

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Казанский государственный
энергетический университет**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ПРОГРАММА, МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Для студентов заочной формы обучения по специальности

140606.65 «Электрический транспорт»

**140610.65 «Электрооборудование и электрохозяйство
предприятий, организаций и учреждений»**

Казань 2010

УДК 621.313

ББК 31.261.2

P24

Электрические машины: Программа, методические указания и контрольные задания. Для студентов заочной формы обучения / Сост.: Ю.А. Рылов, Р.Б. Рыбаков, И.З. Гатиятов - Казань: Казан, гос. энерг. ун-т, 2010. - 40 с.

Приведены общие рекомендации по работе над дисциплиной, программа дисциплины, методические указания по изучению дисциплины.

Предназначены для студентов заочной формы обучения, обучающихся по специальности 140606.65 «Электрический транспорт» и 140610.65 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрические машины имеют чрезвычайно широкое распространение. Они применяются в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, в энергетике, на транспорте, в авиации, морском флоте, медицине, в быту и т.д. Нет ни одной отрасли промышленности, где бы ни находили применения электрические машины. Существует большое разнообразие электрических машин. Они различаются по принципу действия, мощности, частоте вращения. Размеры машин колеблются в широких пределах. Существуют машины, несколько штук которых могут поместиться в наперстке, а есть машины диаметром более 16 м.

Широкому распространению электрических машин способствуют их высокие энергетические показатели, удобство обслуживания и простота управления.

К электрическим машинам относят, в частности, трансформаторы. Строго говоря, трансформатор не является электрической машиной, так как в нем не происходит превращения одного вида энергии в другой, а электрическая энергия одного напряжения. Однако физические процессы, происходящие в трансформаторе, имеют много общего с процессами, происходящими во вращающихся электрических машинах. Аналогичны и уравнения, описывающие эти процессы. Поэтому теорию трансформаторов целесообразно рассматривать совместно с теорией электрических машин.

Асинхронные машины относятся к электрическим машинам переменного тока. Они почти исключительно используются в качестве электрических двигателей. Асинхронные генераторы переменного тока применяются относительно редко. Для этих целей служат более совершенные синхронные машины.

Мощность асинхронных машин колеблется в широких пределах – от долей ватта до многих тысяч киловатт.

Они впервые были предложены и конструктивно разработаны в 1889 г. выдающимся изобретателем, инженером и ученым Доливо-Добровольским М.О. Благодаря повышенной надежности в работе, простоте ухода и дешевизне трехфазные асинхронные машины получили широкое применение в современных силовых установках; их используют в качестве двигателей различных станков, насосно-компрессорных, кузнечно-прессовых, подъемно-транспортных и других машин и механизмов.

Все электрические генераторы переменного тока, установленные на тепловых и гидроэлектрических станциях, являются синхронными машинами. Синхронные машины применяются как двигатели в приводах большой мощности. На металлургических заводах, в шахтах, холодильниках они при-

водят в движение насосы, компрессоры, вентиляторы и другие механизмы, работающие с неизменной скоростью. Специальные синхронные двигатели малой мощности используются в устройствах, где требуется строгое постоянство скорости: электрочасы, автоматические самопишущие приборы, устройства программирования и т.п.

Генераторы и двигатели постоянного тока применяются в различных областях техники. Преимуществами двигателей постоянного тока перед двигателями переменного тока являются удобство регулирования в широких пределах скорости вращения и большой момент, развиваемый при пуске. Благодаря этому они применяются в качестве тяговых двигателей электровозов, троллейбусов, трамваев, а также крановых установок.

Приведем некоторые данные двигателей постоянного тока, применяемых на транспорте. Мощность двигателей трамвайных вагонов составляет 40-45 кВт, напряжение 550 В. Двигатели электропоездов пригородных железных дорог имеют мощность 150-200 кВт, напряжение 1500В, а двигатели электровозов 450 - 550 кВт, напряжение 3 кВ.

КПД машин постоянного тока зависит от их мощности. Например, при мощности 100 Вт КПД составляет 62 %, а при мощности 100 кВт - 94 %.

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»

Работа студентов над дисциплиной «Электрические машины» включает в себя следующие элементы: самостоятельное изучение разделов и тем дисциплины по учебникам и учебным пособиям с последующей самопроверкой; индивидуальные консультации; выполнение лабораторных работ; выполнение контрольной работы и курсового проекта; посещение лекций; сдача зачетов по лабораторным работам; защита контрольной работы; сдача экзамена по всему курсу.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА С ЛИТЕРАТУРОЙ

Изучение дисциплины следует начать с рассмотрения ее содержания по программе, затем приступить к рассмотрению отдельных тем. Вначале знакомятся с содержащимися в данной теме вопросами, их последовательностью, а затем уже приступают к изучению содержания темы. При первом чтении необходимо получить общее представление об излагаемых вопросах. При повторном чтении параллельно ведется конспект, в который заносятся все основные понятия, закономерности рассматриваемой темы, математические зависимости и их выводы; формулы и уравнения физических процессов, названия электрических аппаратов и впервые встретившиеся термины с краткими пояснениями

их сущности. По возможности, старайтесь систематизировать материал, представлять его в виде красочных графиков, схем, диаграмм, таблиц - это облегчает запоминание материала и позволяет легко восстановить его в памяти при повторном обращении. Не следует загромождать конспект отдельными фактами и цифрами, которые всегда можно отыскать в соответствующих справочниках. Необходимо вникать в сущность рассматриваемого вопроса, стараться понять физический смысл того или иного явления - это способствует более глубокому и прочному усвоению материала.

Переходить к изучению новой темы следует только после полного изучения теоретических вопросов и выполнения самопроверки по предыдущей теме.

САМОПРОВЕРКА

Закончив изучение темы, ответьте на вопросы для самопроверки, которые акцентируют внимание на наиболее важных вопросах темы. При этом старайтесь не пользоваться конспектом и учебной литературой. Частое обращение к конспекту говорит о недостаточном усвоении основных вопросов темы, а частое обращение к учебной литературе показывает неумение правильно конспектировать основные понятия и закономерности темы. Внесите коррективы в конспект - это впоследствии поможет при повторении материала в период подготовки к экзамену.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

В процессе изучения курса студент должен выполнить контрольную работу включающую расчетную и графическую части. Контрольная работа выполняется каждым студентом самостоятельно. Оформляется работа в соответствии с требованиями, предъявляемыми к работам данного вида. Методические указания к контрольной работе, рекомендуемая литература и таблица вариантов исходных данных для расчета приведены в методических указаниях. После выполнения и оформления контрольной работы студент обязан защитить ее в срок, установленный планом текущей и семестровой отчетности.

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

В процессе изучения курса студент должен выполнить курсовой проект, включающий расчетную и графическую части. Курсовой проект должен выполняться самостоятельно.

При выполнении курсового проекта необходимо выполнить расчет асинхронного двигателя. Затем оформить пояснительную записку с поясняющими схемами, характеристиками и таблицами, выполнить графическую

часть, а также привести список использованной в работе литературы. Вариант для выполнения курсового проекта выдается каждому студенту индивидуально.

КОНСУЛЬТАЦИИ

При возникновении затруднений при изучении теоретической части дисциплины или выполнении курсовой работы следует обращаться за письменной или устной консультацией в университет к преподавателю кафедры «Электрический транспорт». При этом необходимо точно указать вопрос, вызывающий затруднения, и место в учебнике или учебном пособии, где он рассматривается.

ЛЕКЦИИ

В период установочной или лабораторно-экзаменационной сессии студентам читаются лекции, в которых проводится обзор наиболее важных тем и разделов дисциплины, а также рассматриваются вопросы, недостаточно полно освещенные в учебной литературе, или вызывающие затруднения у большого числа студентов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Для более глубокого освоения материала дисциплины «Электрические машины» выполняется лабораторная работа по изучению свойств одного из видов электрических машин и снятию рабочих характеристик данных машин.

Лабораторные занятия включают:

-инструктаж по технике безопасности при работе в лабораториях электрических машин, а также по правилам проведения экспериментов;

-проверку знаний основных положений темы, по которой проводится лабораторная работа, оценку подготовленности студентов к проведению лабораторных работ; проведение экспериментов на лабораторных установках.

Важным этапом выполнения лабораторной работы является предварительная подготовка к занятию, которая заключается в изучении основных теоретических положений изучаемой темы, подготовке бланка отчета по лабораторной работе.

Обработку результатов эксперимента, их анализ и оформление отчетов по лабораторным работам студенты выполняют самостоятельно.

Перед началом выполнения лабораторных работ студенты проходят инструктаж по технике безопасности, о чем расписываются в специальном журнале.

После проведения лабораторных работ студенты оформляют бланк протокола по работе, где приведено описание и схема лабораторного стенда, таблицы экспериментальных и расчетных данных, объяснение экспериментально снятых характеристик электрических машин и ответы на контрольные вопросы методического описания к лабораторной работе.

ЗАЧЕТ

К сдаче зачета по дисциплине «Электрические машины» допускаются студенты, сдавшие все лабораторные работы и защитившие контрольную работу.

