

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет
имени А. А. Ежевского»

Энергетический факультет

Кафедра электрооборудования и физики

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

учебное пособие для выполнения практических занятий

2-е издание, исправленное и дополненное

Иркутск 2015

Составитель: кандидат технических наук, доцент С. В. Сукьясов

Рецензенты: директор института энергетики ИрНИТУ кандидат технических наук, доцент В. В. Федчишин;
профессор кафедры электрооборудования и физики ФГОУ ВО "ИрГАУ им. А. А. Ежевского" доктор технических наук, Б. Ф. Кузнецов.

Сукьясов С. В.

Электрические машины: учебное пособие для выполнения практических занятий / С. В. Сукьясов. – ИрГАУ им. А. А. Ежевского. – 2-е изд., исправ. и доп. – Иркутск, 2015. – 80 с.

Учебное пособие представляют собой описание выполнения практических занятий по дисциплине «Электрические машины». Представлены варианты заданий и примеры их решений по всем темам предмета.

Издание предназначено для студентов очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Электрические машины» по направлениям подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника и 35.03.06 Агроинженерия.

Учебное пособие утверждено и рекомендовано к изданию методическим советом ИрГАУ им. А. А. Ежевского (протокол №.... от 2015 г.).

©Сукьясов С. В., 2015

©ФГБОУ ВО ИрГАУ им. А. А. Ежевского», 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Электроснабжение», «Теплоэнергетика» и «Агроинженерия», в которых предусмотрено изучение дисциплины «Электрические машины».

Основное назначение учебного пособия – оказать помощь студентам в практическом применении теоретических знаний для решения задач по расчету параметров и режимов работы электрических машин и трансформаторов. В книге систематизированы типовые задачи по всему курсу предмета «Электрические машины» в соответствии с действующим учебно-методическим комплексом дисциплины.

В начале каждой главы книги приведены основные понятия, расчетные формулы и основные уравнения соответствующего раздела предмета.

Каждая задача составлена в нескольких вариантах. При этом по одному из вариантов в каждой задаче приводится подробное решение с рекомендациями и указаниями по выбору параметров.

При пользовании учебным пособием необходимо иметь в виду, что оно не заменяет учебника и для успешного решения предлагаемых задач требуется систематическое изучение предмета по основному учебнику «Электрические машины».

Учебное пособие может быть использовано студентами очного и заочного обучения при выполнении как контрольных работ, так и домашних заданий.

ОСНОВНЫЕ БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ПОСОБИЕ

- a – число пар параллельных ветвей в обмотке якоря; число параллельных ветвей в обмотке машины переменного тока
- B_{δ} – магнитная индукция в воздушном зазоре машины
- c_e – коэффициент, определяемый конструкцией обмотки якоря
- c_M – коэффициент, определяемый конструкцией машины
- D_a – диаметр якоря
- E_1, E_2 – ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора; ЭДС фазы обмоток статора и ротора машины переменного тока
- E_{2S} – ЭДС обмотки вращающегося ротора машины переменного тока
- E_a – ЭДС обмотки якоря машины постоянного тока
- F_a – Магнитодвижущая сила
- f_1, f_2 – частота переменного тока в обмотках статора и ротора машины переменного тока
- I_0, I_K – ток холостого хода и короткого замыкания трансформатора
- I_a – ток якоря
- I_B – ток в цепи возбуждения
- $I_{НОМ}$ – номинальный ток
- $I_{П}$ – пусковой ток двигателя
- K – число коллекторных пластин
- k – коэффициент трансформации трансформатора
- $k_{ОБ1}, k_{ОБ2}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора и ротора
- k_C – коэффициент заполнения магнитопровода сталью
- k_A – коэффициент трансформации автотрансформатора
- K_1 – кратность пускового тока асинхронного двигателя
- K_E – коэффициент трансформации ЭДС асинхронного двигателя
- $K_{П}, K_{МАХ}, K_{МИН}$ – кратность пускового, максимального и минимального моментов асинхронного двигателя
- L – расчетная длина сердечника якоря
- m – число фаз трансформатора
- m_1, m_2 – число фаз статора и ротора асинхронного двигателя
- M_0 – момент холостого хода
- M_2 – полезный момент на валу двигателя
- M_B – приложенный к валу вращающий момент первичного двигателя
- $M_{ДИН}$ – динамический момент
- $M_{НОМ}$ – номинальный момент
- $M_{П}$ – пусковой момент
- $M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент
- N – количество проводников обмотки якоря
- n – частота вращения
- n_1 – синхронная частота вращения магнитного поля статора
- n_2 – частота вращения ротора асинхронного двигателя

n_0 – частота вращения ротора в режиме холостого хода асинхронного двигателя
 P_0 – мощность холостого хода трансформатора
 P_K – мощность короткого замыкания трансформатора
 $P_{\text{МЕХ}}$ – механическая мощность на роторе асинхронного двигателя
 $P_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитная мощность
 p – число пар полюсов в электрической машине
 $2p$ – число полюсов в электрической машине
 $Q_{\text{СТ}}$ – площадь поперечного сечения стержня трансформатора
 Q – реактивная мощность
 r_1, r_2 – активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора
 R_a – сопротивление обмотки якоря
 R_K – активное сопротивление короткого замыкания трансформатора
 $r_{\text{ВО}}$ – общее сопротивление цепи возбуждения
 r_p – сопротивление реостата в цепи возбуждения
 r_2' – активное приведенное сопротивление обмотки ротора
 S – полная мощность трансформатора
 s – скольжение асинхронного двигателя
 $s_{\text{КР}}$ – критическое скольжение асинхронного двигателя
 S – число секций двухслойной обмотки
 $S_{\text{РАСЧ}}$ – расчетная мощность в автотрансформаторе
 $S_{\text{Э}}$ – мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную за счет электрической связи между этими цепями
 U_0 – напряжение холостого хода
 U_K – напряжение короткого замыкания на фазу трансформатора
 u_K – напряжение короткого замыкания трансформатора
 $u_{K,a}, u_{K,p}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора
 $U_{K,a}, U_{K,p}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора
 $U_{\text{Л}}$ – междуфазное напряжение
 $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение
 $U_{\text{Ф}}$ – фазное напряжение
 w_1 – число витков в обмотке статора асинхронного двигателя или первичной обмотки трансформатора
 w_2 – число витков в обмотке ротора асинхронного двигателя или вторичной обмотки трансформатора
 X_K – индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора
 x_2' – индуктивное приведенное сопротивление обмотки ротора
 y – результирующий шаг
 y_1 – первый частичный шаг
 y_2 – второй частичный шаг
 y_K – шаг по коллектору

$u_{ур}$ – шаг уравнивателей
 Z – число пазов
 Z_K – полное сопротивление короткого замыкания трансформатора
 Φ – основной магнитный поток возбуждения
 α – коэффициент полюсного перекрытия
 β – коэффициент нагрузки трансформатора
 $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в щеточном контакте на пару щеток
 ΔP_D – добавочные потери мощности
 ΔP_M – магнитные потери мощности
 $\Delta P_{мех}$ – механические потери мощности
 $\Delta P_{пер}$ – переменные потери мощности
 $\Delta P_{пост}$ – постоянные потери мощности
 $\Delta P_{э1}, \Delta P_{э2}$ – электрические потери в статоре и роторе асинхронного двигателя
 $\Delta U_{ном}$ – изменение напряжения на выводах вторичной обмотки трансформатора
 η – коэффициент полезного действия
 v – линейная скорость
 τ – полюсное деление обмотки
 ψ_2 – угол отставания тока ротора от ЭДС ротора асинхронного двигателя
 ω – угловая скорость
 $\Sigma \Delta P$ – суммарные потери в электрическом устройстве
 Σr – сумма сопротивлений в цепи обмотки якоря
 $\cos \varphi$ – коэффициент мощности
 $\cos \varphi_0, \cos \varphi_K$ – коэффициент мощности холостого хода и короткого замыкания трансформатора

1 КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основные понятия, формулы

Отличительным признаком коллекторной машины постоянного тока является наличие в ней щеточно-коллекторного узла – механического преобразователя. Через коллектор и щетки осуществляется связь обмотки якоря с электрической нагрузкой, если машина является генератором, или с источником питания, если машина является двигателем.

Обмотка якоря расположена на вращающейся части машины. Эта обмотка состоит из секций, определенным образом уложенных в пазах сердечника якоря и присоединенных к коллекторным пластинам.

Обмотка якоря представляет собой замкнутую систему проводников и она, как правило, делается двухслойной. Секции обмотки могут быть одновитковыми или многовитковыми. Обмотки якоря могут быть волновыми и петлевыми, простыми, сложными и комбинированными.

Для выравнивания ЭДС параллельных ветвей обмотки или выравнивания ЭДС простых обмоток, составляющих сложную, применяют уравнивательные соединения.

ЭДС обмотки якоря определяется:

$$E_a = c_e \cdot \Phi \cdot n = 2 \cdot B_\delta \cdot L \cdot v = c_M \cdot \Phi \cdot \omega, \text{ В,}$$

где c_e – постоянный коэффициент по ЭДС, определяемый конструкцией обмотки якоря: числом пар полюсов p (всегда целое число), количеством проводников N и числом параллельных ветвей в обмотке a ; Φ – основной магнитный поток возбуждения, Вб; n – частота вращения, об/мин; B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре машины, Тл; L – расчетная длина сердечника якоря, м; v – линейная скорость м/с; ω – угловая скорость, рад/с.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}, \quad v = \frac{\pi \cdot D_a \cdot n}{60}, \quad c_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a},$$

где D_a – диаметр якоря.

Электромагнитный момент определяется:

$$M_{\text{ЭМ}} = c_M \cdot \Phi \cdot I_a,$$

где c_M – постоянный коэффициент по моменту, определяемый конструкцией машины; I_a – ток якоря, А.

$$c_M = c_e \cdot \frac{60}{2\pi} = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}.$$

Отношение коэффициентов c_e и c_M

$$c_M = 9,55 \cdot c_e.$$

Основной магнитный поток возбуждения машины постоянного тока определяется выражением:

$$\Phi = B_{\delta} \cdot L \cdot \tau \cdot \alpha, \text{ Вб},$$

где τ – полюсное деление, м; α – коэффициент полюсного перекрытия (0,6÷0,8).

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p}.$$

Электромагнитный момент машины постоянного тока прямо пропорционален электромагнитной мощности и обратно пропорционален частоте вращения якоря:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{ЭМ}}}{n} = \frac{9,55 \cdot E_a \cdot I_a}{n} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Магнитодвижущая сила (МДС) обмотки якоря на пару полюсов определяется:

$$F_a = \frac{N \cdot I_a}{4 \cdot a \cdot p}, \text{ А}.$$

Основной магнитный поток, возбуждающий машину постоянного тока, создается обмоткой возбуждения. В зависимости от способа включения этой обмотки относительно обмотки якоря, машины постоянного тока разделяются на машины независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Способ возбуждения в значительной степени влияет на свойства генераторов и двигателей постоянного тока.

Для генераторов постоянного тока справедливо уравнение напряжений

$$U = E_a - I_a \cdot \sum r - \Delta U_{\text{Щ}}, \text{ В},$$

где $\sum r$ – сумма сопротивлений в цепи обмотки якоря (собственно обмотки якоря, обмотки добавочных полюсов и т.д.), Ом; $\Delta U_{\text{Щ}}$ – падение напряжения в щеточном контакте на пару щеток (зависит от марки примененных в машине щеток, табл. 1.1), В.

При оценке свойств генераторов постоянного тока используется понятие номинального изменения напряжения на выходе генератора при сбросе нагрузки:

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{U_0 - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100, \%,$$

где U_0 – напряжение на выходе генератора в режиме холостого хода, В; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, В.

Величина $\Delta U_{\text{НОМ}}$ зависит от способа возбуждения генератора. Например, для генератора независимого возбуждения она составляет 5÷10 %.

Для двигателей постоянного тока уравнение напряжений имеет вид

$$U = E_a + I_a \cdot \sum r + \Delta U_{\text{щ}}, \text{ В.}$$

Таблица 1.1

Марка щеток	Переходное падение напряжения на пару щеток при номинальном токе, В
Электрографитированные ЭГ	2,0÷2,7
Угольнографитные Г	2,0
Металлографитные М, МГ	0,2÷1,5

Полезный момент на валу двигателя:

$$M_2 = \frac{9,55 \cdot P_2}{n}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где P_2 – полезная мощность двигателя, Вт.

$$P_2 = P_1 \cdot \eta, \text{ Вт},$$

где η – КПД двигателя; P_1 – потребляемая мощность двигателя.

Частота вращения якоря двигателя постоянного тока:

$$n = \frac{U - I_a \cdot \sum r}{c_e \cdot \Phi}, \text{ об/мин.}$$

Коэффициент полезного действия машины постоянного тока:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_2 + \sum \Delta P},$$

где $\sum \Delta P$ – суммарные потери в машине.

Полезная мощность, отдаваемая генератором:

$$P_2 = U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}}, \text{ Вт.}$$

Мощность, подводимая к двигателю:

$$P_1 = U \cdot I, \text{ Вт.}$$

Ток в цепи возбуждения двигателя:

$$I_B = \frac{U}{r_{\text{ВО}}} = \frac{U}{r_B + r_P}, \text{ А},$$

где $r_{\text{ВО}}$ – общее сопротивление цепи возбуждения, Ом; r_B – сопротивление обмотки возбуждения, Ом; r_P – сопротивление реостата в цепи возбуждения, Ом.

Частота вращения идеального холостого хода двигателя:

$$n_X = n_{\text{НОМ}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{а.НОМ}} \cdot R_a}, \text{ об/мин,}$$

где R_a – сопротивление обмотки якоря, Ом.

Уравнение механической характеристики двигателя:

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{M \cdot \sum r}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi^2}.$$

Кратность по току:

$$K_{\text{II}} = \frac{I_{\text{II}}}{I_{\text{НОМ}}},$$

где I_{II} – пусковой ток двигателя; $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный ток двигателя.

Кратность по моменту:

$$K_M = \frac{M_{\text{II}}}{M_{\text{НОМ}}},$$

где M_{II} – пусковой момент двигателя; $M_{\text{НОМ}}$ – номинальный момент двигателя.

Уравнение моментов генератора

$$M_B = M_0 + M_{\text{ЭМ}} + M_{\text{ДИН}}, \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

где M_B – приложенный к валу вращающий момент первичного двигателя; M_0 – момент холостого хода (состоит из моментов трения подшипников, момента трения якоря о воздух, момента сопротивления вихревых токов и момента трения щеток); $M_{\text{ДИН}}$ – динамический момент (соответствует изменению кинетической энергии вращающихся масс), $M_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитный момент.

Если скорость вращения якоря постоянна, то:

$$M_B = M_0 + M_{\text{ЭМ}}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Уравнение моментов двигателя

$$M_{\text{ЭМ}} = M_0 + M_2 + M_{\text{ДИН}}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Если скорость вращения якоря постоянна, то:

$$M_{\text{ЭМ}} = M_0 + M_2, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Задачи

Задача 1. Генератор постоянного тока независимого возбуждения имеет на якоре простую волновую обмотку ($a = 1$). Щетки угольнографитные. Значения параметров генератора приведены в таблице 1.2.

Требуется определить для номинального режима работы генератора: ЭДС якоря $E_{a.НОМ}$ ток нагрузки $I_{НОМ}$ (размагничивающим влиянием реакции якоря пренебречь), полезную мощность $P_{2НОМ}$, электромагнитную мощность $P_{ЭМ}$ и электромагнитный момент $M_{НОМ}$.

Решение варианта 1.

1. ЭДС якоря генератора при номинальной частоте вращения:

$$E_{a.НОМ} = c_e \cdot \Phi \cdot n = 3,33 \cdot 0,048 \cdot 1500 = 240 \text{ В},$$

$$c_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} = \frac{2 \cdot 100}{60 \cdot 1} = 3,33.$$

2. Ток якоря в номинальном режиме:

$$I_{a.НОМ} = \frac{E_{a.НОМ} - U_{НОМ} - \Delta U_{Щ}}{\sum r} = \frac{240 - 230 - 2}{0,175} = 45,7 \text{ А}.$$

3. Полезная (номинальная) мощность генератора:

$$P_{НОМ} = U_{НОМ} \cdot I_{a.НОМ} = 230 \cdot 45,7 = 10511 \text{ Вт}.$$

4. Электромагнитная мощность генератора:

$$P_{ЭМ.НОМ} = E_{a.НОМ} \cdot I_{a.НОМ} = 240 \cdot 45,7 = 10968 \text{ Вт}.$$

5. Электромагнитный момент в номинальном режиме:

$$M_{НОМ} = \frac{9,55 \cdot P_{ЭМ.НОМ}}{n_{НОМ}} = \frac{9,55 \cdot 10968}{1500} = 69,8 \text{ Н·м}.$$

Таблица 1.2

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{НОМ}$, В	230	230	460	460	460	140	460	230	230	230	250
$n_{НОМ}$, об/мин	1500	3000	3000	1500	1500	1000	3000	1000	3000	3000	1500
Σr , Ом	0,175	0,8	0,17	0,3	0,7	0,09	0,27	0,75	0,7	0,4	0,8
N	100	202	550	380	200	65	389	90	200	238	220
Φ , Вб	0,048	0,026	0,017	0,026	0,048	0,045	0,024	0,061	0,024	0,023	0,024
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$U_{НОМ}$, В	250	240	450	450	450	125	440	240	240	240	240
$n_{НОМ}$, об/мин	1500	3000	3000	3000	1500	1000	3000	1000	3000	3000	1500
Σr , Ом	0,75	0,8	0,7	1,1	0,9	0,9	0,27	1,8	0,8	0,4	0,8
N	110	200	539	380	200	80	370	80	210	235	250
Φ , Вб	0,048	0,026	0,017	0,026	0,048	0,045	0,024	0,061	0,024	0,023	0,024
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$U_{НОМ}$, В	230	230	460	460	460	115	460	230	230	230	250
$n_{НОМ}$, об/мин	3000	3000	1000	1500	1000	3000	1000	3000	3000	1500	1500

$\Sigma r, \text{ Ом}$	0,175	0,8	0,17	1,3	0,7	0,9	1,4	0,5	0,8	0,4	0,8
N	100	205	550	380	200	80	390	80	200	221	229
$\Phi, \text{ Вб}$	0,048	0,026	0,017	0,026	0,048	0,045	0,024	0,061	0,024	0,023	0,024
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	230	230	460	230	460	115	460	230	110	230	110
$n_{\text{НОМ}}, \text{ об/мин}$	3000	3000	1500	1000	3000	1000	3000	3000	1500	1500	3000
$\Sigma r, \text{ Ом}$	0,175	0,6	0,7	0,6	0,7	0,9	0,7	0,9	0,8	0,14	0,18
N	100	230	560	240	200	80	390	114	100	209	119
$\Phi, \text{ Вб}$	0,048	0,026	0,017	0,026	0,048	0,045	0,024	0,061	0,024	0,023	0,024

Задача 2. Генератор постоянного тока независимого возбуждения имеет данные, приведенные в таблице 1.3. В генераторе применены электрографитированные щетки марки ЭГ.

Определить номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки.

Решение варианта 1.

1. Ток якоря в номинальном режиме:

$$I_{a, \text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{20000}{230} = 87 \text{ А.}$$

2. ЭДС генератора:

$$E_a = U_0 = U_{\text{НОМ}} + I_{a, \text{НОМ}} \cdot \sum r + \Delta U_{\text{Щ}} = 230 + 87 \cdot 0,12 + 2,5 = 243 \text{ В.}$$

3. Номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки:

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{U_0 - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = \frac{243 - 230}{230} \cdot 100 = 5,65 \text{ \%}.$$

Таблица 1.3

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$	20	45	15	90	80	30	18	45	15	90	80
$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	230	460	230	460	460	230	230	440	250	440	450
$\Sigma r, \text{ Ом}$	0,12	0,22	0,15	0,12	0,11	0,08	0,13	0,22	0,15	0,12	0,11
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$	2	4,5	1,5	9	8	3	1,8	4,5	1,5	9	8
$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	230	460	230	460	460	230	230	440	250	440	450
$\Sigma r, \text{ Ом}$	0,15	0,25	0,18	0,15	0,15	0,09	0,13	0,25	0,19	0,18	0,18
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$	20	45	15	90	80	30	18	45	15	90	80
$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	240	440	240	440	440	240	240	440	260	440	450

$\Sigma r, \text{ Ом}$	0,12	0,22	0,15	0,12	0,11	0,08	0,13	0,26	0,15	0,16	0,17
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$	20	45	15	90	80	30	18	45	15	90	80
$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	230	460	230	460	460	230	230	440	250	440	450
$\Sigma r, \text{ Ом}$	0,18	0,28	0,18	0,18	0,18	0,11	0,18	0,28	0,18	0,18	0,18

Задача 3. Номинальные данные генератора постоянного тока параллельного возбуждения приведены в таблице 1.4. Падение напряжения в щеточном контакте пары щеток равно 2 В.

Требуется определить значения параметров, не указанных в таблице.

Решение варианта 1.

