

Учреждение образования  
«Жировичский государственный аграрно-технический колледж»



# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

по выполнению контрольных заданий для учащихся  
заочной формы получения образования по  
специальности

5-04-0812-03 Эксплуатация энергетического  
оборудования в сельском хозяйстве

Жировичи, 2024

Методические рекомендации разработаны на основе примерного тематического плана по учебному предмету «Электрические машины

Разработчик: . Турок И.В., преподаватель.

Методические рекомендации обсуждены и одобрены на заседании цикловой комиссии преподавателей электротехнических предметов

Протокол № 2 от 15 октября 2024г

Председатель цикловой комиссии \_\_\_\_\_ М.А.Борисик

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА.

Целью изучения учебного предмета «Электрические машины» является получение необходимых знаний по теории электромашинных генераторов постоянного и переменного тока, трансформаторов, электрических двигателей постоянного и переменного тока и их конструкциям, а также приобретение навыков по их разборке и сборке, подготовке к работе, пуску, регулированию, управлению и устранению неисправностей электрических машин.

Учебный предмет «Электрические машины» изучается на 2 курсе. Программа предусматривает изучение принципа действия, устройства и основных характеристик электрических машин и трансформаторов общего назначения, а также электрических машин и трансформаторов малой мощности для систем автоматики.

Учебный предмет «Электрические машины» является одним из базовых для электротехнических специальностей. При его изучении необходимы знания по математике, физике, теоретическим основам электротехники и электрическим измерениям, конструкционным и электротехническим материалам, основам технической механики и другим предметам.

В свою очередь, данный учебный предмет является необходимым для изучения последующих специальных предметов, таких как «Электроснабжение сельскохозяйственного производства», «Основы электропривода», «Основы автоматики» и др. Без понимания принципа работы и устройства электрических машин и трансформаторов и физического смысла явлений, происходящих при их работе в номинальном и аварийном режимах, при пуске и регулировании, невозможна грамотная и безаварийная эксплуатация всего оборудования.

Учебный предмет изучается самостоятельно в межсессионный период по учебным заданиям и контрольным вопросам методических указаний и в период лабораторно-экзаменационной сессии под руководством преподавателя.

Изучать предмет рекомендуется в следующей последовательности:

1. Ознакомиться с программой учебного задания и краткими методическими указаниями по соответствующим разделам и темам курса.
2. Самостоятельно изучить материал по рекомендуемой литературе.
3. Ответить на вопросы для самоконтроля.
4. Рассмотреть решенные примеры типовых задач, приведенные в рекомендованной литературе и методических указаниях.
5. Выполнить соответствующую контрольную работу и отослать на рецензирование (при затруднениях можно получить лично или заочно консультацию в учреждении образования).

Во время лабораторно-экзаменационной сессии проводятся обзорные занятия по наиболее важным, узловым темам курса и выполняются лабораторные работы. К экзамену допускаются учащиеся, получившие зачеты по всем контрольным и лабораторным работам.

В результате изучения предмета «Электрические машины» учащиеся должны знать **на уровне представления:**

- назначение и применение электрических машин, трансформаторов и машин малой мощности (микромашин) в сельскохозяйственном производстве, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов;
- классификацию и номенклатуру электрических машин и трансформаторов;
- направления совершенствования электрических машин;

**на уровне понимания:**

- принцип действия, конструкции, рабочие процессы и эксплуатационные особенности трансформаторов и электрических машин, применяемых в сельском хозяйстве;
- физические процессы, происходящие в электрических машинах и трансформаторах при различных режимах работы;
- принципиальные схемы трансформаторов и электрических машин, группы соединения обмоток трансформаторов, различные условия включения их в работу;

**уметь:**

- разбирать, собирать, проводить регулировки электрических машин и их узлов;
- собирать электрические цепи, включая в работу электрические машины;
- собирать электрические цепи и включать трансформаторы и синхронные генераторы на параллельную работу;
- обнаруживать и исправлять основные дефекты в работе электрических машин и

трансформаторов.

Весь учебный материал программы распределен на два задания, по каждому из которых выполняется контрольная работа. Каждая контрольная работа построена по системе в сто вариантов и содержит два вопроса и две задачи. Номера вариантов контрольных вопросов и задач выбираются из соответствующих таблиц по двум последним цифрам шифра.

При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие требования:

1. Каждая контрольная работа выполняется в отдельной тетради, аккуратно и разборчивым почерком, без помарок и исправлений. Для замечаний рецензента оставляют поля 3-3,5 см.

2. Вопросы и условия задач должны быть переписаны полностью. Для задач должны быть приведены данные своего варианта.

3. Ответы на вопросы должны быть краткими, точными, по существу и сопровождаться соответствующими иллюстрациями: рисунками, схемами, эскизами и т. п.

4. Решения задач должны сопровождаться краткими пояснениями, схемами, графиками, выполненными в соответствии с ГОСТами. При решении сначала записывается формула, затем подставляются числовые значения (последовательность подстановки числовых значений величин должна быть такая же, как и буквенных) и пишется конечный ответ с указанием единицы измерения. Промежуточные вычисления должны быть исключены. Вычисления должны содержать три значащие цифры. Все величины должны измеряться только в единицах СИ.