ЭКЗАМЕН

К сдаче экзамена по дисциплине «Электрические машины» допускаются студенты, сдавшие все лабораторные работы и защитившие курсовой проект. При сдаче экзамена необходимо показать знание предмета в объеме программы.

**ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ
ОПД.Ф.07 «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ» ПОДГОТОВКИ
ДИПЛОМИРОВАННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ
ЗАОЧНОГО ФАКУЛЬТЕТА КГЭУ**

**1. УЧЕБНЫЙ ПЛАН ПО ДИСЦИПЛИНЕ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОСТИ
140606.65 «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ»**

Семестры	Зачеты	Экзамены	Контрольная работа	Курсовой проект	Часы учебных занятий				
					Всего	Лекции	Практика	Лабораторные работы	Самостоятельная работа
6	1		1		81	8	0	4	69
7		1		1	89	12	0	8	69

**2. УЧЕБНЫЙ ПЛАН ПО ДИСЦИПЛИНЕ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОСТИ
140610.65 ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВО
ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И УЧРЕЖДЕНИЙ**

Семестры	Зачеты	Экзамены	Контрольная работа	Курсовой проект	Часы учебных занятий				
					Всего	Лекции	Практика	Лабораторные работы	Самостоятельная работа
6	1		1		83	8	0	4	71
7		1		1	87	12	0	4	71

3. САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ

6 СЕМЕСТР

Тема 1 Трансформатор

Общие вопросы электромеханического преобразования энергии. Физические законы, лежащие в основе работы электрических машин. Приведенный трансформатор. Определение параметров трансформатора по опытам холостого хода и короткого замыкания. Изменение напряжения при нагрузке, внешние характеристики и КПД трансформаторов. Параллельная работа трансформаторов. Несимметричная нагрузка, регулирование напряжения трансформатора. Переходные процессы в трансформаторах. Специальные трансформаторы.

Тема 2. Машины переменного тока. Асинхронные двигатели

Устройство асинхронных машин. Конструктивные исполнения и параметры электрических машин. Общая характеристика обмоток машин переменного тока. ЭДС в обмотках машин переменного тока. Электромагнитный момент асинхронной машины. Механическая характеристика. Пуск, устойчивость работы асинхронного двигателя. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками. Единые серии асинхронных двигателей. Специальные асинхронные машины

7 СЕМЕСТР

Выполнение курсового проекта.

Тема 3 Синхронные машины

Принцип действия и устройство синхронных машин. Системы возбуждения. Холостой ход синхронного генератора. Работа синхронного генератора в режиме нагрузки. Основные характеристики, эксплуатационные требования и тенденции развития.

Тема 4 Машины постоянного тока.

Устройство и принцип действия машин постоянного тока. Якорные обмотки машин постоянного тока. Уравнительные соединения. ЭДС обмотки якоря, электромагнитный момент. Реакция якоря. Компенсационная обмотка. Конструктивные исполнения, параметры и режимы работы двигателей и генераторов.

4. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИЙ 6 СЕМЕСТР

Раздел 1 Трансформаторы

Лекция 1. Холостой ход трансформатора.

Лекция 2. Работа трансформатора при нагрузке.

Раздел 2 Асинхронные машины.

Лекция 3. Принцип действия асинхронных машин. Работа асинхронной машины при холостом ходе и нагрузке.

Лекция 4. Приведение обмотки ротора к статору. Уравнения, векторная диаграмма, схемы замещения, энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

7 СЕМЕСТР

Раздел 3 Синхронные машины.

Лекция 5. Принцип действия и устройство синхронных машин. Системы возбуждения

Лекция 6. Холостой ход синхронного генератора.

Лекция 7. Работа синхронного генератора в режиме нагрузки.

Раздел 4 Машины постоянного тока.

Лекция 8. Устройство и принцип действия машин постоянного тока.

Лекция 9. Якорные обмотки машин постоянного тока. Уравнительные соединения.

Лекция 10. ЭДС обмотки якоря, электромагнитный момент. Реакция якоря. Компенсационная обмотка.

5. СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ.

№ л/р	Т Е М А	По какому разделу лекционного курса	Число часов
6 семестр			
1	Исследование однофазного трансформатора	1	4
7 семестр			
2	Исследование 3-х фазного синхронного генератора	3	4
3	Исследование двигателя параллельного возбуждения	4	4

6. ЛИТЕРАТУРА

ОСНОВНАЯ

1. В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. Электрические машины. – М.: издательский центр «Академия», 2006.
2. И.П. Копылов. Электрические машины. – М.: Энергия, 2006.
3. П.С. Вольдек. Электрические машины. – М.: Энергия, 2001.
4. Ю.А. Рылов, Р.Б. Рыбаков, И.З. Гатиятов. Методические указания по расчету трансформаторов.
5. Ю.А. Рылов, Р.Б. Рыбаков, И.З. Гатиятов. Расчет асинхронного двигателя. Методические указания к курсовому проекту по дисциплине «Электрические машины». – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

6. Б.Ф. Токарев. Электрические машины. – М.: Энергия, 1986.
7. Иванов-Смоленский. Электрические машины. - М.: Энергия, 1980
8. И.П. Копылов «Проектирование электрических машин» -М: Энергия, 2005

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

6 СЕМЕСТР

«РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА»

Задание на выполнение контрольной работы

Для трехфазного двухобмоточного трансформатора № из табл.1 или 2:

1. Определить фазные значения номинального напряжения, а также номинальный ток и его фазные значения на сторонах ВН и НН, и коэффициент трансформации (для средней ступени напряжения ВН).

2. Вычертить в масштабе эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток.

3. Определить:

а) потери холостого хода P_x , реактивную мощность Q_x , ток холостого хода i_0 и его активную i_{0a} и реактивную i_{0p} составляющие, а также $\cos\varphi_0$ – все величины для номинального значения фазного напряжения $U_{1\text{фном}}$ при $f = 50$ Гц;

б) приведенные к первичной обмотке параметры схемы замещения r_0 , x_0 и z_0 в омах при $U = U_{1\text{фном}}$;

в) рассчитать и построить характеристики холостого хода: $P_x = f(U_{1\text{ф}})$; $I_0 = f(U_{1\text{ф}})$ и $\cos\varphi_0 = f(U_{1\text{ф}})$, а также графики $I_{0a} = f(U_{1\text{ф}})$ и $I_{0p} = f(U_{1\text{ф}})$ для диапазона значений $U_{1\text{ф}}$ от 0 до 110% от $U_{1\text{фном}}$;

г) потери холостого хода трансформатора при включении в сеть с частотой 40 и 60 Гц.

4. Определить:

а) потери короткого замыкания P_k , напряжение короткого замыкания $U_k(\text{В})$ и $u_k \%$, а также его составляющие – активную u_{ka} , реактивную u_{kp} и $\cos\varphi_k$, сопротивление короткого замыкания и его составляющие r_k , x_k , z_k (Ом);

б) рассчитать и построить график изменения вторичного напряжения трансформатора $\Delta U = f(\varphi_2)$ при номинальном токе. Определить φ_2 , при котором ΔU принимает максимальное значение. Построить внешние характеристики

$$U_{2\phi} = f(I_{2\phi}) \text{ и график } \Delta U = f(I_{2\phi}) \text{ при } \cos\varphi_2 = 1 \text{ и } \cos\varphi_2 = 0,7.$$

5. Построить в масштабе приведенную векторную диаграмму:

а) для одной фазы трансформатора при нагрузке номинальным током и $\cos\varphi_2=0,8$;

б) то же при емкостной нагрузке $\cos(-\varphi_2) = 0,8$.

6. Рассчитать:

а) зависимости КПД от нагрузки $\eta = f(P_2)$ при $\cos\varphi_2 = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,7$.

Построить зависимости КПД от нагрузки при $\cos\varphi_2=1$ и $\cos\varphi_2=0,7$. Определить P_2 , при котором η приобретает максимальное значение.

7. Определить наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания (ударный ток) и кратность этого тока по отношению к номинальному току при трехфазном коротком замыкании.