1. Ток в номинальном режиме:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{10000}{230} = 43,5 \text{ А.}$$

2. Ток в обмотке возбуждения:

$$I_{\text{В}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{r_{\text{В}}} = \frac{230}{150} = 1,5 \text{ А.}$$

3. Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке:

$$I_{\text{а.НОМ}} = I_{\text{НОМ}} + I_{\text{В}} = 43,5 + 1,5 = 45 \text{ А.}$$

4. ЭДС якоря в номинальном режиме:

$$E_{\text{а.НОМ}} = U_{\text{НОМ}} + I_{\text{а.НОМ}} \cdot \sum r + \Delta U_{\text{Щ}} = 230 + 45 \cdot 0,3 + 2 = 245,5 \text{ В.}$$

5. Электромагнитная мощность генератора при номинальной нагрузке:

$$P_{\text{ЭМ.НОМ}} = E_{\text{а.НОМ}} \cdot I_{\text{а.НОМ}} = 245,5 \cdot 45 = 11047 \text{ Вт.}$$

6. Электромагнитный момент генератора в режиме номинальной нагрузки:

$$M_{\text{ЭМ.НОМ}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{ЭМ.НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 11047}{1450} = 72,8 \text{ Н·м.}$$

7. Мощность, подводимая к генератору:

$$P_{\text{1НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{10000}{0,865} = 11560,7 \text{ Вт.}$$

Таблица 1.4

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{НОМ}$, кВт	10	-	18	-	45	15	-	18	-	45	-
$U_{НОМ}$, В	230	230	230	460	-	230	240	230	470	-	450
$n_{НОМ}$, об/мин	1450	-	1500	-	1000	1450	-	1400	-	1500	-
ΣI , Ом	0,3	0,15	-	-	-	0,3	0,15	-	-	-	-
r_B , Ом	150	100	-	-	92	150	100	-	-	92	-
$\eta_{НОМ}$, %	86,5	-	-	88	88	86,5	-	-	90	88	90
$I_{НОМ}$, А	-	87	-	-	97,8	-	87	-	-	97,8	-
I_B , А	-	-	-	4	-	-	-	-	4	-	4
$I_{а.НОМ}$, А	-	-	79	-	-	-	-	81	-	-	-
$E_{а.НОМ}$, В	-	-	240	480	477	-	-	240	480	477	480
$P_{ЭМ.НОМ}$, кВт	-	-	-	55	-	-	-	-	55	-	55
$M_{ЭМ.НОМ}$, Н·м	-	280	-	525	-	-	280	-	525	-	530
$P_{IНОМ}$, кВт	-	23	21	-	-	-	23	21	-	-	-
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$P_{НОМ}$, кВт	12	-	18	-	45	17	-	18	-	46	-
$U_{НОМ}$, В	230	240	230	460	-	230	230	250	450	-	440
$n_{НОМ}$, об/мин	1450	-	1500	-	1500	1450	-	1400	-	1500	-
ΣI , Ом	0,3	0,15	-	-	-	0,3	0,15	-	-	-	-
r_B , Ом	150	100	-	-	92	150	100	-	-	92	-
$\eta_{НОМ}$, %	86,5	-	-	88	88	86,5	-	-	90	88	90
$I_{НОМ}$, А	-	87	-	-	97,8	-	87	-	-	97,8	-
I_B , А	-	-	-	6	-	-	-	-	4	-	4
$I_{а.НОМ}$, А	-	-	80	-	-	-	-	77	-	-	-
$E_{а.НОМ}$, В	-	-	240	480	477	-	-	240	480	477	480
$P_{ЭМ.НОМ}$, кВт	-	-	-	55	-	-	-	-	55	-	55
$M_{ЭМ.НОМ}$, Н·м	-	280	-	525	-	-	280	-	525	-	525
$P_{IНОМ}$, кВт	-	23	21	-	-	-	23	21	-	-	-
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$P_{НОМ}$, кВт	14	-	18	-	43	13	-	16	-	43	-
$U_{НОМ}$, В	230	230	230	460	-	230	240	230	470	-	450
$n_{НОМ}$, об/мин	1450	-	1500	-	1000	1450	-	1400	-	1500	-
ΣI , Ом	0,3	0,2	-	-	-	0,3	0,2	-	-	-	-
r_B , Ом	150	100	-	-	92	150	100	-	-	92	-
$\eta_{НОМ}$, %	86,5	-	-	88	88	86,5	-	-	85	88	85
$I_{НОМ}$, А	-	87	-	-	97,8	-	87	-	-	97,8	-
I_B , А	-	-	-	4	-	-	-	-	4	-	4
$I_{а.НОМ}$, А	-	-	80	-	-	-	-	75	-	-	-
$E_{а.НОМ}$, В	-	-	240	480	477	-	-	240	480	477	480
$P_{ЭМ.НОМ}$, кВт	-	-	-	58	-	-	-	-	55	-	55
$M_{ЭМ.НОМ}$, Н·м	-	280	-	525	-	-	280	-	525	-	525
$P_{IНОМ}$, кВт	-	23	21	-	-	-	23	21	-	-	-
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$P_{НОМ}$, кВт	10	-	18	-	45	15	-	14	-	45	-

$U_{НОМ}, В$	230	230	230	460	-	230	240	230	470	-	450
$n_{НОМ}, об/мин$	1450	-	1000	-	1000	1450	-	1000	-	1500	-
$\Sigma r, Ом$	0,3	0,15	-	-	-	0,3	0,15	-	-	-	-
$r_B, Ом$	150	120	-	-	92	150	120	-	-	92	-
$\eta_{НОМ}, \%$	88	-	-	85	85	85	-	-	85	85	85
$I_{НОМ}, А$	-	87	-	-	97,8	-	87	-	-	97,8	-
$I_B, А$	-	-	-	4	-	-	-	-	4	-	4
$I_{a.НОМ}, А$	-	-	85	-	-	-	-	75	-	-	-
$E_a, В$	-	-	240	480	477	-	-	240	480	477	480
$P_{ЭМ.НОМ}, кВт$	-	-	-	55	-	-	-	-	55	-	55
$M_{ЭМ.НОМ}, Н·м$	-	280	-	525	-	-	280	-	525	-	525
$P_{IНОМ}, кВт$	-	23	21	-	-	-	23	21	-	-	-

Задача 4. Данные двигателя постоянного тока параллельного возбуждения приведены в таблице 1.5. Падение напряжения в щеточном контакте щеток равно 2 В.

Требуется определить потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки $I_{НОМ}$, сопротивление пускового реостата $R_{П.Р.}$, при котором начальный пусковой ток в цепи якоря двигателя был бы равен $2,5 \cdot I_{a.НОМ}$, начальный пусковой момент $M_{П.}$, частоту вращения n_0 и ток I_0 в режиме холостого хода, номинальное изменение частоты вращения якоря двигателя при сбросе нагрузки. Влиянием реакции якоря пренебречь.

Решение варианта 1.

1. Потребляемая двигателем мощность при номинальной нагрузке:

$$P_{IНОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\eta} = \frac{25}{0,85} = 29,4 \text{ кВт.}$$

2. Ток, потребляемый двигателем при номинальной нагрузке:

$$I_{НОМ} = \frac{P_{IНОМ}}{U_{НОМ}} = \frac{29400}{440} = 66,8 \text{ А.}$$

3. Ток в цепи обмотки возбуждения:

$$I_B = \frac{U_{НОМ}}{r_B} = \frac{440}{150} = 2,93 \text{ А.}$$

4. Ток в обмотке якоря:

$$I_{a.НОМ} = I_{НОМ} - I_B = 66,8 - 2,93 = 63,9 \text{ А.}$$

5. Начальный пусковой ток якоря при заданной кратности 2,5:

$$I_{a.П} = 2,5 \cdot I_{a.НОМ} = 2,5 \cdot 63,9 = 159,8 \text{ А.}$$

6. Требуемое сопротивление цепи якоря при заданной кратности пускового тока 2,5:

$$R_{\Pi} = R_{\Pi.P.} + \sum r = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{а.П.}}} = \frac{440}{159,8} = 2,75 \text{ Ом.}$$

7. Сопротивление пускового реостата:

$$R_{\Pi.P.} = R_{\Pi} - \sum r = 2,75 - 0,15 = 2,6 \text{ Ом.}$$

8. ЭДС якоря в режиме номинальной нагрузки:

$$E_a = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{а.НОМ}} \cdot \sum r - \Delta U_{\text{Щ}} = 440 - 63,9 \cdot 0,15 - 2 = 428,4 \text{ В.}$$

9. Из выражения:

$$E_a = c_e \cdot \Phi \cdot n,$$

определим

$$c_e \cdot \Phi = \frac{E_a}{n} = \frac{428,4}{1500} = 0,29$$

отношение коэффициентов

$$\frac{c_M}{c_e} = 9,55$$

следовательно, в данном случае

$$c_M \cdot \Phi = 9,55 \cdot c_e \cdot \Phi = 9,55 \cdot 0,29 = 2,73.$$

10. Начальный пусковой момент при заданной кратности пускового тока 2,5:

$$M_{\Pi} = c_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{а.П.}} = 2,73 \cdot 159,8 = 435,8 \text{ Н·м.}$$

11. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_{2\text{НОМ}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 25000}{1500} = 159,2 \text{ Н·м.}$$

12. Электромагнитный момент при номинальной нагрузке:

$$M_{\text{ЭМ.НОМ}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{ЭМ.НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 27380,6}{1500} = 174,3 \text{ Н·м,}$$

где электромагнитная мощность при номинальной нагрузке:

$$P_{\text{ЭМ.НОМ}} = E_a \cdot I_{\text{а.НОМ}} = 428,4 \cdot 63,9 = 27380,6 \text{ Вт.}$$

13. Момент холостого хода:

$$M_0 = M_{\text{ЭМ.НОМ}} - M_{2\text{НОМ}} = 174,3 - 159,2 = 15,1 \text{ Н·м.}$$

14. Ток якоря в режиме холостого хода:

$$I_{a.0} = \frac{M_0}{c_M \cdot \Phi} = \frac{15,1}{2,73} = 5,56 \text{ А.}$$

15. ЭДС якоря в режиме холостого хода (принимая $\Delta U_{\text{щ}} = 0$):

$$E_{a.0} = U_{\text{НОМ}} - I_{a.0} \cdot \sum r = 440 - 5,56 \cdot 0,15 = 439,2 \text{ В.}$$

16. Частота вращения якоря в режиме холостого хода:

$$n_0 = \frac{E_{a.0}}{c_e \cdot \Phi} = \frac{438,9}{0,29} = 1537,7 \text{ об/мин.}$$

17. Номинальное изменение частоты вращения двигателя при сбросе нагрузки:

$$\Delta n_{\text{НОМ}} = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = \frac{1537,7 - 1500}{1500} \cdot 100 = 2,51 \%.$$

Таблица 1.5

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{\text{НОМ}}$, кВт	25	15	45	4,2	18	25	15	45	4,2	18	4,2
$U_{\text{НОМ}}$, В	440	220	440	220	220	440	220	440	220	220	220
$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	1500	1000	1500	1500	1200	3000	3000	3000	3000	3000	1500
$\eta_{\text{НОМ}}$, %	85	83,8	88	78	84	85	83,8	88	78	84	78
$\sum r$, Ом	0,15	0,12	0,13	0,15	0,12	0,15	0,12	0,13	0,15	0,12	0,2
r_B , Ом	150	73	88	64	73	88	73	88	64	73	70
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$P_{\text{НОМ}}$, кВт	25	15	45	4,2	18	25	15	45	4,2	18	4,2
$U_{\text{НОМ}}$, В	440	220	440	220	220	440	220	440	220	220	220
$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	1000	1500	1500	1200	3000	3000	3000	3000	3000	1500	1000
$\eta_{\text{НОМ}}$, %	85	83,8	88	78	84	88	85	85	78	84	78
$\sum r$, Ом	0,15	0,12	0,13	0,15	0,12	0,15	0,12	0,13	0,15	0,12	0,2
r_B , Ом	88	73	88	64	73	88	73	88	64	73	70
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$P_{\text{НОМ}}$, кВт	25	15	45	4,2	18	25	15	45	4,2	18	4,2
$U_{\text{НОМ}}$, В	440	220	440	220	220	440	220	440	220	220	220
$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	1500	1000	1500	1500	1200	1500	1500	1000	1500	1500	1200
$\eta_{\text{НОМ}}$, %	85	83,8	88	78	84	85	83,8	88	78	84	78
$\sum r$, Ом	0,2	0,2	0,15	0,18	0,18	0,18	0,13	0,12	0,16	0,16	0,19
r_B , Ом	88	73	88	64	73	88	73	88	64	73	70
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$P_{\text{НОМ}}$, кВт	27	17	46	4,4	15	28	18	48	4,5	15	4,3
$U_{\text{НОМ}}$, В	440	220	440	220	220	440	220	440	220	220	220
$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	1500	1000	1500	1500	1200	3000	3000	3000	3000	3000	1500
$\eta_{\text{НОМ}}$, %	85	83,8	88	78	84	85	83,8	88	78	84	78

$\Sigma r, \text{ Ом}$	0,15	0,12	0,13	0,15	0,12	0,15	0,12	0,13	0,15	0,12	0,2
$r_B, \text{ Ом}$	88	73	88	64	73	88	73	88	64	73	70

Задача 5. Данные двигателя постоянного тока параллельного возбуждения приведены в таблице 1.6.

Определить номинальный момент на валу $M_{\text{НОМ}}$, суммарные потери мощности $\Sigma \Delta P$, номинальный КПД при номинальном режиме работы.

Решение варианта 1.

1. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_{2\text{НОМ}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{9,55 \cdot 20000}{1000} = 191 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

2. Полезная мощность, подводимая к двигателю:

$$P_1 = U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}} = 230 \cdot 101,1 = 23253 \text{ Вт}.$$

3. Номинальные суммарные потери в электродвигателе:

$$\Sigma \Delta P = P_1 - P_{2\text{НОМ}} = 23253 - 20000 = 3253 \text{ Вт}.$$

4. Номинальный КПД электродвигателя:

$$\eta = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{P_1} = \frac{20000}{23253} = 0,86.$$

Таблица 1.6

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$	20	45	15	90	80	30	18	45	15	90	80
$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	230	460	230	460	460	230	230	440	250	440	450
$I_{\text{НОМ}}, \text{ А}$	101,1	113,8	75,8	227,5	202,2	151,7	91,0	118,9	69,8	237,8	206,7
$n_{\text{НОМ}}, \text{ об/мин}$	1000	1500	3000	1000	3000	1500	1000	1500	3000	1000	3000
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$	20	45	15	90	80	30	18	45	15	90	80
$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	230	460	230	460	460	230	230	440	250	440	450
$I_{\text{НОМ}}, \text{ А}$	101,1	113,8	75,8	227,5	202,2	151,7	91,0	118,9	69,8	237,8	206,7
$n_{\text{НОМ}}, \text{ об/мин}$	1500	3000	1000	3000	1500	1000	1500	3000	1000	3000	1500
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$P_{\text{НОМ}}, \text{ кВт}$	20	45	15	90	80	30	18	45	15	90	80
$U_{\text{НОМ}}, \text{ В}$	240	440	240	440	440	240	240	440	260	440	450
$I_{\text{НОМ}}, \text{ А}$	95,8	117,6	71,8	235,1	209,0	143,7	86,2	117,6	66,3	235,1	204,3
$n_{\text{НОМ}}, \text{ об/мин}$	3000	1000	3000	1500	1000	1500	3000	1000	3000	1500	1000
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44

$P_{НОМ}$, кВт	20	45	15	90	80	30	18	45	15	90	80
$U_{НОМ}$, В	230	460	230	460	460	230	230	440	250	440	450
$I_{НОМ}$, А	102,3	115,1	76,7	230,2	204,6	153,5	92,1	120,3	70,6	240,6	209,2
$n_{НОМ}$, об/мин	3000	1500	1000	1500	3000	1000	3000	1500	1000	1000	3000

Задача 6. Шестиполюсный двигатель постоянного тока смешанного возбуждения работает от сети с напряжением $U = 220$ В. Номинальные данные приведены в таблице 1.7. Сопротивление якоря равно 1,5 Ом, сопротивление обмоток возбуждения 180 Ом, 240 проводников, три пары параллельных ветвей.

Определить магнитный поток, вращающий момент на валу двигателя, электромагнитную, потребляемую и номинальную мощности.

Решение варианта 1.

1. Ток в цепи обмотки возбуждения:

$$I_B = \frac{U_{НОМ}}{r_B} = \frac{220}{180} = 1,22 \text{ А.}$$

2. Ток в обмотке якоря

$$I_{a.НОМ} = I_{НОМ} - I_B = 14 - 1,22 = 12,78 \text{ А.}$$

3. ЭДС якоря в режиме номинальной нагрузки:

$$E_{a.НОМ} = U_{НОМ} - I_{a.НОМ} \cdot \sum r = 220 - 12,78 \cdot 1,5 = 200,83 \text{ В.}$$

4. Магнитный поток:

$$\Phi = \frac{E_{a.НОМ}}{c_e \cdot n_{НОМ}} = \frac{E_{a.НОМ} \cdot 60 \cdot a}{p \cdot N \cdot n_{НОМ}} = \frac{200,83 \cdot 60 \cdot 3}{3 \cdot 240 \cdot 1000} = 0,05 \text{ Вб.}$$

5. Электромагнитная мощность при номинальной нагрузке:

$$P_{ЭМ.НОМ} = E_{a.НОМ} \cdot I_{a.НОМ} = 200,83 \cdot 12,78 = 2566,2 \text{ Вт.}$$

6. Мощность, подводимая к двигателю:

$$P_1 = U_{НОМ} \cdot I_{НОМ} = 220 \cdot 14 = 3080 \text{ Вт.}$$

7. Полезная (номинальная) мощность:

$$P_{2НОМ} = P_1 \cdot \eta = 3080 \cdot 0,88 = 2710,4 \text{ Вт.}$$

8. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_{2НОМ} = \frac{9,55 \cdot P_{2НОМ}}{n_{НОМ}} = \frac{9,55 \cdot 2710,4}{1000} = 25,9 \text{ Н·м.}$$

Таблица 1.7

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$n_{НОМ}$, об/мин	1000	1300	1100	1000	900	685	700	600	650	580	520
$I_{НОМ}$, А	14	14,2	26	30	48	64	34	33	68	26	54
η , %	88	86	87	86	85	88	86	87	86	85	86
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$n_{НОМ}$, об/мин	475	1300	1100	1000	900	685	700	600	650	580	1000
$I_{НОМ}$, А	5	14,2	26	30	48	64	34	32	61	30	14
η , %	85	87	86	85	88	86	87	86	85	87	86
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$n_{НОМ}$, об/мин	1000	900	685	700	600	650	580	1000	475	1300	1100
$I_{НОМ}$, А	26	30	48	64	34	10	16	13	14	56	14,2
η , %	86	85	88	86	87	86	85	87	86	85	87
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$n_{НОМ}$, об/мин	900	685	700	600	650	580	1000	475	1300	1100	650
$I_{НОМ}$, А	26	30	48	64	34	70	31	23	14	58	14,2
η , %	86	85	88	86	87	86	85	87	86	85	87

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

Обмотки машин постоянного тока

Обмотка якоря является важным элементом машины постоянного тока, в ней наводится ЭДС, через нее протекает ток нагрузки, ею определяются номинальные величины: напряжение, ток и мощность машины. Возможны различные выполнения этих обмоток.

Современные машины постоянного тока на якоре имеют барабанные обмотки. Обмотки состоят из секций, которые укладывают в пазы якоря в два слоя: одну сторону секции укладывают в верхнем слое одного паза, а другую – в нижнем слое другого паза. Если в каждом слое паза расположено по одной стороне секции, то такой паз называется элементарным. В реальных машинах чаще всего в каждом слое располагают не одну, а u_{Π} секционных сторон, где $u_{\Pi} = 2, 3, 4...$ Перед укладкой в паз секции покрывают общей изоляцией, в результате образуется катушка якорной обмотки.

Секции в обмотке соединяют между собой в определенной последовательности. В зависимости от этого обмотки машин постоянного тока подразделяют на петлевые и волновые. Петлевые и волновые обмотки подразделяются на простые и сложные (многоходовые). От типа обмотки будет зависеть число ее параллельных ветвей, что определяет область ее применения

Машины постоянного тока выполняют только с якорями барабанного типа, в которых проводники укладывают в пазы, расположенные на

наружной поверхности сердечника якоря. Основным элементом его обмотки – катушка. Катушка состоит из одной или нескольких секций. Секция состоит из одного или нескольких витков. Виток состоит из двух или нескольких проводников. Для упрощения выполнения схемы принимают то, что секция состоит из одного витка.

Стороны секции располагают так, чтобы одна из них лежала под полюсом N, а другая – под полюсом S, т. е. на расстоянии полюсного деления τ . В этом случае в секции будет индуцироваться максимальная ЭДС.

Обмотка якоря представляет собой замкнутую цепь, в которой секции соединены последовательно и разделены щеточными контактами на параллельные ветви.

Последовательность соединения секций между собой и с коллекторными пластинами задается обмоточными шагами. Для этого необходимо иметь следующие шаги:

y_1 – первый частичный шаг, равный расстоянию между сторонами секции. Этот шаг определяет ширину секции. Сторону секции, лежащую в верхней части паза, называют начальной стороной, лежащую в нижней части паза называют конечной стороной, y_1 – целое число;

y_2 – второй частичный шаг, равный расстоянию между конечной стороной данной секции и начальной стороной последующей секции, с которой она должна быть соединена;

y – результирующий шаг, равный расстоянию между началами следующих друг за другом по схеме соединения секциями;

y_K – шаг по коллектору, равный расстоянию между точками подсоединения проводников секции к коллектору.

Шаги обмотки измеряют числом пройденных пазов или числом зубцов между сторонами секции, а шаг по коллектору – числом коллекторных пластин.

РГЗ №1: Простая петлевая обмотка. Обмотку так называют из-за внешнего очертания контуров, образуемых секциями, идущими друг за другом по ходу обмотки. Число секций двухслойной обмотки S равняется числу пазов Z и числу коллекторных пластин K . Для простой петлевой обмотки (рис. 1.1) результирующий шаг обмотки $y = y_1 - y_2 = \pm 1$; шаг по коллектору $y_K = \pm 1$, где знак «плюс» соответствует наиболее распространенной правоходовой (неперекрещенной) обмотке, знак «минус» – левоходной (перекрещенной). Во втором случае расход меди несколько больше, и поэтому выполнения таких петлевых обмоток избегают.

Принцип выполнения обмотки можно сформулировать следующим образом: после шага y_1 вперед следует шаг y_2 назад, затем снова шаг y_1 вперед и т. д. Таким образом, простую петлевую обмотку выполняют так:

определяют первый и второй частичные шаги, результирующий шаг:

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon, \quad y_2 = y_1 - y, \quad y = y_K,$$

где $2p$ – число полюсов в машине (здесь p – число пар полюсов); ε – доля единицы при, которой y_1 – целое число.

Пронумеровывают по порядку элементарные пазы, считая, что верхняя секционная сторона начала секции имеет номер паза, а нижняя сторона (конец секции) – номер паза со штрихом. Соединение проводников начинают обычно с первого паза.

Обычно обмотки изображают в виде схемы-развертки на плоскости, причем для простоты их всегда показывают одновитковыми (рис. 1.2).

К каждой коллекторной пластине подходит два проводника: от конца одной секции и начала следующей. Условимся коллекторной пластине присваивать номер той секции, с началом которой она соединена.

Для размещения щеток на коллекторе необходимо знать расположение полюсов. На рисунке 1.2 намечаются контуры полюсов, для чего произвольно разбивается якорь на $2p$ равных частей. Линии раздела между частями принимаются за геометрические нейтралы (гн). Тогда расстояние между соседними нейтралами будет равно полюсному делению $\tau_{\text{п}}$. В средней части этого деления на равном расстоянии от нейтралей размещают полюсы, которые обычно занимают $(0,75 \div 0,85) \cdot \tau_{\text{п}}$.

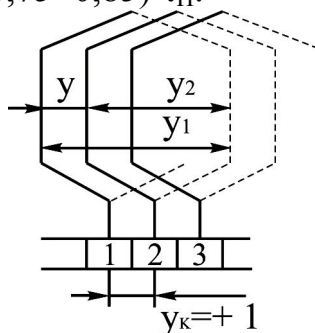


Рисунок 1.1 – Обозначение шагов петлевой обмотки

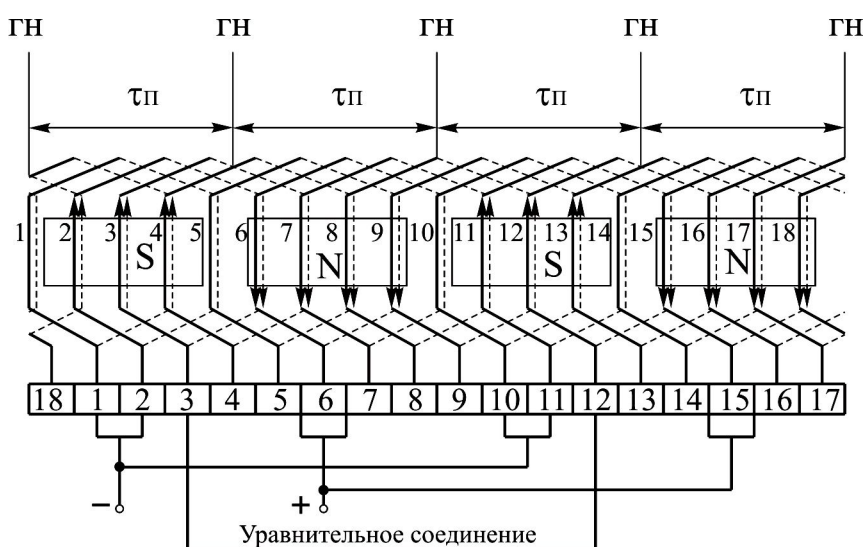


Рисунок 1.2 – Схема-развертка простой петлевой обмотки

Щетки на коллекторе размещаются таким образом, чтобы они соприкасались с пластинами, с узловыми точками, либо по оси полюсов.

Направления ЭДС в сторонах секций, находящихся под полюсами противоположной полярности, будут разными. Поэтому, проследив за направлением ЭДС, можно определить узловые точки обмотки, в которых ЭДС сторон секций направлены или к узлу, или от него. На коллекторные пластины, к которым присоединены указанные стороны секций, и устанавливают щетки. При этом щетки одной полярности объединяют между собой и размещают на одинаковом расстоянии друг от друга. Для петлевой обмотки число щеток равно числу полюсов. Щетки делят обмотку на параллельные ветви, число которых $2a$ (здесь a – число пар параллельных ветвей) также равно числу полюсов $2p$. По этому признаку петлевые обмотки называют параллельными.

