциальную точку, подсоединяет узел C схемы к заземленной точке D , закорачивая тем самым сопротивление нагрузки R_n . Таким образом, на выходе напряжение равно логическому нулю.

Появление хотя бы на одном входе $T1$ импульса напряжения низкого уровня приводит к открытию соответствующего эмиттерного перехода транзистора. Тогда $T1$ выходит из инверсного режима, а транзисторы $T2$ и $T4$ закрываются, так как их базовые токи становятся равными нулю. В это время входит в насыщение транзистор $T3$. Его базовый ток насыщения замыкается по цепи « $+E_k$, R_2 , эмиттерно-базовый переход $T3$, прямо включенный диод VD , сопротивление нагрузки R_n , $-E_k$ ». На сопротивлении R имеем напряжение $U_{\text{вых}} \geq 3,3 \text{ В}$, что соответствует логической единице.

Логический элемент **ИЛИ-НЕ** выполнен на базе n -канальной МОП-транзисторной логики (МОПТЛ). В логических схемах на полевых транзисторах используют только МОП-транзисторы с диэлектриком SiO_2 . Основное преимущество схем на МОП-транзисторах по сравнению с другими схемами — повышенная помехоустойчивость.

На рис. 21.15б приведена схема логического элемента **ИЛИ-НЕ**, выполненного на базе МОП-транзистора с индуцированным n -каналом. В отличие от рассмотренных ранее схем вместо нагрузочного резистора коллектора R_k (рис. 21.14а) используется МОП-транзистор T_k , а логические транзисторы $T1$ и $T2$ включены параллельно. Входное напряжение на каждом из этих транзисторов равно напряжению затвора: $U_{\text{вх1}} = U_{\text{з11}}$, $U_{\text{вх2}} = U_{\text{з12}}$, а выход-

ное напряжение равно напряжению стока: $U_{\text{вых}} = U_{\text{си}}$ (см. п. 17.3.4 «Полевые транзисторы»).

Напряжение питания обычно выбирают в три раза больше порогового напряжения на затворе $U_{\text{пор}}$, при котором образуется индуцированный канал. Если, например, $U_{\text{пор}} = 2,0 \text{ В}$, то разность между входным и пороговым напряжениями составляет 4 В.

Логические уровни соответствуют выходным напряжениям открытого и закрытого транзисторов. Если на оба входа подать напряжение меньше порогового, соответствующего логическому нулю, то транзисторы $T1$ и $T2$ окажутся закрытыми, а ток стока практически равным нулю. При этом ток стока нагрузочного транзистора T_k тоже будет равен нулю. Поэтому на выходе установится напряжение, близкое к напряжению источника питания E_c и соответствующее логической 1. Если на вход хотя бы одного транзистора подать напряжение, соответствующее логической 1 (превышающее пороговое), то этот транзистор откроется и появится ток стока. Тогда на выходе схемы будет остаточное напряжение, значительно меньшее порогового, что соответствует логическому 0.

Быстродействие логических элементов на МОП-транзисторах меньше, чем на биполярных транзисторах, что связано со скоростью перезарядки выходной емкости. Перспективным представляется использование интегральной инжекционной логики, использующей комплементарные пары биполярных транзисторов. Здесь транзистор $p-n-p$ -типа работает в режиме источника тока, а многоэмиттерный транзистор $n-p-n$ -типа работает как инвертор.

21.5. ТРИГГЕРЫ НА БАЗЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

На базе логических элементов, различающихся структурой цепей управления и режимами работы, создаются различные триггеры в интегральном исполнении. Такие триггеры состоят из цепей управления и запоминающих устройств. Они имеют один, два (или более) входа и два выхода. Каждый из входов имеет определенное функциональное назначение и отражается в обозначении данного входа (R , S , K , D и т. д.). Цепи управления, в которые

поступают входные сигналы, преобразуют их в сигналы для запоминания и считывания. *Запоминающие устройства* состоят из двух плеч, в каждом из которых одновременно хранятся сколь угодно долго два сигнала, один из которых соответствует логической 1, другой — логическому 0. Выход триггера Q , с которого в исходном состоянии снимается высокий потенциал, называют *прямым*, а выход с низким потенциалом — *инверсным* с соответствующим обозначением \bar{Q} .

В зависимости от выполняемых функций различают триггеры с *раздельным запуском* (RC -триггеры), с *счетным запуском* (T -триггеры), с *элементами задержки* или *логическими переключающими схемами* в цепях управления (D -триггеры), *универсальные* (JK -триггеры).

По способу записи информации триггеры подразделяют на:

- 1) *асинхронные*, в которых информация записывается непосредственно при поступлении входного сигнала,
- 2) *тактируемые* (синхронные), записывающие входную информацию только при поступлении разрешающего тактового импульса.

Названия триггеров составляют из типов входов. Синхронные триггеры бывают со статическими и динамическими входами. Динамическим называют такой вход, действие поданных уровней сигналов на который прекращается после соответствующего переключения триггера.

RC -триггер (рис. 21.16). Обозначения входов: R — раздельный вход установки в состояние 0, S — раздельный вход установки в состояние 1. Логические нули и единицы на рисунках обозначены цифрами в кавычках: «0», «1».

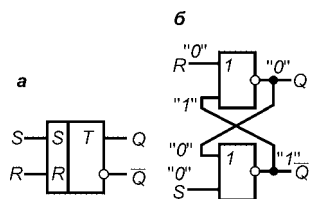


Рис. 21.16
 RC -триггер
на логических элементах
а — условное обозначение; б —
схема триггера на логических
элементах ИЛИ-НЕ.

Условное обозначение в схемах (рис. 21.16а) асинхронного RC -триггера, выполненного на двух логических элементах **ИЛИ-НЕ** (рис. 21.16б), имеет два прямых входа R , S и два выхода: прямой Q и инверсный \bar{Q} .

Перекрестное соединение выхода каждого элемента **ИЛИ-НЕ** с входом другого обеспечивает

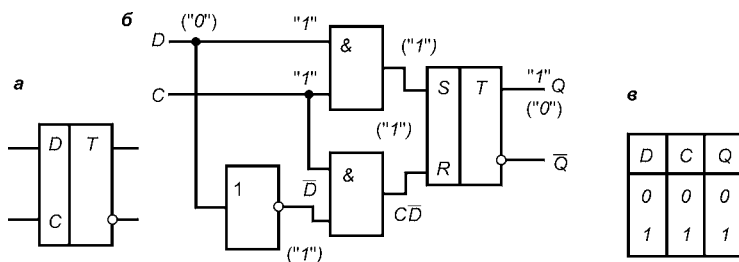


Рис. 21.17
Синхронный *D*-триггер

a — условное обозначение; *б* — схема триггера; *в* — таблица истинности.