Таблица 1

**Основные данные трехфазных двухобмоточных трансформаторов с естественным масляным охлаждением
с алюминиевыми (№ 1—21) и медными (№ 22*—24*) обмотками**

№ п/п	Общие данные				Обмотки								Магнитная система						Контрольные данные				
	Мощность S, кВА	Схемы и группа соедине- ний	Номиналь- ные напря- жения, В		Число витков		Сечение витков, мм ²		Внутрен- ний диа- метр об- мотки НН D ₁ , см	Радиальные размеры, см		Канал между обмотками ВН и НН a ₁₂ , см	Высота обмот- ки, l ₁ =l ₂ ,см	Диам- метр стерж- ня d, см	Активное сече- ние, см ²		Высота, см		Расстоя- ние меж- ду осями C, см	P _к , Вт	P _х , Вт	u _к , %	i ₀ , %
			ВН	НН	ВН	НН	ВН	НН		ВН a ₁	НН a ₂				стер- жень П _с	ярмо П _я	стер- жень h _с	ярмо h _я					
1	25	Y/Y-0	10000	400	3153	126	1.225	23.9	9.8	2.75	1.5	1.0	28.2	9.0	52.1	54.3	32	8.5	21.3	590	140	4.5	8
2	40	" "	" "	" "	2504	100	1.74	37.5	10.8	4.05	1.6	0.9	32.0	10.0	65.4	71.6	36	9.5	25	900	200	4.5	6.6
3	63	" "	" "	" "	2080	83	2.78	50.7	11.8	3.5	1.35	0.9	39.4	11.0	78.9	86.0	43.4	10.5	25.5	1320	270	4.5	5.5
4	100	" "	" "	" "	1745	70	3.46	95.7	12.8	3.25	2.35	0.9	48.0	12.0	95.1	99.3	52	11.5	27	2100	360	4.5	4.8
5	160	" "	" "	" "	1250	50	6.29	130.2	14.9	4.2	2.45	0.9	46.0	14.0	127.3	133.9	52	13.5	30.7	2740	580	4.5	4.7
6	250	" "	" "	" "	950	38	9.79	200.4	17.0	4.05	2.6	0.95	50.0	16.0	168.7	175.6	55.5	15.5	33	3820	800	4.5	4.1
7	400	" "	" "	" "	750	30	15.9	280.0	19.0	4.4	2.65	0.9	55.6	18.0	213.4	226.5	62	17	36	5650	1100	4.5	3.5
8	160	" "	35000	400	4375	50	2.22	138.2	15.4	5.2	1.6	3.0	56.0	14.0	125.6	130.7	71	13.5	37	2500	770	6.5	8.6
9	250	" "	" "	" "	3335	38	3.20	204.4	17.0	5.2	2.4	2.9	57.5	16.0	166.0	172.2	72.5	15.5	40	3540	840	6.5	5.1
10	400	" "	" "	" "	2631	30	5.43	259.8	19.0	5.7	2.2	3.1	65.0	18.0	210.8	217.1	80	17	43	5330	1050	6.5	4.2
11	630	" "	" "	" "	2105	24	8.45	593.0	24.1	5.7	2.65	3.1	79.0	20.0	263.7	276.8	94	19	49	6800	1750	6.5	3.8
12	1000	Y/Δ-11	10000	6300	425	464	34.9	27.9	27.2	4.1	3.4	2.0	68.0	24.0	371	371	78	23	48	11260	2840	5.5	2.8
13	1600	" "	" "	" "	375	409	58.6	54.6	29.0	4.25	4.0	2.0	96.5	26.0	428	433	107	25	52	16200	3780	5.5	2.6
14	2500	" "	" "	" "	268	292	78.9	78.9	33.5	4.4	4.1	2.0	89.5	30.0	588.3	597	100	29	56	23000	5280	5.5	2
15	4000	" "	" "	" "	214	234	134.6	125.8	37.5	5.45	5.15	2.1	97.0	34.0	736.3	744.3	108	33	65	33000	7360	6.5	1.8
16	6300	" "	" "	" "	170	186	219.0	174.9	41.5	6.1	5.4	2.45	115.0	38.0	927.8	945.8	126	37	71	46500	10350	6.5	1.6
17	1000	Y/Δ-11	35000	6300	1487	464	11.1	29.9	27.2	5.3	3.4	3.1	75.5	24.0	371	371	92	23	54	11000	3180	6.5	3
18	1600	" "	" "	" "	1312	409	16.3	57.9	29.0	4.45	3.85	3.1	101.5	26.0	428	433	118	25	55	16400	4200	6.5	2.8
19	2500	" "	" "	" "	937	292	23.8	74.1	33.7	4.9	3.5	3.25	95.5	30.0	588.3	588.3	113	29	60	23000	5900	6.5	2.2

20	4000	” ”	” ”	” ”	750	234	37.6	117.0	37.5	5.9	5.1	2.75	96.5	34.0	736.3	744.3	113	33	68	34200	7700	7.5	2
21	6300	Y/Δ-11	35000	6300	596	186	62.9	174.9	41.5	6.15	5.25	2.85	113.5	38.0	927.8	944	131	37	73	46800	10800	7.5	1.8
22	1000	Y/Y-0	10000	6300	433	273	19.0	40.5	27.2	3.75	3.2	2.1	68.0	24.0	371	371	78	23	48	11260	2700	5.5	2.8
23	1000	Y/Δ-11	38500	6300	1636	464	5.73	25.7	27.4	4.2	3.15	3.55	76.0	24.0	371	371	92	23	54	9640	3220	6.5	3
24	6300	Y/Δ-11	33000	6600	563	195	51.4	150.5	41.5	5.3	5.3	3.4	113.5	38.0	927.8	944	131	37	73	34900	11000	7.5	1.8

Таблица 2

**Основные данные трехфазных двухобмоточных трансформаторов с естественным воздушным охлаждением
с медными (№ 25*...31*) и алюминиевыми (№ 32...44) обмотками**

№ п/п	Общие данные				Обмотки								Магнитная система						Контрольные данные				
	Мощность S, кВА	Схемы и группа соединений	Номинальные напряжения, В		Число витков		Сечение витков, мм ²		Внутренний диаметр обмотки НН D ₁ , см	Радиальные размеры, см		Канал между обмотками ВН и НН a ₁₂ , см	Высота обмотки, l ₁ =l ₂ , см	Диаметр стержня d, см	Активное сечение, см ²		Высота, см		Расстояние между осями С, см	P _к , Вт	P _х , Вт	u _к , %	i ₀ , %
			ВН	НН	ВН	НН	ВН	НН		ВН a ₁	НН a ₂				стержень П _с	ярмо П _я	стержень h _с	ярмо h _я					
25	10	Y/Y-0	380	230	142	86	6.29	13.9	10.5	1.1	2.15	1.35	17.1	9.5	55	64.5	22	9	22	300	75	4.8	12
26	16	" "	" "	" "	129	78	10.6	19.4	10.5	1.2	2.2	1	26.9	9.5	53.5	62.4	32	9	22	480	110	4.10	10
27	25	" "	" "	" "	99	60	20.5	35.2	13	1.5	2.45	1	27.6	11	73.2	87.6	32	10.5	27	620	150	4	5.5
28	40	" "	" "	" "	73	44	32.4	58.3	14	1.6	2.3	1	29	12	91.5	111.5	34	11.5	28	740	230	3.2	7
29	63	" "	" "	" "	66	40	30.1	112.5	15	1.85	2.85	1	41.5	13	109.5	120.5	48	12.5	31	1330	300	3.7	4.7
30	100	" "	" "	" "	43	26	51.4	162	20.5	2.4	3.35	1.5	40.5	17.5	167	184	48	16.5	39	1860	530	4.1	5.2
31	160	" "	" "	" "	33	20	94.0	244.2	22.5	2.5	3.25	2.5	51	19.5	212	241.5	60	18.5	41	2400	800	4.3	4.8
32	10	" "	" "	" "	142	86	10.3	18.9	10.5	1.7	2.4	1	16.9	9.5	55	64.5	22	9	22	335	75	4.8	12
33	16	" "	" "	" "	129	78	16.3	32.4	10.5	1.6	2.6	1	26.8	9.5	55	64.5	32	9	22	530	110	4.6	10
34	25	" "	" "	" "	99	60	32.3	59.8	13	2	3.05	1	27.5	11	73.2	87.6	32	10.5	27	670	150	5.1	5.5
35	40	" "	" "	" "	73	44	47.2	103.5	14	2	3.4	1	29	12	91.5	111.5	34	11.5	28	750	230	4.1	7
36	63	" "	" "	" "	66	40	30	112	15	1.85	2.85	1	41.5	13	109.5	120.5	48	12.5	31	1330	300	3.7	4.7
37	100	" "	" "	" "	43	26	86.2	271.6	20.5	2.85	4.25	1.5	40.5	17.5	167	184	48	16.5	39	1960	530	4.8	5.2
38	160	" "	" "	" "	33	20	135.8	440	22.5	2.9	4.25	1.5	51	19.5	212	241.5	60	18.5	41	2640	800	4	4.8
39	160	Y/Δ-11	30000	230	1807	24	3.46	348.8	19	2.7	3.1	3.6	57.5	16	172	175	78	15	42	2600	830	5.5	5.2
40	250	" "	" "	" "	1430	19	5.85	585	21	2.7	3.3	3.9	73.5	18	221	223	89	17	45	3500	1050	5.5	4.3
41	400	" "	" "	400	1212	28	9.39	553.2	24	2.5	3.85	3.9	96.5	21	264	266	112	20	49	3300	1600	5.5	3.4

42	630	"	"	"	"	"	"	909	21	15	935	31	2.6	4.1	3.9	104.5	24	351	360	121	23	56	7200	2330	5.5	2.9
43	1000	"	"	"	"	"	"	693	16	20.6	1488	35	3.6	4.7	3.55	118.8	28	451	460	137	27	63	11100	3460	5.5	3.1
44	600	"	"	"	"	"	"	563	13	32.3	2690	38	3.3	5.4	3.6	145	31	563	573	164	30	67	15200	5000	5.5	2.5

Примечания:

1. $f=50$ Гц.
2. Обмотки ВН имеют пять ступеней напряжения: 95; 97,5; 100; 102,5; 105% от $U_{ном}$. Напряжения и числа витков обмотки ВН даны для средней ступени.
3. Магнитные системы собраны в переплет, с прямыми стыками из холоднокатаной стали марки 3413 – 0,35 мм.
4. Обмотки НН трансформаторов № 1...11, 22 и 25...38 соединены по схеме звезда с нулевым выводом.