Некоторые щетки могут перекрывать две соседние коллекторные пластины, замыкая накоротко секцию, присоединенную к этим пластинам. Такие секции называют короткозамкнутыми или коммутируемыми.

В многополюсных машинах с петлевой обмоткой каждую параллельную ветвь располагают под своей парой полюсов. Из-за неизбежной магнитной несимметрии магнитные потоки под полюсами могут незначительно отличаться по величине, и поэтому ЭДС параллельных ветвей также будут неодинаковы. Это приводит к появлению уравнивающих токов, которые загружают щетки и способствуют возникновению искрения на коллекторе.

Для того чтобы разгрузить щетки от уравнивающих токов и дать этим токам возможность замыкаться внутри самой обмотки, обмотка снабжается уравнивающими соединениями, или уравнивателями (уравнивательные соединения I рода). Уравниватели соединяют внутри обмотки токи, которые имеют равные потенциалы.

Уравниватели выполняются либо на стороне коллектора (соединяют пластины с равными потенциалами), либо на противоположной от коллектора стороне (соединяют равнопотенциальные точки лобовых частей секций).

Шаг уравнивателей $u_{ур}$ равен:

$$u_{ур} = \frac{K}{p}.$$

Максимальное число уравнивателей составляет K/a . Полным количеством уравнивателей снабжают только крупные машины с тяжелыми условиями коммутации токов. В остальных случаях выполняют от $1/3$ до $1/6$ всех возможных. Сечение уравнивателей берут равным $20 \div 50$ % сечения витка обмотки якоря.

По отношению к выводам обмотку якоря разбивают на несколько параллельных ветвей, схема которых показана на рис. 1.3.

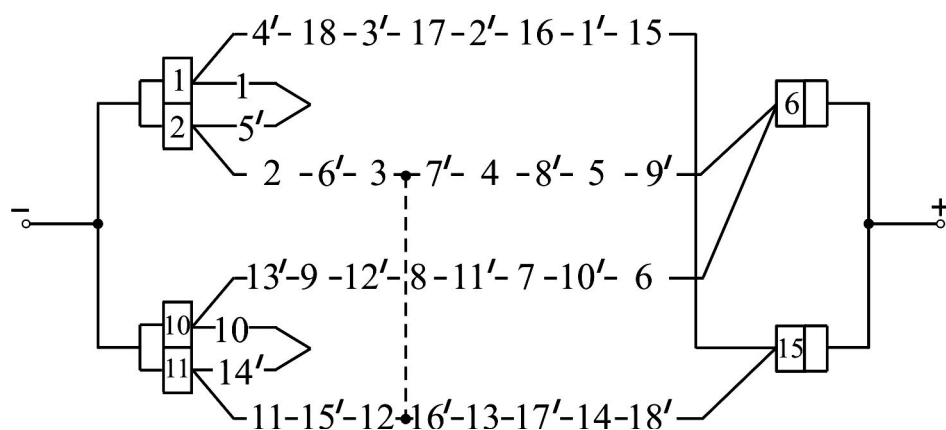


Рисунок 1.3 – Схема параллельных ветвей обмотки

Таблица 1.8

Данные для построения простой петлевой обмотки

№ вар.	2p	Z	Вид обм.	№ вар.	2p	Z	Вид обм.	№ вар.	2p	Z	Вид обм.
1	4	12	правоход.	12	4	18	правоход.	23	2	10	левоход.
2	4	14	левоход.	13	4	14	левоход.	24	6	18	левоход.
3	6	18	правоход.	14	2	14	правоход.	25	4	16	правоход.
4	4	18	левоход.	15	6	18	левоход.	26	4	12	левоход.
5	4	20	правоход.	16	4	18	правоход.	27	2	14	правоход.
6	4	14	правоход.	17	4	16	правоход.	28	4	16	левоход.
7	4	14	правоход.	18	4	14	правоход.	29	4	16	правоход.
8	4	14	левоход.	19	4	14	левоход.	30	6	18	правоход.
9	2	16	правоход.	20	2	12	правоход.	31	4	16	левоход.
10	4	14	правоход.	21	4	18	правоход.	32	6	18	левоход.
11	2	10	правоход.	22	4	16	левоход.	33	2	16	правоход.

Построить схему-развертку и схему параллельных ветвей обмотки.

РГЗ №2: Сложная петлевая обмотка. Сложные петлевые обмотки применяют для увеличения числа параллельных ветвей. Они представляют собой совокупность m простых обмоток, уложенных в одном и том же якоре. В этом случае $2a = 2pm$. При образовании сложной петлевой обмотки последовательно соединяют не рядом лежащие секции, как это было в предыдущем случае, а секции, отстающие друг от друга на m элементарный пазов, то есть $y = m$. Соответственно $y_K = m$.

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon,$$

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - m,$$

$$y = y_K = \pm m.$$

Сложные петлевые обмотки состоят из двух, редко из трех простых петлевых обмоток. Две или три простых петлевых обмотки соединяются параллельно щетками.

Для обеспечения равномерного распределения тока между ветвями обмотки следует выполнять уравнительные соединения I рода (их шаг K/p , количество K/a). Вместе с тем сложная петлевая обмотка нуждается также в уравнительных соединениях II рода, которые служат для выравнивания нагрузки между разными ходами сложной обмотки. Каждая щетка касается пластин разных ходов обмотки. Щеточный контакт не может быть вполне устойчивым, так как отдельные пластины несколько выступают по отношению к соседним. Поэтому условия контакта с пластинами разных ходов изменяется, что вызывает бесперывное перераспределение токов нагрузки и пульсацию токов.

Во избежание таких явлений необходимо соединять равнопотенциальные точки разных ходов обмотки. Иногда данное условие выполнить невозможно на одной стороне якоря. Эти две равнопотенциальные точки можно соединить уравнителями II рода, проходящими между сердечником якоря и валом машины.

Недостатком уравнителей, проходящих между якорем и валом, является их конструктивная сложность.

Таблица 1.9

Данные для построения сложной петлевой обмотки

№ вар.	2p	Z	m	Вид обм.	№ вар.	2p	Z	m	Вид обм.	№ вар.	2p	Z	m	Вид обм.
1	4	12	2	правоход.	11	4	16	2	левоход.	21	4	14	2	левоход.
2	4	14	2	левоход.	12	4	18	2	правоход.	22	6	14	2	левоход.
3	6	16	2	правоход.	13	4	14	2	левоход.	23	4	16	2	правоход.
4	4	16	2	левоход.	14	6	16	2	правоход.	24	4	12	2	левоход.
5	4	18	2	правоход.	15	6	18	2	левоход.	25	6	18	2	правоход.
6	6	18	2	правоход.	16	4	18	2	правоход.	26	4	16	2	левоход.
7	4	14	2	правоход.	17	6	16	2	правоход.	27	4	14	2	правоход.
8	4	14	2	левоход.	18	8	14	2	правоход.	28	6	14	2	правоход.
9	6	18	2	правоход.	19	4	14	2	левоход.	29	6	16	2	левоход.
10	4	14	2	правоход.	20	6	18	2	правоход.	30	4	18	2	правоход.

Построить схему-развертку и схему параллельных ветвей обмотки.

РГЗ №3: Простая волновая обмотка. В волновых обмотках последовательно соединяют секции, начала которых лежат под следующими друг за другом одноименными полюсами (рис. 1.4). При таком соединении результирующий шаг примерно равен двум полюсным делениям. После p шагов обмотка совершает волнообразный обход якоря, а чтобы при первом же обходе не произошло замыкания ее на исходную секцию, она должна подойти к элементарному пазу, расположенному слева (неперекрещенная) или справа (перекрещенная), рядом с исходным. Во втором случае расход меди будет несколько больше.

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon.$$

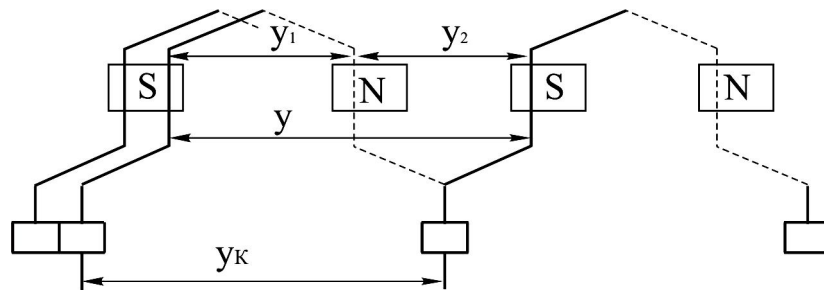


Рисунок 1.4 – Соединение секций волновой обмотки

Знак минус относится к неперекрыщенной обмотке, а знак плюс – перекрыщенной.

$$y_2 = y - y_1, \quad y = y_k = \frac{Z \pm 1}{p}.$$

Далее выполняется схема-развертка (рис. 1.5).

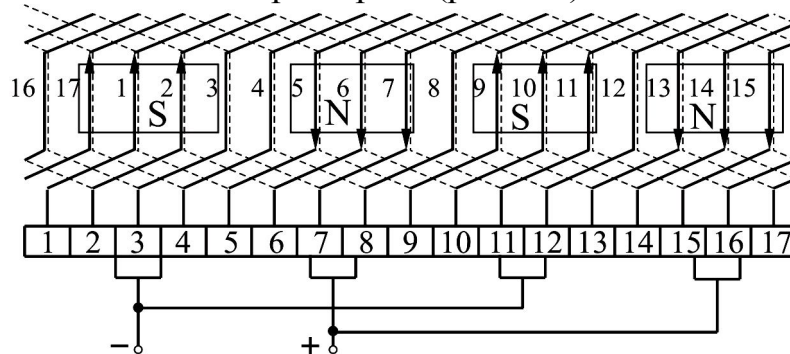


Рисунок 1.5 – Схема-развертка простой волновой обмотки

Расстановку щеток на коллекторе производят так же, как и при петлевых обмотках, - щетки должны соприкасаться с пластинами, к которым подсоединяются секции, расположенные на нейтрали или вблизи нее.

По схеме-развертке строится схема параллельных ветвей обмотки.

Характерной особенностью волновых обмоток является независимость числа параллельных ветвей от числа полюсов машины. При любом числе полюсов количество параллельных ветвей волновой обмотки равно двум. На примере рассмотренной обмотки можно установить, что в одну параллельную ветвь будут включены все секции, начала которых располагаются на полюсных делениях южной полярности, а в другую – северной полярности.

Так как волновая обмотка имеет две параллельные ветви, то число щеточных болтов в машине может быть уменьшено до двух. Распределение секций по параллельным ветвям в этом случае практически сохраняется таким же, как и при полном комплекте щеток.

Поскольку каждая из ветвей простой волновой обмотки проходит под всеми полюсами, то неравенство потоков полюсов не вызывает неравенства

ЭДС и токов параллельных ветвей. Поэтому такая обмотка не нуждается в уравнивающих соединениях.

Таблица 1.10

Данные для построения простой волновой обмотки

№ вар.	2p	Z	Вид обмотки	№ вар.	2p	Z	Вид обмотки	№ вар.	2p	Z	Вид обмотки
1	2	11	неперекрещенная	12	2	13	неперекрещенная	23	2	15	неперекрещенная
2	4	13	неперекрещенная	13	4	21	неперекрещенная	24	6	17	перекрещенная
3	2	15	неперекрещенная	14	4	15	перекрещенная	25	4	13	неперекрещенная
4	4	15	перекрещенная	15	4	17	неперекрещенная	26	4	17	неперекрещенная
5	4	17	неперекрещенная	16	6	19	неперекрещенная	27	6	19	неперекрещенная
6	2	13	неперекрещенная	17	2	11	неперекрещенная	28	4	15	перекрещенная
7	4	17	перекрещенная	18	4	21	неперекрещенная	29	6	17	перекрещенная
8	4	13	неперекрещенная	19	6	17	перекрещенная	30	6	19	неперекрещенная
9	4	13	перекрещенная	20	2	15	неперекрещенная	31	4	15	перекрещенная
10	2	17	неперекрещенная	21	6	17	перекрещенная	32	2	13	неперекрещенная
11	4	13	неперекрещенная	22	4	13	неперекрещенная	33	4	13	неперекрещенная

Построить схему-развертку и схему параллельных ветвей обмотки.

2 АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Основные понятия, формулы

Отличительным признаком асинхронного двигателя является отставание частоты вращения ротора от частоты вращающегося магнитного поля статора, характеризуемого величиной скольжения (номинальное скольжение $s_{НОМ} = 0,02 \div 0,08$):

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}, \quad \omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}, \text{ рад/с}, \quad n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \text{ об/мин},$$

откуда частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s),$$

где n_1, n_2 – частота вращения соответственно магнитного поля статора и ротора, об/мин; ω – угловая скорость вращения, рад/с.

Частота ЭДС ротора:

$$f_2 = \frac{p \cdot (n_1 - n_2)}{60} = \frac{p \cdot n_1}{60} \cdot s = f_1 \cdot s, \text{ Гц.}$$

В дальнейшем индекс 1 будет соответствовать параметрам статора, а индекс 2 – параметрам ротора.

Асинхронный двигатель аналогичен трансформатору, у которого вторичная обмотка (обмотка ротора) вращается. При этом вращающийся магнитный поток сцепляется не только с обмоткой статора, где индуцирует ЭДС E_1 , но и с обмоткой вращающегося ротора, где индуцирует ЭДС ($n_s = n_1 - n_2$):

$$E_{2s} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_{ОБ2} = E_2 \cdot s, \text{ В},$$

где E_2 – ЭДС, наведенная в неподвижном роторе; w_2 – число витков в обмотке ротора, для короткозамкнутого ротора $w_2 = 0,5$; $k_{ОБ2}$ – обмоточный коэффициент обмотки ротора, для короткозамкнутого ротора равен 1; Φ – магнитный поток, Вб.

Мощность, потребляемая двигателем в номинальном режиме:

$$P_{1НОМ} = \frac{P_{2НОМ}}{\eta}, \text{ Вт},$$

где η – коэффициент полезного действия (КПД); $P_{2НОМ}$ – номинальная мощность, Вт.

Ток, потребляемый двигателем из сети при номинальной нагрузке:

$$I_{1НОМ} = \frac{P_{1НОМ}}{m \cdot U_{1\Phi} \cdot \cos \varphi}, \text{ А}, \quad I_{1НОМ} = \frac{P_{2НОМ}}{m \cdot U_{1\Phi} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}, \text{ А},$$

где $U_{1\Phi}$ – фазное напряжение, В; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; m – число фаз.

Уравнение баланса активной мощности запишется:

$$P_1 = \Delta P_{\text{Э1}} + \Delta P_{\text{М}} + \Delta P_{\text{Э2}} + \Delta P_{\text{МЕХ}} + \Delta P_{\text{Д}} + P_2,$$

где $\Delta P_{\text{М}}$ – магнитные потери на перемагничивание стали сердечника статора и нагрев его вихревыми токами (из-за малой частоты тока они малы), Вт; $\Delta P_{\text{МЕХ}}$ – механические потери мощности, Вт; $\Delta P_{\text{Э1}}$, $\Delta P_{\text{Э2}}$ – электрические потери в статоре и роторе, Вт; $\Delta P_{\text{Д}}$ – добавочные потери при номинальной нагрузке принимаются $0,005 \cdot P_{\text{НОМ}}$, Вт.

Суммарные потери в двигателе при номинальной нагрузке:

$$\sum \Delta P = P_1 - P_2, \text{ Вт.}$$

Потери на нагрев обмоток двигателя в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{Э}} = \Delta P_{\text{Э1}} + \Delta P_{\text{Э2}} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = \Delta P_{\text{Э1}} + s \cdot P_{\text{ЭМ}}, \text{ Вт,}$$

где I_1 , I_2 – ток в статоре и роторе, А; r_1 , r_2 – сопротивление обмотки статора и ротора, Ом; m_1 , m_2 – число фаз статора и ротора.

Постоянные потери:

$$\Delta P_{\text{ПОСТ}} = \sum \Delta P - \Delta P_{\text{Э}} - \Delta P_{\text{Д}} = 0,5 \cdot \sum \Delta P, \text{ Вт.}$$

Переменные потери:

$$\Delta P_{\text{ПЕР}} = \Delta P_{\text{Э}} + \Delta P_{\text{Д}} = \sum \Delta P - \Delta P_{\text{ПОСТ}}, \text{ Вт.}$$

КПД двигателя определяется как отношение полезной мощности к потребляемой:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1}.$$

Момент двигателя (момент на валу) при номинальной нагрузке:

$$M_{2\text{НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2\text{НОМ}}}{n_{2\text{НОМ}}}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Для совместного рассмотрения процессов в двигателе, упрощения построения и анализа векторных диаграмм, а так же составления эквивалентных электрических схем параметры ротора приводят к параметрам статора. При этом приведенные параметры обозначают со штрихом.

Активное и индуктивное приведенные сопротивления обмотки ротора:

$$r_2' = r_2 \cdot K_E^2, \text{ Ом, } x_2' = x_2 \cdot K_E^2, \text{ Ом,}$$

где K_E – коэффициент трансформации ЭДС.

$$K_E = \frac{E_1}{E_2}.$$

Индуктируемая в обмотках асинхронного двигателя ЭДС при неподвижном роторе:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot k_{OB1}, \text{ В}, \quad E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot \Phi \cdot k_{OB2}, \text{ В},$$

где w_1 – число витков в обмотке статора; k_{OB1} – обмоточный коэффициент обмотки статора.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя:

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot r_2' \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega_1} = c_M \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2 =$$

$$= M_{2\text{НОМ}} + M_0, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где c_M – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции двигателя; ψ_2 – угол отставания тока ротора I_2 от ЭДС ротора E_2 ; x_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом.

$$c_M = \frac{p \cdot m_2 \cdot w_2 \cdot k_{OB2}}{\sqrt{2}}.$$

Электромагнитная мощность на роторе:

$$P_{\text{ЭМ}} = M_{\text{ЭМ}} \cdot \omega_1 = \frac{\Delta P_{\text{Э2}}}{s} = P_1 - \Delta P_{\text{Э1}} - \Delta P_{\text{М}}, \text{ Вт}.$$

Механическая мощность на роторе:

$$P_{\text{МЕХ}} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s} \right) = P_{\text{ЭМ}} - \Delta P_{\text{Э2}} = P_{\text{ЭМ}} \cdot (1-s), \text{ Вт}.$$

Максимальное значение момента:

$$M_{\text{МАХ}} = \pm \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

в этом соотношении знак минус относится к двигательному, а знак плюс – к генераторному режиму работы.

Приведенное значение тока в обмотке ротора при номинальной нагрузке:

$$I_2' = \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \text{ А}.$$

Пусковой момент асинхронного двигателя:

$$M_{\Pi} = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot r_2' \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Момент в режиме холостого хода:

$$M_0 = 9,55 \cdot \frac{\Delta P_{\text{ПОСТ}}}{n_1}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Кратность пускового момента:

$$K_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{2\text{НОМ}}}.$$

Кратность максимального момента:

$$K_{\text{MAX}} = \frac{M_{\text{MAX}}}{M_{2\text{НОМ}}}.$$

Кратность минимального момента:

$$K_{\text{MIN}} = \frac{M_{\text{MIN}}}{M_{2\text{НОМ}}}.$$

Кратность пускового тока:

$$K_I = \frac{I_{\Pi}}{I_{2\text{НОМ}}}.$$

Соответствующее этому моменту критическое скольжение (упрощенное выражение):

$$s_{\text{КР}} = \pm \frac{r_2'}{(x_1 + x_2')} = s_{\text{НОМ}} \cdot (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}).$$

Момент при изменении напряжения статора U_1 :

$$M_2 = M_{2\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1\text{НОМ}}} \right)^2, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Задачи

Задача 1. В таблице 2.1 приведены данные параметров трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Частота тока в питающей сети 50 Гц. Требуется определить значения параметров, не указанные в таблице в каждом из вариантов.

Решение варианта 1.

1. ЭДС обмотки статора:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot k_{ОБ1} = 4,44 \cdot 50 \cdot 18 \cdot 0,028 \cdot 0,95 = 106,3 \text{ В.}$$

2. Частота ЭДС ротора при номинальном скольжении:

$$f_2 = f_1 \cdot s = 50 \cdot 0,04 = 2 \text{ Гц.}$$

3. ЭДС обмотки ротора при номинальной частоте вращения:

$$E_{2s} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_{ОБ2} = 4,44 \cdot 0,028 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,12 \text{ В.}$$

4. ЭДС обмотки неподвижного ротора:

$$E_2 = \frac{E_{2s}}{s} = \frac{0,12}{0,04} = 3 \text{ В.}$$

5. Частота вращения ротора номинальная:

$$n_{2НОМ} = n_1 \cdot (1 - s) = 1500 \cdot (1 - 0,04) = 1440 \text{ об/мин,}$$

где синхронная частота вращения магнитного поля статора $n_1 = 1500$ об/мин, при $f_1 = 50$ Гц и $2p = 4$.

Таблица 2.1

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Φ, Вб	0,028	0,032	0,048	-	0,025	-	-	0,028	0,028	-	-
w ₁ , витков	18	-	24	16	-	24	18	-	36	18	25
k _{ОБ1}	0,95	0,96	0,96	0,98	0,98	0,96	0,95	0,95	0,98	0,98	0,97
s _{НОМ}	0,04	-	0,05	0,04	-	0,05	-	-	-	-	0,05
2p	4	6	2	4	-	8	4	8	-	4	6
E ₁ , В	-	210	-	98	110	200	-	120	-	100	98
E ₂ , В	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E _{2s} , В	-	-	-	-	-	-	0,13	-	-	-	-
f ₂ , Гц	-	-	-	-	-	-	2,5	3,2	-	2,5	-
n _{2НОМ} , об/мин	-	970	-	-	2920	-	-	-	1470	-	-
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Φ, Вб	-	0,029	0,026	0,022	0,048	-	0,035	-	-	0,028	-
w ₁ , витков	21	15	20	-	24	16	-	24	25	-	21
k _{ОБ1}	0,97	0,95	0,95	0,96	0,96	0,98	0,98	0,96	0,95	0,95	0,98
s _{НОМ}	0,07	0,04	0,05	-	0,06	0,04	-	0,05	-	-	-
2p	2	4	4	6	4	2	-	6	4	6	4
E ₁ , В	110	-	-	230	-	120	120	210	-	120	120
E ₂ , В	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E _{2s} , В	-	-	-	-	-	-	-	-	0,13	-	-
f ₂ , Гц	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5	3,2	2,5
n _{2НОМ} , об/мин	-	-	-	970	-	-	2920	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Φ, Вб	0,029	0,026	0,03	0,05	-	0,035	-	-	0,028	-	-
w ₁ , витков	15	20	-	26	20	-	34	30	-	21	21

$k_{OБI}$	0,95	0,95	0,96	0,96	0,98	0,98	0,96	0,95	0,95	0,98	0,95
$S_{НОМ}$	0,05	0,06	-	0,06	0,04	-	0,05	-	-	-	0,07
$2p$	4	6	6	4	2	-	6	4	4	6	4
$E_1, В$	-	-	230	-	140	160	210	-	120	120	110
$E_2, В$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$E_{2s}, В$	-	-	-	-	-	-	-	0,18	-	-	-
$f_2, Гц$	-	-	-	-	-	-	-	2,5	3,2	2,5	-
$n_{2НОМ}, об/мин$	-	-	970	-	-	2920	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$\Phi, Вб$	0,03	0,04	-	0,037	-	-	0,028	-	-	0,02	-
$w_1, витков$	-	28	16	-	24	25	-	21	30	-	25
$k_{OБI}$	0,97	0,96	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,98	0,95	0,95	0,98
$S_{НОМ}$	-	0,06	0,04	-	0,05	-	-	-	-	-	-
$2p$	6	4	2	-	4	4	6	4	2	6	4
$E_1, В$	230	-	140	120	200	-	120	130	-	120	140
$E_2, В$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$E_{2s}, В$	-	-	-	-	-	0,13	-	-	0,13	-	-
$f_2, Гц$	-	-	-	-	-	3,5	4,2	3,5	2,5	3,2	2,5
$n_{2НОМ}, об/мин$	970	-	-	2920	-	-	-	-	-	-	-

Задача 2. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии АИР имеет технические данные, приведенные в таблице 2.2. Определить скольжение при номинальной нагрузке $S_{НОМ}$, момент на валу $M_{2НОМ}$, начальный пусковой $M_{П}$ и максимальный $M_{МАХ}$ моменты, потребляемую двигателем из сети активную мощность $P_{1НОМ}$, суммарные потери при номинальной нагрузке $\Sigma \Delta P$, номинальный ток $I_{1НОМ}$ в питающей сети при соединении обмоток статора «звездой» и «треугольником».