5. В конце работы указывается литература, которой пользовались при выполнении контрольной работы, ставится дата и подпись.

Контрольные работы, выполненные небрежно, с отступлениями от требований или в неполном объеме, к рецензированию не принимаются и не зачитываются.

В зачетных контрольных работах к экзамену должны быть представлены дополнения и исправления по замечаниям рецензента.

Незачетные работы предоставляются на повторную проверку вместе с первоначальным незачетным экземпляром.

## **ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.**

### **Основная**

1. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990.
2. Данилов А.А., Лотоцкий К.В. Электрические машины. – М.: Колос, 1972.
3. Кацман М.М. Электрические машины и электропривод автоматических устройств. – М.: Высшая школа, 1987.
4. Шевчик Н.Е., Подгайский Г.Д. Электрические машины. – Мн.: Дизайн ПРО, 2000.
5. Справочник по электрическим машинам / Под общ. ред. И. П. Копытова. т1,2. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Александров Н.Н. Электрические машины и микромашины. - М.: Колос. 1983.
7. Специальные электрические машины Под редакцией А. И. Бертинова.– М.: Энергоатомиздат, 1982.
8. Кацман М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу. – М.: Высшая школа, 1983.

### **Дополнительная**

9. Брускин Д.Э., Зорхович А.Е., Хвостов В.С., Электрические машины и микромашины. - .: Высшая школа, 1990.
10. Токарев Б. Ф. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

## ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

Раздел, тема	Количество учебных часов					Время на самостоятельную работу учащихся (часов)
	для дневной формы	для заочной формы	В том числе			
			на установочные занятия	лекции и другие теоретические занятия	На лабораторные, практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
Введение	2			-	-	2
<b>Раздел 1. Машины постоянного тока</b>	<b>38</b>	<b>10</b>		<b>8</b>	<b>2</b>	<b>28</b>
1.1 .Принцип работы и устройство машин постоянного тока	4			2	-	2
1.2.Обмотки якоря	6				-	6
1.3.Реакция якоря	2			2	-	-
1.4.Коммутация в машинах постоянного тока	4			-	-	4
1.5.Генераторы постоянного тока, их характеристики	6			-	2	4
1.6.Двигатели постоянного тока, их характеристики	10			2	-	8
1.7.Коэффициент полезного действия машин постоянного тока	4			2	-	2
1.8.Машины постоянного тока малой мощности	2			-	-	2
<b>Раздел 2. Трансформаторы</b>	<b>34</b>			<b>4</b>	<b>4</b>	<b>26</b>
2.1.Общие сведения о трансформаторах	2			2	-	-
2.2.Элементы конструкций трансформаторов	4			-	2	2
2.3.Схемы замещения трансформатора	2			2	-	-
2.4.Рабочий процесс трансформатора	10			-	-	10
2.5.Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов	4			-	2	2
2.6.Параллельная работа трансформаторов	6			-	-	6
2.7.Специальные типы трансформаторов	6			-	-	6
<b>Раздел 3. Синхронные машины</b>	<b>32</b>			<b>8</b>	<b>4</b>	<b>20</b>
3.1.Принцип действия и устройство синхронных генераторов	2			2	-	-
3.2.Способы возбуждения и схемы синхронных машин	4			-	2	2
3.3 .Обмотки машин переменного тока	8			2	-	6

1	2	3	4	5	6	7
3.4.Реакция якоря синхронного генератора	2			2	-	-
3.5.Характеристики синхронного генератора	4			-	2	2
3.6.Параллельная работа синхронных генераторов	6			2	-	4
3.7.Синхронные двигатели и компенсаторы	2			-	-	2
3.8.Синхронные машины малой мощности	4			-	-	4
<b>Раздел 4. Асинхронные машины</b>	<b>54</b>			<b>10</b>	<b>4</b>	<b>40</b>
4.1 .Принцип действия и устройство асинхронных двигателей	4			2	-	2
4.2.Рабочий процесс асинхронного двигателя	4			-	—	4
4.3.Схема замещения асинхронного двигателя	2			2	-	-
4.4.Электромагнитный момент асинхронной машины	8			-	2	6
4.5.Пуск и регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей	10			2	2	6
4.6.Асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми свойствами	2			-	-	2
4.7.Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели	6			2	-	4
4.8.Асинхронные генераторы	4			-	-	4
4.9.Индукционные регуляторы и фазорегуляторы	4			2	-	2
4.10.Асинхронные и коллекторные машины малой мощности	6			-	-	6
4.11 .Электромашинные преобразователи	4			-	-	4
<b>Итого</b>	<b>140</b>		<b>2</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>108</b>

## **КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №1**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Роль электрических машин в сельском хозяйстве. Их классификация. История и перспективы развития теории и практики электромашиностроения. Содержание дисциплины, ее значение для техника-электрика, связь с другими дисциплинами учебного плана.

*Литература:* 1 (с. 4-7), 2 (с. 3-8), 4 (с. 3-7).

## **РАЗДЕЛ 1. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **10.1. Принцип работы и устройство машин постоянного тока**

Основные законы электротехники в применении к теории электрических машин. Условия работы и элементы конструкции электрической машины: статор, ротор, якорь, индуктор. Принцип работы генераторов переменного и постоянного тока. Коллекторные и униполярные машины.