Таблица 3

Удельные потери и удельная намагничивающая мощность для холоднокатаной электротехнической стали марки 3413 толщиной 0,35 мм

Индукция B , Тл	Удельные потери p , Вт/кг	Удельная намагничивающая мощность	
		для стали q , В·А/кг	для зазоров q_z , В·А/см ²
1,0	0,6	1,0	0,166
1,06	0,666	1,15	0,2
1,1	0,71	1,25	0,222
1,16	0,782	1,43	0,255
1,2	0,83	1,57	0,277
1,26	0,914	1,82	0,445
1,3	0,97	2,0	0,555
1,36	1,07	2,38	0,89
1,4	1,13	2,62	1,11
1,46	1,23	3,26	1,44
1,5	1,3	3,7	1,67
1,56	1,45	4,63	2,27
1,6	1,55	5,39	2,66
1,66	1,76	7,26	3,64
1,7	1,9	9,75	4,44
1,76	2,19	14,3	6,3
1,8	2,38	17,8	7,7

Методические указания

Перед выполнением расчетного задания рекомендуется просмотреть соответствующие разделы конспекта лекций и ознакомиться с литературой, указанной в методических указаниях. Во время выполнения задания при использовании справочных таблиц следует внимательно прочитать заголовки и все примечания к таблицам.

К пункту 1. При определении линейных и фазных значений напряжений и токов обмоток ВН и НН следует учесть схемы соединения обмоток, приведенные в табл.1 и 2.

В числителе указана схема соединения обмотки ВН, в знаменателе – обмотки НН. Все трансформаторы, данные которых приведены в табл. 1 и 2, - трехфазные.

К пункту 2. Эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток следует выполнить в масштабе в таком виде, как это показано на рис.1 с указанием вместо буквенных обозначений заданных размеров трансформатора. Масштаб рекомендуется выбирать таким, чтобы рисунок умещался на листе бумаги формата А4.

К пункту 3.

а) Рассчитать массу стали в трех стержнях и двух ярмах трехфазной магнитной системы, используя ее размеры из табл. 1 или 2 и принимая плотность холоднокатаной стали $\rho_{ст} = 7650 \text{ кг/м}^3$. Определить расчетную магнитную индукцию в стержнях B_c и в ярмах B_y отдельно, принимая ЭДС первичной обмотки, равной номинальному первичному напряжению (ВН). На практике принято рассчитывать потери холостого хода трансформатора, определяя их как произведение удельных потерь в единице массы, Вт/кг, зависящих

от расчетной частоты и индукции и качества стали, на массу стали соответствующей части магнитной системы. Потери рассчитываются отдельно для стержней и ярм и затем суммируются.

Добавочные потери, возникающие в магнитных системах из холоднокатаной текстурованной анизотропной стали вследствие несовпадения направления вектора магнитной индукции с направлением прокатки стали, неравномерного распределения индукции в стержнях и ярмах, а также вызванные механическими воздействиями в процессе заготовки пластин стали и сборки остова трансформатора, могут быть учтены постоянным коэффициентом $K_d=1,25$

Потери холостого хода

$$P_x = K_d \cdot (p_c G_c + p_y G_y),$$

где p_c и p_y — удельные потери в стали стержней и ярм, определенные по табл. 3 для соответствующих индукций в стержне B_c и в ярме B_y , Вт/кг; G_c и G_y — массы стали стержней и ярм, кг.

Для расчета тока холостого хода рассчитывается общая намагничивающая мощность магнитной системы.

Намагничивающая мощность магнитной системы (реактивная мощность х.х.)

$$Q_x = q_c G_c + q_y G_y + q_{зс} n_{зс} \Pi_c + q_{зя} n_{зя} \Pi_y$$

где $q_{зс}$ и $q_{зя}$ — удельные намагничивающие мощности для зазоров в стали стержней и ярм по табл. 3 для соответствующих значений индукции B_c и B_y , ВА/см².

$n_{зс} = 3$ и $n_{зя} = 4$ — число воздушных зазоров

Ток холостого хода:

активная составляющая, %

$$i_{0a} = \frac{P_x}{10 \cdot S}$$

реактивная составляющая, %

$$i_{0p} = \frac{Q_x}{10 \cdot S}$$

полный ток холостого хода

$$i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2}$$

где P_x измеряется в Вт, Q_x – ВАр; S – кВА.

Реальный ток холостого хода, А

$$I_{0a} = \frac{i_{0a} \cdot I_{1\text{фном}}}{100};$$

$$I_{0p} = \frac{i_{0p} \cdot I_{1\text{фном}}}{100};$$

$$I_0 = \frac{i_0 \cdot I_{1\text{фном}}}{100};$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток первичной обмотки (высшего напряжения)

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0a}}{I_0}$$

$$\sin \varphi_0 = \frac{I_{0p}}{I_0}$$

После определения потерь и тока холостого хода трансформатора следует полученные данные сравнить с контрольными. Результаты расчета не должны сильно отличаться от контрольных данных.

б) Параметры схемы замещения трансформатора рассчитываются по параметрам первичной обмотки (обмотки ВН) и получаются приведенными к этой обмотке

$$z_0 = \frac{U_{1\text{фном}}}{I_0};$$

$$r_0 = z_0 \cdot \cos \varphi_0;$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

г) Рассчитываются потери холостого хода при номинальном напряжении первичной обмотки (обмотки ВН) с учетом изменения индукции при изменении частоты. При этом

$$P_k = P_{x50} \cdot \left(\frac{B}{B_{50}}\right)^2 \left(\frac{f}{f_{50}}\right)^{1.5},$$

где P_{x50} , B_{50} и f_{50} — данные при частоте 50 Гц.

К пункту 4.

а) Рассчитать массу металла обмотки ВН и обмотки НН, используя размеры обмоток и их числа витков, приведенные в табл. 1 или 2, и эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток, выполненный по п. 2. Плотность металла обмоток меди $\rho_m=8900$ кг/м³, алюминия $\rho_a = 2700$ кг/м³. Потери короткого замыкания рассчитываются для каждой обмотки и затем суммируются

$$P_{\text{осн}} = P_{\text{осн1}} + P_{\text{осн2}}$$

Потери короткого замыкания трансформатора P_k определяются для обмоток, имеющих номинальную эксплуатационную температуру +75°C. При определении P_k учесть, что помимо основных (электрических) потерь в обмотках возникают добавочные потери. К потерям короткого замыкания относятся также потери в отводах (проводах) от обмоток к проходным изоляторам и переключающим устройствам, потери в стальных деталях крепления магнитной системы и в стенках бака, вызванные полем рассеяния обмоток и отводов. Все эти добавочные потери могут быть ориентировочно оценены средним коэффициентом по отношению к основным потерям, т. е.

$$P_k = P_{\text{осн}} \cdot k_{\text{доб}}$$

где $k_{\text{доб}}$ может быть принят для трехфазных трансформаторов мощностью до 100 кВА – 1,03; 160 – 630 кВА – 1,06; 1000 – 6300 кВА – 1,12.

Основные потери при +75°C:

в медных обмотках

$$P_{\text{осн.м}} = 2,4J^2 \cdot G_0; G_{0м} = 28 \cdot C \cdot D_{\text{ср}} \cdot w \cdot S_{\text{пр}} \cdot 10^{-5}$$

в алюминиевых обмотках

$$P_{\text{осн.а}} = 12,75J^2 \cdot G_0; G_{0а} = 8,47 \cdot C \cdot D_{\text{ср}} \cdot w \cdot S_{\text{пр}} \cdot 10^{-5}$$

где J – плотность тока в обмотке, А/мм²; G_0 – масса металла обмотки, кг.

При выводе выражения $P_{\text{осн}}$ приняты указанные выше плотности металла обмоток и удельные электрические сопротивления при +75°C: меди $p_m=0,02135$ мкОм·м и алюминия $p_a=0,0344$ мкОм·м.