Решение варианта 1.

1. Скольжение при номинальной нагрузке:

$$s = \frac{n_1 - n_{2НОМ}}{n_1} = \frac{3000 - 2655}{3000} = 0,115.$$

2. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке, т.е. при номинальной частоте вращения 2655 об/мин:

$$M_{2НОМ} = 9,55 \cdot \frac{P_{2НОМ}}{n_{2НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{90}{2655} = 0,32 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

3. Начальный пусковой момент:

$$M_{П} = M_{2НОМ} \cdot K_M = 0,32 \cdot 2,2 = 0,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

4. Максимальный момент двигателя определяют по его перегрузочной способности:

$$M_{\text{MAX}} = M_{\text{НОМ}} \cdot K_M = 0,32 \cdot 2,2 = 0,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

5. Номинальный ток в фазной обмотке статора:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{m_1 \cdot U_{1\text{Ф}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{90}{3 \cdot 220 \cdot 0,75 \cdot 0,6} = 0,3 \text{ А.}$$

6. Потребляемая двигателем из сети активная мощность в режиме номинальной нагрузки:

$$P_{\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{0,09}{0,6} = 0,15 \text{ кВт.}$$

7. Суммарные потери двигателя при номинальной нагрузке:

$$\sum \Delta P = P_{\text{НОМ}} - P_{2\text{НОМ}} = 0,15 - 0,09 = 0,06 \text{ кВт.}$$

8. Линейный ток статора:

при соединении обмоток статора «звездой»

$$I_{\text{ЛЛУ}} = I_{\text{НОМ}} = 0,3 \text{ А.}$$

при соединении обмоток статора «треугольником»

$$I_{\text{ЛЛА}} = 1,73 \cdot I_{\text{НОМ}} = 1,73 \cdot 0,3 = 0,52 \text{ А.}$$

Таблица 2.2

Вар.	Тип двигателя	$P_{2\text{НОМ}}$, кВт	$n_{2\text{НОМ}}$, об/мин	$\eta_{\text{НОМ}}$, %	$\cos \varphi$	$\frac{I_{\text{П}}}{I_{2\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\text{П}}}{M_{2\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\text{MAX}}}{M_{2\text{НОМ}}}$	U_1 , В (Δ/У)
1	АИР50А2	0,09	2655	60,0	0,75	4,5	2,2	2,2	220/380
2	АИР56А2	0,25	2730	69,0	0,79	5,0	2,2	2,2	220/380
3	АИР63В2	0,75	2820	79,0	0,80	6,0	2,2	2,2	220/380
4	АИР71А2	1,1	2805	79,5	0,80	6,0	2,6	2,7	220/380
5	АИР90Л2	4,0	2850	87,0	0,88	7,5	2,0	2,4	220/380
6	АИР160М2	18,5	2910	90,5	0,90	7,0	2,0	2,7	220/380
7	АИР200Л2	45,0	2940	92,0	0,88	7,5	1,8	2,8	380/660
8	АИР250S2	75,0	2940	93,0	0,91	7,5	1,8	3,0	380/660
9	АИР250М2	90,0	2940	93,0	0,92	7,5	1,8	3,0	380/660
10	АИР56В4	0,18	1350	64,0	0,68	5,0	2,3	2,2	220/380
11	АИР80В4	1,5	1395	78,5	0,80	5,3	2,2	2,4	220/380
12	АИР100S4	3,0	1410	82,0	0,82	7,0	2,0	2,2	220/380
13	АИР112М4	5,5	1430	86,0	0,86	6,0	2,0	2,5	220/380
14	АИР160S4	15,0	1455	90,0	0,89	7,0	1,9	2,9	220/380
15	АИР180М4	30,0	1470	92,0	0,87	7,0	1,7	2,7	380/660
16	АИР225М4	55,0	1470	93,0	0,89	7,0	1,7	2,6	380/660
17	АИР280S4	110	1470	94,0	0,91	6,5	1,6	2,2	380/660
18	АИР355М4	315	1470	94,7	0,93	7,0	1,6	3,0	380/660
19	АИР80В6	1,1	920	75,0	0,74	4,5	2,2	2,3	220/380
20	АИР100Л6	2,2	945	81,5	0,74	6,0	1,9	2,2	220/380
21	АИР132S6	5,5	960	85,0	0,80	7,0	2,0	2,2	220/380
22	АИР160S6	11,0	970	88,0	0,83	6,5	2,0	2,7	220/380
23	АИР160М6	15,0	970	88,0	0,85	6,5	2,0	2,7	220/380
24	АИР225М6	37,0	980	91,0	0,85	6,5	1,5	2,3	380/660
25	АИР250S6	45,0	980	92,5	0,85	6,5	1,5	2,3	380/660

Продолжение таблицы 2.2

26	АИР280М6	90,0	980	93,5	0,90	6,5	1,4	2,4	380/660
27	АИР315S6	110	980	93,5	0,90	6,0	1,4	2,3	380/660
28	АИР355М6	200	980	94,5	0,90	6,5	1,7	2,0	380/660
29	АИР112МВ8	3,0	700	79,0	0,74	6,0	1,8	2,2	220/380
30	АИР160S8	7,5	730	87,0	0,75	5,5	1,6	2,4	220/380
31	АИР200М8	18,5	730	89,0	0,81	6,0	1,6	2,3	220/380
32	АИР280S8	55,0	730	92,5	0,86	6,0	1,3	2,2	220/380
33	АИР250S10	22,0	580	89,0	0,82	5,0	1,2	2,2	220/380
34	АИР250М10	30,0	580	89,0	0,83	5,5	1,2	2,2	220/380
35	АИР280S10	32,0	580	91,5	0,79	6,0	1,3	2,3	220/380
36	АИР280М10	45,0	580	92,0	0,79	6,0	1,4	2,1	220/380
37	АИР315S10	55,0	585	92,5	0,79	6,5	1,2	1,9	380/660
38	АИР315М10	75,0	585	92,5	0,80	6,0	1,2	1,9	380/660
39	АИР355S10	90,0	590	92,5	0,83	6,0	1,1	1,9	380/660
40	АИР355М10	110,0	590	93,0	0,83	6,0	1,1	1,9	380/660
41	АИР315S12	45,0	480	91,0	0,75	6,0	1,1	1,8	220/380
42	АИР315М12	55,0	480	91,5	0,75	6,0	1,1	1,8	380/660
43	АИР355S12	75,0	490	91,0	0,76	6,0	1,1	1,9	380/660
44	АИР355М12	90,0	490	92,0	0,76	6,0	1,1	1,9	380/660

Задача 3. Трехфазный асинхронный двигатель включен в сеть линейным напряжением 380 В, частотой 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой». Требуется определить значения параметров, не указанные в таблице 2.3 в каждом из вариантов.

Решение варианта 1.

1. Номинальная частота вращения

$$n_{2НОМ} = n_1 \cdot (1 - s_{НОМ}) = 1000 \cdot (1 - 0,04) = 960 \text{ об/мин.}$$

2. Полезная мощность двигателя

$$P_{2НОМ} = 0,105 \cdot M_{НОМ} \cdot n_{НОМ} = 0,105 \cdot 180 \cdot 960 = 18144 \text{ Вт.}$$

3. Потребляемая двигателем мощность

$$P_{1НОМ} = \frac{P_{2НОМ}}{\eta_{НОМ}} = \frac{18144}{0,82} = 22126 \text{ Вт.}$$

4. Потребляемый двигателем ток статора

$$I_{1НОМ} = \frac{P_{1НОМ}}{m_1 \cdot U_{1Ф} \cdot \cos \varphi} = \frac{22126}{3 \cdot 220 \cdot 0,8} = 41,9 \text{ А.}$$

Таблица 2.3

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{2НОМ}$, кВт	-	12	-	15	22	17,5	18,5	-	15	22	1,1
$P_{1НОМ}$, кВт	-	14,6	-	-	27,8	-	-	-	-	27,8	1,47

Продолжение таблицы 2.3

$\eta_{НОМ}$, %	82	-	85	89	-	80	87	85	80	-	-
$\cos \varphi$	0,8	0,78	0,8	-	0,78	-	0,82	0,84	-	0,70	0,78
$I_{НОМ}$, А	-	-	18	30	-	42	-	18	30	-	-
$M_{2НОМ}$, Н·м	180	-	105	-	145	-	-	105	-	145	-
$S_{НОМ}$, %	4	3,5	-	3	-	-	6,6	-	3	-	3,5
$2p$	6	4	-	4	4	6	-	-	6	4	4
$n_{2НОМ}$, об/мин	-	-	-	-	-	970	2800	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$P_{2НОМ}$, кВт	-	12	-	15	22	17,5	18,5	-	15	22	1,1
$P_{1НОМ}$, кВт	-	14,6	-	-	27,8	-	-	-	-	27,8	1,47
$\eta_{НОМ}$, %	85	-	85	86	-	82	85	87	82	-	-
$\cos \varphi$	0,8	0,8	0,86	-	0,8	-	0,82	0,8	-	0,86	0,8
$I_{НОМ}$, А	-	-	16	30	-	42	-	18	30	-	-
$M_{2НОМ}$, Н·м	170	-	105	-	145	-	-	106	-	145	-
$S_{НОМ}$, %	4	3,5	-	3	-	-	6,6	-	3	-	3,5
$2p$	6	4	-	4	4	6	2	-	6	4	4
$n_{2НОМ}$, об/мин	-	-	-	-	-	970	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$P_{2НОМ}$, кВт	-	12	-	15	22	17,5	18,5	-	15	22	1,1
$P_{1НОМ}$, кВт	-	14,6	-	-	27,8	-	-	-	-	27,8	1,47
$\eta_{НОМ}$, %	90	-	85	86	-	84	81	83	83	-	-
$\cos \varphi$	0,8	0,88	0,8	-	0,8	-	0,82	0,8	-	0,86	0,82
$I_{НОМ}$, А	-	-	17	30	-	42	-	18	30	-	-
$M_{2НОМ}$, Н·м	110	-	115	-	145	-	-	110	-	145	-
$S_{НОМ}$, %	4	3,5	-	3	-	-	6,6	-	3	-	3,5
$2p$	6	4	-	4	4	6	-	-	6	4	4
$n_{2НОМ}$, об/мин	-	-	-	-	-	970	2800	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$P_{2НОМ}$, кВт	-	12	-	15	22	17,5	18,5	-	15	22	1,1
$P_{1НОМ}$, кВт	-	14,6	-	-	27,8	-	-	-	-	27,8	1,47
$\eta_{НОМ}$, %	87	-	87	87	-	83	87	85	83	-	-
$\cos \varphi$	0,8	0,77	0,8	-	0,88	-	0,82	0,83	-	0,73	0,73
$I_{НОМ}$, А	-	-	17	30	-	42	-	18	30	-	-
$M_{2НОМ}$, Н·м	180	-	105	-	145	-	-	105	-	145	-
$S_{НОМ}$, %	4	3,5	-	3	-	-	6,6	-	3	-	3,5
$2p$	6	4	-	4	4	6	2	-	6	4	4
$n_{2НОМ}$, об/мин	-	-	-	-	-	970	-	-	-	-	-

Задача 4. Трехфазный асинхронный двигатель с числом полюсов $2p = 4$ включен в сеть с линейным напряжением 380 В, частотой 50 Гц при соединении обмотки статора «треугольником». В таблице 2.4 приведены

параметры двигателя, соответствующие его номинальной нагрузке. При нагрузке $P_2 = 0,85 \cdot P_{2\text{НОМ}}$ КПД двигателя имеет наибольшее значение $\eta_{\text{МАХ}} = 1,03 \cdot \eta_{\text{НОМ}}$. Необходимо определить все остальные виды потерь двигателя для режима номинальной нагрузки.

Решение варианта 1.

1. Наибольшее значение КПД:

$$\eta_{\text{МАХ}} = 1,03 \cdot \eta_{\text{НОМ}} = 1,03 \cdot 0,53 = 0,546.$$

2. Нагрузка двигателя при этом КПД:

$$P_2 = 0,85 \cdot P_{2\text{НОМ}} = 0,85 \cdot 0,06 = 0,05 \text{ кВт.}$$

3. Потребляемая мощность при $\eta_{\text{МАХ}}$:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{\text{МАХ}}} = \frac{0,05}{0,546} = 0,09 \text{ кВт.}$$

4. Суммарные потери при $\eta_{\text{МАХ}}$:

$$\sum \Delta P = P_1 - P_2 = 0,09 - 0,05 = 0,04 \text{ кВт.}$$

5. Постоянные потери двигателя:

$$\Delta P_{\text{ПОСТ}} = \Delta P_{\text{М}} + \Delta P_{\text{МЕХ}} = 0,5 \cdot \sum \Delta P = 0,5 \cdot 0,04 = 0,02 \text{ кВт.}$$

6. Потребляемая мощность в номинальном режиме:

$$P_{1\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{0,06}{0,53} = 0,11 \text{ кВт.}$$

7. Суммарные потери в номинальном режиме:

$$\sum \Delta P_{\text{НОМ}} = P_{1\text{НОМ}} - P_{2\text{НОМ}} = 0,11 - 0,06 = 0,05 \text{ кВт.}$$

8. Переменные потери в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{ПЕР}} = \Delta P_{\text{Э}} + \Delta P_{\text{Д}} = \sum \Delta P_{\text{НОМ}} - \Delta P_{\text{ПОСТ}} = 0,05 - 0,02 = 0,03 \text{ кВт.}$$

9. Момент в режиме холостого хода:

$$M_0 = 9,55 \cdot \frac{\Delta P_{\text{ПОСТ}}}{n_1} = 9,55 \cdot \frac{20}{1500} = 0,13 \text{ Н·м.}$$

10. Номинальная частота вращения:

$$n_{2\text{НОМ}} = n_1 \cdot (1 - s_{\text{НОМ}}) = 1500 \cdot (1 - 0,062) = 1407 \text{ об/мин.}$$

11. Полезный момент на валу двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_{2\text{НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2\text{НОМ}}}{n_{2\text{НОМ}}} = 9,55 \cdot \frac{60}{1407} = 0,4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

12. Электромагнитный момент при номинальной нагрузке:

$$M = M_{2\text{НОМ}} + M_0 = 0,4 + 0,2 = 0,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

13. Номинальное значение электромагнитной мощности:

$$P_{\text{ЭМ}} = 0,105 \cdot M_{2\text{НОМ}} \cdot n_1 = 0,105 \cdot 0,4 \cdot 1500 = 63 \text{ Вт}.$$

14. Электрические потери в обмотке ротора:

$$\Delta P_{\text{Э2}} = s_{\text{НОМ}} \cdot P_{\text{ЭМ}} = 0,062 \cdot 63 = 3,9 \text{ Вт}.$$

15. Добавочные потери:

$$\Delta P_{\text{Д}} = 0,005 \cdot P_{1\text{НОМ}} = 0,005 \cdot 110 = 0,55 \text{ Вт}.$$

16. Электрические потери в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{Э}} = \Delta P_{\text{ПЕР}} - \Delta P_{\text{Д}} = 30 - 0,55 = 29,45 \text{ Вт},$$

17. Электрические потери в обмотке статора:

$$\Delta P_{\text{Э1}} = \Delta P_{\text{Э}} - \Delta P_{\text{Э2}} = 29,45 - 3,9 = 25,55 \text{ Вт},$$

18. Проверка

$$\sum \Delta P_{\text{НОМ}} = \Delta P_{\text{ПОСТ}} + \Delta P_{\text{Э1}} + \Delta P_{\text{Э2}} + \Delta P_{\text{Д}} = 20 + 25,55 + 3,9 + 0,55 = 50 \text{ Вт}$$

(см. п. 7).

Таблица 2.4

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{2\text{НОМ}}$, кВт	0,06	0,09	0,12	0,18	0,25	0,37	0,55	0,75	1,1	1,5	2,2
$\eta_{\text{НОМ}}$, %	53,0	57,0	63,0	64,0	68,0	68,0	75,0	75,0	76,5	78,5	81,0
$s_{\text{НОМ}}$, %	6,2	6,1	6,0	5,8	5,7	5,6	5,5	5,4	5,3	5,2	5,1
$\cos \varphi$	0,63	0,65	0,66	0,68	0,67	0,70	0,73	0,80	0,77	0,80	0,81
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$P_{2\text{НОМ}}$, кВт	3,0	4,0	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37	45
$\eta_{\text{НОМ}}$, %	82,0	85,0	86	87,5	88,5	90,0	90,0	90,0	92,0	92,5	92,5
$s_{\text{НОМ}}$, %	5,0	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	4,1	4,0
$\cos \varphi$	0,82	0,84	0,86	0,86	0,85	0,89	0,89	0,87	0,87	0,89	0,89
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$P_{2\text{НОМ}}$, кВт	55	75	90	110	132	160	200	250	315	0,06	0,09
$\eta_{\text{НОМ}}$, %	93,0	94,0	94,0	94,0	94,5	94,5	95,0	94,5	94,7	63,0	67,0
$s_{\text{НОМ}}$, %	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	6,2	6,1
$\cos \varphi$	0,89	0,88	0,89	0,91	0,93	0,91	0,92	0,92	0,93	0,63	0,65

Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$P_{2НОМ}$, кВт	0,12	0,25	0,55	1,1	2,2	4,0	11	30	55	90	160
$\eta_{НОМ}$, %	65,0	69,0	73,0	74,5	80,0	85,0	88,5	91,0	92,0	92,0	93,5
$s_{НОМ}$, %	6,0	5,7	5,5	5,3	5,1	4,9	4,6	4,2	3,9	3,7	3,4
$\cos \varphi$	0,66	0,67	0,73	0,77	0,81	0,85	0,86	0,87	0,89	0,89	0,91

Задача 5. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором и числом полюсов $2p$ включен в сеть напряжением $U_{1Л} = 380$ В частотой $f_1 = 50$ Гц при соединении обмоток статора «звездой». ЭДС ротора в режиме холостого хода, измеренная на контактных кольцах неподвижного ротора, E_{20} . Обмотки статора и ротора обладают сопротивлениями r_1 , x_1 , r_2 и x_2 соответственно (табл. 2.5). Требуется определить: частоту вращения ротора при номинальной нагрузке $n_{2НОМ}$, электромагнитный момент $M_{ЭМ}$ в номинальном режиме $M_{2НОМ}$, перегрузочную способность K_M и номинальную мощность двигателя $P_{2НОМ}$. Механические потери принять $\Delta P_{МЕХ} = 2 \cdot \Delta P_D$.

Решение варианта 1.

1. Приведенные значения сопротивлений в цепи ротора:

$$K_E = \frac{U_{1Л}}{E_{20}} = \frac{380}{270} = 1,4,$$

$$r_2' = r_2 \cdot K_E^2 = 0,044 \cdot 1,4^2 = 0,086 \text{ Ом},$$

$$x_2' = x_2 \cdot K_E^2 = 0,089 \cdot 1,4^2 = 0,17 \text{ Ом}.$$

2. Приведенное значение тока в цепи ротора при номинальной нагрузке:

$$I_2' = \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s_{НОМ}}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,21 + \frac{0,086}{0,04}\right)^2 + (0,2 + 0,17)^2}} = 92 \text{ А}.$$

3. При числе полюсов $2p = 8$, частоте тока 50 Гц и номинальном скольжении 0,04 номинальная частота вращения:

$$n_{2НОМ} = n_1 \cdot (1 - s_{НОМ}) = 750 \cdot (1 - 0,04) = 720 \text{ об/мин}.$$

4. Электромагнитный момент двигателя в номинальном режиме:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot r_2' \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot s_{\text{НОМ}} \cdot f_1 \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s_{\text{НОМ}}} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,086 \cdot 4}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 50 \cdot \left[\left(0,21 + \frac{0,086}{0,04} \right)^2 + (0,2 + 0,17)^2 \right]} = 689,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Максимальный момент двигателя:

$$M_{\text{МАХ}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 4}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot \left[0,21 + \sqrt{0,21^2 + (0,2 + 0,17)^2} \right]} = 1443 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Перегрузочная способность двигателя:

$$K_M = \frac{M_{\text{МАХ}}}{M} = \frac{1443}{689,1} = 2,1.$$

7. Электромагнитная мощность при номинальной нагрузке двигателя:

$$P_{\text{ЭМ}} = 0,105 \cdot M_{2\text{НОМ}} \cdot n_1 = 0,105 \cdot 689,1 \cdot 750 = 54268 \text{ Вт}.$$

8. Мощность электрических потерь в обмотке ротора при номинальной нагрузке:

$$\Delta P_{\text{Э2}} = m_2 \cdot (I_2')^2 \cdot r_2' = 3 \cdot 92^2 \cdot 0,086 = 2164 \text{ Вт}.$$

9. Добавочные потери при номинальной нагрузке:

$$\Delta P_{\text{Д}} \approx 0,005 \cdot P_{\text{ЭМ}} = 0,005 \cdot 54268 = 271,3 \text{ Вт}.$$

10. Механические потери:

$$\Delta P_{\text{МЕХ}} = 2 \cdot \Delta P_{\text{Д}} = 2 \cdot 271,3 = 542,7 \text{ Вт}.$$

11. Полезная мощность в номинальном режиме двигателя:

$$P_{2\text{НОМ}} = P_{\text{ЭМ}} - \Delta P_{\text{Э2}} - \Delta P_{\text{Д}} - \Delta P_{\text{МЕХ}} =$$

$$= 54268 - 2164 - 271,3 - 542,7 = 51290,7 \text{ Вт}.$$

Таблица 2.5

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$r_1, \text{ Ом}$	0,21	0,04	0,065	0,035	0,055	0,25	0,045	0,065	0,035	0,055	0,04

x ₁ , Ом	0,20	0,09	0,11	0,073	0,16	0,25	0,1	0,11	0,073	0,16	0,09
r ₂ , Ом	0,044	0,031	0,027	0,02	0,033	0,054	0,031	0,027	0,02	0,033	0,031
x ₂ , Ом	0,089	0,082	0,07	0,1	0,082	0,099	0,082	0,07	0,1	0,082	0,082
E ₂₀ , В	270	380	290	250	267	270	380	290	250	267	380
2p	8	10	10	10	8	8	10	8	8	6	4
SHOM, %	4	3	3,2	3	3,5	4	3	3,2	3	3,5	3
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
r ₁ , Ом	0,26	0,04	0,065	0,035	0,055	0,25	0,045	0,065	0,035	0,055	0,04
x ₁ , Ом	0,20	0,09	0,11	0,073	0,16	0,25	0,1	0,11	0,073	0,16	0,09
r ₂ , Ом	0,05	0,031	0,027	0,02	0,033	0,054	0,031	0,027	0,02	0,033	0,031
x ₂ , Ом	0,089	0,082	0,07	0,1	0,082	0,099	0,082	0,07	0,1	0,082	0,082
E ₂₀ , В	270	385	290	250	267	275	384	290	250	270	385
2p	8	10	6	6	4	8	10	4	6	6	4
SHOM, %	4	3	3,2	3	3,5	4	3	3,2	3	3,5	3
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
r ₁ , Ом	0,21	0,04	0,065	0,035	0,055	0,25	0,045	0,065	0,035	0,055	0,04
x ₁ , Ом	0,20	0,09	0,11	0,073	0,16	0,25	0,1	0,11	0,073	0,16	0,09
r ₂ , Ом	0,044	0,031	0,027	0,02	0,033	0,054	0,031	0,027	0,02	0,033	0,031
x ₂ , Ом	0,08	0,082	0,07	0,1	0,082	0,099	0,082	0,07	0,14	0,084	0,08
E ₂₀ , В	275	385	280	259	260	275	385	295	260	267	380
2p	8	10	10	10	8	8	4	8	8	6	4
SHOM, %	4	3	3,2	3	3,5	4	3	3,2	3	3,5	3
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
r ₁ , Ом	0,21	0,04	0,065	0,035	0,055	0,25	0,045	0,065	0,035	0,055	0,04
x ₁ , Ом	0,20	0,09	0,11	0,073	0,16	0,25	0,1	0,11	0,073	0,16	0,09
r ₂ , Ом	0,044	0,031	0,027	0,02	0,033	0,054	0,031	0,027	0,02	0,033	0,031
x ₂ , Ом	0,089	0,082	0,07	0,1	0,082	0,099	0,082	0,07	0,1	0,082	0,082
E ₂₀ , В	270	382	272	268	268	278	388	298	260	267	380
2p	6	8	8	6	8	6	6	4	8	4	4
SHOM, %	4	3	3,2	3	3,5	4	3	3,2	3	3,5	3

Задача 6. Трехфазный асинхронный двигатель номинальной мощностью P_{2НОМ} включен в сеть с линейным напряжением 380 В, частотой 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой». Вращаясь с частотой n_{2НОМ}, двигатель потребляет ток I_{1НОМ} при коэффициенте мощности cos φ (табл. 2.6). При работе в режиме холостого хода двигатель потребляет из сети мощность P₁₀ при токе I₁₀. определить все виды потерь в режиме номинальной нагрузки.