Устройство и серии машин постоянного тока П, 2П, 4П. Схемы возбуждения машин постоянного тока.

*Литература:* 1 (с. 7-10, 321-328, 359, 409-410), 2 (с. 9-20), 4 (с. 8-10), 5 (с. 352, 369, 399).

### **10.2. Обмотки якоря**

Основные элементы обмоток. Простые обмотки якоря; расчетные формулы, принцип выполнения. Понятие о сложных обмотках. Электродвижущая сила обмотки якоря. Способы регулирования напряжения генераторов.

*Практическая работа.* Расчет, вычерчивание развернутых схем и схем параллельных ветвей простых обмоток.

*Литература:* 1 (с. 329-347, примеры 25.1, 25.4), 2 (с. 21-33, примеры 1, 2), 4 (с. 10-20).

### **10.3. Реакция якоря**

Магнитная цепь машины постоянного тока. Сущность реакции якоря. Геометрическая и физическая нейтраль. Поперечные и продольные составляющие реакции якоря. Влияние реакции якоря на работу машин постоянного тока. Компенсационная обмотка, ее назначение и конструкция.

*Литература:* 1 (с. 348-360), 2 (с. 34-38), 4 (с. 22-26).

### **10.4. Коммутация в машинах постоянного тока.**

Сущность коммутации. Реактивная электродвижущая сила и электродвижущая сила вращения. Прямолинейная и криволинейная коммутации. Способы улучшения коммутации. Радиопомехи от коллекторных машин, способы их подавления.

*Литература:* 1 (с. 361-376), 2 (с. 38-45), 4 (с. 28-37).

### **10.5. Генераторы постоянного тока, их характеристики**

Генератор независимого возбуждения, его характеристики. Принцип самовозбуждения генераторов. Характеристики генераторов параллельного и смешанного возбуждения.

*Лабораторная работа (выполняется в учреждении образования).* Ознакомление с устройством машин постоянного тока. Снятие характеристик генератора параллельного или смешанного возбуждения.

*Литература:* 1 (с. 377-386), 2 (с. 47-67), 4 (с. 37-43).

### **10.6. Двигатели постоянного тока, их характеристики**

Принцип действия двигателя постоянного тока. Уравнение электродвижущей силы и напряжения. Электромагнитный момент. Уравнение моментов.

Двигатели параллельного, последовательного и смешанного возбуждения: пуск, регулирование частоты вращения, рабочие характеристики, применение. Достоинства и недостатки постоянного тока. Понятие о бесконтактных двигателях постоянного тока.

*Лабораторная работа.* Исследование двигателей параллельного и последовательного возбуждения: пуск, регулирование частоты вращения и снятие рабочих характеристик .

*Литература:* 1 (с. 387-413), 2 (с. 67-81), 4 (с. 44-65).

### **10.7. Коэффициент полезного действия машин постоянного тока**

Классификация потерь. Энергетические диаграммы генератора и двигателя. Коэффициент полезного действия, способы его определения, зависимость от нагрузки.

*Практическая работа.* Определение токов, моментов, потерь и коэффициента полезного действия машин постоянного тока.

*Литература:* 1 (с. 405-409, пример 29.1), 2 (с. 83-90, примеры 1, 2, 3, 4; с. 60-62, примеры 1, 2, 3; с. 71-72, пример 4; с. 81, 89).

### **10.8. Машины постоянного тока малой мощности**

Общая характеристика машин постоянного тока малой мощности. Их роль в современной технике. Исполнительные двигатели постоянного тока и тахогенераторы. Электромашинные усилители поперечного поля (ЭМУ).

*Литература:* 1 (с. 414-426), 3 (с. 172-178, 213-219, 259-264), 4 (с. 65-72).



## Методические указания

Прежде чем приступить к изучению электрических машин (тема 1.1), необходимо уяснить основные законы электромагнетизма: закон электромагнитной индукции в формулировках Фарадея и Максвелла и правило правой руки, закон Ампера об электромагнитных силах и правило левой руки. Из этих законов следуют условия работы любой электрической машины и принцип их обратимости. На законе электромагнитной индукции основан принцип работы генераторов и трансформаторов, а на законе Ампера - принцип действия двигателей. Следует уяснить, что любая электрическая машина состоит из двух основных частей: неподвижной части - статора и вращающейся - ротора. В одной из них размещают элементы для создания магнитного поля, необходимого для работы любой электрической машины (для ее возбуждения), и эта часть машины называется индуктором. В другой части располагается рабочая обмотка, в которой происходят основные электромагнитные процессы (индуцируется электродвижущая сила и действует электромагнитная сила). Этот элемент называется якорем. Якорь может быть вращающимся и неподвижным. Якорь и его обмотка являются наиболее сложными частями электрических машин.

Тему 1.2 следует изучать по такому плану:

1. Изучить основные определения, относящиеся к обмоткам якорей электрических машин постоянного тока: катушка, секция, полюсные деления, геометрическая нейтраль, однослойная и двухслойная обмотка, шаги обмотки. Уяснить, что для простой петлевой обмотки начало и конец секции присоединены к соседним коллекторным пластинам (шаг по коллектору  $Y_k=1$ ); для простой волновой обмотки начало и конец секции присоединены через несколько коллекторных пластин ( $Y_k>1$ ).