б) Для определения напряжения короткого замыкания найти активную $u_{\text{ка}\%}$ и реактивную $u_{\text{кр}\%}$ составляющие напряжения короткого замыкания трансформатора $u_{\text{к}}$.

$$u_{\text{а}\%} = \frac{P_{\text{к}}}{10 \cdot S}, \%$$

$$u_{\text{р}\%} = \frac{7.92 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_{\text{р}} \cdot k_{\text{р}} \cdot 10^{-3}}{U_{\text{в}}'^2}, \%$$

где $U_{\text{в}}'$ – напряжение в одном витке $U_{\text{в}}' = \frac{U_{1\Phi}}{w_1}$, В

$S' = \frac{S}{c}$; кВА – мощность на один стержень

$$\beta = \frac{\pi \cdot d_{12}}{l}$$

$$d_{12} = D_1 + 2a_1 + a_{12}, \text{ см}$$

$$a_{\text{р}} = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \text{ см}$$

$$k_{\text{р}} = 0.95$$

$$u_{\text{к}\%} = \sqrt{u_{\text{а}\%}^2 + u_{\text{р}\%}^2}, \%$$

$$U_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{фном}} \cdot u_{\text{к}\%}}{100}, \text{ В}$$

$$U_{\text{ка}} = \frac{U_{1\text{фном}} \cdot u_{\text{ка}\%}}{100}, \text{ В}$$

$$U_{\text{кр}} = \frac{U_{1\text{фном}} \cdot u_{\text{кр}\%}}{100}, \text{ В}$$

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{к}}}{I_1}, \text{ Ом}$$

$$r_k = \frac{U_{ка}}{I_1}, \text{ Ом}$$

$$x_k = \frac{U_{кр}}{I_1}, \text{ Ом}$$

$$\cos\varphi_k = \frac{U_{ка}}{U_{кр}}$$

При расчете z_k , u_k и их составляющих пользоваться фазными значениями номинального напряжения и тока первичной обмотки (обмотки ВН)

Сравнить их с контрольными данными.

К пункту 5.

Записать уравнения для приведенного трансформатора. Нарисовать схему замещения. При построении диаграмм принять $x_1 = x_2' = x_k/2$ и $r_1 = r_2' = r_k/2$; $r_m \approx r_0$, $x_m \approx x_0$

К пункту 6.

а) КПД рассчитывается по применяемой для практических расчетов формуле

$$\eta = 1 - \frac{P + K_{нг}^2 \cdot P_k}{K_{нг} \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi_2 + P + K_{нг} \cdot P_k}$$

К пункту 7. Ударный ток короткого замыкания – наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания определяется по амплитудному значению тока короткого замыкания в соответствии с формулой

$$i_{км} = k_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{куст}$$

где

$$I_{куст} = I_{1ном} \cdot \frac{100}{u_k},$$

$k_{уд}$ – коэффициент, учитывающий аperiodическую составляющую тока

$$k_{уд} = \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot R_k}{\omega \cdot L_k}} \right)$$

$I_{куст}$ – установившийся ток короткого замыкания.

Указания к оформлению

1. Расчетное задание оформляется на листах писчей бумаги. Формат А4 – 297×210 мм.

2. В тексте необходимо приводить все использованные формулы. Полученные значения величин должны снабжаться соответствующими единицами измерения. При использовании табличного и справочного материала дать в тексте краткие пояснения.

3. Эскизы и графики оформляются на миллиметровой бумаге формата А4 в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД). Кривые выполнить по лекалу.

4. Расчетное задание брошюруется и снабжается титульным листом с указанием:

- а) названия расчетного задания;
- б) номера варианта и обозначение типа трансформатора;
- в) факультета и группы, фамилии и инициалов студента.

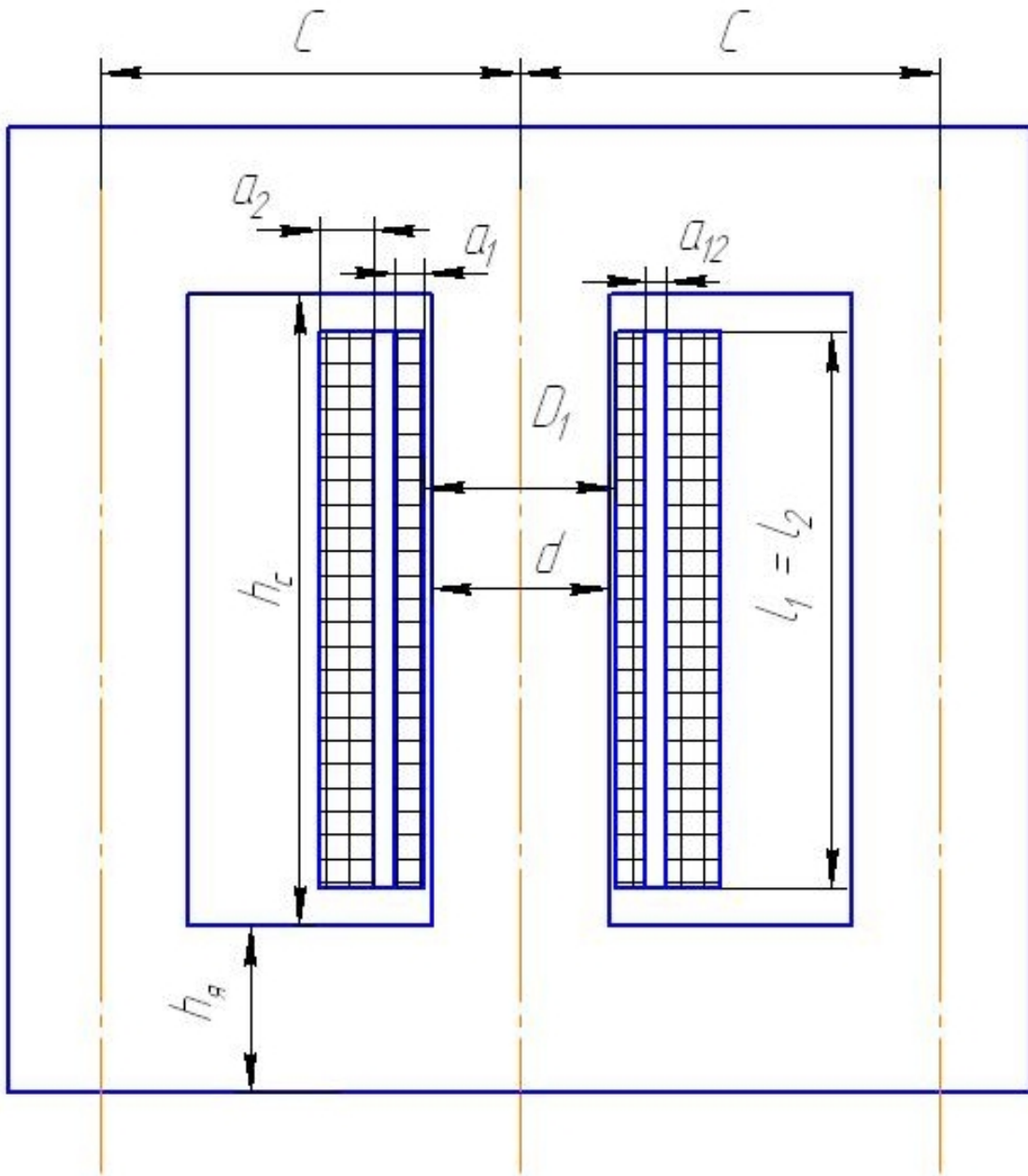


Рис. 1

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Исходные данные:

1. Обмотка алюминиевая.
2. Мощность $S = 25$ кВА
3. Схемы и группа соединений $Y/Y-0$
4. Номинальные напряжения, В:

$$\text{ВН} \quad U_{1\text{НОМ}} = 10000$$

$$\text{НН} \quad U_{2\text{НОМ}} = 400$$

5. Обмотки:

Число витков:

$$\text{ВН} \quad w_1 = 3153$$

$$\text{НН} \quad w_2 = 126$$

Сечение витков, мм^2 :

$$\text{ВН} \quad S_{\text{пр1}} = 1.225 \text{ мм}^2$$

$$\text{НН} \quad S_{\text{пр2}} = 23.9 \text{ мм}^2$$

Внутренний диаметр обмотки НН $D_1 = 9.8$ см

Радиальные размеры, см:

$$\text{ВН} \quad a_1 = 2.75 \text{ см}$$

$$\text{НН} \quad a_2 = 1.5 \text{ см}$$

Канал между обмотками ВН и НН $a_{12} = 1.0$ см

Высота обмотки, $l_1=l_2$, см $l_1 = 28.2$ см

6. Магнитная система

Диаметр стержня d , см $d = 9.0$ см

Активное сечение, см^2

стержень $\Pi_c = 52.1 \text{ см}^2$

ярмо $\Pi_я = 54.3 \text{ см}^2$

Высота, см

стержень $h_c = 32$ см

ярмо $h_{я} = 8.5$ см

Расстояние между осями $C = 21.3$ см

7. Контрольные данные

$$P_k = 590 \text{ Вт} \quad P_x = 140 \text{ Вт}$$

$$u_k = 4.5\% \quad i_0 = 8\%$$

1. Фазные значения номинального напряжения, а также номинальный ток и его фазные значения на сторонах ВН и НН, и коэффициент трансформации (для средней ступени напряжения ВН).