Решение варианта 1.

1. Электрические потери в обмотке статора в режиме холостого хода:

$$\Delta P_{\Sigma 10} = m_1 \cdot I_{10}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 7^2 \cdot 0,25 = 37 \text{ Вт.}$$

2. Постоянные потери (сумма магнитных и механических потерь) :

$$\Delta P_{\text{ПОСТ}} = P_{10} - \Delta P_{\text{Э10}} = 820 - 37 = 783 \text{ Вт.}$$

3. Магнитные потери:

$$\Delta P_{\text{М}} = \Delta P_{\text{ПОСТ}} - \Delta P_{\text{МЕХ}} = 783 - 160 = 623 \text{ Вт.}$$

4. Мощность, потребляемая из сети при номинальной нагрузке:

$$P_{1\text{НОМ}} = m_1 \cdot U_{1\Phi} \cdot I_{1\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 32 \cdot 0,85 = 17952 \text{ Вт.}$$

5. Суммарные потери:

$$\sum \Delta P = P_{1\text{НОМ}} - P_{2\text{НОМ}} = 17952 - 15000 = 2952 \text{ Вт.}$$

6. КПД двигателя в номинальном режиме:

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{P_{1\text{НОМ}}} = \frac{15000}{17952} = 0,84.$$

7. Переменные потери (сумма электрических потерь в обмотках статора и ротора и добавочных потерь) в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{ПЕР}} = \sum \Delta P - \Delta P_{\text{ПОСТ}} = 2952 - 783 = 2169 \text{ Вт.}$$

8. Добавочные потери в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{Д}} = 0,005 \cdot P_{1\text{НОМ}} = 0,005 \cdot 17952 = 90 \text{ Вт.}$$

9. Электрические потери в обмотке статора в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{Э1}} = m_1 \cdot I_{1\text{НОМ}}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 32^2 \cdot 0,25 = 768 \text{ Вт.}$$

10. Электрические потери в обмотке ротора в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{Э2}} = \Delta P_{\text{ПЕР}} - \Delta P_{\text{Э1}} - \Delta P_{\text{Д}} = 2169 - 768 - 90 = 1311 \text{ Вт.}$$

Таблица 2.6

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{2\text{НОМ}}$, кВт	15	7	75	100	5,5	10	15	17,5	75	100	5
$I_{1\text{НОМ}}$, А	32	14	140	180	11	19	33	42	140	180	11
$n_{2\text{НОМ}}$, об/мин	1455	2910	960	1460	1450	2920	1420	2980	985	1460	1450
r_1 , Ом	0,25	0,58	0,036	0,015	0,52	0,33	0,24	0,2	0,036	0,015	0,52
$\cos \varphi$	0,85	0,9	0,88	0,91	0,86	0,91	0,8	0,86	0,88	0,91	0,86
P_{10} , Вт	820	400	1270	2000	300	330	810	680	1470	2000	400
I_{10} , А	7	4	31	43	4,5	5	8	9,2	31	43	4,5
$\Delta P_{\text{МЕХ}}$, Вт	160	170	250	450	120	220	140	205	250	450	120
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$P_{2\text{НОМ}}$, кВт	15	7	65	100	4	10	14	17,5	75	100	5,5
$I_{1\text{НОМ}}$, А	32	14	140	180	11	19	30	42	140	180	11

$n_{2НОМ}$, об/мин	1455	2910	960	1460	1450	2920	1420	2980	985	1460	1450
r_1 , Ом	0,25	0,58	0,036	0,015	0,52	0,33	0,24	0,2	0,036	0,015	0,52
$\cos \varphi$	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,86	0,88	0,91	0,86
P_{10} , Вт	820	400	1270	2000	300	330	810	680	1470	2000	350
I_{10} , А	7	4	31	43	4,5	5	8	9,2	31	43	4,5
$\Delta P_{МЕХ}$, Вт	170	180	250	460	130	230	130	200	240	440	140
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$P_{2НОМ}$, кВт	15	7	75	100	5	10	15	17,5	75	100	5
$I_{1НОМ}$, А	32	14	150	180	11	19	30	42	140	180	11
$n_{2НОМ}$, об/мин	1455	2910	960	1460	1450	2920	1420	2980	985	1460	1450
r_1 , Ом	0,25	0,58	0,036	0,015	0,52	0,33	0,24	0,2	0,036	0,015	0,52
$\cos \varphi$	0,82	0,9	0,82	0,92	0,82	0,91	0,81	0,86	0,88	0,91	0,86
P_{10} , Вт	820	420	1000	2200	320	310	350	660	1400	1900	420
I_{10} , А	7	4	31	43	4,5	5	8	9,2	31	43	4,5
$\Delta P_{МЕХ}$, Вт	170	180	250	460	130	230	130	200	240	440	140
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$P_{2НОМ}$, кВт	15	7	70	100	5	10	12	17,5	75	100	5,5
$I_{1НОМ}$, А	32	14	140	180	11	19	30	42	140	180	11
$n_{2НОМ}$, об/мин	1485	2930	980	1480	1480	2900	1440	2940	980	1400	1440
r_1 , Ом	0,25	0,58	0,036	0,015	0,52	0,33	0,24	0,2	0,036	0,015	0,52
$\cos \varphi$	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,86	0,88	0,91	0,86
P_{10} , Вт	820	400	1270	2000	300	330	810	680	1470	2000	400
I_{10} , А	7	4	31	43	4,5	5	8	9,2	31	43	4,5
$\Delta P_{МЕХ}$, Вт	170	180	250	460	130	230	130	200	240	440	140

Задача 7. Трехфазные асинхронные двигатели с фазным ротором серии 4А имеют следующие данные каталога, приведенные в таблице 2.7.

Определить: номинальный $M_{2НОМ}$ и максимальный $M_{МАХ}$ моменты, критическое скольжение $s_{КР}$.

Решение варианта 1.

1. Частота вращения в номинальном режиме:

$$n_{2НОМ} = n_1 \cdot (1 - s_{НОМ}) = 3000 \cdot (1 - 0,055) = 2835 \text{ об/мин.}$$

2. Номинальный момент:

$$M_{2НОМ} = 9,55 \cdot \frac{P_{2НОМ}}{n_{2НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{1500}{2835} = 5,1 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

3. Максимальный момент:

$$M_{МАХ} = M_{2НОМ} \cdot K_M = 5,1 \cdot 2,4 = 12,2 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

4. Соответствующее этому моменту критическое скольжение (упрощенное выражение):

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} \cdot (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}) = 0,055 \cdot (2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1}) = 0,25.$$

Таблица 2.7

Вариант	P _{2НОМ} , кВт	2р	s _{НОМ} , %	η _{НОМ} , %	cos φ	I _{2НОМ} , А	E ₂ , В	$\frac{M_{\text{MAX}}}{M_{\text{НОМ}}}$
1	1,5	2	5,5	76	0,74	14	80	2,4
2	3,0	4	5,2	78	0,75	26	86	2,4
3	4,0	6	5	78,5	0,76	35	85	2,4
4	5,5	8	5	79	0,78	45	90	2,4
5	11	2	4,9	80	0,8	84	95	2,2
6	15	4	4,8	80	0,8	103	105	2,2
7	18,5	6	4,7	82	0,8	130	100	2,2
8	22	8	4,7	85	0,8	136	110	2,2
9	30	2	4,6	86,5	0,82	167	120	2,2
10	37	4	4,3	87,5	0,82	213	115	1,9
11	45	6	4	89	0,82	209	140	1,9
12	55	8	3,4	89	0,82	188	190	1,9
13	75	2	3,2	90	0,83	254	190	1,9
14	90	4	3	90	0,84	270	214	1,9
15	110	6	2,8	91,5	0,86	309	225	1,9
16	132	8	2,6	92	0,86	336	247	1,7
17	160	4	2,5	92,5	0,86	351	285	1,7
18	200	6	2,4	92,5	0,86	357	350	1,7
19	1,5	4	5,5	76	0,74	14	80	2,4
20	3,0	6	5,2	78	0,75	26	86	2,4
21	4,0	8	5	78,5	0,76	35	85	2,4
22	5,5	2	5	79	0,78	45	90	2,4
23	11	4	4,9	80	0,8	84	95	2,2
24	15	6	4,8	80	0,8	103	105	2,2
25	18,5	8	4,7	82	0,8	130	100	2,2
26	22	2	4,7	85	0,8	136	110	2,2
27	30	4	4,6	86,5	0,82	167	120	2,2
28	37	6	4,3	87,5	0,82	213	115	1,9
29	45	8	4	89	0,82	209	140	1,9
30	55	2	3,4	89	0,82	188	190	1,9
31	75	4	3,2	90	0,83	254	190	1,9
32	90	6	3	90	0,84	270	214	1,9
33	110	8	2,8	91,5	0,86	309	225	1,9
34	132	4	2,6	92	0,86	336	247	1,7
35	160	6	2,5	92,5	0,86	351	285	1,7
36	200	6	2,4	92,5	0,86	357	350	1,7
37	5,5	8	5	79	0,78	45	90	2,4
38	11	2	4,9	80	0,8	84	95	2,2
39	15	4	4,8	80	0,8	103	105	2,2
40	18,5	6	4,7	82	0,8	130	100	2,2
41	22	8	4,7	85	0,8	136	110	2,2
42	30	2	4,6	86,5	0,82	167	120	2,2

43	37	4	4,3	87,5	0,82	213	115	1,9
44	45	6	4	89	0,82	209	140	1,9

Задача 8. Трехфазный асинхронный двигатель серии 4А, включенный в сеть с линейным напряжением $U_{1Л} = 380$ В при соединении обмотки статора «треугольником», имеет номинальные данные, приведенные в таблице 2.8.

Требуется определить: вращающие моменты двигателя – номинальный, пусковой, максимальный; потребляемую мощность и ток статора при номинальной нагрузке; пусковые ток статора и момент, а также перегрузочную способность двигателя при соединении обмотки статора «звездой» при прежнем напряжении питающей сети; при каком фазном напряжении статора двигатель утрачивает перегрузочную способность, т.е. $K_M' = 1$.

Решение варианта 1.

1. Номинальный момент:

$$M_{2НОМ} = 9,55 \cdot \frac{P_{2НОМ}}{n_{2НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{1500}{2980} = 4,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

2. Пусковой момент:

$$M_{П} = M_{НОМ} \cdot K_{П} = 4,8 \cdot 1,2 = 5,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

3. Максимальный момент:

$$M_{МАХ} = M_{2НОМ} \cdot K_M = 4,8 \cdot 2,4 = 11,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

4. Потребляемая двигателем мощность в номинальном режиме:

$$P_{1НОМ} = \frac{P_{2НОМ}}{\eta_{НОМ}} = \frac{1,5}{0,76} = 1,97 \text{ кВт}.$$

5. Номинальные токи в цепи обмотки статора:
фазный ток

$$I_{1ФНОМ} = \frac{P_{1НОМ}}{m_1 \cdot U_{1Ф} \cdot \cos \varphi} = \frac{1970}{3 \cdot 380 \cdot 0,74} = 2,3 \text{ А}.$$

линейный ток

$$I_{1ЛНОМ} = \sqrt{3} \cdot I_{1ФНОМ} = 1,73 \cdot 2,3 = 4 \text{ А}.$$

6. Пусковой (линейный) ток в питающей сети:

$$I_{П.Л} = I_{1Л} \cdot K_I = 4 \cdot 5,5 = 22 \text{ А}.$$

7. Номинальный и пусковой токи при соединении обмотки статора «звездой».

В этом случае фазное напряжение статора уменьшается до значения:

$$U_{1\Phi Y} = \frac{U_{1\Phi \Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ В.}$$

Фазный ток статора также уменьшается на 1,73, т.е. становится равным:

$$I_{1\Phi Y} = \frac{I_{1\Phi \Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{2,3}{1,73} = 1,3 \text{ А,}$$

что же касается линейного тока, то он при соединении «звездой» уменьшится в 3 раза

$$I_{1\Phi Y} = \frac{I_{1\Phi \Delta}}{3} = \frac{4}{3} = 1,3 \text{ А.}$$

Также в 3 раза уменьшится пусковой ток в линейных проводах питающей сети:

$$I_{п.л. Y} = \frac{I_{п.л. \Delta}}{3} = \frac{22}{3} = 7,3 \text{ А.}$$

8. Номинальный и пусковой моменты двигателя при соединении обмотки статора «звездой»:

Так как момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения статора, при уменьшении фазного напряжения в 1,73 раза моменты двигателя уменьшатся в 3 раза:

$$M_Y = \frac{M_{\Delta}}{3} = \frac{4,8}{3} = 1,6 \text{ А,}$$

$$M_{п. Y} = \frac{M_{п. \Delta}}{3} = \frac{5,8}{3} = 1,9 \text{ А,}$$

$$M_{МАХ Y} = \frac{M_{МАХ \Delta}}{3} = \frac{11,5}{3} = 3,8.$$

При этом перегрузочная способность двигателя уменьшится в 3 раза и составит $K_{MY} = \frac{K_{M \Delta}}{3} = \frac{2,4}{3} = 0,8$.

9. Напряжение (фазное) $U'_{1\Phi}$, при котором двигатель утрачивает перегрузочную способность, т.е. $K'_M = 1$.

Так как момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения статора, двигатель утратит перегрузочную способность при уменьшении напряжения до значения:

$$U'_{1\Phi} = \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{K_M}} = \frac{380}{\sqrt{2,4}} = 245 \text{ В.}$$

Таблица 2.8

Вариант	$P_{НОМ}$, кВт	$n_{НОМ}$, об/мин	$\eta_{НОМ}$, %	$\cos \varphi$	K_I	K_{II}	K_M
1	1,5	2980	76	0,74	5,5	1,2	2,4
2	3,0	2975	78	0,75	5,4	1,3	2,4
3	4,0	2980	78,5	0,76	6,0	1,1	2,4
4	5,5	1480	79	0,78	6,5	1,2	2,4
5	11	1450	80	0,8	6,0	1,2	2,3
6	15	1450	80	0,8	5,5	1,3	2,3
7	18,5	950	82	0,8	5,4	1,1	2,3
8	22	980	85	0,8	6,0	1,2	2,3
9	30	970	86,5	0,82	6,5	1,2	2,0
10	37	2980	87,5	0,82	6,0	1,3	2,0
11	45	2975	89	0,82	5,5	1,1	2,0
12	55	2980	89	0,82	5,4	1,2	1,9
13	75	1480	90	0,83	6,0	1,2	1,9
14	90	1450	90	0,84	6,5	1,3	1,8
15	110	1450	91,5	0,86	6,0	1,1	1,8
16	132	950	92	0,86	5,5	1,2	1,9
17	160	980	92,5	0,86	5,4	1,2	1,8
18	200	970	92,5	0,86	6,0	1,3	1,9
19	1,5	2975	76	0,74	5,5	1,2	2,4
20	3,0	2980	78	0,75	5,4	1,3	2,4
21	4,0	1480	78,5	0,76	6,0	1,1	2,4
22	5,5	1450	79	0,78	6,5	1,2	2,4
23	11	1450	80	0,8	6,0	1,2	2,3
24	15	950	80	0,8	5,5	1,3	2,3
25	18,5	980	82	0,8	5,4	1,1	2,3
26	22	970	85	0,8	6,0	1,2	2,3
27	30	2980	86,5	0,82	6,5	1,2	2,0
28	37	2975	87,5	0,82	6,0	1,3	2,0
29	45	2980	89	0,82	5,5	1,1	2,0
30	55	1480	89	0,82	5,4	1,2	1,9
31	75	1450	90	0,83	6,0	1,2	1,9
32	90	1450	90	0,84	6,5	1,3	1,8
33	110	2980	91,5	0,86	6,0	1,1	1,8
34	132	2975	92	0,86	5,5	1,2	1,9
35	160	1450	92,5	0,86	5,4	1,2	1,8
36	200	1450	92,5	0,86	6,0	1,3	1,9
37	15	950	80	0,8	5,5	1,3	2,3
38	18,5	980	82	0,8	5,4	1,1	2,3
39	22	970	85	0,8	6,0	1,2	2,3
40	30	2980	86,5	0,82	6,5	1,2	2,0
41	37	2975	87,5	0,82	6,0	1,3	2,0
42	45	2980	89	0,82	5,5	1,1	2,0
43	55	1480	89	0,82	5,4	1,2	1,9
44	75	1450	90	0,83	6,0	1,2	1,9

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Рассчитать и построить механическую характеристику асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (зависимость $\omega = f(M)$), имеющего следующие технические данные (табл. 2.9).

Механическая характеристика строится по четырем характерным точкам – А, В, С, D:

1. Угловая скорость вращения вала двигателя при идеальном холостом ходе:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \text{ рад/с.}$$

2. Угловая скорость вращения вала двигателя при номинальной нагрузке

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi \cdot n_{2\text{НОМ}}}{30}, \text{ рад/с.}$$

3. Номинальный момент двигателя

$$M_{2\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\omega_{2\text{НОМ}}}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

4. Номинальное скольжение

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{\omega_0 - \omega_{2\text{НОМ}}}{\omega_0}.$$

Этих данных достаточно для построения рабочего участка механической характеристики (прямолинейная часть) по координатам двух точек:

т. А ($M = 0$; $\omega = \omega_0$)

т. В ($M = M_{2\text{НОМ}}$; $\omega = \omega_{2\text{НОМ}}$)

5. Максимальный (критический) момент двигателя

$$M_{\text{КР}} = K_M \cdot M_{2\text{НОМ}}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

6. Критическое скольжение

$$s_{\text{КР}} = s_{\text{НОМ}} \cdot (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}),$$

$$\omega_{\text{КР}} = \omega_0 \cdot (1 - s_{\text{КР}}).$$

т. С ($M = M_{\text{КР}}$; $\omega = \omega_{\text{КР}}$).

7. Пусковой момент двигателя

$$M_{\text{П}} = K_{\text{П}} \cdot M_{2\text{НОМ}}, \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

т. D ($M = M_{П}; \omega = 0$)

Таблица 2.9

Данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Вариант	Тип	$P_{2НОМ}$, кВт	$n_{2НОМ}$, об/мин	$\eta_{НОМ}$, %	$\cos \varphi$	K_M	$K_{П}$
1	4A80B2Y3	2,2	2850	83	0,87	2,2	2,0
2	4A132M2Y3	11	2910	88	0,9	2,2	1,6
3	4A200M2Y3	37	2940	90	0,89	2,2	1,4
4	4A225M2Y3	55	2940	91	0,92	2,2	1,2
5	4A250M2Y3	90	2960	92	0,9	2,2	1,2
6	4A280B2Y3	110	2940	91	0,89	2,2	1,2
7	4A315B2Y3	160	2940	92	0,9	1,9	1
8	4A355M2Y3	315	2940	93	0,91	1,9	1
9	4A100B4Y3	3	1420	82	0,83	2,2	2
10	4A100B4Y3	4	1420	84	0,84	2,2	2
11	4A160B4Y3	15	1460	89	0,88	2,2	1,4
12	4A180M4Y3	30	1470	91	0,91	2,2	1,4
13	4A250B4Y3	75	1480	93	0,9	2,2	1,2
14	4A250M4Y3	90	1480	93	0,91	2,2	1,2
15	4A280M4Y3	132	1470	93	0,9	2	1,2
16	4A315M4Y3	200	1475	94	0,92	1,9	1
17	4A132B6Y3	5,5	960	85	0,8	2,2	2
18	4A225M6Y3	37	980	91	0,89	2	1,2
19	4A250M6Y3	55	985	92	0,88	2	1,2
20	4A315B6Y3	110	980	93	0,9	1,9	1
21	4A355M6Y3	200	980	94	0,9	1,9	1
22	4A160B8Y3	7,5	730	86	0,75	2,2	1,4
23	4A280B8Y3	55	730	92	0,84	1,9	1,2
24	4A250B10Y3	30	590	88	0,81	1,9	1,2
25	4A315B10Y3	55	590	92	0,79	1,8	1
26	4A80B2Y3	2,2	2850	83	0,87	2,4	2,2
27	4A132M2Y3	11	2910	88	0,9	2,4	1,2
28	4A200M2Y3	37	2940	90	0,89	2,4	1,2
29	4A225M2Y3	55	2940	91	0,92	2,4	1,4
30	4A250M2Y3	90	2960	92	0,9	2,4	1,4
31	4A280B2Y3	110	2940	91	0,89	2,4	1,4
32	4A315B2Y3	160	2940	92	0,9	2	1,1
33	4A355M2Y3	315	2940	93	0,91	2	1,1
34	4A100B4Y3	3	1420	82	0,83	2	2,1
35	4A100B4Y3	4	1420	84	0,84	2	2,1
36	4A160B4Y3	15	1460	89	0,88	2	1,6
37	4A180M4Y3	30	1470	91	0,91	2	1,6
38	4A250M4Y3	90	1480	93	0,91	2,1	1,2
39	4A280M4Y3	132	1470	93	0,9	2,1	1,2
40	4A315M4Y3	200	1475	94	0,92	1,8	1,1
41	4A132B6Y3	5,5	960	85	0,8	2,1	2,1
42	4A225M6Y3	37	980	91	0,89	2,1	1,1
43	4A250M6Y3	55	985	92	0,88	2,1	1,1
44	4A315B6Y3	110	980	93	0,9	1,8	1,2

3 ТРАНСФОРМАТОРЫ

Основные сведения, формулы

Трансформатор – это электромагнитный аппарат, преобразующий напряжение в сетях переменного тока.

Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции: если обмотка пронизывается изменяющимся во времени магнитным потоком, то в ней индуцируется ЭДС. Действующие значения ЭДС двухобмоточного однофазного трансформатора равны:

первичная ЭДС

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi_{\text{MAX}} \cdot f_1 \cdot w_1, \text{ В},$$

вторичная ЭДС

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi_{\text{MAX}} \cdot f_1 \cdot w_2, \text{ В},$$

где f_1 – частота переменного тока питающей сети, Гц; w_1 и w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Максимальное значение основного магнитного потока:

$$\Phi_{\text{MAX}} = B_{\text{MAX}} \cdot Q_{\text{СТ}} \cdot k_C, \text{ Вб},$$

где B_{MAX} – максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода, Тл; $Q_{\text{СТ}}$ – площадь поперечного сечения стержня трансформатора, м²; k_C – коэффициент заполнения магнитопровода сталью, который учитывает толщину изоляционных прослоек между пластинами электротехнической стали, при толщине пластин 0,5 мм обычно принимают $k_C = 0,95$.

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения, равное отношению чисел витков этих обмоток, называют коэффициентом трансформации:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

Трансформаторы характеризуются следующими параметрами:

полная мощность первичной обмотки

$$S_1 = U_1 \cdot I_1, \text{ В} \cdot \text{А},$$

где U_1 – первичное напряжение, В; I_1 – первичный ток, А.

полная мощность вторичной обмотки:

$$S_2 = U_2 \cdot I_2, \text{ В} \cdot \text{А},$$

где U_2 – вторичное напряжение, В; I_2 – вторичный ток, А.

Так как потери в трансформаторе невелики, то за номинальную полную мощность однофазного трансформатора принимают:

$$S_{\text{НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} \cdot I_{1\text{НОМ}} \approx U_{2\text{НОМ}} \cdot I_{2\text{НОМ}},$$

для трехфазного трансформатора

$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}} \cdot I_{1\text{НОМ}}, \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Изменение напряжения на выводах вторичной обмотки трансформатора при любой номинальной нагрузке (в данном выражении знак плюс соответствует индуктивной нагрузке, знак минус – емкостной нагрузке):

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \beta \cdot (u_{\text{К.а}} \cdot \cos \varphi_2 \pm u_{\text{К.р}} \cdot \sin \varphi_2), \%,$$

где $u_{\text{К.а}}$, $u_{\text{К.р}}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, %; β – коэффициент нагрузки трансформатора.

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора определяются:

$$u_{\text{К.а}} = u_{\text{К}} \cdot \cos \varphi_{\text{К}}, \%, \quad u_{\text{К.р}} = u_{\text{К}} \cdot \sin \varphi_{\text{К}}, \%,$$

где $u_{\text{К}}$ – напряжение короткого замыкания, %.

$$u_{\text{К.а}} = \frac{U_{\text{К.а}}}{U_{1\text{НОМ}}} \cdot 100, \%, \quad u_{\text{К.р}} = \frac{U_{\text{К.р}}}{U_{1\text{НОМ}}} \cdot 100, \%, \quad u_{\text{К}} = \frac{U_{\text{К}}}{U_{1\text{НОМ}}} \cdot 100, \%, \quad \beta = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}},$$

где $U_{\text{К.а}}$, $U_{\text{К.р}}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, В; $U_{\text{К}}$ – напряжение короткого замыкания на фазу, В.

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется выражением:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{К}}}{\beta \cdot S_{\text{Н}} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{К}}},$$

где P_0 – мощность холостого хода трансформатора при номинальном первичном напряжении, равная мощности магнитных потерь, Вт; $P_{\text{К}}$ – мощность короткого замыкания при номинальных токах в обмотках трансформатора, равная мощности электрических потерь, Вт.

Электрические потери в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке можно определить, если известны значения активных сопротивлений обмоток и номинальные значения токов в обмотках:

$$\Delta P_{\text{Э}} = \Delta P_{\text{Э1}} + \Delta P_{\text{Э2}} = m \cdot I_1^2 \cdot r_1 + m \cdot I_2'^2 \cdot r_2' = \beta^2 \cdot P_{\text{К}}, \text{ Вт},$$

где r_1 , r_2 – активное сопротивление первичной и вторичной обмоток; m – число фаз трансформатора; I_2' , r_2' – приведенные значения тока и сопротивления вторичной обмотки, А, Ом.

Полезная мощность трансформатора определяется:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{\text{М}} - \Delta P_{\text{Э}} = P_1 - \sum \Delta P, \text{ Вт},$$

где $\Delta P_{\text{М}}$ – магнитные потери, Вт; $\sum \Delta P$ – сумма потерь, Вт.

Наибольшее значение КПД соответствует максимальному коэффициенту нагрузки, обычно составляет 0,45-0,65:

$$\beta_{\text{MAX}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}.$$

Полное, активное и индуктивное сопротивления холостого хода определяются:

однофазный трансформатор

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0}, \text{ Ом}, \quad R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, \text{ Ом}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \text{ Ом},$$

где I_0 – ток холостого хода, А; U_0 – напряжение холостого хода, В.

трехфазный трансформатор (первичная обмотка соединена в «звезду»)

$$Z_0 = \frac{U_{0Л}}{\sqrt{3} \cdot I_{0Л}}, \text{ Ом}, \quad R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_{0Л}^2}, \text{ Ом}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \text{ Ом}.$$

трехфазный трансформатор (первичная обмотка соединена в «треугольник»)

$$Z_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0Л}}{I_{0Л}}, \text{ Ом}, \quad R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_{0Л}^2}, \text{ Ом}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \text{ Ом}.$$

Коэффициент мощности холостого хода определяется:

однофазный трансформатор

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_0 \cdot U_0},$$

трехфазный трансформатор

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot I_{0Л} \cdot U_{0Л}}.$$

Полное, активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания определяются:

однофазный трансформатор

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}, \text{ Ом}, \quad R_K = \frac{P_K}{I_K^2}, \text{ Ом}, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \text{ Ом},$$

где I_K – ток короткого замыкания, А; U_K – напряжение короткого замыкания, В.

трехфазный трансформатор (первичная обмотка соединена в «звезду»)

$$Z_K = \frac{U_{КЛ}}{\sqrt{3} \cdot I_{КЛ}}, \text{ Ом}, \quad R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_{КЛ}^2}, \text{ Ом}, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \text{ Ом}.$$

трехфазный трансформатор (первичная обмотка соединена в «треугольник»)

$$Z_K = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{КЛ}}}{I_{\text{КЛ}}}, \text{ Ом}, R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_{\text{КЛ}}^2}, \text{ Ом}, X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, r_K = Z_K \cdot \cos \varphi_K, \text{ Ом},$$

$$x_K = Z_K \cdot \sin \varphi_K, \text{ Ом}.$$

Коэффициент мощности короткого замыкания определяется:
однофазный трансформатор

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{I_K \cdot U_K},$$

трехфазный трансформатор

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{КЛ}} \cdot U_{\text{КЛ}}}.$$

При включении нескольких трансформаторов на параллельную работу рекомендуется соблюдение следующих условий:

- трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации;
- трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения обмоток;
- трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания;
- номинальные мощности трансформаторов по своим значениям не должны различаться более чем в три раза.

Нарушение перечисленных условий ведет к возникновению уравнительных токов в цепи обмоток параллельно включенных трансформаторов. Это влияет на распределение нагрузки между трансформаторами. В итоге одни трансформаторы оказываются недогруженными (их нагрузка становится намного меньше номинальной), а другие – перегруженными.

Общая нагрузка параллельно работающих трансформаторов при точном соблюдении всех условий параллельной работы распределяется между ними пропорционально номинальным мощностям этих трансформаторов. С учетом возможного неравенства напряжений короткого замыкания нагрузка любого из параллельно включенных трансформаторов определяется по формуле:

$$S_i = \frac{S \cdot S_{\text{НОМ}i}}{u_{\text{К}i} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_{\text{НОМ}i}}{u_{\text{К}i}}}, \text{ кВ}\cdot\text{А},$$

где S_i – нагрузка одного из параллельно работающих трансформаторов, кВ·А; S – общая нагрузка всей параллельной группы, кВ·А; $u_{\text{К}i}$ – напряжение

короткого замыкания данного трансформатора, %; $S_{НОМi}$ – номинальная мощность данного трансформатора, кВ·А.

Соотношения между линейными и фазными значениями токов и напряжений при соединении:

в «звезду»

$$U_{Л} = \sqrt{3} \cdot U_{Ф}, \quad I_{Л} = I_{Ф}.$$

в «треугольник»

$$U_{Л} = U_{Ф}, \quad I_{Л} = \sqrt{3} \cdot I_{Ф}.$$

Мощности независимо от схемы соединения определяется:

активная

$$P = 3 \cdot P_{Ф} = 3 \cdot I_{Ф} \cdot U_{Ф} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot I_{Л} \cdot U_{Л} \cdot \cos \varphi,$$

реактивная

$$Q = 3 \cdot Q_{Ф} = 3 \cdot I_{Ф} \cdot U_{Ф} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot I_{Л} \cdot U_{Л} \cdot \sin \varphi,$$

полная

$$S = 3 \cdot S_{Ф} = 3 \cdot I_{Ф} \cdot U_{Ф} = \sqrt{3} \cdot I_{Л} \cdot U_{Л}.$$

Ток холостого хода в процентах от номинального:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{НОМ}} \cdot 100, \%$$

В автотрансформаторе между первичной и вторичной цепями помимо магнитной связи существует еще и электрическая связь. Объясняется это тем, что в автотрансформаторе имеется всего лишь одна обмотка (на каждую фазу), часть витков которой принадлежит как первичной, так и вторичной цепям. Расчетная мощность автотрансформатора составляет лишь часть проходной мощности, передаваемой из первичной цепи во вторичную. Другая часть этой мощности передается из первичной во вторичную цепь без участия магнитного поля за счет электрической связи между цепями автотрансформатора. Проходная мощность определяется по выражению

$$S_{ПР} = S_{Э} + S_{РАСЧ} = U_2 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_{12}, \text{ В} \cdot \text{А},$$

где $S_{Э}$ – мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную за счет электрической связи между этими цепями, В·А; $S_{РАСЧ}$ – расчетная мощность в автотрансформаторе, В·А.

Таким образом, расчетная мощность составляет лишь часть всей мощности, передаваемой из первичной цепи автотрансформатора во вторичную. Это дает возможность для изготовления автотрансформатора использовать магнитопровод меньшего сечения, чем в трансформаторе равной мощности. При этом за счет уменьшенного сечения сердечника средняя длина витка обмотки также становится меньше, а, следовательно,

сокращается расход меди на выполнение обмотки автотрансформатора. Одновременно уменьшаются магнитные и электрические потери, а КПД автотрансформатора по сравнению с двухобмоточным трансформатором равной мощности повышается.

Таким образом, автотрансформаторы по сравнению с трансформаторами обладают следующими преимуществами: меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь), более высоким КПД, меньшими размерами и, следовательно, меньшей стоимостью.

Указанные преимущества автотрансформаторов тем значительнее, чем больше мощность S_{Σ} , передаваемая за счет электрической связи между обмотками, а, следовательно, чем меньше расчетная часть $S_{РАСЧ}$ проходной мощности автотрансформатора.

Измерительные трансформаторы.

Действительный коэффициент трансформации для трансформаторов:

тока

$$k_i = \frac{I_1}{I_2},$$

напряжения

$$k_u = \frac{U_1}{U_2},$$

где I_1 – действительное значение первичного тока; I_2 – действительное значение вторичного тока; U_1 – действительное значение первичного напряжения; U_2 – действительное значение вторичного напряжения.

Стандартные номинальные первичные токи $I_{1НОМ}$: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000 А и более. Номинальный вторичный ток $I_{2НОМ}$ для всех трансформаторов тока принят равным 5 А.

Однофазные и трёхфазные трансформаторы напряжения изготавливаются на стандартные номинальные первичные напряжения $U_{1НОМ}$: 400, 500, 3000, 6000, 10000 В и выше. Номинальное вторичное напряжение $U_{2НОМ}$ для всех трансформаторов напряжения принято равным 100 В.

Задачи

Задача 1. Используя приведенные в таблице 3.1 значения параметров трехфазных масляных трансформаторов серии ТМ (в обозначении марки в числителе указано номинальная мощность трансформатора в кВ·А, в знаменателе – высшее напряжение в кВ), определить для каждого варианта значения параметров, величины которых не указаны в этой таблице. Обмотки соединены по схемам Y/Y. Частота тока в сети равная 50 Гц.

Решение варианта 1.

1. Напряжение на выводах обмотки НН

$$U_{2НОМ} = \frac{U_{1НОМ}}{k} = \frac{35}{5,56} = 6,3 \text{ кВ.}$$

2. Число витков в фазной обмотке НН

$$w_2 = \frac{w_1}{k} = \frac{1600}{5,56} = 288 \text{ витков.}$$

3. Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{MAX} = \frac{U_{2НОМ}}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2} = \frac{6300}{1,73 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 288} = 0,057 \text{ Вб.}$$

4. Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода

$$Q_{СТ} = \frac{\Phi_{MAX}}{B_{MAX} \cdot k_C} = \frac{0,057}{1,5 \cdot 0,95} = 0,04 \text{ м}^2.$$

Таблица 3.1

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Тип трансформатора	ТМ-1000/35	ТМ-50/6	ТМ-100/6	ТМ-180/6	ТМ-320/6	ТМ-560/35	ТМГ-750/35	ТМ-1000/6	ТМ-10/6	ТМ-250/6	ТМ-250/6
Φ_{MAX} , Вб	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w_1 , витков	1600	1190	-	-	522	2000	-	-	480	-	522
w_2 , витков	-	-	72	85	-	-	146	110	-	85	-
$Q_{СТ}$, м ² при $B_{MAX} = 1,5$ Тл	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$U_{1НОМ}$, кВ	35	6	6	6	6	35	35	6	6	6	6
$U_{2НОМ}$, кВ	-	0,4	0,5	0,5	0,4	-	3,15	0,4	0,4	0,5	0,4
k	5,56	-	-	-	-	5,55	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Тип трансформатора	ТМ-1000/110	ТМ-100/6	ТМ-160/6	ТМ-160/6	ТМ-250/6	ТМ-250/35	ТМГ-750/35	ТМ-100/6	ТМ-100/6	ТМ-400/6	ТМ-400/6
Φ_{MAX} , Вб	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w_1 , витков	1600	1190	-	-	522	2000	-	-	500	-	520
w_2 , витков	-	-	72	80	-	-	150	100	-	90	-
$Q_{СТ}$, м ² при $B_{MAX} = 1,5$ Тл	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$U_{1НОМ}$, кВ	110	6	6	6	6	35	35	6	6	6	6
$U_{2НОМ}$, кВ	-	0,4	0,5	0,5	0,4	-	3,15	0,4	0,4	0,5	0,4
k	5,56	-	-	-	-	5,55	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Тип трансформатора	ТМ-100/35	ТМ-50/10	ТМ-100/10	ТМ-180/10	ТМ-320/10	ТМ-560/10	ТМГ-750/10	ТМ-1000/10	ТМ-10/10	ТМ-250/10	ТМ-250/10
Φ_{MAX} , Вб	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w_1 , витков	1600	1190	-	-	522	2000	-	450	-	400	522
w_2 , витков	-	-	72	120	-	-	146	-	130	-	-
$Q_{СТ}$, м ² при $B_{MAX} = 1,5$ Тл	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$U_{1НОМ}$, кВ	35	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{2НОМ}$, кВ	-	0,4	0,5	0,5	0,4	-	3,15	0,4	0,4	0,5	0,4
k	5,56	-	-	-	-	5,55	-	-	-	-	-

Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Тип трансформатора	ТМ-1500/35	ТМ-500/6	ТМ-1000/6	ТМ-250/6	ТМ-250/6	ТМ-1000/35	ТМГ-7000/35	ТМ-1000/6	ТМ-100/6	ТМ-2500/10	ТМ-250/10
Φ_{MAX} , Вб	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w_1 , витков	1600	1190	-	400	522	2000	-	-	-	-	522
w_2 , витков	-	-	72	-	-	-	146	110	120	150	-
$Q_{\text{СТ}}$, м ² при $B_{\text{MAX}} = 1,5$ Тл	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$U_{1\text{НОМ}}$, кВ	35	6	6	6	6	35	35	6	6	10	10
$U_{2\text{НОМ}}$, кВ	-	0,4	0,5	0,5	0,4	-	3,15	0,4	0,4	0,5	0,4
k	5,56	-	-	-	-	5,55	-	-	-	-	-

Задача 2. Параметры однофазного двухобмоточного трансформатора приведены в таблице 3.2. Частота переменного тока в сети равна 50 Гц. Требуется определить не указанные в этой таблице значения параметров для каждого варианта.

Решение варианта 1.

1. Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{\text{MAX}} = \frac{E_{\text{Витка}}}{4,44 \cdot f_1 \cdot w} = \frac{5}{4,44 \cdot 50 \cdot 1} = 0,0225 \text{ Вб.}$$

2. Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода

$$Q_{\text{СТ}} = \frac{\Phi_{\text{MAX}}}{B_{\text{MAX}} \cdot k_{\text{С}}} = \frac{0,0225}{1,5 \cdot 0,95} = 0,0158 \text{ м}^2.$$

3. Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = \frac{U_{2\text{НОМ}}}{4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_{\text{MAX}}} = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0225} = 80 \text{ витков.}$$

4. Число витков первичной обмотки

$$w_1 = w_2 \cdot k = 80 \cdot 15 = 1200 \text{ витков.}$$

5. Полная номинальная мощность трансформатора

$$S_{\text{НОМ}} = U_{2\text{НОМ}} \cdot I_{2\text{НОМ}} = 400 \cdot 172 = 68,8 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Таблица 3.2

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$S_{\text{НОМ}}$, кВ·А	-	120	-	240	600	-	120	-	250	630	100
$U_{2\text{НОМ}}$, В	400	630	-	880	660	630	400	-	880	660	630
w_1 , витков	-	1800	-	-	-	-	1800	-	-	-	1800
w_2 , витков	-	-	169	128	140	-	-	169	128	140	-
k	15	-	12	23,4	9,55	15	-	12	23,4	9,55	-

Продолжение таблицы 3.2

$E_{1\text{витка}}, \text{В}$	5	-	6	-	-	5	-	6	-	-	-
$Q_{\text{СТ}}, \text{М}^2$	-	0,018	-	0,022	-	-	0,018	-	0,022	-	0,018
$V_{\text{МАХ}}, \text{Тл}$	1,5	1,4	1,5	-	1,55	1,5	1,4	1,5	-	1,55	1,4
$I_{2\text{НОМ}}, \text{А}$	172	-	140	-	-	172	-	150	-	-	-
$\Phi_{\text{МАХ}}, \text{Вб}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$S_{\text{НОМ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	-	120	-	240	600	-	120	-	250	630	100
$U_{2\text{НОМ}}, \text{В}$	230	600	-	800	600	600	420	-	800	600	600
$w_1, \text{ВИТКОВ}$	-	1800	-	-	-	-	1800	-	-	-	1800
$w_2, \text{ВИТКОВ}$	-	-	170	128	140	-	-	169	128	140	-
k	15	-	12	23,4	9,55	15	-	12	23,4	9,55	-
$E_{1\text{витка}}, \text{В}$	5	-	6	-	-	5	-	6	-	-	-
$Q_{\text{СТ}}, \text{М}^2$	-	0,018	-	0,022	-	-	0,018	-	0,022	-	0,018
$V_{\text{МАХ}}, \text{Тл}$	1,5	1,4	1,5	-	1,55	1,5	1,4	1,5	-	1,55	1,4
$I_{2\text{НОМ}}, \text{А}$	172	-	140	-	-	172	-	120	-	-	-
$\Phi_{\text{МАХ}}, \text{Вб}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$S_{\text{НОМ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	-	300	-	250	630	-	100	-	300	600	180
$U_{2\text{НОМ}}, \text{В}$	300	330	-	380	360	330	300	-	380	300	330
$w_1, \text{ВИТКОВ}$	-	1800	-	-	-	-	1800	-	-	-	1800
$w_2, \text{ВИТКОВ}$	-	-	169	128	140	-	-	169	128	140	-
k	15	-	12	23,4	9,55	15	-	12	23,4	9,55	-
$E_{1\text{витка}}, \text{В}$	5	-	6	-	-	5	-	6	-	-	-
$Q_{\text{СТ}}, \text{М}^2$	-	0,018	-	0,022	-	-	0,018	-	0,022	-	0,018
$V_{\text{МАХ}}, \text{Тл}$	1,5	1,4	1,5	-	1,55	1,5	1,4	1,5	-	1,55	1,4
$I_{2\text{НОМ}}, \text{А}$	172	-	140	-	-	172	-	150	-	-	-
$\Phi_{\text{МАХ}}, \text{Вб}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$S_{\text{НОМ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	-	120	-	240	600	-	120	-	250	630	100
$U_{2\text{НОМ}}, \text{В}$	400	630	-	880	660	630	400	-	880	660	630
$w_1, \text{ВИТКОВ}$	-	1800	-	-	-	-	1800	-	-	-	1800
$w_2, \text{ВИТКОВ}$	-	-	169	128	140	-	-	180	150	150	-
k	15	-	12	23,4	9,55	15	-	12	23,4	9,55	-
$E_{1\text{витка}}, \text{В}$	4	-	5	-	-	4	-	5	-	-	-
$Q_{\text{СТ}}, \text{М}^2$	-	0,02	-	0,03	-	-	0,02	-	0,03	-	0,03
$V_{\text{МАХ}}, \text{Тл}$	1,5	1,4	1,5	-	1,55	1,5	1,4	1,5	-	1,55	1,4
$I_{2\text{НОМ}}, \text{А}$	172	-	140	-	-	172	-	150	-	-	-
$\Phi_{\text{МАХ}}, \text{Вб}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Задача 3. В таблице 3.3 приведены данные некоторых параметров трехфазных масляных трансформаторов. Характер нагрузки – индуктивный ($\cos \varphi = 0,8$). Соединение обмоток трансформатора Y/Y. Требуется определить параметры трансформатора, значения которых в таблице не указаны.

Решение варианта 1.