2. Рассмотреть рекомендованные в учебном задании примеры из учебников.

3. Научиться рассчитывать шаги обмоток и составлять обмоточные таблицы для простой петлевой и простой волновой обмоток.

4. Научиться вычерчивать развернутые схемы обмоток, расставлять полюса и щетки, определять полярность щеток и составлять схемы параллельных ветвей.

5. Усвоить общие понятия о сложных обмотках.

*Пример 1.* Вычертить развернутую схему и схему параллельных ветвей простой волновой двухслойной обмотки якоря из 13 секций, если машина имеет четыре полюса. Число пазов и число коллекторных пластин принять равным числу секций:  $S = K = Z = 13$ ;  $2p = 4$ .

Решение:

Первый частичный шаг

$$Y_1 = (Z \pm b) / 2p = (13 - 1) / 4 = 3$$

где  $b$  - ближайшее число, которое отнимают или добавляют к  $Z$ , чтобы  $Y_1$  было целым числом.

Результирующий шаг и шаг по коллектору

$$Y = Y_k = (K \pm 1) / p = (13 - 1) / 2 = 6$$

Второй частичный шаг

$$Y_2 = Y - Y_k = 6 - 3 = 3.$$

Знак «минус» при расчете шага по коллектору соответствует левоходовой обмотке, так как правоходные обмотки практического применения не получили вследствие дополнительного расхода меди на перекрещивание в лобовых частях.

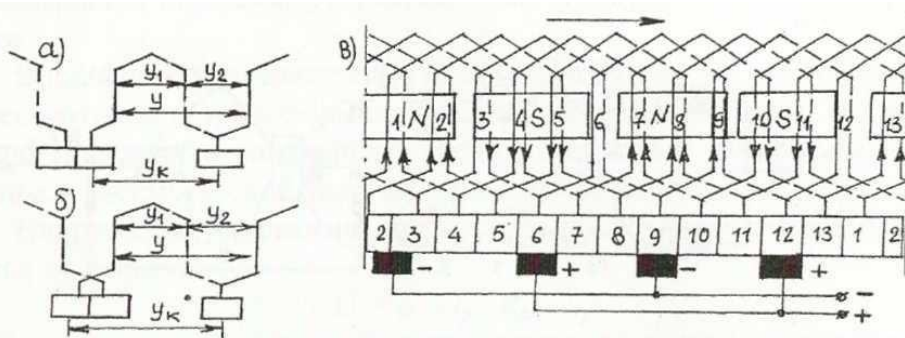


Рис.1. Простая волновая обмотка:

а) – правоходовая; б) – левоходовая; в) развернутая схема

Для облегчения выполнения обмотки составляем обмоточную таблицу. Начинаем выполнять обмотку с первой коллекторной пластины, затем укладываем ее в паз 1 (рис.1). Для определения номера паза, в который нужно уложить вторую активную сторону этой

Обмоточная таблица		
Номер коллекторной пластины, к которой припаяно начало секции	Номера пазов, в которых лежит секция	Номер коллекторной пластины, к которой припаян конец секции
↓		
1	1-4'	7
7	7-10'	13
13	13-3'	6
6	6-9'	12
12	12-2'	5
5	5-8'	11
11	11-1'	4
4	4-7'	10
10	10-13'	3
3	3-6'	9
9	9-12'	2
2	2-5'	8
8	8-11'	1
		↓

секции, к номеру паза, в котором лежит начало секции, прибавляем  $U_1 : 1 + 3 = 4$ . Вторую сторону укладываем в нижнюю часть паза 4 и присоединяем к седьмой коллекторной пластине, так как шаг по коллектору  $U_k = 6 : 1 + 6 = 7$ . Вторую секцию начинаем с седьмой коллекторной пластины и укладываем в пазы 7 - 10, а конец присоединяем к 13 коллекторной пластине и т.д., пока не будут уложены все 13 секций и обмотка не окажется замкнутой.

Так как обмотка двухслойная, номера сторон секций, лежащих внизу паза, обозначим в обмоточной таблице штрихом, а на развернутой схеме изобразим штриховой линией. В первой графе по вертикали к каждой цифре прибавляем  $U_k$ , во второй - по вертикали  $U$ , а по горизонтали  $U_1$ , в третьей - по вертикали  $U_k$ .

При составлении развернутой схемы лобовые соединения секций должны располагаться симметрично относительно оси секции и коллекторных пластин, к которым они присоединены. Шири- на полюса принимается  $\approx 0,8\tau$ , где  $\tau$  - полюсное деление. Количество щеток устанавливается равным числу полюсов. Щетки устанавливают так, чтобы они находились на коллекторных пластинах, соединенных с проводниками обмотки якоря, расположенными на геометрической нейтрали.

Для определения полярности щеток задаемся направлением вращения якоря и по правилу правой руки определяем направление индуцированной электродвижущей силы.

Схему параллельных ветвей получают из развернутой схемы и обмоточной таблицы.