Фазные значения номинального напряжения (при соединении Y/Y)

$$U_{1\phi\text{ном}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5773 \text{ В}$$

$$U_{2\phi\text{ном}} = \frac{U_{2\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ В}$$

Номинальные и фазные значения токов

$$I_{1\text{ном}} = I_{1\phi} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 1.44 \text{ А}$$

$$I_{2\text{ном}} = I_{2\phi} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 36.1 \text{ А}$$

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{w_1}{w_2} = 25$$

2. Эскиз магнитной системы и размещение на ней обмоток представлены на рис. 2.

3. Потери холостого хода P_x , реактивная мощность Q_x , ток холостого хода i_0 и его активная i_{0a} и реактивная i_{0p} составляющие, а также $\cos\varphi_0$ – все величины для номинального значения фазного напряжения $U_{1\phi\text{ном}}$ при $f = 50$ Гц; потери холостого хода P_x :

$$P_x = K_d \cdot (p_c G_c + p_{я} G_{я}) = 1.25 \cdot (1.55 \cdot 38.3 + 1.3 \cdot 42.9) = 144 \text{ Вт}$$

где $K_d = 1.25$

Удельные потери в стали стержней и ярм, определенные по табл. 3

$$p_c = 1.55 \text{ Вт/кг} \quad p_{\text{я}} = 1.3 \text{ Вт/кг}$$

Индукции в стержнях и ярмах

$$B_c = \frac{U_{1\text{фном}} \cdot 10^4}{4.44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Pi_c} = \frac{5773 \cdot 10^4}{4.44 \cdot 50 \cdot 3153 \cdot 52.1} = 1.58 \text{ Тл};$$

$$B_{\text{я}} = \frac{U_{1\text{фном}} \cdot 10^4}{4.44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Pi_{\text{я}}} = \frac{5773 \cdot 10^4}{4.44 \cdot 50 \cdot 3153_1 \cdot 54.3} = 1.52 \text{ Тл.}$$

Массы стали стержней и ярм:

$$G_c = 3h_c \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot \Pi_c = 3 \cdot 32 \cdot 52.1 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 38.3 \text{ кг}$$

$$G_{\text{я}} = 2 \cdot l_{\text{я}} \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot \Pi_{\text{я}} = 2 \cdot 51.6 \cdot 54.3 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 42.9 \text{ кг}$$

$$l_{\text{я}} = 2 \cdot c + d = 2 \cdot 21.3 + 9 = 51.6 \text{ см}$$

Плотность холоднокатаной стали $\rho_{\text{ст}} = 7650 \text{ кг/м}^3$

Намагничивающая мощность магнитной системы (реактивная мощность х.х.)

$$Q_x = q_c G_c + q_{\text{я}} G_{\text{я}} + q_{\text{зс}} n_{\text{зс}} \Pi_c + q_{\text{зя}} n_{\text{зя}} \Pi_{\text{я}}$$

По таблице 3 выбираем значения q_c и $q_{\text{я}}$, $q_{\text{зс}}$ и $q_{\text{зя}}$

$$q_c = 5.39 \text{ В} \cdot \text{А/кг} \quad q_{\text{зс}} = 2.66 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$$

$$q_{\text{я}} = 3.7 \text{ В} \cdot \text{А/кг} \quad q_{\text{зя}} = 1.67 \cdot \text{В} \cdot \text{А/см}^2$$

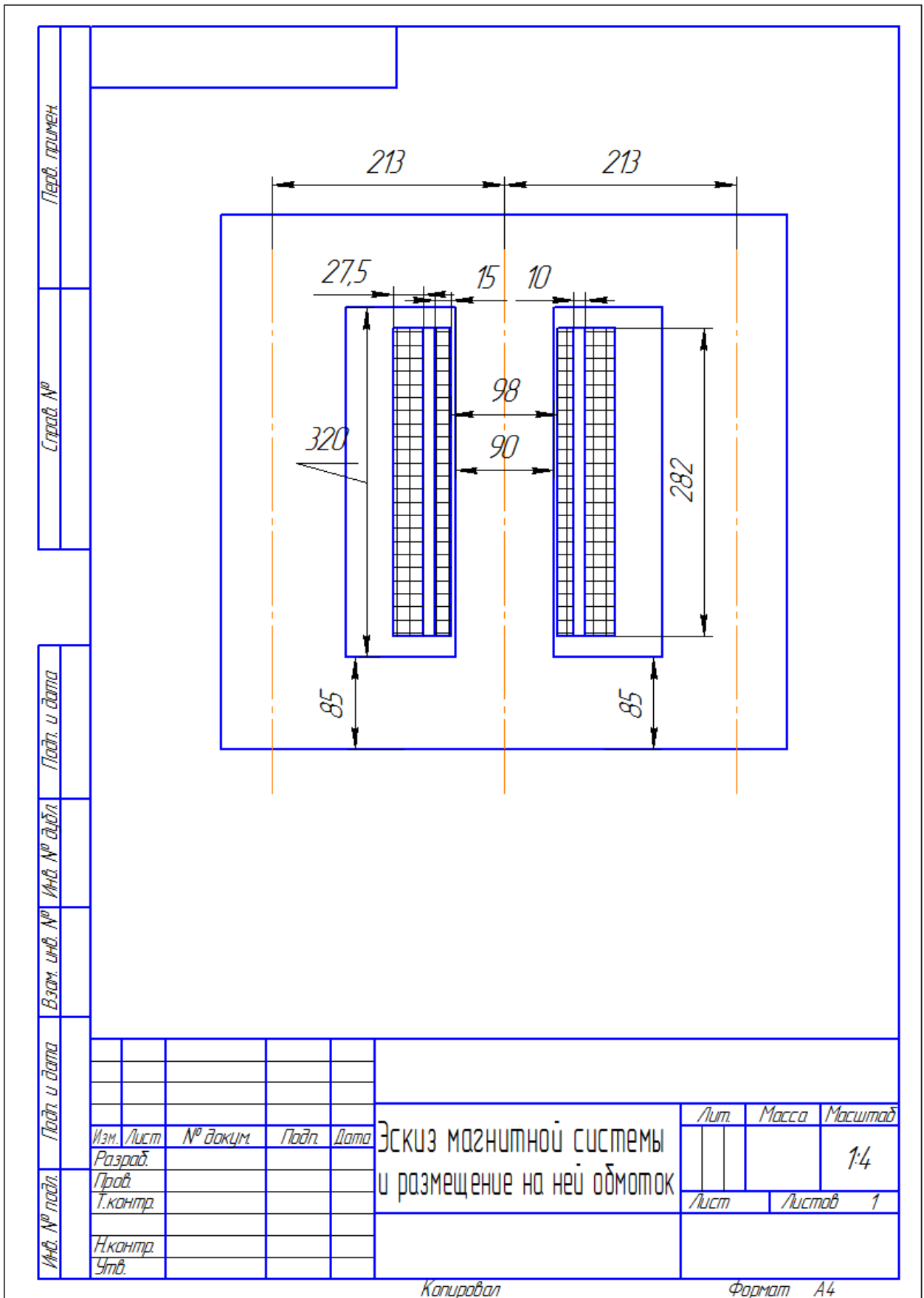


Рис. 2 Эскиз магнитной системы и размещение на ней обмоток

$$Q_x = 5.39 \cdot 38.3 + 3.7 \cdot 42.9 + 2.66 \cdot 3 \cdot 52.1 + 1.67 \cdot 4 \cdot 54.3 = 1144 \text{ ВАр}$$

Ток холостого хода:

активная составляющая, %

$$i_{0a} = \frac{P_x}{10 \cdot S} = \frac{144}{10 \cdot 25} = 0.58\%;$$

реактивная составляющая, %

$$i_{0p} = \frac{Q_x}{10 \cdot S} = \frac{1144}{10 \cdot 25} = 4.5\%;$$

полный ток холостого хода

$$i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2} = \sqrt{0.58^2 + 4.5^2} = 4.6 \%$$

реальный ток холостого хода, А

$$I_{0a} = \frac{i_{0a} \cdot I_{1\text{фном}}}{100} = \frac{0.58 \cdot 1.44}{100} = 0.0084 \text{ А};$$

$$I_{0p} = \frac{i_{0p} \cdot I_{1\text{фном}}}{100} = \frac{4.5 \cdot 1.44}{100} = 0.065 \text{ А};$$

$$I_0 = \frac{i_0 \cdot I_{1\text{фном}}}{100} = \frac{4.6 \cdot 1.44}{100} = 0.066 \text{ А}$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{I_{0a}}{I_0} = \frac{0.0084}{0.066} = 0.13$$

$$\sin\varphi_0 = \frac{I_{0p}}{I_0} = \frac{0.065}{0.066} = 0.985$$

Полученные данные сравниваем с контрольными

Контрольные данные	Результаты вычислений
$P_x = 140 \text{ Вт}$	144
$i_0 = 8 \%$	4,6