схеме два устойчивых состояния. Предположим, что на входах *R* и *S* действуют уровни логического 0, которые не влияют на состояние триггера. Тогда на прямом выходе триггера *Q* имеет место уровень логического 0. Этот сигнал совместно с нулевым уровнем на входе *S* образует на инверсном выходе \bar{Q} триггера уровень логической 1. Уровень логической 1, в свою очередь, совместно с 0 на входе *R* формирует на прямом выходе *Q* уровень логического 0. Это устойчивое состояние триггера называют *нулевым по уровню на прямом выходе*.

Переключают триггер подачей на один из входов сигнала логической 1. При подаче на вход *R* уровня 1, а на вход *S* уровня 0 на инверсном выходе устанавливается сигнал $\bar{Q} = 0$, который переводит триггер в состояние 1, соответствующее $Q = 1$. Аналогично происходит переключение триггера и при подаче уровня логической единицы на вход *S*.

Для *RC*-триггера существует запретная комбинация входных сигналов. Триггер теряет свойства (его состояние становится неопределенным) при одновременной подаче на входы *R* и *S* уровня логической 1. Если отпирающие импульсы действуют одновременно, то триггер оказывается временно в симметричном состоянии, из которого он может выйти равновероятно в любое из двух устойчивых состояний. Таким образом, результат неоднозначный, что недопустимо.

D-триггер. Схема синхронного *D*-триггера приведена на рис. 21.17б, а на рис. 21.17а показано его условное обозначение в схемах. *D*-триггер имеет один информационный вход *D*, устанавливающий триггер в состояние,

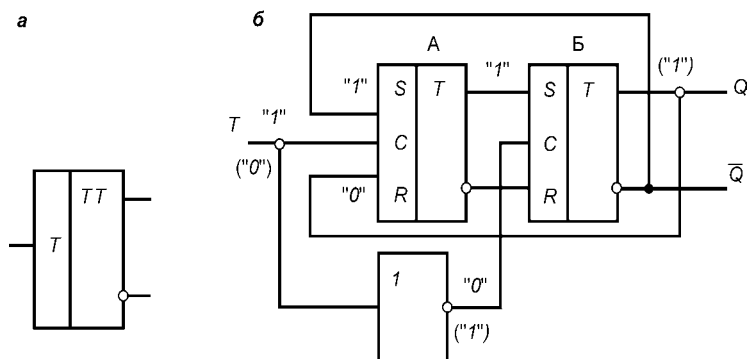


Рис. 21.18
T-триггер

a — условное обозначение; *б* — схема *T*-триггера.

соответствующее логическому уровню на этом входе. Вход *C* является исполнительным управляющим, он служит для подачи на вход синхронизирующего сигнала. Если на входе *C* логический 0, триггер сохраняет состояние, установленное ранее. Триггер состоит из асинхронного *RC*-триггера и логических переключающих устройств на входах (одного элемента **НЕ** и двух элементов **И**). На рис. 21.17*б* представлена таблица истинности, определяющая функционирование триггера. Из нее видно, что при *C* = 1 триггер устанавливается в состояние, определяемое логическим уровнем на входе *D*.

При анализе состояний логических элементов схемы на рис. 21.17 состояния входов и выходов для одного режима отмечены скобками, для другого режима — без скобок.

При *C* = 1 на выходах элементов **И** образуются уровни 0 для входов *RS*-триггеров. При *C* = 1 и *D* = 1 уровень 1 будет на входе *S* *RS*-триггера, а если на входе *D* = 0, то уровень 1 окажется на входе *R* *RS*-триггера. Следовательно, *D*-триггер принимает информацию с входа *D*, когда *C* = 1, и может ее хранить до тех пор, пока *C* = 0.

T-триггер. Буква *T* означает, что триггер имеет счетный вход. Условное обозначение и структура одной из схем *T*-триггера показаны на рис. 21.18.

Триггер состоит из двух (*A* и *B*) синхронных *T*-триггеров, имеющих синхронизирующие входы *C* и один счетный вход *T*, а также содержит инвертор (**НЕ**), через ко-

торый тактовый импульс подается на триггер *Б*. Триггер *А* называют ведущим, а триггер *Б* — ведомым. Обратная связь в *T*-триггере осуществлена следующим образом: с выхода *Q* триггера *Б* на вход *R* триггера *А* и с выхода \bar{Q} триггера *Б* на вход *S* триггера *А*. При уровне 1 на входе обеспечивается перевод триггера *А* в противоположное состояние. Если $T = 0$ и $Q = 0$, а $\bar{Q} = 1$, то на выходах триггера *А* будут такие же уровни, поскольку единичный уровень сигнала на выходе инвертора обеспечивает запись сигналов с выхода первого триггера *А* во второй *Б*. При этом на входе *S* триггера *А* будет 1, а на входе *R* уровень сигнала равен 0. Подача сигнала 1 на *T* отключает триггер *Б* от *А* и обеспечивает запись сигналов 1 на *S* и 0 на *R*. Изменение входного уровня на 0 приводит к отключению входов триггера *А* и запись сигналов с его выходов в триггер *Б*, который переводится в противоположное состояние $Q = 1$, $\bar{Q} = 0$.

Универсальный *JK*-триггер. Условное обозначение и структурная схема одного из вариантов *JK*-триггера показана на рис. 21.19. Входы *J* и *K* задают состояния работы триггера. На входе *J* устанавливается состояние 1, на входе *K* — состояние 0. Эти входы подобны входам *R* и *S* в *RS*-триггере. *JK*-триггер имеет синхронизирующий вход *C*, поэтому триггер является синхронным, т. е. его выходные уровни устанавливаются только при поступлении тактовых импульсов.

Входы *R* и *S* связаны с выходами перекрестными связями через две схемы **И**, на один из входов которых подаются управляющие уровни *J* и *K*. В *JK*-триггере

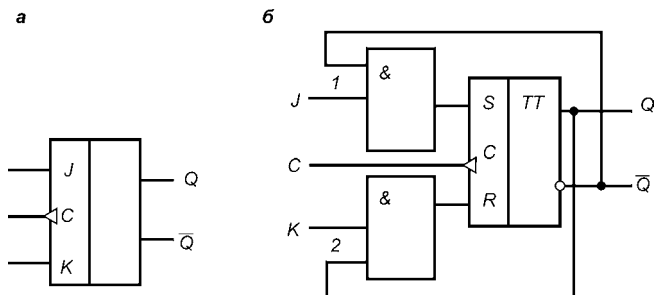


Рис. 21.19
JK-триггер

а — условное обозначение; б — структурная схема.

допустимо подавать на входы J и K одинаковые сигналы в отличие от RS -триггеров. Если на входы поданы сигналы-единицы, логические элементы $\mathbf{И}$ превращаются в повторители для уровней, поданных на входы 1 и 2. В этом случае JK -триггер работает как T -триггер. При остальных наборах сигналов на входах JK -триггер работает как RS -триггер.