1. Номинальный ток в первичной обмотке

$$I_{\text{ИНОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ИНОМ}}} = \frac{25}{1,73 \cdot 10} = 1,44 \text{ А.}$$

2. Ток холостого хода

$$I_0 = \frac{i_0}{100} \cdot I_{\text{ИНОМ}} = \frac{3,2}{100} \cdot 1,44 = 0,046 \text{ А.}$$

3. Коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot I_0 \cdot U_{\text{ИНОМ}}} = \frac{130}{1,73 \cdot 0,046 \cdot 10000} = 0,16.$$

4. Напряжение короткого замыкания

$$U_{\text{К}} = \frac{u_{\text{К}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ИНОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{4,5}{100} \cdot \frac{10000}{\sqrt{3}} = 260 \text{ В.}$$

5. Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\text{К}} = \frac{P_{\text{К}}}{3 \cdot I_{\text{ИНОМ}} \cdot U_{\text{К}}} = \frac{600}{3 \cdot 1,44 \cdot 260} = 0,53, \sin \varphi_{\text{К}} = 0,85.$$

6. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания

$$u_{\text{К.а}} = u_{\text{К}} \cdot \cos \varphi_{\text{К}} = 4,5 \cdot 0,53 = 2,39, u_{\text{К.р}} = u_{\text{К}} \cdot \sin \varphi_{\text{К}} = 4,5 \cdot 0,85 = 3,83.$$

7. Сопротивление короткого замыкания

$$Z_{\text{К}} = \frac{U_{\text{К}}}{I_{\text{ИНОМ}}} = \frac{260}{1,44} = 180 \text{ Ом.}$$

8. Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_{\text{К}} = Z_{\text{К}} \cdot \cos \varphi_{\text{К}} = 180 \cdot 0,53 = 95,4 \text{ Ом}, x_{\text{К}} = Z_{\text{К}} \cdot \sin \varphi_{\text{К}} = 180 \cdot 0,85 = 153 \text{ Ом.}$$

9. Номинальное изменение напряжения трансформатора при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = u_{\text{К.а}} \cdot \cos \varphi_2 + u_{\text{К.р}} \cdot \sin \varphi_2 = 2,39 \cdot 0,8 + 3,83 \cdot 0,6 = 4,2 \%$$

Таблица 3.3

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Тип трансформатора	ТМ-25/10	ТМ-40/6	ТМ-63/10	ТМ-100/6	ТМ-160/10	ТМ-250/6	ТМ-40/10	ТМ-63/6	ТМ-100/10	ТМ-160/6	ТМ-250/10
S _{НОМ} , кВ·А	25	-	63	-	-	250	-	63	-	-	250

Продолжение таблицы 3.3

$U_{1НОМ}$, кВ	10	6	10	6	10	-	10	6	10	6	-
u_K , %	4,5	-	4,5	-	4,5	-	-	4,5	-	4,5	-
i_0 , %	3,2	-	4,5	2,6	2,4	3,0	-	4,5	2,6	2,4	3,2
P_0 , кВт	0,13	0,175	0,21	-	0,51	-	0,175	0,21	-	0,51	-
P_K , кВт	0,6	0,88	-	-	2,65	-	0,88	-	-	2,65	-
$I_{1НОМ}$, А	-	3,87	-	9,6	9,2	24	3,87	-	9,6	9,2	24
I_0 , А	-	0,115	0,16	-	-	-	0,115	0,16	-	-	-
U_K , кВ	-	0,28	0,45	-	-	0,31	0,28	0,45	-	-	0,29
Z_K , Ом	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi_K$	-	-	0,4	0,30	-	-	-	0,43	0,30	-	-
$\sin \varphi_K$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi_0$	-	-	-	0,08	-	0,13	-	-	0,12	-	0,13
$u_{K,a}$, %	-	-	-	1,95	-	-	-	-	1,95	-	-
$u_{K,p}$, %	-	-	-	6,2	-	-	-	-	6,2	-	-
r_K , Ом	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	5
x_K , Ом	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	12
$\Delta U_{НОМ}$, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Тип трансформатора	ТМ-25/10	ТМ-40/6	ТМ-63/10	ТМ-100/6	ТМ-160/10	ТМ-250/6	ТМ-40/10	ТМ-63/6	ТМ-100/10	ТМ-160/6	ТМ-250/10
$S_{НОМ}$, кВ·А	25	-	63	-	-	250	-	63	-	-	250
$U_{1НОМ}$, кВ	10	6	10	6	10	-	10	6	10	6	-
u_K , %	5	-	5	-	5	-	-	5	-	5	-
i_0 , %	3,2	-	4,5	2,6	2,4	3,1	-	4,5	2,6	2,4	3,0
P_0 , кВт	0,13	0,2	0,3	-	0,51	-	0,21	0,25	-	0,51	-
P_K , кВт	0,6	0,88	-	-	2,65	-	0,88	-	-	2,65	-
$I_{1НОМ}$, А	-	3,87	-	9,6	9,2	24	3,87	-	9,6	9,2	24
I_0 , А	-	0,115	0,16	-	-	-	0,115	0,16	-	-	-
U_K , кВ	-	0,28	0,45	-	-	0,36	0,28	0,45	-	-	0,3
Z_K , Ом	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi_K$	-	-	0,4	0,30	-	-	-	0,4	0,30	-	-
$\sin \varphi_K$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi_0$	-	-	-	0,1	-	0,13	-	-	0,11	-	0,13
$u_{K,a}$, %	-	-	-	1,95	-	-	-	-	1,95	-	-
$u_{K,p}$, %	-	-	-	6,2	-	-	-	-	6,2	-	-
r_K , Ом	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	5
x_K , Ом	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	12
$\Delta U_{НОМ}$, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Тип трансформатора	ТМ-25/10	ТМ-40/6	ТМ-63/10	ТМ-100/6	ТМ-160/10	ТМ-250/6	ТМ-40/10	ТМ-63/6	ТМ-100/10	ТМ-160/6	ТМ-250/10
$S_{НОМ}$, кВ·А	25	-	63	-	-	250	-	63	-	-	250
$U_{1НОМ}$, кВ	10	6	10	6	10	-	10	6	10	6	-
u_K , %	4,5	-	4,5	-	4,5	-	-	4,5	-	4,5	-
i_0 , %	3,2	-	4,5	2,6	2,4	3,1	-	4,5	2,6	2,4	3,1
P_0 , кВт	0,18	0,18	0,3	-	0,63	-	0,19	0,3	-	0,7	-

Продолжение таблицы 3.3

P_K , кВт	0,6	0,88	-	-	2,65	-	0,88	-	-	2,65	-
$I_{1НОМ}$, А	-	3,87	-	9,6	9,2	24	3,87	-	9,6	9,2	24
I_0 , А	-	0,115	0,19	-	-	-	0,13	0,18	-	-	-
U_K , кВ	-	0,28	0,45	-	-	0,38	0,28	0,45	-	-	0,32
Z_K , Ом	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi_K$	-	-	0,4	0,30	-	-	-	0,4	0,30	-	-
$\sin \varphi_K$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi_0$	-	-	-	0,3	-	0,13	-	-	0,12	-	0,13
$u_{K,a}$, %	-	-	-	1,95	-	-	-	-	1,95	-	-
$u_{K,p}$, %	-	-	-	6,2	-	-	-	-	6,2	-	-
r_K , Ом	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	5
x_K , Ом	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	12
$\Delta U_{НОМ}$, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Тип трансформатора	ТМ-25/10	ТМ-40/6	ТМ-63/10	ТМ-100/6	ТМ-160/10	ТМ-250/6	ТМ-40/10	ТМ-63/6	ТМ-100/10	ТМ-160/6	ТМ-250/10
$S_{НОМ}$, кВ·А	25	-	63	-	-	250	-	63	-	-	250
$U_{1НОМ}$, кВ	10	6	10	6	10	-	10	6	10	6	-
u_K , %	4,5	-	4,5	-	4,5	-	-	4,5	-	4,5	-
i_0 , %	3,2	-	4,5	2,6	2,4	3,2	-	4,5	2,6	2,4	3,0
P_0 , кВт	0,13	0,175	0,3	-	0,51	-	0,175	0,25	-	0,51	-
P_K , кВт	0,6	0,88	-	-	2,65	-	0,88	-	-	2,65	-
$I_{1НОМ}$, А	-	3,87	-	9,6	9,2	24	3,87	-	9,6	9,2	24
I_0 , А	-	0,115	0,16	-	-	-	0,115	0,16	-	-	-
U_K , кВ	-	0,28	0,45	-	-	0,4	0,28	0,45	-	-	0,3
Z_K , Ом	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi_K$	-	-	0,41	0,30	-	-	-	0,4	0,30	-	-
$\sin \varphi_K$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi_0$	-	-	-	0,12	-	0,13	-	-	0,11	-	0,13
$u_{K,a}$, %	-	-	-	1,95	-	-	-	-	1,95	-	-
$u_{K,p}$, %	-	-	-	6,2	-	-	-	-	6,2	-	-
r_K , Ом	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	5
x_K , Ом	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	12
$\Delta U_{НОМ}$, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Задача 4. В таблице 3.4 приведены технические данные трехфазных трансформаторов серии ТСЗ (трансформатор трехфазный сухой с заземленной первичной обмоткой, схема Y/Y). Используя эти данные, определить: коэффициент трансформации k ; номинальные значения токов первичной $I_{1НОМ}$ и вторичной $I_{2НОМ}$ обмоток; ток холостого хода $I_{0НОМ}$; напряжение короткого замыкания $U_{KНОМ}$; сопротивление короткого замыкания Z_K и его активную r_K и индуктивную x_K составляющие; номинальное изменение напряжения при значениях коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1; 0,8$ (инд.) и $0,8$ (емк.); номинальные и максимальные

значения КПД трансформатора при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1$ и $0,8$.

Решение варианта 1.

1. Коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{6}{0,23} = 26.$$

2. Номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}}} = \frac{160}{1,73 \cdot 6} = 15,4 \text{ А.}$$

3. Номинальный ток вторичной обмотки:

$$I_{2\text{НОМ}} = I_{1\text{НОМ}} \cdot k = 15,4 \cdot 26 = 400 \text{ А.}$$

4. Ток холостого хода:

$$I_0 = \frac{i_0}{100} \cdot I_{1\text{НОМ}} = \frac{4}{100} \cdot 15,4 = 0,6 \text{ А.}$$

5. Напряжение короткого замыкания:

$$U_K = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{6000}{1,73} = 190,6 \text{ В.}$$

6. Сопротивление короткого замыкания:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{1\text{НОМ}}} = \frac{190,6}{15,4} = 12,4 \text{ Ом.}$$

7. Коэффициент мощности короткого замыкания:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_{1\text{НОМ}} \cdot U_K} = \frac{2700}{3 \cdot 15,4 \cdot 190,6} = 0,3, \text{ тогда } \sin \varphi_K = 0,95.$$

8. Активная и реактивная составляющие сопротивления короткого замыкания:

$$r_K = Z_K \cdot \cos \varphi_K = 12,4 \cdot 0,3 = 3,7 \text{ Ом, } x_K = Z_K \cdot \sin \varphi_K = 12,4 \cdot 0,95 = 11,8 \text{ Ом.}$$

9. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания:

$$u_{K,a} = u_K \cdot \cos \varphi_K = 5,5 \cdot 0,3 = 1,65, \quad u_{K,p} = u_K \cdot \sin \varphi_K = 5,5 \cdot 0,95 = 5,2.$$

10. Изменение вторичного напряжения трансформатора при номинальной нагрузке ($\beta = 1$):

при коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1, \sin \varphi_2 = 0$

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = u_{\text{К.а}} \cdot \cos \varphi_2 + u_{\text{К.р}} \cdot \sin \varphi_2 = 1,65 \cdot 1 + 5,2 \cdot 0 = 1,65 \%$$

при коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,8$ (инд.), $\sin \varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = u_{\text{К.а}} \cdot \cos \varphi_2 + u_{\text{К.р}} \cdot \sin \varphi_2 = 1,65 \cdot 0,8 + 5,2 \cdot 0,6 = 4,4 \%$$

при коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,8$ (емк.), $\sin \varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = u_{\text{К.а}} \cdot \cos \varphi_2 + u_{\text{К.р}} \cdot \sin \varphi_2 = 1,65 \cdot 0,8 + 5,2 \cdot (-0,6) = -1,8 \%$$

Результаты расчета изменения вторичного напряжения трансформатора $\Delta U_{\text{НОМ}}$ при номинальной нагрузке ($\beta = 1$):

$\cos \varphi_2$	1,0	0,8 (инд.)	0,8 (емк.)
$\Delta U_{\text{НОМ}}, \%$	1,65	4,4	-1,8
$\Delta U_{\text{НОМ}}, \text{В}$	3,8	10,1	-3,9
$U_2 = U_{2\text{НОМ}} - \Delta U_{\text{НОМ}}, \text{В}$	226,2	219,9	233,9

11. КПД трансформатора при номинальной нагрузке $\beta = 1$) и коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 1$:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{Н}} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{К}}} = \frac{1 \cdot 160 \cdot 1}{1 \cdot 160 \cdot 1 + 0,7 + 1 \cdot 2,7} = 0,98,$$

при номинальной нагрузке и коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$

$$\eta = \frac{1 \cdot 160 \cdot 0,8}{1 \cdot 160 \cdot 0,8 + 0,7 + 1 \cdot 2,7} = 0,974.$$

12. Максимальный КПД:

при $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{Н}} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{\text{К}}} = \frac{0,51 \cdot 160 \cdot 1}{0,51 \cdot 160 \cdot 1 + 0,7 + 0,51^2 \cdot 2,7} = 0,983,$$

при $\cos \varphi_2 = 0,8$

$$\eta = \frac{0,51 \cdot 160 \cdot 0,8}{0,51 \cdot 160 \cdot 0,8 + 0,7 + 0,51^2 \cdot 2,7} = 0,979,$$

где коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному КПД

$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{К}}}} = \sqrt{\frac{0,7}{2,7}} = 0,51.$$

Таблица 3.4

Вариант	$S_{\text{НОМ}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	$U_{1\text{НОМ}}, \text{кВ}$	$U_{2\text{НОМ}}, \text{кВ}$	$P_0, \text{кВт}$	$P_{\text{К}}, \text{кВт}$	$u_{\text{К}}, \%$	$i_0, \%$
1	160	6	0,23	0,7	2,7	5,5	4,0
2	160	10	0,4	0,7	2,7	5,5	4,0
3	250	6	0,23	1,0	3,8	5,5	3,5
4	250	10	0,4	1,0	3,8	5,5	3,5
5	400	6	0,23	1,3	5,4	5,5	3,0
6	400	10	0,4	1,3	5,4	5,5	3,0
7	630	6	0,23	2,0	7,3	5,5	1,5

Продолжение таблицы 3.4

8	630	10	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5
9	1000	6	0,23	3,0	11,3	5,5	1,5
10	1000	10	0,4	3,0	11,3	5,5	1,5
11	1600	6	0,23	4,2	16,0	5,5	1,5
12	1600	10	0,4	4,2	16,0	5,5	1,5
13	160	6	0,4	0,7	2,7	5,5	4,0
14	160	10	0,23	0,7	2,7	5,5	4,0
15	250	6	0,4	1,0	3,8	5,5	3,5
16	250	10	0,23	1,0	3,8	5,5	3,5
17	400	6	0,4	1,3	5,4	5,5	3,0
18	400	10	0,23	1,3	5,4	5,5	3,0
19	630	6	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5
20	630	10	0,23	2,0	7,3	5,5	1,5
21	1000	6	0,4	3,0	11,3	5,5	1,5
22	1000	10	0,23	3,0	11,3	5,5	1,5
23	1600	6	0,4	4,2	16,0	5,5	1,5
24	1600	10	0,23	4,2	16,0	5,5	1,5
25	160	6	0,23	0,7	2,7	5,0	4,0
26	160	10	0,4	0,7	2,7	5,0	4,0
27	250	6	0,23	1,0	3,8	5,0	3,5
28	250	10	0,4	1,0	3,8	5,0	3,5
29	400	6	0,23	1,3	5,4	5,0	3,0
30	400	10	0,4	1,3	5,4	5,0	3,0
31	630	6	0,23	2,0	7,3	5,0	1,5
32	630	10	0,4	2,0	7,3	5,0	1,5
33	1000	6	0,23	3,0	11,3	5,0	1,5
34	1000	10	0,4	3,0	11,3	5,0	1,5
35	1600	6	0,23	4,2	16,0	5,0	1,5
36	1600	10	0,4	4,2	16,0	5,0	1,5
37	160	6	0,4	0,7	2,7	5,0	4,0
38	160	10	0,23	0,7	2,7	5,0	4,0
39	250	6	0,4	1,0	3,8	5,0	3,5
40	250	10	0,23	1,0	3,8	5,0	3,5
41	400	6	0,4	1,3	5,4	5,0	3,0
42	400	10	0,23	1,3	5,4	5,0	3,0
43	630	6	0,4	2,0	7,3	5,0	1,5
44	630	10	0,23	2,0	7,3	5,0	1,5

Задача 5. Однофазный понижающий автотрансформатор номинальной (проходной) мощностью $S_{\text{ном}}$ при номинальном первичном напряжении U_1 и номинальном вторичном напряжении U_2 имеет число витков в обмотке w_1 , из которых w_2 витков являются общими для первичной и вторичной цепей;

ЭДС, индуцируемая в одном витке обмотки трансформатора $E_{1\text{витка}}$ (табл. 3.5). При решении задачи током холостого хода пренебречь. Требуется определить параметры, значения которых в таблице не указаны.

Решение варианта 1.

1. Число витков в обмотке автотрансформатора:

$$w_1 = \frac{U_1}{E_{1\text{витка}}} = \frac{220}{0,85} = 259 \text{ витков.}$$

2. Вторичное напряжение:

$$U_2 = w_2 \cdot E_{1\text{витка}} = 120 \cdot 0,85 = 102 \text{ В.}$$

3. Коэффициент трансформации автотрансформатора:

$$k_A = \frac{w_1}{w_2} = \frac{259}{120} = 2,16$$

4. Номинальный ток в первичной цепи:

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = \frac{15000}{220} = 68 \text{ А.}$$

5. Номинальный ток во вторичной цепи:

$$I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{15000}{102} = 147 \text{ А.}$$

6. Ток в общей части витков обмотки:

$$I_{12} = I_{2\text{НОМ}} - I_{1\text{НОМ}} = 147 - 68 = 79 \text{ А.}$$

7. Мощность, передаваемая из первичной во вторичную цепь электрическим путем:

$$S_{\text{Э}} = U_2 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 102 \cdot 68 = 6936 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

Таким образом, электромагнитным путем передается лишь половина проходной мощности, а поэтому, по сравнению с двухобмоточным трансформатором номинальной мощностью 15 кВ·А, рассматриваемый автотрансформатор изготовлен из активных материалов, масса которых в два раза меньше, а, следовательно, и потери в нем также меньше в два раза.

Таблица 3.5

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$S_{\text{НОМ}}$, кВ·А	15	4	6	16	8	3	5	2,8	9	12	16
U_1 , В	220	-	380	-	220	-	220	-	380	-	-
U_2 , В	-	100	-	220	-	137	-	130	-	220	220

Продолжение таблицы 3.5

$E_{\text{витка}}, \text{В}$	0,85	-	1,73	-	0,9	0,85	-	0,85	-	1,1	-
$W_1, \text{ВИТКОВ}$	-	-	-	-	-	250	250	270	400	400	-
$W_2, \text{ВИТКОВ}$	120	133	200	240	130	-	-	-	-	-	230
k_A	-	2,5	-	2,5	-	-	2,3	-	2,3	-	2,5
$I_{\text{НОМ}}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I_{2\text{НОМ}}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I_{12}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$S_{\Sigma}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$S_{\text{НОМ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	15	4	6	16	8	3	5	2,8	9	12	16
$U_1, \text{В}$	220	-	380	-	220	-	220	-	380	-	-
$U_2, \text{В}$	-	110	-	220	-	127	-	140	-	220	220
$E_{\text{витка}}, \text{В}$	0,85	-	1,73	-	0,9	0,8	-	0,8	-	0,9	-
$W_1, \text{ВИТКОВ}$	-	-	-	-	-	250	250	270	400	400	-
$W_2, \text{ВИТКОВ}$	140	140	200	220	120	-	-	-	-	-	240
k_A	-	2,5	-	2,5	-	-	2,3	-	2,3	-	2,5
$I_{\text{НОМ}}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I_{2\text{НОМ}}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I_{12}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$S_{\Sigma}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$S_{\text{НОМ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	17	5	7	15	9	4	6	3	10	10	18
$U_1, \text{В}$	220	-	380	-	220	-	220	-	380	-	-
$U_2, \text{В}$	-	110	-	220	-	127	-	140	-	220	220
$E_{\text{витка}}, \text{В}$	0,85	-	1,73	-	0,9	0,85	-	0,85	-	1,0	-
$W_1, \text{ВИТКОВ}$	-	-	-	-	-	250	250	270	400	400	-
$W_2, \text{ВИТКОВ}$	130	130	210	240	130	-	-	-	-	-	240
k_A	-	2,5	-	2,5	-	-	2,3	-	2,3	-	2,5
$I_{\text{НОМ}}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I_{2\text{НОМ}}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I_{12}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$S_{\Sigma}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$S_{\text{НОМ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	15	4	6	16	8	3	5	2,8	9	12	16
$U_1, \text{В}$	220	-	380	-	220	-	220	-	380	-	-
$U_2, \text{В}$	-	110	-	220	-	127	-	140	-	220	220
$E_{\text{витка}}, \text{В}$	0,85	-	1,73	-	0,9	0,85	-	0,85	-	1,0	-
$W_1, \text{ВИТКОВ}$	-	-	-	-	-	250	250	270	400	400	-
$W_2, \text{ВИТКОВ}$	130	130	190	240	130	-	-	-	-	-	240
k_A	-	2,5	-	2,5	-	-	2,3	-	2,3	-	2,5
$I_{\text{НОМ}}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I_{2\text{НОМ}}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$I_{12}, \text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$S_{\Sigma}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Основные понятия, формулы

Характерным признаком синхронных машин является жесткая связь между частотой вращения ротора n_1 и частотой переменного тока в обмотке статора f_1

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}.$$

Другими словами, вращающееся магнитное поле статора и ротор синхронной машины вращаются синхронно, т. е. с одинаковой частотой.

По своей конструкции синхронные машины разделяются на явнополюсные и неявнополюсные. В явнополюсных синхронных машинах ротор имеет явно выраженные полюса, на которых располагают катушки обмотки возбуждения, питаемые постоянным током. Характерным признаком таких машин является различие магнитного сопротивления по продольной оси (по оси полюсов) и по поперечной оси (по оси, проходящей в межполюсном пространстве). Магнитное сопротивление потоку статора по продольной оси dd намного меньше магнитного сопротивления потоку статора по поперечной оси qq . В неявнополюсных синхронных машинах магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям одинаковы, поскольку воздушный зазор у этих машин по периметру статора одинаков.

Конструкция статора синхронной машины в принципе не отличается от статора асинхронной машины. В обмотке статора в процессе работы машины индуцируются ЭДС и протекают токи, которые создают магнитодвижущую силу (МДС), максимальное значение которой

$$F_1 = \frac{m_1 \cdot I_1 \cdot w_1 \cdot k_{OБ1}}{p}.$$

Эта МДС создает вращающееся магнитное поле, а в воздушном зазоре δ машины создается магнитная индукция, график распределения которой в пределах каждого полюсного деления τ зависит от конструкции ротора.

Для явнополюсной синхронной машины справедливо уравнение напряжений:

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_0 + \bar{E}_{1d} + \bar{E}_{1q} + \bar{E}_{\sigma 1} - \bar{I}_1 \cdot r_1,$$

где \bar{E}_0 – основная ЭДС синхронной машины, пропорциональная основному магнитному потоку синхронной машины Φ_0 ; \bar{E}_{1d} – ЭДС реакции якоря синхронной машины по продольной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по продольной оси F_{1d} ; \bar{E}_{1q} – ЭДС реакции якоря по поперечной оси,

пропорциональная МДС реакции якоря по поперечной оси F_{1q} ; $\bar{E}_{\sigma 1}$ – ЭДС рассеяния, обусловленная наличием магнитного потока рассеяния Φ_{σ} , величина этой ЭДС пропорциональна индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора x_1

$$\bar{E}_{\sigma 1} = -jI_1 \cdot r_1;$$

$\bar{I}_1 \cdot r_1$ – активное падение напряжения в фазной обмотке статора, обычно этой величиной при решении задач пренебрегают ввиду ее небольшого значения.

Для неявнополюсной синхронной машины уравнение напряжений имеет вид

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_0 + \bar{E}_C - \bar{I}_1 \cdot r_1,$$

Здесь

$$\bar{E}_C = \bar{E}_1 + \bar{E}_{\sigma 1},$$

где \bar{E}_1 – ЭДС реакции якоря неявнополюсной синхронной машины.

Рассмотренным уравнениям напряжений соответствуют векторные диаграммы напряжений. Эти диаграммы приходится строить для определения либо основной ЭДС машины E_0 , либо напряжения обмотки статора U_1 . Следует иметь в виду, что уравнения напряжений и соответствующие им векторные диаграммы не учитывают магнитного насыщения магнитопровода синхронной машины, которое, как известно, влияет на величину индуктивных сопротивлений, вызывая их уменьшение.

Учет этого насыщения представляет сложную задачу, поэтому при расчетах ЭДС и напряжений синхронных машин обычно пользуются практической диаграммой ЭДС, которая учитывает состояние насыщения магнитной системы, вызванное действием реакции якоря при нагрузке синхронной машины. При построении практической диаграммы ЭДС намагничивающую силу реакции якоря не разлагают на продольную и поперечную составляющие, поэтому эта диаграмма может быть применена как при расчетах явнополюсных, так и неявнополюсных машин.