б) параметры схемы замещения

$$z_0 = \frac{U_{1\phi_{\text{ном}}}}{I_0} = \frac{5773}{0.066} = 87.5 \text{ кОм};$$

$$r_0 = z_0 \cdot \cos\varphi_0 = 87.5 \cdot 0.13 = 11.4 \text{ кОм};$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{87.5^2 - 11.4^2} = 86.8 \text{ кОм}.$$

в) Характеристики холостого хода: $P_x = f(U)$, $I_0 = f(U)$, $I_{0p} = f(U)$, $I_{0a} = f(U)$, $\cos\varphi_0 = f(U)$, рассчитываем изменяя напряжение от 0,5 до 1,1 от номинального фазного напряжения $U_{1\phi_{\text{ном}}}$ Данные расчета сводим в таблицу

n	$U_{1\phi}, \text{В}$	$P_x, \text{Вт}$	$Q_x, \text{ВАр}$	$I_{0a}, \text{А}$	$I_{0p}, \text{А}$	$I_0, \text{А}$	$\cos\varphi_0$
0.5	2887	61	143	0.0035	0.0081	0.0088	0.4
0.7	4041	70	175	0.004	0.01	0.0108	0.37
0.8	4618	88	267	0.005	0.0156	0.0164	0.30
0.9	5196	112	569	0.0064	0.033	0.0336	0.19
1.0	5773	144	1144	0.0084	0.065	0.066	0.13
1.1	6350	195	2467	0.011	0.142	0.1424	0.08

По данным таблицы строим характеристики холостого хода

г) Потери холостого хода при номинальном фазном напряжении первичной обмотки (обмотки ВН) с учетом изменения индукции при изменении частоты. При этом

$$P_x = P_{x50} \cdot \left(\frac{B}{B_{50}}\right)^2 \left(\frac{f}{f_{50}}\right)^{1.5},$$

где P_{x50} , B_{50} и f_{50} — данные при частоте 50 Гц.

Индукция при частоте 40 и 60 Гц

$$B_{c40} = \frac{U_{1\phi_{\text{ном}}} \cdot 10^4}{4.44 \cdot f_{40} \cdot W_1 \cdot \Pi_r} = \frac{5773 \cdot 10^4}{4.44 \cdot 40 \cdot 3153 \cdot 52.1} = 1.98 \text{ Тл};$$

$$B_{c60} = \frac{U_{1\phi_{\text{ном}}} \cdot 10^4}{4.44 \cdot f_{60} \cdot W_1 \cdot \Pi_r} = \frac{5773 \cdot 10^4}{4.44 \cdot 60 \cdot 3153 \cdot 52.1} = 1.32 \text{ Тл};$$

Потери холостого хода:

$$P_{x40} = 144 \cdot \left(\frac{1.98}{1.58}\right)^2 \left(\frac{40}{50}\right)^{1.5} = 163 \text{ Вт};$$

$$P_{x60} = 144 \cdot \left(\frac{1.32}{1.58}\right)^2 \left(\frac{60}{50}\right)^{1.5} = 111 \text{ Вт}.$$

4. а) Потери короткого замыкания P_K , напряжение короткого замыкания $u_K\%$ и $U_K(\text{В})$, а также его составляющие – активная $u_{ка}$, реактивная $u_{кр}$ и $\cos\varphi_K$, сопротивление короткого замыкания z_K и его составляющие $r_K, x_K, (\text{Ом})$;

Потери короткого замыкания рассчитываются для каждой обмотки и затем суммируются:

$$\begin{aligned} P_{\text{осн}} &= P_{\text{осн1}} + P_{\text{осн2}} = 265.8 + 401.4 = 667.2 \text{ Вт} \\ P_{\text{осн1}} &= 12.75 J_1^2 \cdot G_{01} = 12.75 \cdot 1.2^2 \cdot 15 = 265.8 \text{ Вт} \\ P_{\text{осн2}} &= 12.75 J_2^2 \cdot G_{02} = 12.75 \cdot 1.5^2 \cdot 13.8 = 401.4 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Плотность тока в обмотках

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{I_{1\text{ном}}}{S_{\text{пр1}}} = \frac{1.44}{1.225} = 1.2 \text{ А/мм}^2; \\ J_2 &= \frac{I_{2\text{ном}}}{S_{\text{пр2}}} = \frac{36.1}{23.9} = 1.5 \text{ А/мм}^2; \end{aligned}$$

Масса обмоток (обмотки алюминиевые)

$$\begin{aligned} G_{01} &= 8.47 \cdot C \cdot D_{\text{ср1}} \cdot w_1 \cdot S_{\text{пр1}} \cdot 10^{-5} = 8.47 \cdot 3 \cdot 15.3 \cdot 3153 \cdot 1.225 \cdot 10^{-5} \\ &= 15 \text{ кг} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{02} &= 8.47 \cdot C \cdot D_{\text{ср2}} \cdot w_2 \cdot S_{\text{пр2}} \cdot 10^{-5} = 8.47 \cdot 3 \cdot 18.05 \cdot 126 \cdot 23.9 \cdot 10^{-5} \\ &= 13.8 \text{ кг} \end{aligned}$$

$C = 3$ – число стержней сердечника;

$$D_{\text{ср1}} = D_1 + 2a_1 = 9.8 + 2 \cdot 2.75 = 15.3 \text{ см}$$

$$D_{\text{ср2}} = D_1 + 2a_1 + 2a_{12} + \frac{a_2}{2} = 9.8 + 2 \cdot 2.75 + 2 \cdot 1 + \frac{1.5}{2} = 18.05 \text{ см}$$

Потери короткого замыкания трансформатора

$$P_K = P_{\text{осн}} \cdot k_{\text{доб}} = 667.2 \cdot 1.03 = 687.4 \text{ Вт};$$

где $k_{\text{доб}} = 1.03$

Напряжение короткого замыкания $u_K\%$ и $U_K(\text{В})$, а также его составляющие – активная $u_{ка\%}$, реактивная $u_{кр\%}$ и $\cos\varphi_K$, сопротивление короткого замыкания z_K и его составляющие $r_K, x_K, (\text{Ом})$;

$$\begin{aligned} u_{a\%} &= \frac{P_K}{10 \cdot S} = \frac{687.7}{10 \cdot 25} = 2.7\%; \\ u_{p\%} &= \frac{7.92 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p \cdot 10^{-3}}{U'_B{}^2} = \\ &= \frac{7.92 \cdot 50 \cdot 8.3 \cdot 1.82 \cdot 2.42 \cdot 0.95 \cdot 10^{-3}}{1.8^2} = 4.1\%; \end{aligned}$$

$$\text{где } U'_B \text{ - напряжение в одном витке } U'_B = \frac{U_{1\Phi}}{w_1} = \frac{5773}{3153} = 1.8$$

$$S' = \frac{S}{C} = \frac{25}{3} = 8.3; \text{ кВА - мощность на один стержень}$$

$$\beta = \frac{\pi \cdot d_{12}}{l} = \frac{\pi \cdot 16.8}{28.2} = 1.82$$

$$d_{12} = D_1 + 2a_1 + a_{12} = 9.2 + 2 \cdot 2.75 + 1.5 = 16.8 \text{ см}$$

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 1 + \frac{2.75 + 1.5}{3} = 2.42 \text{ см}$$

$$k_p = 0.95$$

$$u_{к\%} = \sqrt{u_{а\%}^2 + u_{р\%}^2} = \sqrt{2.7^2 + 4.1^2} = 4.9\%$$

$$U_{к} = \frac{U_{1\text{фном}} \cdot u_{к\%}}{100} = \frac{5773 \cdot 4.9}{100} = 283 \text{ В}$$

$$U_{ка} = \frac{U_{1\text{фном}} \cdot u_{ка\%}}{100} = 5773 \cdot \frac{2.7}{100} = 156 \text{ В}$$

$$U_{кр} = \frac{U_{1\text{фном}} \cdot u_{кр\%}}{100} = 5773 \cdot \frac{4.1}{100} = 237 \text{ В}$$

$$z_{к} = \frac{U_{к}}{I_1} = \frac{283}{1.44} = 197 \text{ Ом}$$

$$r_{к} = \frac{U_{ка}}{I_1} = \frac{156}{1.44} = 108 \text{ Ом}$$

$$x_{к} = \frac{U_{кр}}{I_1} = \frac{237}{1.44} = 165 \text{ Ом}$$

$$\cos\varphi_{к} = \frac{U_{ка}}{U_{кр}} = \frac{156}{273} = 0.55$$

Контрольные данные	Результаты вычислений
$P_{к} = 590 \text{ Вт}$	$P_{к} = 687.7 \text{ Вт}$
$u_{к\%} = 4.5 \%$	$u_{к\%} = 4.9 \%$

б) Изменение вторичного напряжения $\Delta U = f(\varphi_2)$ при номинальном токе ($K_{н\tau} = 1$)

$$\Delta U = U_{ка} \cdot \cos\varphi_2 + U_{кр} \cdot \sin\varphi_2 = 156 \cdot \cos\varphi_2 + 237 \cdot \sin\varphi_2$$

Результаты расчетов сводим в таблицу

φ_2	-90	-60	-45	-30	0	30	45	60	90
$\Delta U, \text{В}$	-237	-127	-58	16,5	156	254	278	283	237

Максимальное изменение напряжения при $\varphi_2 = \varphi_{к}$

$$\varphi_{к} = 57^\circ; \Delta U_{max} = 156 \cdot \cos 57^\circ + 237 \sin 57^\circ = 284, \text{ В}$$

По данным таблицы смотрим зависимость $\Delta U = f(\varphi_2)$

Внешняя характеристика $U_{2\phi} = f(I_{2\phi})$ при $\cos\varphi_2 = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0.7$.