21.6. СЧЕТЧИКИ

Счетчиком называют цифровое устройство, осуществляющее счет импульсов, поступающих на его вход. Числа в счетчике представляют в двоичной системе счисления в виде комбинаций состояний триггеров, образующих разряды счетчика. Счетчики подразделяют на *суммирующие*, в которых числа, представленные в виде последовательности импульсов, складываются с записанным ранее числом; *вычитающие*, когда входные импульсы вычитаются из начального числа; *реверсивные*, производящие одну из указанных выше операций в зависимости от знака входных сигналов. В зависимости от схемы выполнения цепей связи между разрядами различают счетчики с *непосредственной связью*, с *цепями переноса* и *комбинированные*. По принципу подачи сигналов счетчики бывают *последовательными*, *параллельными* и *смешанными*. Счетчики выполняют на счетных триггерах T - или JK -типа.

Суммирующие двоичные счетчики. В таких счетчиках поступление на вход очередного импульса вызывает увеличение на одну единицу хранимого в счетчиках числа. При этом в счетчике устанавливается число, которое получается суммированием предыдущего значения с единицей. Суммирование производится в двоичной системе счисления.

Таблица 21.5
Таблица истинности
счетчика

a_i	0	0	1	1
Π_i	0	1	0	1
b_i	0	1	0	1
Π_{i+1}	0	0	0	1

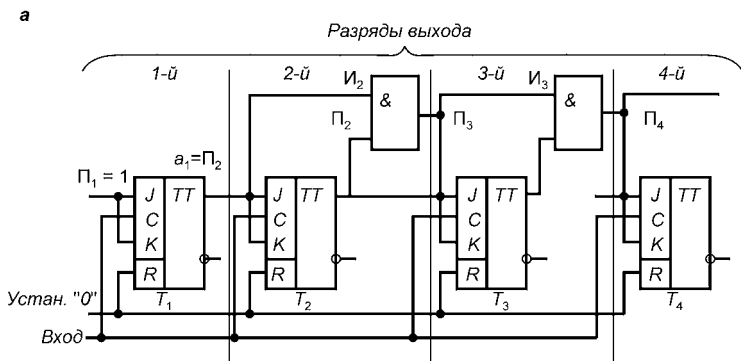
Процесс суммирования можно описать с помощью логических выражений. Функционирование i -го разряда счетчика можно представить таблицей истинности (табл. 21.5).

В этой таблице: a_i — цифры разрядов числа до суммирования; b_i — цифры разрядов числа, по-

лучаемого при суммировании с единицей; Π_i — значение переноса, формируемого в $(i - 1)$ -м разряде счетчика и передаваемого в i -й разряд; Π_{i+1} — перенос, передаваемый в $(i + 1)$ -й разряд; $\Pi_{i+1} = a_i \Pi_i$.

Из таблицы истинности следует, что установившееся в i -м разряде значение $b_i = a_i \Pi_i \vee \bar{a}_i \Pi_i$ может быть получено путем подачи переноса Π_i на счетный вход триггера i -го разряда, хранившего значение a_i . Если на вход счетчика поступила логическая единица, перенос, подаваемый на первый разряд счетчика, $\Pi_1 = 1$, $\Pi_{i+1} = \Pi_2 = a_1$. Логические операции реализует схема счетчика на рис. 21.20а с четырьмя разрядами.

Информационные входы J и K триггеров разрядов объединены с образованием счетного входа, на который подаются поступающие в разряды переносы. Подлежащие счету импульсы подаются на входы синхронизации триггеров. Если на вход счетного триггера поступает



б

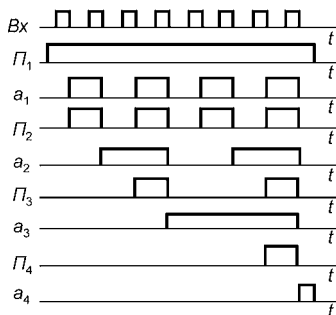


Рис. 21.20
Суммирующий счетчик
а — схема; б — диаграмма.

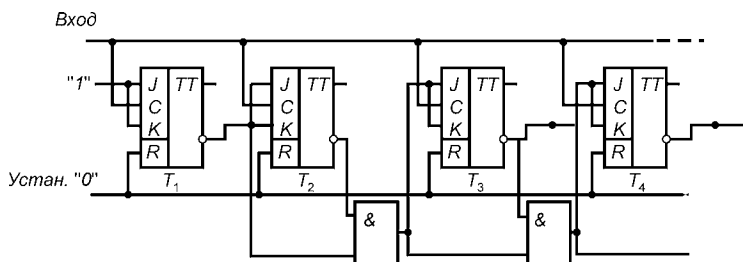


Рис. 21.21
Схема вычитающего счетчика

«перенос», равный логической 1, входной импульс переводит триггер в новое состояние. В противном случае в триггере сохраняется прежнее состояние. Для формирования переносов использованы логические элементы И. Цепь установки «нуля» используется для начальной установки в состояние 0 триггеров всех разрядов счетчика. На рис. 21.20б представлены временные диаграммы работы счетчика. При нарастании входного импульса триггер принимает поданное на его информационные входы значение «переноса», затем при спаде входного импульса на выходе триггера устанавливается новое значение «переноса». С каждым входным импульсом число в счетчике увеличивается на единицу. Такое нарастание числа продолжается до тех пор, пока после $(2^n - 1)$ -го входного импульса не установится двоичное число $(11...1)_2$. Далее с приходом 2^n -го импульса в счетчике устанавливается исходное состояние $00...0$, после чего счет ведется сначала.

Вычитающий счетчик. В вычитающем счетчике поступление на вход очередной логической единицы (очередного импульса) вызывает уменьшение хранившегося в счетчике числа на единицу. Он отличается от суммирующих счетчиков тем, что счетные входы каждого из последующих триггеров подсоединены не к прямому выходу предыдущего триггера, а к инверсному \bar{Q} (рис. 21.21). Кроме того, в исходном состоянии все разряды (или часть из них) заполняются не нулями, а единицами уменьшаемого числа. При поступлении на вход импульсов, которые надо вычесть из заранее установленного числа, триггеры, начиная с первого, последовательно срабатывают и уменьшают это число.



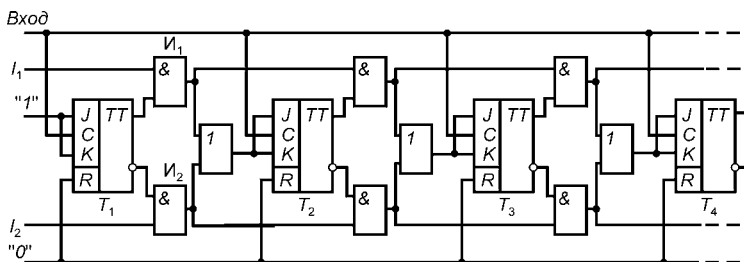


Рис. 21.22
Схема реверсивного счетчика

На рис. 21.21 представлена схема вычитающего счетчика с последовательной передачей «переносов». Как и суммирующий счетчик, вычитающий счетчик имеет период циклической работы, равный 2^n импульсов.