Для этого изображают щетки и имеющие с ними контакт коллекторные пластины. Затем совершают обход секций обмотки, начиная с коллекторной пластины 2, к которой присоединена вторая секция, лежащая в пазах 2-5'. С ней последовательно соединена 8 секция (8-11') и т.д. В результате получаем электрическую схему с двумя параллельными ветвями. Секции 6 (6-9'), 9 (9-12') и 3 (3-6') в данный момент времени оказываются замкнутыми накоротко щетками. Во избежание искрения закороченные секции должны находиться на геометрической нейтрали (рис.2).

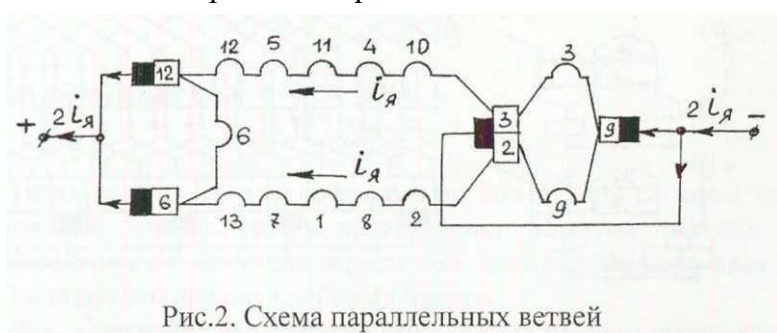


Рис.2. Схема параллельных ветвей

Следует иметь ввиду, что простая волновая обмотка всегда имеет две параллельные ветви ( $2a=2$ ). Для простой петлевой обмотки количество параллельных ветвей равно количеству полюсов ( $2a=2p$ ).

В теме 1.3 изучается реакция якоря машин постоянного тока, т.е. влияние магнитного поля якоря на магнитное поле основных полюсов. Реакция якоря имеет две составляющие: продольную -  $\Phi_{яд}$  и поперечную -  $\Phi_{яq}$ . Продольная составляющая ослабляет магнитное поле машины, что приводит к уменьшению электродвижущей силы. Поперечная составляющая искажает магнитное поле, что приводит к смещению физической нейтрали и искрению под щетками. Действием

реакции якоря объясняется тяжелой аварийный режим - круговой огонь на коллекторе.

Неудовлетворительная коммутация (тема 1.4) внешне проявляется в искрении под щетками. Степень искрения оценивается классами коммутации: 1, 1<sup>1/4</sup>, 1<sup>1/2</sup>, 2, 3. В этой теме следует уяснить причины искрения и способы улучшения коммутации.

В теме 1.5 необходимо сначала усвоить способы возбуждения машин постоянного тока и принципиальные схемы подключения различных обмоток, обратив внимание на конструктивные особенности и сопротивление шунтовых и серийных обмоток. Принцип самовозбуждения генераторов как постоянного, так и переменного тока основан на наличии остаточного магнетизма в магнитной системе машины. Кроме этого, должна быть правильно подключена обмотка возбуждения, частота вращения должна быть выше критической, а сопротивление цепи возбуждения меньше критического.

Свойства генераторов постоянного и переменного тока отражают его характеристики: характеристика холостого хода, короткого замыкания, внешняя, регулировочная и нагрузочная характеристики.

Внешняя характеристика указывает на качество получаемой от генераторов и трансформаторов электрической энергии. По ней можно определить важнейший эксплуатационный показатель источников электрической энергии - изменение напряжения ( $\Delta U$ ).

Напряжение на зажимах генератора постоянного тока вычисляется по формуле

$$U = E - I_{\text{я}} * R_{\text{я}}$$

где  $R_{\text{я}}$  - сопротивление цепи якоря, которое в общем случае складывается из сопротивлений обмотки якоря  $r_{\text{я}}$ , обмотки добавочных полюсов  $r_{\text{д}}$ , компенсационной обмотки  $r_{\text{к}}$ , последовательной (серийной) обмотки  $r_{\text{с}}$  и переходного щеточного контакта  $r_{\text{щ}}$ . Электродвижущая сила якоря двигателя и генератора постоянного тока

$$E = C_E * \Phi * n = ((PN)/60 * a) * \Phi * n$$

где  $C_E$  - постоянная для данной машины величина;  $P$  - число пар полюсов;  $N$  - число проводников обмотки якоря;  $a$  - число пар параллельных ветвей обмотки якоря;  $\Phi$  - магнитный поток, Вб;  $n$  - частота вращения якоря, об/мин.

При изучении темы 1.6 необходимо уяснить принцип действия двигателя постоянного тока и роль коллектора как механического преобразователя постоянного тока сети в переменный ток якоря.

Основные формулы, объясняющие работу двигателя:

1) Уравнение равновесия электродвижущей силы

$$U = E - I_{\text{я}} * R_{\text{я}} .$$

Подведенное напряжение  $U$  уравновешивается противоэлектродвижущей силой  $E$  и падением напряжения в цепи якоря

В момент пуска или при затормаживании якоря  $n = 0$ ,  $E = C_E * n * \Phi = 0$ , и пусковой ток увеличивается в десятки раз

$$I_{\text{п}} = U / R_{\text{я}}$$

Кратность пускового тока вычисляется по формуле

$$K_i = I_{\text{п}} / I_{\text{н}} .$$

Для уменьшения пускового тока в цепь якоря на время пуска включают пусковой реостат

$$R_{\text{п.р.}} = (U - (I_{\text{я}} * R_{\text{я}})) / I_{\text{я}} ,$$

где величину  $I_{\text{я}}$  в момент пуска принимают обычно в 1,5-2 раза больше номинального тока двигателя.