При решении задач, связанных либо с синхронными генераторами, включенными параллельно с сетью, либо с синхронными двигателями, пользуются угловыми характеристиками синхронных машин, представляющими собой зависимость электромагнитного момента M от угла нагрузки θ . При этом следует помнить, что в явнополюсных синхронных машинах действуют два момента: основной $M_{ОСН}$ и реактивный M_P , а в неявнополюсных машинах – только основной момент

$$M_{ОСН} = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot E_0}{w_1 \cdot x_d} \sin \theta,$$

$$M_p = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot w_1} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

Угол нагрузки $\theta_{НОМ}$ соответствует номинальному моменту $M_{НОМ}$. Максимальный момент синхронной машины определяет перегрузочную способность синхронной машины, что имеет важное значение как для синхронных генераторов, работающих параллельно с сетью, так и для синхронных двигателей. В неявнополюсных синхронных машинах максимальный момент соответствует углу нагрузки $\theta = 90^\circ$, в явнополюсных машинах $\theta_{кр} < 90^\circ$ и обычно составляет $60 - 80^\circ$ в зависимости от соотношения основного и реактивного электромагнитных моментов этой машины.

Для расчета критического угла нагрузки, определяющего перегрузочную способность явнополюсных синхронных машин, можно воспользоваться выражением:

$$\cos \theta_{кр} = \sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta,$$

$$\beta = \frac{E_0}{4 \cdot U_1 \cdot \left(\frac{x_d}{x_q} - 1 \right)}.$$

При расчетах параметров синхронных машин применяют U-образные характеристики, представляющие собой зависимость тока статора I_1 от тока в обмотке возбуждения I_B при постоянной нагрузке P_2 . При этом изменение тока в цепи статора $\bar{I}_1 = \bar{I}_{1,a} + j\bar{I}_{1,p}$ происходит лишь за счет его реактивной составляющей $j\bar{I}_{1,p}$. Поэтому регулировка величины тока возбуждения I_B сопровождается одновременным изменением не только тока статора, но и коэффициента мощности $\cos \varphi$. Активная составляющая тока статора $I_{1,a}$ и при этом остается неизменной. Создавая режим перевозбуждения $I_B > I_{B0}$, вызывают опережение по фазе тока сети \bar{I}_C относительно напряжения U_1 , что способствует повышению коэффициента мощности в сети.

Энергетические характеристики в синхронной машине зависят от режима ее работы. Если машина работает в режиме генератора, то подводимая к генератору механическая мощность определяется вращающим моментом приводного двигателя M_1 и частотой вращения n_1

$$P_1 = 0,105 \cdot M_1 \cdot n_1.$$

Часть этой мощности расходуется на покрытие механических $\Delta P_{МЕХ}$, магнитных ΔP_M и добавочных ΔP_D потерь. Если возбуждение генератора происходит от возбудителя, приводимого во вращение от общего приводного

двигателя, то к перечисленным потерям добавляются еще и потери на возбуждение

$$\Delta P_B = \frac{U_B \cdot I_B}{\eta_B},$$

где U_B и I_B – напряжение и ток в цепи возбуждения; η_B – КПД возбудителя.

Оставшаяся после вычитания перечисленных потерь мощность представляет собой электромагнитную мощность генератора $P_{ЭМ}$, которая передается на статор генератора электромагнитным путем. Полезная мощность на выходе генератора P_2 меньше электромагнитной мощности на величину электрических потерь в обмотке статора

$$\Delta P_{Э1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1.$$

Суммарные потери синхронного генератора

$$\sum \Delta P = \Delta P_{МЭХ} + \Delta P_M + \Delta P_B + \Delta P_D + \Delta P_{Э1}.$$

Полезная мощность генератора

$$P_2 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1,$$

где S_2 – полная мощность на выходе генератора, В·А; $\cos \varphi_1$ – коэффициент мощности в цепи нагрузки генератора.

Если синхронная машина работает в режиме двигателя, то виды потерь остаются прежними, но электрическая мощность на входе двигателя

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1.$$

а мощность на выходе двигателя является механической

$$P_2 = 0,105 \cdot M_2 \cdot n_1.$$

Коэффициент полезного действия синхронной машины

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Задачи

Задача 1. Параметры трехфазного синхронного генератора приведены в таблице 4.1: номинальное (линейное) напряжение на выходе $U_{1НОМ}$ при частоте тока 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой», номинальный ток статора $I_{1НОМ}$, КПД генератора при номинальной нагрузке $\eta_{НОМ}$, число полюсов $2p$, мощность на входе генератора $P_{1НОМ}$, полезная мощность на выходе генератора $P_{НОМ}$, суммарные потери в режиме номинальной нагрузки $\Sigma \Delta P_{НОМ}$, полная номинальная мощность на выходе $S_{2НОМ}$, коэффициент мощности нагрузки, подключенной к генератору, $\cos \varphi$, вращающий момент

первичного двигателя при номинальной загрузке генератора $M_{1НОМ}$. Требуется определить параметры, значения которых в таблице не указаны.

Решение варианта 1.

1. Полезная мощность на выходе генератора

$$P_{НОМ} = S_{НОМ} \cdot \cos \varphi = 330 \cdot 0,9 = 297 \text{ кВт.}$$

2. Мощность на входе генератора

$$P_{1НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_{НОМ}} = \frac{297}{0,92} = 322,8 \text{ кВт.}$$

3. Суммарные потери

$$\sum \Delta P_{НОМ} = P_{1НОМ} - P_{НОМ} = 322,8 - 297 = 25,8 \text{ кВт.}$$

4. Ток статора в номинальном режиме

$$I_{1НОМ} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{1НОМ}} = \frac{330}{1,73 \cdot 6,3} = 30,2 \text{ А.}$$

5. Синхронная частота вращения при $2p = 6$ и частоте тока $f_1 = 50$ Гц;

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

6. Момент приводного двигателя, необходимый для вращения ротора генератора с синхронной частотой вращения в режиме номинальной нагрузки,

$$M_{1НОМ} = 9,55 \cdot \frac{P_{1НОМ}}{n_1} = 9,55 \cdot \frac{322800}{1000} = 3083 \text{ Н·м.}$$

Таблица 4.1

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$S_{НОМ}$, кВ·А	330	-	270	470	-	600	780	450	700	500	600
$U_{1НОМ}$, кВ	6,3	3,2	0,4	-	0,7	3,2	6,3	0,4	-	3,2	3,2
$\eta_{НОМ}$, %	92	-	-	91	90	93	-	90	93	92	95
$2p$	6	6	-	4	8	10	4	-	4	8	10
$P_{НОМ}$, кВт	-	-	230	-	-	-	667,4	369,5	-	-	-
$\sum \Delta P_{НОМ}$, кВт	-	27	18	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi$	0,9	-	0,85	0,9	-	0,92	-	-	0,92	0,85	0,92
$I_{1НОМ}$, А	-	72,2	-	43,1	190	-	-	-	64,2	-	-
$P_{1НОМ}$, кВт	-	340	-	-	190	-	717,6	-	-	-	-
$M_{1НОМ}$, Н·м	-	-	1579	-	-	-	-	3920,8	-	-	-

Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$S_{НОМ}$, кВ·А	330	-	270	470	-	600	780	450	700	500	600
$U_{IНОМ}$, кВ	6,3	3,2	0,4	-	0,7	3,2	6,3	0,4	-	3,2	3,2
$\eta_{НОМ}$, %	92	-	-	91	95	93	-	85	93	92	95
2р	6	8	-	6	10	12	6	-	6	10	12
$P_{НОМ}$, кВт	-	-	230	-	-	-	667,4	369,5	-	-	-
$\Sigma\Delta P_{НОМ}$, кВт	-	27	18	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi$	0,85	-	0,8	0,86	-	0,9	-	-	0,9	0,8	0,9
$I_{IНОМ}$, А	-	72,2	-	43,1	190	-	-	-	64,2	-	-
$P_{IНОМ}$, кВт	-	350	-	-	190	-	717,6	-	-	-	-
$M_{IНОМ}$, Н·м	-	-	1579	-	-	-	-	3920,8	-	-	-
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$S_{НОМ}$, кВ·А	330	-	270	470	-	600	780	450	700	500	600
$U_{IНОМ}$, кВ	6,3	3,2	0,4	-	0,7	3,2	6,3	0,4	-	3,2	3,2
$\eta_{НОМ}$, %	92	-	-	91	90	93	-	88	93	92	95
2р	6	8	-	6	10	12	6	-	6	10	12
$P_{НОМ}$, кВт	-	-	230	-	-	-	667,4	369,5	-	-	-
$\Sigma\Delta P_{НОМ}$, кВт	-	27	18	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi$	0,92	-	0,87	0,92	-	0,94	-	-	0,94	0,88	0,94
$I_{IНОМ}$, А	-	72,2	-	43,1	190	-	-	-	64,2	-	-
$P_{IНОМ}$, кВт	-	340	-	-	190	-	717,6	-	-	-	-
$M_{IНОМ}$, Н·м	-	-	1579	-	-	-	-	3920,8	-	-	-
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
$S_{НОМ}$, кВ·А	330	-	270	470	-	600	780	450	700	500	600
$U_{IНОМ}$, кВ	6,3	3,2	0,4	-	0,7	3,2	6,3	0,4	-	3,2	3,2
$\eta_{НОМ}$, %	92	-	-	91	90	93	-	91	93	92	95
2р	6	8	-	6	10	12	6	-	6	10	12
$P_{НОМ}$, кВт	-	-	230	-	-	-	667,4	369,5	-	-	-
$\Sigma\Delta P_{НОМ}$, кВт	-	27	18	-	-	-	-	-	-	-	-
$\cos \varphi$	0,9	-	0,85	0,9	-	0,92	-	-	0,92	0,85	0,92
$I_{IНОМ}$, А	-	72,2	-	43,1	190	-	-	-	64,2	-	-
$P_{IНОМ}$, кВт	-	340	-	-	190	-	717,6	-	-	-	-
$M_{IНОМ}$, Н·м	-	-	1579	-	-	-	-	3920,8	-	-	-

Задача 2. Трехфазный синхронный двигатель серии СДН2 имеет данные каталога (табл. 4.2): номинальная мощность $P_{НОМ}$, число полюсов 2р, КПД $\eta_{НОМ}$; кратности – пускового тока $I_{П}/I_{НОМ}$ ($K_{I.П}$), пускового момента $M_{Н}/M_{НОМ}$ ($K_{M.П}$), максимального синхронного момента $M_{МАХ}/M_{НОМ}$ ($K_{M.МАХ}$), асинхронного момента при скольжении $s = 5\%$ (момент входа в синхронизм) $M_{5\%}/M_{НОМ}$; соединение обмоток статора «звездой». Значения перечисленных величин приведены в таблице.

Определить: частоту вращения, номинальный и пусковой токи в цепи статора, номинальный, максимальный синхронный, пусковой моменты и

асинхронный момент входа в синхронизм (при $s = 5\%$). Напряжение питающей сети $U_C = 10$ кВ при частоте 50 Гц, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$.

Решение варианта 1.

1. Частота вращения

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{6} = 500 \text{ об/мин.}$$

2. Потребляемая двигателем мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{500}{0,937} = 534 \text{ кВт.}$$

3. Ток в цепи статора в режиме номинальной нагрузки

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi} = \frac{534}{1,73 \cdot 10 \cdot 0,8} = 38,6 \text{ А.}$$

4. Пусковой ток в цепи статора

$$I_{\text{П}} = I_{\text{НОМ}} \cdot K_{\text{I,П}} = 38,6 \cdot 5,2 = 200,5 \text{ А.}$$

5. Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}}{n_1} = 9,55 \cdot \frac{500000}{500} = 9550 \text{ Н·м.}$$

6. Максимальный (синхронный) момент

$$M_{\text{МАХ}} = M_{\text{НОМ}} \cdot K_{\text{МАХ.М}} = 9550 \cdot 1,9 = 18145 \text{ Н·м.}$$

7. Пусковой момент

$$M_{\text{П}} = M_{\text{НОМ}} \cdot K_{\text{П.М}} = 9550 \cdot 1,0 = 9550 \text{ Н·м.}$$

8. Момент входа в синхронизм (асинхронный момент при скольжении 5%)

$$M_{5\%} = M_{\text{НОМ}} \cdot \frac{M_{5\%}}{M_{\text{НОМ}}} = 9550 \cdot 1,3 = 12415 \text{ Н·м.}$$

Таблица 4.2

Вар.	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	2р	$\eta_{\text{НОМ}}$, %	$\frac{M_{\text{МАХ}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{5\%}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\text{П}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{I_{\text{П}}}{I_{\text{НОМ}}}$
1	500	12	93,7	1,9	1,3	1,0	5,2
2	630	12	94,2	1,9	1,3	1,0	5,1
3	800	12	94,3	1,9	1,1	1,0	4,7
4	1000	12	94,9	1,8	1,0	1,0	4,5

Продолжение таблицы 4.2

5	1250	12	95,3	1,9	1,2	1,1	5,2
6	2500	12	96,2	1,8	1,4	1,2	6,5
7	630	10	94,4	1,8	1,4	0,75	5,0
8	800	10	94,9	1,8	1,3	0,75	5,0
9	1250	10	95,5	1,9	1,2	1,1	5,4
10	1600	8	95,9	1,8	1,2	1,0	5,2
11	500	8	93,7	1,9	1,3	1,0	5,2
12	630	8	94,2	1,9	1,3	1,0	5,1
13	800	8	94,3	1,9	1,1	1,0	4,7
14	1000	8	94,9	1,8	1,0	1,0	4,5
15	1250	8	95,3	1,9	1,2	1,1	5,2
16	2500	8	96,2	1,8	1,4	1,2	6,5
17	630	8	94,4	1,8	1,4	0,75	5,0
18	800	8	94,9	1,8	1,3	0,75	5,0
19	1250	8	95,5	1,9	1,2	1,1	5,4
20	1600	8	95,9	1,8	1,2	1,0	5,2
21	500	12	93,7	1,9	1,3	1,0	5,1
22	630	12	94,2	1,9	1,3	1,0	4,7
23	800	12	94,3	1,9	1,1	1,0	4,5
24	1000	12	94,9	1,8	1,0	1,0	5,2
25	1250	12	95,3	1,9	1,2	1,1	6,5
26	2500	12	96,2	1,8	1,4	1,2	5,0
27	630	10	94,4	1,8	1,4	0,75	5,0
28	800	10	94,9	1,8	1,3	0,75	5,4
29	1250	10	95,5	1,9	1,2	1,1	5,2
30	1600	8	95,9	1,8	1,2	1,0	4,5
31	500	8	93,7	1,9	1,3	1,0	5,2
32	630	8	94,2	1,9	1,3	1,0	6,5
33	800	8	94,3	1,9	1,1	1,0	5,0
34	1000	8	94,9	1,8	1,0	1,0	5,0
35	1250	8	95,3	1,9	1,2	1,1	5,4
36	2500	8	96,2	1,8	1,4	1,2	5,2
37	630	8	94,4	1,8	1,4	0,75	5,1
38	800	8	94,9	1,8	1,3	0,75	4,7
39	1250	8	95,5	1,9	1,2	1,1	4,5
40	1600	8	95,9	1,8	1,2	1,0	5,2
41	2500	12	94,4	1,8	1,4	1,2	5,0
42	630	10	94,9	1,8	1,4	0,75	5,0
43	800	10	95,5	1,8	1,3	0,75	5,4
44	1250	10	95,9	1,9	1,2	1,1	5,2

Задача 3. В трехфазную сеть напряжением U_C включен потребитель Z мощностью S при коэффициенте мощности $\cos \varphi$. Определить мощность $Q_{СК}$ синхронного компенсатора, который следует подключить параллельно потребителю, чтобы коэффициент мощности в сети повысился до значения $\cos \varphi' = 0,95$. Насколько при этом уменьшатся потери энергии в сети, если величина этих потерь пропорциональна квадрату тока в этой сети.

Определить также, насколько придется увеличить мощность синхронного компенсатора, чтобы повысить коэффициент мощности сети до $\cos \varphi' = 1$. Значения заданных параметров приведены в таблице 4.3.

Решение варианта 1.

1. Ток нагрузки в сети

$$I_C = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_C} = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 6} = 154,1 \text{ А.}$$

2. Активная составляющая этого тока

$$I_{C,a} = I_C \cdot \cos \varphi = 154,1 \cdot 0,72 = 110,9 \text{ А.}$$

3. Реактивная мощность сети до подключения синхронного компенсатора

$$Q = S \cdot \sin \varphi = 1600 \cdot 0,69 = 1110,4 \text{ кВар.}$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0,72^2} = 0,69$$

4. Реактивная мощность сети после подключения синхронного компенсатора

$$Q' = S \cdot \sin \varphi' = 1600 \cdot 0,31 = 499,6 \text{ кВар.}$$

$$\sin \varphi' = \sqrt{1 - 0,95^2} = 0,31$$

5. Для повышения коэффициента мощности до $\cos \varphi' = 0,95$ требуется включение параллельно нагрузке Z синхронного компенсатора реактивной мощностью

$$Q_{СК} = Q - Q' = 1110,4 - 499,6 = 610,8 \text{ кВар.}$$

6. При включении синхронного компенсатора активная составляющая тока в сети не изменится ($I_{C,a} = 110,9 \text{ А}$), а реактивная составляющая тока в сети станет равной

$$I'_{C,p} = \frac{Q'}{\sqrt{3} \cdot U_C} = \frac{499,66}{\sqrt{3} \cdot 6} = 48,1 \text{ А.}$$

7. Ток в сети после подключения синхронного компенсатора

$$I'_C = \sqrt{I_{C,a}^2 + I_{C,p}^2} = \sqrt{110,9^2 + 48,1^2} = 121 \text{ А.}$$

8. Потери в сети после подключения синхронного компенсатора составят

$$\Delta P'_C = \left(\frac{I'_C}{I_C} \right)^2 \cdot 100 = \left(\frac{121}{154,1} \right)^2 \cdot 100 = 61,6 \%$$

от их значения до подключения синхронного компенсатора ΔP , т. е. потери в сети уменьшатся на 38,4 %.

9. При увеличении коэффициента мощности сети до $\cos \varphi' = 1$ требуемая для этого реактивная мощность синхронного компенсатора была бы равна всей реактивной мощности сети до подключения синхронного компенсатора (см. п. 3), т.е. $Q_{СК} = Q = 1110,4$ кВар. Следовательно, потребовался бы синхронный компенсатор мощностью в $(1110,4/610,8) = 1,82$ раза больше мощности СК, примененного в схеме повышения коэффициента мощности до $\cos \varphi'_1 = 0,95$. Это привело бы к росту капитальных затрат на создание рассматриваемой электрической установки и сделало бы нерентабельным применение синхронного компенсатора для повышения коэффициента мощности сети до единицы.

Таблица 4.3

Параметр	Варианты										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U_c , кВ	6	10	20	35	6	10	20	35	6	10	20
S , МВ·А	1,6	4,5	1,8	2,4	0,8	1,7	1,5	3,5	2,0	3,5	1,8
$\cos \varphi$	0,72	0,7	0,75	0,7	0,72	0,75	0,74	0,78	0,72	0,8	0,7
Параметр	Варианты										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
U_c , кВ	10	20	35	6	10	20	35	6	10	20	35
S , МВ·А	1,6	4,5	1,8	2,4	0,8	1,7	1,5	3,5	2,0	3,5	1,8
$\cos \varphi$	0,7	0,72	0,7	0,75	0,7	0,72	0,75	0,74	0,78	0,72	0,8
Параметр	Варианты										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
U_c , кВ	20	35	6	10	20	35	6	10	20	35	6
S , МВ·А	1,6	4,5	1,8	2,4	0,8	1,7	1,5	3,5	2,0	3,5	1,8
$\cos \varphi$	0,7	0,72	0,7	0,75	0,7	0,72	0,75	0,74	0,78	0,72	0,8
Параметр	Варианты										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
U_c , кВ	6	10	20	35	6	10	20	35	6	10	20
S , МВ·А	1,6	4,5	1,8	2,4	0,8	1,7	1,5	3,5	2,0	3,5	1,8
$\cos \varphi$	0,7	0,72	0,7	0,75	0,7	0,72	0,75	0,74	0,78	0,72	0,8

Приложения

Основные единицы СИ

Величина	Единица		
	наименование	обозначение	
		русское	международное
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
Сила электрического тока	ампер	А	A
Термодинамическая температура	кельвин	К	K
Количество вещества	моль	моль	mol
Сила света	кандела	кд	cd

Некоторые единицы механических, электрических и магнитных величин

Величина	Обозначение величины	Единица		Выражение производной единицы	
		наименование	обозначение	через другие единицы СИ	через основные единицы СИ
Частота	f	герц	Гц	-	с^{-1}
Сила	G	ньютон	Н	-	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Давление	p	паскаль	Па	$\text{Н}/\text{м}^2$	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	Q	джоуль	Дж	Н/м	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность: активная, реактивная, полная	P, Q, S	ватт, вольт-ампер реактивный, вольт-ампер	Вт, вар, В·А	Дж/с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Количество электричества, электрический заряд	q	кулон	Кл	А·с	$\text{с} \cdot \text{А}$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, электродвижущая сила (ЭДС)	U, φ, E	вольт	В	Вт/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
Электрическая емкость	C	фарада	Ф	Кл/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическое сопротивление: активное, реактивное, полное	r, x, z	ом	Ом	В/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическая проводимость	Y	сименс	См	А/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
Поток магнитной индукции	Φ	вебер	Вб	В·с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Магнитная индукция	B	тесла	Тл	$\text{Вб}/\text{м}^2$	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Индуктивность	L	генри	Гн	$\text{Вб}/\text{А}$	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$
Световой поток	Φ	люмен	лм	-	кд·ср
Освещенность	E	люкс	лк	-	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$
Момент силы, вращающий	M	ньютон-метр	Н·м	-	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$

или тормозящий момент					
Момент инерции, динамический момент	J	килограмм- метр в квадрате	кг·м ²	-	кг·м ²
Скорость поступательного движения	v	метр в секунду	м/с	-	м/с
Угловая скорость	ω	радиан в секунду	рад/с	-	рад/с
Частота вращения	n	оборот в минуту	об/мин	-	-
Удельное электрическое сопротивление	ρ	ом-метр	Ом·м	-	м ³ ·кг·с ⁻³ ·А ⁻²
Напряженность магнитного тока	H	ампер на метр	А/м	-	А/м
Магнитодвижущая сила (МДС)	F	ампер	А	-	А

Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименование

Приставка	Отношение к главной единице	Обозначение приставки		Приставка	Отношение к главной единице	Обозначение приставки	
		русское	международное			русское	международное
Атто	10 ⁻¹⁸	а	a	Деци	10 ⁻¹	д	d
Фемто	10 ⁻¹⁵	ф	f	Дека	10 ¹	да	da
Пико	10 ⁻¹²	п	p	Гекто	10 ²	г	h
Нано	10 ⁻⁹	н	n	Кило	10 ³	к	k
Микро	10 ⁻⁶	мк	μ	Мега	10 ⁶	М	M
Милли	10 ⁻³	м	m	Гига	10 ⁹	Г	G
Санتي	10 ⁻²	с	c	Тера	10 ¹²	Т	T

ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоров С. Г. Электрические машины: учебное пособие / С. Г. Прохоров, Р. А. Хуснутдинов. – Ростов на Дону: Феникс, 2012.-409 с.
2. Кацман М. М. Сборник задач по электрическим машинам. / М. М. Кацман. - М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 160 с.
3. Копылов И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. - М.: Логос, 2000. – 607 с.
4. Ванурин В. Н. Электрические машины. / В. Н. Ванурин. - М.: Колос, 1995. – 192 с.
4. Сукманов В. И. электрические машины и аппараты / В. И. Сукманов. - М.: Колос, 2001. – 296 с.
6. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. / Д. Э. Брускин и др.: М., Высшая школа, 1990. – 528 с.
7. Токарев Б. Ф. Электрические машины. / Б. Ф. Токарев - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.