Реверсивный счетчик. Реверсивный счетчик (рис. 21.22) работает как в режиме суммирования, так и в режиме вычитания. В устройстве счетчика содержится блок управления, состоящий из логических элементов. В схеме счетчика предусмотрены две цепи передачи «переносов», соответствующие схемам суммирующего и вычитающего счетчиков.

Счетчик работает в режиме суммирования, когда управляющие сигналы $I_1 = 1$ и $I_2 = 0$, так как в этом случае закрыт элемент И2 и, следовательно, отключена цепь передачи переносов режима вычитания. Счетчик работает в режиме вычитания, когда $I_1 = 0$ и $I_2 = 1$, т. е. когда закрыт элемент И1, и поэтому отключена цепь передачи переносов режима суммирования.

21.7. РЕГИСТРЫ

Регистр — это узел ЭВМ, предназначенный для приема, хранения и выдачи по команде числовых кодов. Наибольшее применение регистры находят в устройствах оперативной обработки информации. Регистр включает в себя сборку из триггерных и логических элементов. В зависимости от формы представления числа, используемой при вводе в регистр (параллельной или последовательной), регистры подразделяют на накопительные и сдвигающие.

Накопительные регистры (параллельные) могут только принимать, запоминать и выдавать числовую информацию.

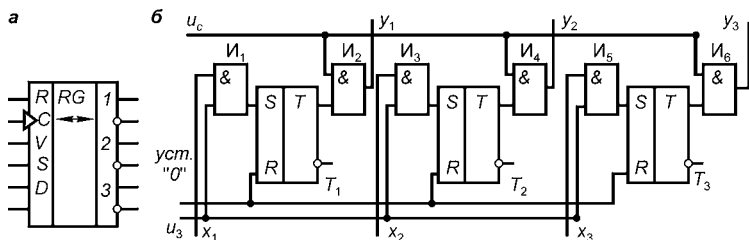


Рис. 21.23
Накопительный (параллельный) регистр
а — условное обозначение; б — структурная схема.

Условное обозначение и одна из типовых схем такого регистра показана на рис. 21.23. Регистр состоит из трех триггеров с прямыми входами и шести элементов И. К входам триггеров подключаются логические элементы I_1, I_3, I_5 , а к прямым выходам триггеров — I_2, I_4, I_6 . R -входы триггеров присоединены к шине установки входов в исходное состояние *уст. «0»*. На первые входы элементов И (x_1, x_2, x_3) поступают коды чисел, подлежащие записи. Их вторые входы подключены к шине генератора импульсов записи u_3 . Считывание информации производится с выходов y_1, y_2, y_3 конъюнкторов.

Сдвигающий (последовательный) регистр можно получить, если ячейки параллельного регистра (рис. 21.23б) соединить последовательно: выход старшего разряда подключить ко входу младшего, т. е. коллектор правого триггера предыдущей ячейки связать со счетным входом последующей. При этом связь должна содержать элемент задержки импульсов во времени. Элемент задержки реализуется с помощью цепей, содержащих катушку индуктивности и конденсатор. Выходы сдвигающего регистра и его ячеек присоединяют в зависимости от применения к блокам или схемам управления электрическими приводами технологических объектов. Если с заданной частотой подавать запускающие импульсы на вход x_1 и шины u_3 и u_c , то ячейки регистра будут одна за другой срабатывать и поочередно включать управляемые цепи. В условном изображении регистра в средней части под буквами *RG* одно- или двусторонняя стрелка означает, что регистр сдвигает в одну или обе стороны.

21.8. ШИФРАТОРЫ И ДЕШИФРАТОРЫ

Комбинация электрических сигналов, однозначно соответствующая данному числу, называется *кодом* числа. Устройство, преобразующее цифровые коды входных чисел в сигналы для выполнения логических операций, называется *шифратором* (*кодером*). Обратное преобразование сигналов в код осуществляется *дешифратором* (*декодером*). Шифратор в совокупности с дешифратором позволяет решать задачу преобразования одного кода в другой (например, десятичных чисел в двоичную систему счисления и наоборот). Шифраторы и дешифраторы выполняют в виде комбинаций триггеров и простых логических элементов **И**, **ИЛИ**, **НЕ** и их комбинаций.

Шифратор для преобразования кода десятичного числа в код двоичного числа и его условное обозначение представлены на рис. 21.24. На рисунке входы обозначены десятичными цифрами, а выходы — двоичными кодовыми эквивалентами. Символ *CD* соответствует английскому

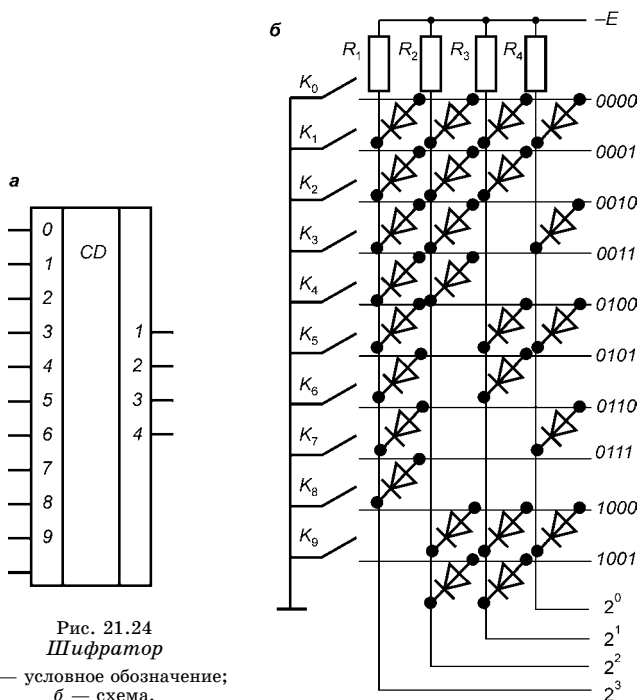


Рис. 21.24
Шифратор

a — условное обозначение;
б — схема.

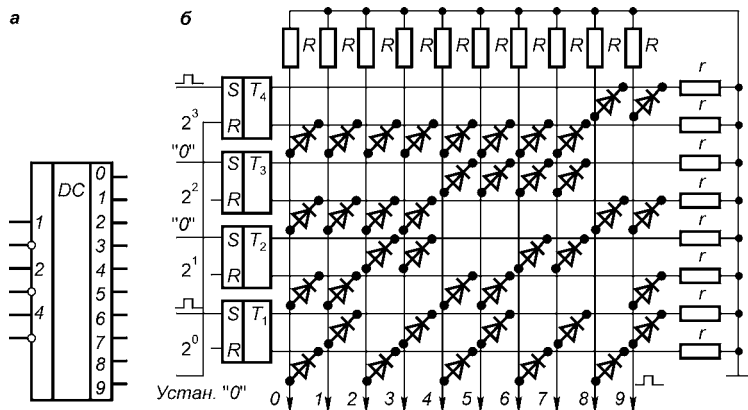


Рис. 21.25
Дешифратор

а — условное обозначение; б — схема.