Из уравнения равновесия электродвижущей силы двигателя (учитывая, что  $E = C_E * n * \Phi$ ) следует формула частоты вращения якоря

$$n = (U - (I_{\text{я}} * R_{\text{я}})) / (C_E * \Phi)$$

Из полученного выражения вытекают способы регулирования частоты вращения двигателя: 1) изменением напряжения; 2) изменением сопротивления цепи якоря; 3) изменением магнитного потока регулировочным реостатом в цепи возбуждения.

Из этой же формулы следует, что при значительном ослаблении магнитного потока двигатель постоянного тока может пойти «вразнос».

Электромагнитный вращающий момент двигателя вычисляется по формуле

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = ((PN)/(2\pi \cdot a)) \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}$$

где  $C_M$  - постоянная величина для данной машины.

## 2) Уравнение равновесия моментов

$$M = M_0 + M_2 \pm M_{\text{дин}}$$

где  $M_0$  - момент холостого хода;  $M_2$  - полезный момент;  $M_{\text{дин}}$  - динамический момент.

Полезный вращающий момент на валу двигателя вычисляется по формуле

$$M_2 = 9550 \cdot (P_2 / n_2)$$

где  $P_2$  - полезная мощность на валу двигателя, кВт.

**Пример 2.** Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения 2ПН200МУЗ имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность  $P_n = 30$  кВт, номинальная частота вращения  $n_n = 600$  об/мин, сопротивление цепи якоря  $R_{\text{я}} = 0,08$  Ом, сопротивление цепи возбуждения  $r_b = 62$  Ом, коэффициент полезного действия  $\eta = 75\%$ , номинальное напряжение  $U_n = 440$  В. Определить номинальный и электромагнитный моменты, момент холостого хода, суммарные потери и сопротивление пускового реостата, при котором пусковой ток якоря в два раза превышает номинальный.

2ПН200МУЗ: двигатель постоянного тока 2-ой серии, Н - защищенный (незакрытый) с самовентиляцией, 200 мм - высота оси вращения, М - средняя длина сердечника якоря, У - для умеренного климата, 3 - категория размещения (для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий).

Решение:

1. Номинальный ток, потребляемый двигателем из сети

$$I_n = P_n / (U \cdot \eta) = 30 \cdot 10^3 / (440 \cdot 0,75) = 90,9 \text{ А}$$

2. Ток возбуждения

$$I_b = U_n / r_b = 440 / 62 = 7,1 \text{ А}$$

3. Ток якоря

$$I_z = I_n - I_b = 90,9 - 7,1 = 83,8 \text{ А}$$

4. Противо-электродвижущая сила обмотки якоря

$$E = U_n - (I_z \cdot R_{\text{я}}) = 440 - (83,8 \cdot 0,08) = 433 \text{ В.}$$

5. Номинальный (полезный) момент на валу двигателя

$$M_n = 9550 \cdot (P_n / n_n) = 9550 \cdot (30/600) = 477 \text{ Н*м}$$

6. Электромагнитный момент якоря

$$M = (E \cdot I_z) / \omega = (E \cdot I_z \cdot 30) / (\pi \cdot n) = (433 \cdot 83,8 \cdot 30) / (3,14 \cdot 600) = 577 \text{ Н*м}$$

где  $\omega$  - угловая скорость, рад/с.

7. Момент холостого хода

$$M_0 = M - M_n = 577 - 447 = 130 \text{ Н*м.}$$

8. Сопротивление пускового реостата, при котором пусковой ток якоря в два раза превышает номинальный

$$R_{\text{п.р.}} = (U - (I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}})) / I_{\text{я}} = (440 - (182 \cdot 0,08)) / 182 = 2,34 \text{ Ом,}$$

## Вопросы для самоконтроля по разделу №1

1. Назовите условия работы и основные элементы конструкции электрической машины.
2. Перечислите, из каких частей состоит машина постоянного тока. Объясните их назначение.
3. Дайте определения основных элементов обмотки якоря.
4. Запишите формулу электродвижущей силы обмотки якоря и объясните способы регулирования напряжения генераторов.
5. Что называется реакцией якоря?
6. Почему в результате действия реакции якоря уменьшается электродвижущая сила генератора?
7. Что такое «круговой огонь» на коллекторе? Каковы причины его возникновения?
8. Что такое геометрическая и физическая нейтраль машины постоянного тока?