Величину вторичного напряжения определим по формуле

$$U_{2\phi} = \frac{U_{1\phi_{ном}} - \Delta U}{K} = \frac{5773 - \Delta U}{25}$$

где

$$\Delta U = K_{нг} (U_{ка} \cdot \cos\varphi_2 + U_{кр} \cdot \sin\varphi_2) = K_{нг} (156 \cdot \cos\varphi_2 + 237 \cdot \sin\varphi_2)$$

Результаты расчетов вводим в таблицу

$K_{нг}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
I_2, A	0	7,2	14,4	21,7	28,8	36,1	43,3
$\Delta U, B$ при $\cos\varphi_2 = 1$	0	31	62	94	125	156	187
$U_{2\phi}, B$ при $\cos\varphi_2 = 1$	231	230	228	227	226	225	223
$\Delta U, B$ при $\cos\varphi_2 = 0,7$	0	55	110	165	220	275	330
$U_{2\phi}, B$ при $\cos\varphi_2 = 0,7$	231	229	227	224	222	220	218

По данным таблицы строим зависимость $U_2=f(I_2)$

Векторная диаграмма при номинальном токе $I_{2ном}$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$.

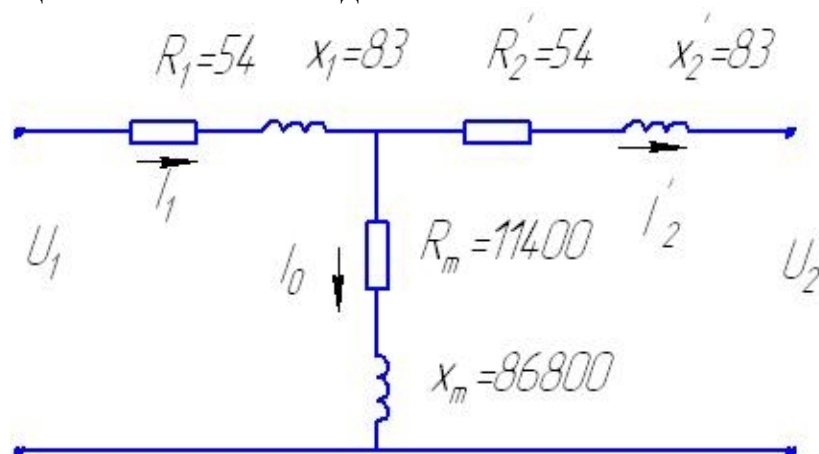
Уравнения приведенного трансформатора при нагрузке.

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_1 \dot{I}_1 + R_1 \dot{I}_1$$

$$\dot{E}'_1 = \dot{U}'_2 + jx'_1 \dot{I}'_1 + R'_1 \dot{I}'_1$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$$

Схема замещения с числовыми данными



При этом $R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{108}{2} = 54 \text{ Ом}$

$$x_1 = x'_2 = \frac{x_k}{2} = \frac{165}{2} = 82.5 \text{ Ом}$$

$$R_m \approx R_0 = 11.4 \text{ кОм}$$

$$x_m \approx x_0 = 86.6 \text{ кОм}$$

Будем считать $I_0 = 0$. Тогда $I_1 = -I'_2$

$$U'_{2\phi} = U_{1\phi\text{ном}} - \Delta U = 5773 - 267 = 5506 \text{ В}$$

$$\Delta U = K_{\text{нг}} (U_{\text{ка}} \cdot \cos\varphi_2 + U_{\text{кр}} \cdot \sin\varphi_2) = 1 \cdot (156 \cdot 0,8 + 237 \cdot 0,6) = 267 \text{ В}$$

$$I'_2 = I_1 = 1.44 \text{ А}$$

Пусть $I_1 = I'_2 = 1.44 \text{ А}$

$$\text{Тогда } U'_2 = 5506 \cdot e^{j37^\circ} = 4405 + j3304$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + jx'_2 \dot{I}'_2 + R'_2 \dot{I}'_2;$$

$$R'_2 \dot{I}'_2 = 54 \cdot 1.44 = 78 \text{ В};$$

$$jx'_2 \dot{I}'_2 = j83 \cdot 1.44 = j120 \text{ В}$$

$$\dot{E}'_2 = 4405 + j3304 + 78 + j120 = 4483 + j3424 \text{ В}$$

Под углом $\pi/2$ откладываем Φ_m .

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 = -1,44 \text{ В}; \dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + jx_1 \dot{I}_1 + R_1 \dot{I}_1 = -4483 - j3424 + 54(-1.44) + j83(-1.44) = \\ &= -4566 - j3544 \end{aligned}$$

По результатам расчетов строим в масштабе векторную диаграмму, начиная с вектора I'_2

б. Зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(P_2)$

для $\cos\varphi_2 = 1$ и $\cos\varphi_2 = 0,7$

$$\eta = 1 - \frac{P + K_{\text{нг}}^2 \cdot P_k}{K_{\text{нг}} \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_2 + P + K_{\text{нг}} \cdot P_k} = 1 - \frac{0,144 + K_{\text{нг}}^2 \cdot 0,689}{K_{\text{нг}} \cdot 25 \cdot \cos\varphi_2 + 0,144 + K_{\text{нг}}^2 \cdot 0,689}$$

Результаты расчетов сводим в таблицу

$K_{\text{нг}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$P_2, \text{кВт}$	0	5	10	15	20	25	30
η при $\cos\varphi_2 = 1$	0	0,967	0,975	0,975	0,972	0,968	0,964
η при $\cos\varphi_2 = 0,7$	0	0,953	0,965	0,964	0,96	0,955	0,95

Максимальное значение КПД при $\cos\varphi_2 = 1$

при

$$K_{\text{нг}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{0,144}{0,689}} = 0,46$$

$$\eta_{max} = 0,975$$

По данным таблицы строим зависимость $\eta = f(P_2)$

7. Ударный ток короткого замыкания

$$i_{км} = k_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{куст} = 29,4 \cdot 1,134 = 33,3 \text{ А}$$

где $I_{куст} = I_{1ном} \cdot \frac{100}{u_k} = 1,44 \cdot \frac{100}{4,5} = 29,4 \text{ А}$ ток установившегося КЗ

$$k_{уд} = \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot R_k}{\omega \cdot L_k}}\right) = \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot 108}{165}}\right) = 1,134$$

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект посвящен электромагнитному расчету и конструированию асинхронного двигателя. По заданным техническим данным выполняется: выбор основных размеров машин, электромагнитный расчет, проработка конструкций, расчет рабочих и пусковых характеристик, механические расчеты. Методические указания по выполнению курсового проекта представлены в соответствующей литературе.

Литература:

1. Ю.А. Рылов, Р.Б. Рыбаков, И.З. Гатиятов. Расчет асинхронного двигателя. Методические указания к курсовому проекту по дисциплине «Электрические машины».
2. И.П. Копылов «Проектирование электрических машин» -М: Энергия, 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Общие рекомендации по изучению дисциплины «Электрические машины».....	4
Самостоятельная работа с литературой.....	4
Самопроверка.....	5
Контрольная работа.....	5
Курсовой проект.....	5
Консультации.....	6
Лекции.....	6
Лабораторная работа.....	6
Зачет.....	7
Экзамен.....	7
Программа дисциплины специализации опд.ф.07 «Электрические машины» подготовки дипломированных специалистов заочного отделения КГЭУ.....	8
1. Учебный план по дисциплине для специальности 140606.65 «Электрический транспорт».....	8
2. Учебный план по дисциплине для специальности 140610.65 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».....	8
3. Самостоятельное изучение.....	9
4. Содержание лекций.....	10
5. Содержание лабораторных занятий.....	10
6. Литература.....	10
Методические указания к выполнению контрольной работы.....	12
Пример расчета.....	27
Курсовой проект общие рекомендации по выполнению курсового проекта.....	38

Учебное издание

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ПРОГРАММА, МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**Для студентов заочной формы обучения специальности 140606.65
«Электрический транспорт»**

**Составители: Рылов Юрий Анатольевич,
Рыбаков Рудольф Борисович,
Гатиятов Ильнур Зиннурович**

Кафедра электрический транспорт КГЭУ

Редактор редакционно-издательского отдела
Компьютерная верстка

Подписано в печать

Формат 60 × 84/16. Гарнитура «Times». Бумага «Business». Вид печати РОМ.

Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____. Тираж ____ экз. Заказ № _____.

Издательство КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51

Типография КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская, 51