слову *coder*. Входы шифратора — ключи K_0, \dots, K_9 служат для ввода цифр разряда единиц десятичного числа. Выходы — это вертикальные проводники, соединенные через резисторы R_1, \dots, R_4 с источником энергии и корпусом. Диоды каждого горизонтального проводника (строки) вместе с резисторами образуют элементы **И**. Код двоичного числа формируется из электрических сигналов,

соответствующих сумме слагаемых $N = \sum_0^n 2^n$, где N — двоичное число, n — разряд числа. При нажатии определенного ключа элемент **И** формирует электрический сигнал, являющийся кодом двоичного числа.

Дешифраторы применяют в устройствах вывода информации в ЭВМ для преобразования двоичных эквивалентов в десятичные числа. На схеме (рис. 21.25) показана принципиальная схема дешифратора двоичных чисел в десятичные в виде матрицы с диодными элементами **И**.

Ее входные горизонтальные шины присоединены к прямым и инверсным выходам триггеров, выходные шины $0, \dots, 9$ (вертикальные) могут подключаться к печатающей цифры машине или к индикаторам. Сопротивления резисторов значительно выше сопротивления диодов. На условном обозначении дешифратора прямые и инверсные входы (слева) обозначены двоичными числами разрядов, а выходы (справа) — десятичными цифрами.

21.9. СУММАТОРЫ

Сумматором называют устройство, осуществляющее арифметическое сложение двоичных чисел. Сумматор является одним из основных элементов ЭВМ, выполняющим арифметические операции. Сложение многоразрядных двоичных чисел производится однотипными действиями, осуществляемыми в каждом разряде с помощью одноразрядного двоичного сумматора (рис. 21.26). В двоичном одноразрядном сумматоре путем сложения по модулю 2 определяется сумма чисел a_1 и b_1 в каждом разряде. Операция сложения выполняется путем подачи соответствующих разрядов двух чисел (a_1, b_1) на информационные входы D двух D -триггеров, а именно D_a и D_b . Числа в триггеры записываются подачей тактового импульса u_T на тактовые входы C обоих триггеров.

Операция сложения осуществляется следующим образом. Предположим, что $a_1 = 0$ и $b_1 = 0$. После подачи тактового импульса u_T эти числа переписываются на выходы D -триггеров. При этом на выходе элемента **И**₁, на входы которого поступают сигналы $a_1 = 0$ и $\bar{b}_1 = 1$, будет сигнал $a_1 \bar{b}_1 = 0$. На входы элемента **И**₂ поступают сигналы $\bar{a}_1 = 1$ и $b_1 = 0$, что обеспечивает на его выходе сигнал $\bar{a}_1 b_1 = 0$. Сигналы $a_1 \bar{b}_1 = 0$ и $\bar{a}_1 b_1 = 0$, поступая на входы элемента **ИЛИ**, образуют сигнал, соответствующий сумме чисел a_1 и b_1 :

$$S = \bar{a}_1 b_1 + a_1 \bar{b}_1 = 0.$$

Если $a_1 = 1, b_1 = 0$, то на выходе элемента **И**₁ вырабатывается сигнал $a_1 \bar{b}_1 = 1$, а на выходе элемента **И**₂ — $\bar{a}_1 b_1 = 0$. В результате на выходе элемента **ИЛИ** сигнал суммы $S = 1$. Аналогично формируется сигнал суммы в каждом разряде двоичного одноразрядного сумматора и при других сочетаниях входных чисел.

Для сложения многоразрядных двоичных чисел используют многоразрядные сумматоры, которые в зависимости

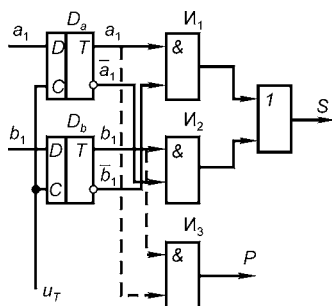


Рис. 21.26
Одноразрядный
двоичный сумматор

от ввода чисел делятся на две группы: последовательного и параллельного действия. Сумматор *последовательного действия* состоит из одноразрядного сумматора (рис. 21.26), на входы которого последовательно (в последовательном коде) подаются числа каждого разряда, начиная с младшего. Сумма, формируемая на выходе последовательного сумматора, также представляется в последовательном коде. Суммирование осуществляется при поступлении тактовых импульсов u_T . При поступлении первого тактового импульса суммируются числа первого разряда, при поступлении второго тактового импульса — второго разряда и т. д. Для сумматора последовательного действия характерно малое количество элементов, однако он обладает низким быстродействием. Сумматор *параллельного действия* выполняется много-разрядным, его каждый разряд образован одноразрядным сумматором. Каждый одноразрядный сумматор должен формировать сигнал суммы и сигнал «переноса» в старший разряд, если сумма, полученная при сложении двух чисел, превышает 1. Схемы, позволяющие формировать сигнал «переноса» в старший разряд, называют полусумматорами. Полусумматор образуется путем добавления к схеме вышерассмотренного одноразрядного сумматора элемента $\mathbf{И}_3$, на выходе которого формируется сигнал «переноса» $P = a_1b_1$. Если $a_1 = 1$ и $b_1 = 1$, то на выходе элемента $\mathbf{И}_3$ появляется сигнал «переноса» $P = a_1b_1 = 1$.

21.10. МИКРОПРОЦЕССОРЫ

В результате развития технологии *больших интегральных микросхем* (БИС) были созданы универсальные БИС — микропроцессоры. Высокий уровень технических характеристик таких микропроцессоров, высокая надежность, низкая стоимость, малые габариты, малое потребление электроэнергии обеспечили широкое использование их не только в вычислительной технике, но и в разнообразных промышленных, бытовых и других устройствах. *Микропроцессор* (МП) — это полупроводниковый прибор, предназначенный для обработки информации и управления, рассчитанный на совместную работу с устройствами памяти, ввода-вывода информации и дру-



гими периферийными устройствами. Микропроцессор выполняется в виде БИС с программируемой логикой, для чего используются программы, обеспечивающие способ функционирования МП. Программы хранятся в памяти микропроцессора. Способ функционирования изменяется путем замены одной программы на другую.

Микропроцессоры выполняют как на базе одной, так и нескольких БИС и помещают в корпус, от которого делают внешние выводы. Таким образом, МП представляет собой единое устройство, реализованное соответствующей схмотехникой. По своему составу и выполняемым функциям он аналогичен процессору ЭВМ, поэтому МП можно определить как процессор, реализованный средствами интегральной технологии в виде одной или нескольких БИС.

Микропроцессор состоит из *арифметико-логического устройства (АЛУ), устройства управления (УУ), блока внутренних регистров* (внутренняя память), *аппаратуры и шин*, обеспечивающих связь внутренних устройств между собой и с внешней аппаратурой (*интерфейс*). Структурная схема микропроцессора показана на рис. 21.27а.