9. Что называется коммутацией в машинах постоянного тока?
10. Объясните причины возникновения добавочного тока в коммутируемых секциях.
11. Как оценивается качество коммутации?
12. Каков порядок чередования основных и добавочных полюсов в машинах постоянного тока?
13. Начертите принципиальные схемы генераторов и двигателей различных систем возбуждения
14. Объясните принципы самовозбуждения генераторов постоянного тока.
15. Начертите характеристики генератора параллельного возбуждения и поясните, как они снимаются.
16. Какой вид имеет внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения при согласном и встречном включении обмоток возбуждения?
17. Начертите и поясните схемы «короткий шунт» и «длинный шунт» для машин смешанного возбуждения.
18. Чем объясняются большие пусковые токи двигателей постоянного тока? Каковы их последствия?
19. В каких ситуациях двигатели параллельного, последовательного и смешанного возбуждения могут пойти «вразнос»?
20. В каких положениях должны находиться рукоятки пусковых и регулировочных реостатов в момент пуска?
21. Назовите достоинства и недостатки двигателей постоянного тока, область их применения.
22. Какие потери в машинах постоянного тока относятся к постоянным, а какие к переменным?
23. Какие требования предъявляются к исполнительным двигателям?
24. Каково назначение и применение тахогенераторов?
25. Объясните способы управления исполнительными двигателями постоянного тока.

## **РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ**

### **2.1. Общие сведения о трансформаторах**

Назначение, классификация и принцип действия трансформаторов. Коэффициент трансформации. Общее устройство силовых трансформаторов, их типы и паспортные данные.

*Литература:* 1 (с. 15-17), 2 (с. 100-104, 130-131, 146-147), 4 (с. 199-204).

### **2.2. Элементы конструкций трансформаторов**

Устройство элементов конструкций трансформаторов: магнитопровода, обмоток, баков, вводов, устройств охлаждения, воздухоосушителей, фильтров, аппаратуры защиты. Переключатели для регулирования напряжения ПБВ и РПН. Особенности конструкций трансформаторов с витым магнитопроводом и с симметрирующим устройством.

*Лабораторная работа (выполняется в учреждении образования).* Ознакомление с элементами конструкции трансформаторов, их сборка и разборка. Маркировка выводов обмоток.

*Литература:* 1 (с. 17-25; 57-60), 2 (с. 130-146).

### **2.3. Схемы замещения трансформатора**

Понятие о приведенном трансформаторе. Формулы приведения. Схемы замещения приведенного трансформатора. Векторные диаграммы.

*Литература:* 1 (с. 25-32), 2 (с. 110-115), 4 (с. 206-208).

### **2.4. Рабочий процесс трансформатора**

Режим холостого хода. Опыт холостого хода, его практическое значение. Работа трансформатора при нагрузке. Режим короткого замыкания. Опыт короткого замыкания, его практическое значение. Эксплуатационные показатели трансформатора: изменение вторичного напряжения и коэффициент полезного действия. Регулирование напряжения трансформатора.

*Литература:* 1 (с. 47-60), 2 (с. 104-128), 4 (с. 210-213).

*Практическая работа.* Определение параметров двухобмоточного трансформатора при решении задач.

*Литература:* 1 (с. 27, пример 1.2; с. 38-39, пример 1.3; с. 46, пример 1.4; с. 49-50, пример 1.5; с. 53-54, пример 1.6; с. 57, пример 1.7), 2 (с. 102, пример 1; с. 124, пример 2; с. 127, пример 3; с. 128-

130).

*Лабораторная работа.* Определение параметров и снятие характеристик холостого хода и короткого замыкания.

## 2.5. Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов

Схемы соединений обмоток трехфазных трансформаторов: звезда, треугольник, зигзаг. Понятие о началах и концах обмоток, направление и векторные диаграммы электродвижущей силы первичной и вторичной обмоток различных групп соединений. Искажение фазных напряжений при неравномерной нагрузке фаз у трансформаторов с различными схемами соединений обмоток. Область применения различных схем и групп соединений.

*Лабораторная работа (выполняется в учреждении образования).* Исследование трехфазного трансформатора: сборка различных схем соединений, определение коэффициента трансформации и групп соединений при различных схемах.

*Литература:* 1 (с. 36-39, 61-66), 2 (с. 147-165), 4 (с. 220-224).

## 2.6. Параллельная работа трансформаторов

Необходимость и условия включения трансформаторов на параллельную работу. Явления, возникающие в трансформаторах при несоблюдении условий включения на параллельную работу.

Особенности фазировки трансформаторов с изолированной и заземленной нейтралью.

*Лабораторная работа.* Включение трансформаторов на параллельную работу. Фазировка и работа под нагрузкой.

*Литература:* 1 (с. 66-70), 2 (с. 165-175), 4 (с. 224-226).

## 2.7. Специальные типы трансформаторов

Автотрансформаторы: принцип действия, схемы, соотношения токов и мощностей, достоинства и недостатки, применение. Вольтодобавочные трансформаторы, их применение. Сварочные трансформаторы и трансформаторы для выпрямительных установок. Измерительные трансформаторы тока и напряжения. Трехобмоточные трансформаторы. Трансформаторы для преобразования формы кривой электродвижущей силы.

*Литература:* 1 (с. 71-75, 84-94), 2 (с. 175-190), 4 (с. 235-248).

## Методические указания

Раздел должен быть изучен наиболее полно. Это облегчит понимание процессов, происходящих в асинхронных двигателях (раздел 4).

Трансформаторы относятся к электромагнитным аппаратам, так как в них отсутствуют вращающиеся части. Поэтому коэффициент полезного действия трансформатора очень высок по сравнению с коэффициентом полезного действия вращающихся машин и достигает 99%. Также отсутствует воздушный зазор между статором и ротором, что приводит к уменьшению тока намагничивания, т.е. тока холостого хода. Так как ток холостого хода 10 почти чисто индуктивный, то при холостом ходе трансформатор имеет очень низкий коэффициент мощности  $\cos \varphi_0$ .