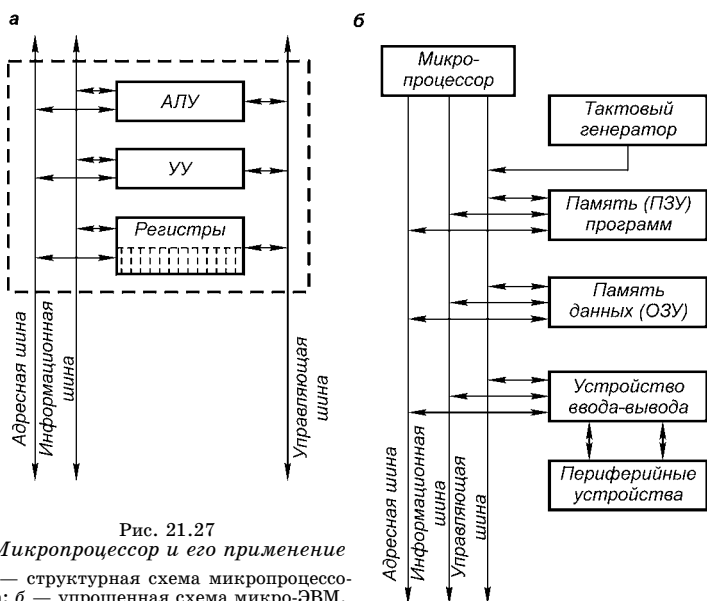


Рис. 21.27

Микропроцессор и его применение

а — структурная схема микропроцессора; б — упрощенная схема микро-ЭВМ.

Арифметико-логическое устройство реализует простейшие арифметические и логические операции над числами и адресами, представленными в двоичном коде: сложение, вычитание, сравнение, сдвиги, логическое умножение (**И**), логическое сложение (**ИЛИ**) и т. п.

Структура АЛУ достаточно сложна и содержит сумматор по модулю 2, дешифратор, сдвигающий регистр, регистр для временного хранения операндов (исходных элементов данных, над которыми выполняется операция) и другие регистры и элементы, которые содержатся в обычных АЛУ. АЛУ различных МП отличаются друг от друга лишь деталями структуры и количеством регистров.

Управляет работой АЛУ и всех других элементов МП устройство управления. В нем поступающие из памяти команды преобразуются в двоичные сигналы, непосредственно воздействующие на все элементы МП и обеспечивающие выполнение определенной команды. Устройство управления соединено с генератором тактовых сигналов (*таймером*), с помощью которого процесс выполнения команды распределяется по времени. Блок внутренних регистров образует внутреннюю сверхоперативную память МП и содержит специальные регистры и регистры общего назначения (РОН). Регистры связаны между собой и с другими внутренними регистрами шинами. Специальные регистры — это накопительный регистр, регистр адреса, регистр состояний и др.

Регистры общего назначения предназначены для хранения промежуточных результатов, адресов и команд, возникающих в ходе выполнения программы. Кроме того, их используют для выполнения функций специальных регистров, а именно формирования адресов, счетчика команд и др.

Шины служат для связи внутренних устройств между собой и с внешней аппаратурой, т. е. являются интерфейсом, с помощью которого подключают устройства. В соответствии с передаваемыми по ним сигналами они бывают *информационными, адресными и управляющими*. Шина представляет собой группу линий связи, число которых соответствует разрядности одновременно передаваемой по шине двоичной информации.

Как следует из определения МП и его структуры, он не может быть использован в качестве самостоятельного

устройства. Для обеспечения его работы требуются внешняя память (запоминающие устройства), устройства ввода-вывода, таймер, источник питания и др. Поэтому обычно разрабатывают *микропроцессорные системы* (МПС) — совокупность МП, устройств памяти и ввода-вывода информации. Каждое из этих устройств выполняется на одном или нескольких кристаллах БИС. В состав МПС входит также источник питания, таймер и др. Такие системы могут обмениваться информацией с большим количеством периферийных устройств, к которым относятся печатающие устройства, дисплеи на электронно-лучевых трубках для графического отображения данных, панели ключевого управления, шаговые двигатели и др. МПС служит основой для создания микро-ЭВМ. Микро-ЭВМ — это конструктивно завершенная МПС, помещенная в корпус, имеющая панель управления и комплект математического обеспечения. Упрощенная схема микро-ЭВМ показана на рис. 21.27б. Микро-ЭВМ, как правило, выполняют на нескольких кристаллах БИС. Однако развитие технологии интегральных микросхем и повышение степени интеграции в кристалле до 10 000 элементов и более позволяют реализовать на одном кристалле всю микро-ЭВМ. Такие микро-ЭВМ обладают небольшим объемом памяти и несложными схемами каналов ввода-вывода, поэтому их используют для выполнения несложных функций.

Микропроцессорные системы находят широкое применение в различных отраслях науки и техники. Их применяют для управления и контроля производственных процессов в системах сбора данных, в станках с программным управлением, в системах обработки информации при решении научно-технических задач, в качестве универсальных и специализированных микро-ЭВМ, в измерительной технике и др.



РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Нейман Л. Р., Демирчян К. С.* Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. — Л. : Энергоиздат, 1981. — 533 с.
- Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для вузов. — 8-е издание, перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1984. — 559 с.
- Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для вузов. — 8-е издание, перераб. и доп. — М. : Высш. школа, 1986. — 262 с.
- Иванов-Смоленский А. В.* Электрические машины. — М. : Энергия, 1980. — 927 с.
- Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С.* Электрические машины и микромашины: Учебник для вузов. — 3-е издание, перераб. и доп. — М. : Высш. школа, 1990. — 527 с.
- Электрические измерения / Под ред. А. Ф. Фремке и Е. М. Душина. — Л. : Энергия, 1980. — 424 с.
- Исмаилов Ш. Ю.* Электрические измерения. — СПб. : Изд-во СПбГУ, 2000. — 289 с.
- Чиликин М. Г., Сандлер А. С.* Общий курс электропривода. — М. : Энергоиздат, 1981. — 576 с.
- Липкин Б. Ю.* Электроснабжение промышленных предприятий и установок. — М. : Высш. школа, 1990. — 363 с.



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
<i>Часть первая</i> ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	
Введение	6
В.1. Электрическая энергия и ее применение	6
В.2. Электрификация страны	8
Глава 1. Электрические цепи постоянного тока	11
1.1. Основные понятия об электрических цепях	11
1.2. Условные положительные направления ЭДС, тока в элементах цепи и напряжения на зажимах элементов цепи ..	15
1.3. Законы Кирхгофа	16
1.4. Режимы работы электрической цепи	19
1.5. Энергетические соотношения в цепях постоянного тока	21
1.6. Неразветвленные и разветвленные линейные электрические цепи с одним источником питания	23
1.7. Нелинейные элементы электрической цепи постоянного тока ..	27
1.8. Методы расчета электрических цепей с нелинейными элементами	33
Глава 2. Электрические однофазные цепи синусоидального тока	40
2.1. Основные понятия и определения	40
2.2. Получение синусоидальной ЭДС	42
2.3. Действующие и средние значения синусоидальных ЭДС, напряжения и тока	44
2.4. Изображение синусоидальных ЭДС, напряжений и токов в прямоугольных координатах	47
2.5. Векторное изображение синусоидальных ЭДС, напряжений и токов	50
2.6. Комплексный метод расчета	53
2.7. Законы Кирхгофа для электрической цепи синусоидального тока	57
2.8. Электрическая цепь с резистором	59
2.9. Электрическая цепь с индуктивным элементом	61
2.10. Электрическая цепь с емкостным элементом	64
2.11. Электрическая цепь при последовательном соединении элементов с R , L и C . Закон Ома в комплексной форме	67
2.12. Треугольники напряжений и сопротивлений	73
2.13. Последовательное соединение нескольких электроприемников	76
2.14. Мощность цепи синусоидального тока	79
2.15. Электрическая цепь при параллельном соединении элементов с R , L и C	85



2.16. Соотношения между эквивалентными параметрами цепи при последовательном и параллельном соединении элементов . . .	88
2.17. Параллельное соединение нескольких электроприемников . . .	90
2.18. Резонанс в электрических цепях синусоидального тока . . .	93
2.19. Повышение коэффициента мощности	98
2.20. Поверхностный эффект в проводниках	101
Глава 3. Сложные линейные электрические цепи	103
3.1. Общие понятия о сложных разветвленных цепях	103
3.2. Расчет цепей по уравнениям, составленным по законам Кирхгофа	104
3.3. Расчет цепей методом контурных токов	106
3.4. Расчет цепей с использованием принципа наложения	109
3.5. Расчет цепей методом эквивалентного генератора	110
3.6. Расчет цепей методом узловых потенциалов	114
3.7. Преобразование схем соединения пассивных элементов звездой и треугольником	116
3.8. Общие понятия о четырехполюсниках	119
Глава 4. Электрические трехфазные цепи	123
4.1. Понятие о трехфазной системе электрических цепей	123
4.2. Получение трехфазной системы ЭДС	124
4.3. Соединение обмоток генератора и фаз приемника звездой	127
4.4. Соединение обмоток генератора и фаз приемника треугольником	132
4.5. Напряжение между нейтральными точками генератора и приемника	135
4.6. Трехфазная цепь с несимметричным приемником	137
4.7. Мощность трехфазной цепи	142
Глава 5. Переходные процессы в электрических цепях	144
5.1. Основные понятия и принципы анализа переходных процессов	144
5.2. Переходные процессы в цепи с последовательным соединением элементов с R и L при подключении ее к источнику постоянного напряжения	147
5.3. Переходные процессы в цепи при зарядке и разрядке конденсатора	149
5.4. Переходные процессы в цепи с последовательным соединением элементов с R и L при подключении ее к источнику синусоидального напряжения	152
5.5. Переходные процессы в цепи с последовательным соединением элементов с R и C при подключении ее к источнику синусоидального напряжения	154
Глава 6. Периодические несинусоидальные токи в электрических цепях	157
6.1. Основные понятия о несинусоидальных ЭДС, напряжениях, токах и методах их анализа	157
6.2. Действующие и средние значения несинусоидальных электрических величин	162
6.3. Активная мощность при несинусоидальных напряжении и токе	164
6.4. Анализ линейных электрических цепей при несинусоидальном напряжении источника питания	166
6.5. Влияние параметров цепи на изменение тока во времени	167
6.6. Электрические фильтры	169
Глава 7. Магнитное поле	173
7.1. Основные величины, характеризующие магнитное поле	173
7.2. Магнитные свойства и характеристики ферромагнитных материалов	179
7.3. Магнитные цепи и их разновидности	182
7.4. Магнитное сопротивление магнитной цепи. Закон Ома для участка магнитной цепи	184



7.5. Законы Кирхгофа для магнитной цепи	185
7.6. Схемы замещения магнитных цепей	187
7.7. Потоки рассеяния в магнитных цепях	188
7.8. Расчет неразветвленных магнитных цепей	189
7.9. Расчет разветвленных магнитных цепей	191
7.10. Расчет магнитных цепей с постоянными магнитами	193
7.11. Энергия магнитного поля	195
7.12. Механические усилия в магнитном поле	197
7.13. Некоторые особенности цепей переменного тока с ферромагнитными элементами	201
7.14. Мощность потерь энергии в ферромагнитных материалах при переменном магнитном поле	203
Глава 8. Трансформаторы	208
8.1. Назначение трансформаторов	208
8.2. Принцип действия трансформатора	209
8.3. Устройство трансформаторов	212
8.4. Уравнения напряжений трансформатора	217
8.5. Холостой ход трансформатора	219
8.6. Работа трансформатора под нагрузкой	223
8.7. Уравнения магнитодвижущих сил и токов	224
8.8. Параметры приведенной вторичной обмотки	225
8.9. Схемы замещения и уравнения приведенного трансформатора	227
8.10. Векторная диаграмма приведенного трансформатора	230
8.11. Короткое замыкание трансформатора	232
8.12. Потери напряжения в трансформаторе	235
8.13. Внешняя характеристика трансформатора	237
8.14. Мощность потерь энергии и коэффициент полезного действия трансформатора	239
8.15. Трехобмоточные трансформаторы	241
8.16. Трехфазные трансформаторы	242
8.17. Схемы и группы соединения обмоток трехфазного трансформатора	244
8.18. Параллельная работа трансформаторов	248
8.19. Автотрансформаторы	251
8.20. Специальные трансформаторы	253
Глава 9. Электроизмерительные приборы	257
9.1. Общие сведения	257
9.2. Погрешности приборов	258
9.3. Классификация электроизмерительных приборов	259
9.4. Общие элементы электроизмерительных приборов непосредственной оценки	263
9.5. Магнитоэлектрические приборы	267
9.6. Электромагнитные приборы	272
9.7. Электродинамические и ферродинамические приборы	275
9.8. Индукционные приборы	280
9.9. Логометры	283
9.10. Регистрирующие приборы	286
9.11. Общие понятия об электронных измерительных приборах	288
Глава 10. Электрические измерения	293
10.1. Измерения в цепях постоянного тока	293
10.2. Измерения в однофазных цепях синусоидального тока	294
10.3. Измерения в трехфазных цепях	296
10.4. Измерение сопротивлений	300
10.5. Понятия об измерении неэлектрических величин	302
Глава 11. Электрические машины постоянного тока	305
11.1. Общие сведения	305
11.2. Устройство машин постоянного тока	306
11.3. Принцип действия машины постоянного тока	312
11.4. ЭДС якоря и электромагнитный момент	317

11.5. Реакция якоря	320
11.6. Понятие о коммутации	322
11.7. Классификация и параметры генераторов постоянного тока	326
11.8. Генератор независимого возбуждения	327
11.9. Генератор параллельного возбуждения	330
11.10. Генератор смешанного возбуждения	333
11.11. Общие свойства двигателей постоянного тока	335
11.12. Пуск двигателей постоянного тока	338
11.13. Способы регулирования частоты вращения	340
11.14. Двигатель параллельного возбуждения	343
11.15. Двигатель последовательного возбуждения	345
11.16. Двигатель смешанного возбуждения	349
11.17. Мощность потерь	350
Глава 12. Асинхронные машины	352
12.1. Общие сведения	352
12.2. Устройство асинхронных машин	353
12.3. Получение вращающегося магнитного поля	356
12.4. Принцип действия асинхронного двигателя	362
12.5. Электродвижущие силы в обмотках статора и ротора. Ток ротора	364
12.6. Уравнения магнитодвижущих сил. Ток статора	370
12.7. Схема замещения и векторная диаграмма асинхронного двигателя	373
12.8. Энергетическая диаграмма и КПД асинхронного двигателя	377
12.9. Вращающий момент асинхронного двигателя	379
12.10. Характеристики асинхронного двигателя	384
12.11. Пуск асинхронных двигателей	390
12.12. Регулирование частоты и направления вращения асинхронных двигателей	396
12.13. Асинхронная машина в режиме генератора и электромагнитного тормоза	401
12.14. Линейный асинхронный двигатель	403
12.15. Однофазный асинхронный двигатель	405
12.16. Однофазный коллекторный двигатель	411
Глава 13. Синхронные машины	414
13.1. Общие сведения	414
13.2. Устройство синхронных машин	415
13.3. Синхронный генератор	421
13.4. Электромагнитная мощность и электромагнитный момент синхронной машины	428
13.5. Параллельная работа синхронной машины с сетью	431
13.6. Синхронный двигатель	438
13.7. Характеристики синхронного двигателя	444
13.8. Синхронный компенсатор	447
13.9. Реактивный двигатель	448
13.10. Сельсины	449
Глава 14. Аппараты управления, защиты и автоматики	455
14.1. Аппаратура ручного управления	455
14.2. Плавкие предохранители	457
14.3. Контактные и магнитные пускатели постоянного и переменного токов	459
14.4. Реле	466
14.5. Автоматические выключатели	472
Глава 15. Вопросы электропривода и электроснабжения	474
15.1. Основные понятия об электроприводе	474
15.2. Режимы работы электродвигателей	475
15.3. Выбор мощности электродвигателя	480
15.4. Выбор типа электродвигателя	484
15.5. Типовые схемы автоматического управления электродвигателями	486



15.6. Основные элементы системы электроснабжения	493
15.7. Расчетная мощность системы электроснабжения	500
15.8. Выбор сечения проводов	502

Часть вторая ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Введение	506
Глава 16. Электронные приборы	509
16.1. Электровакuumные лампы. Определения	509
16.2. Виды электронной эмиссии	509
16.3. Устройство электровакuumных ламп	516
16.4. Двухэлектродные электронные лампы (диоды)	520
16.5. Трехэлектродные электронные лампы (триоды)	523
16.6. Электронные тетроды, пентоды и многоэлектродные лампы	527
16.7. Газоразрядные приборы	530
Глава 17. Полупроводниковые приборы	535
17.1. Полупроводники и их свойства	535
17.2. Полупроводниковые диоды	542
17.3. Транзисторы	566
17.4. Тиристоры	595
17.5. Комбинированные транзисторы	613
Глава 18. Полупроводниковые выпрямители	620
18.1. Общая структура выпрямителей	620
18.2. Однополупериодный однофазный выпрямитель	621
18.3. Двухполупериодные выпрямители	623
18.4. Трехфазные выпрямители	626
18.5. Управляемые выпрямители	635
18.6. Сглаживающие фильтры	638
18.7. Выпрямители на МДП-транзисторах	640
Глава 19. Усилители электрических сигналов	642
19.1. Основные определения и характеристики усилителей	642
19.2. Обратная связь в усилителях	645
19.3. Динамические характеристики усилителей	649
19.4. Принцип работы усилителя. Определение рабочей точки	651
19.5. Режимы работы усилителя	652
19.6. Стабилизация положения рабочей точки усилителя	655
19.7. Особенности схем включения транзисторов в усилительном каскаде	657
19.8. Выходной каскад усилителя	658
19.9. Многокаскадные усилители	660
19.10. Импульсные усилители	662
19.11. Усилители постоянного тока	664
Глава 20. Преобразователи	670
20.1. Классификация преобразователей	670
20.2. Инверторы	671
20.3. Переключатели постоянного тока	674
20.4. Переключатели переменного тока	676
20.5. Компенсаторы реактивных составляющих полной мощности	680
Глава 21. Импульсная техника	685
21.1. Электрические импульсы и их параметры	685
21.2. Интегрирующие и дифференцирующие цепи	687
21.3. Регенеративные импульсные устройства	691
21.4. Логические элементы	701
21.5. Триггеры на базе логических элементов	713
21.6. Счетчики	718
21.7. Регистры	721
21.8. Шифраторы и дешифраторы	723
21.9. Сумматоры	725
21.10. Микропроцессоры	726
Рекомендуемая литература	730

*Иван Иванович ИВАНОВ,
Герман Иванович СОЛОВЬЕВ,
Владимир Яковлевич ФРОЛОВ*

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

У ч е б н и к

Издание седьмое,
переработанное и дополненное

Зав. инженерно-технической редакцией *Е. Л. Дубова*
Художественный редактор *С. Ю. Малахов*
Редактор *А. В. Андреев*
Верстка *М. И. Хетерели*
Выпускающие *Л. В. Дорохина, М. В. Тучина*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.
Тел./факс: (812) 412-29-35, 412-05-97, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

*Для того чтобы заказать необходимые Вам книги, достаточно обратиться
в любую из торговых компаний Издательского Дома «ЛАНЬ»:*

по России и зарубежью
«ЛАНЬ-ТРЕЙД». 192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13
тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82; тел./факс: (812) 412-54-93
e-mail: trade@lanbook.ru; ICQ: 446-869-967
www.lanpbl.spb.ru/price.htm

в Москве и в Московской области
«ЛАНЬ-ПРЕСС». 109263, Москва, 7-я ул. Текстильщиков, д. 6/19
тел.: (499) 178-65-85; e-mail: lanpress@lanbook.ru

в Краснодаре и в Краснодарском крае
«ЛАНЬ-ЮГ». 350072, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1
тел.: (861) 274-10-35; e-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазины:
Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>
«Сова»: <http://www.symplex.ru>; «Ozon.ru»: <http://www.ozon.ru>
«Библион»: <http://www.biblion.ru>

Подписано в печать 06.09.11.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108^{1/32}.
Печать офсетная. Усл. п. л. 38,64. Тираж 1500 экз.

Заказ № .

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленных диапозитивов
в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Правда Севера».
163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, д. 32.
Тел./факс (8182) 64-14-54; www.ippps.ru