При изучении принципа действия трансформатора (тема 2.1) необходимо обратить внимание на физическую сущность электродвижущей силы, индуктируемой в обмотках трансформатора. В первичной обмотке индуктируется электродвижущая сила самоиндукции, которая почти уравнивает подведенное напряжение

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot W_1,$$

где  $f$  - частота тока, Гц;  $W_1$  - число витков первичной обмотки.

А во вторичной обмотке индуктируется электродвижущая сила взаимной индукции, которая определяет напряжение на зажимах и вызывает ток нагрузки

$$U_2 \approx E_2 = 4.44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot W_2,$$

где  $W_2$  - число витков вторичной обмотки.

Обратите внимание на равенство электродвижущих сил в одном витке первичной и вторичной обмотки. Если при данном первичном напряжении изменить число витков первичной обмотки (например, уменьшить), то изменится магнитный поток и электродвижущая сила одного витка (в

нашем примере эти параметры увеличатся). Следовательно, изменится и электродвижущая сила одного витка вторичной обмотки и напряжение на зажимах (увеличатся).

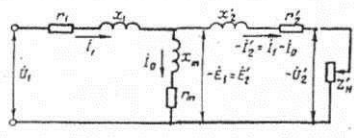
Для практической работы необходимо усвоить два вида переключения числа витков обмотки высшего напряжения: ПБВ (переключение без возбуждения) и РПН (регулирование под нагрузкой).

В сельскохозяйственной электрификации наибольшее применение получили трехфазные трансформаторы типов ТМ, ТМН, ТМВМ (с витым пространственным магнитопроводом), ТМС (с симметрирующим устройством), ТМГ (герметичные с гофрированным баком). Шкала номинальных мощностей построена по математическому ряду  $R_5 = \sqrt[5]{10} \approx 1.6$ , т.е. 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, и т.д. кВА.

Для облегчения анализа работы трансформатора и для упрощения расчетов при определении его параметров большое значение имеет применение схем замещения (тема 2.3), на которых магнитная связь между первичной и вторичной обмоткой заменяется электрической связью.

Схема замещения трансформатора составляется после «приведения» вторичной обмотки к первичной, т.е. после замены реального трансформатора условным приведенным трансформатором.

Для трехфазных трансформаторов схема замещения строится из расчета на одну фазу.



На рис.3 дана схема замещения трансформатора для режима нагрузки. Используя эту схему, нетрудно составить схемы замещения для других режимов, например, для опытов холостого хода и короткого замыкания.

Изучая тему 2.4, следует твердо усвоить, что магнитный поток в сердечнике

Рис.3. Схема замещения приведенного трансформатора трансформатора не зависит от нагрузки. Отсюда вытекают уравнение магнитодвижущей силы трансформатора и свойство саморегулирования

$$I_0 W_1 = I_1 W_1 + I_2 W_2,$$

где  $I_0 W_1$  - магнитодвижущая сила первичной обмотки при холостом ходе, А;  $I_1 W_1$ ,  $I_2 W_2$  - магнитодвижущие силы первичной и вторичной обмотки при нагрузке, А.

При изменениях вторичного тока автоматически изменяется и потребляемый первичный ток.

Следует также внимательно изучить методику проведения опытов холостого хода и короткого замыкания и их практическое значение. По результатам опытов холостого хода и короткого замыкания определяется ряд важных параметров трансформатора: потери холостого хода и короткого замыкания, напряжение короткого замыкания, ток холостого хода и параметры схемы замещения.

Обычно потери короткого замыкания распределяются между первичными и вторичными обмотками поровну. Поэтому

$$r_1 = r_2' = r_k / 2 ; \quad x_1 = x_2' = x_k / 2,$$

где  $r_1$ ,  $x_1$  - активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки, Ом;

$r_2'$ ,  $x_2'$  - приведенное активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом;

$r_k$ ,  $x_k$  - активное и индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом.

Параметры намагничивающей ветви для трехфазного трансформатора

$$Z_m = U_{1H} / \sqrt{3} * I_0, \quad r_m = Z_m * \cos \varphi_0, \quad x_m = \sqrt{(Z_m^2 - r_m^2)},$$

где  $Z_m$ ,  $r_m$ ,  $x_m$  - полное, активное и индуктивное сопротивление намагничивающей ветви, Ом.

Необходимо усвоить, что коэффициент полезного действия трансформатора 'зависит от нагрузки и достигает максимального значения при равенстве переменных потерь (в меди) и постоянных потерь (в стали), что соответствует оптимальному коэффициенту нагрузки

$$K_{н\text{опт}} = \sqrt{(P_0 / P_k)},$$

где  $P_0$ ,  $P_k$  - потери холостого хода и потери короткого замыкания, Вт.

*Пример 3.* Силовой трансформатор ТМ 100/35 имеет номинальное вторичное напряжение  $U_{2H} = 400$  В, напряжение короткого замыкания  $u_k = 6,5\%$ , потери холостого хода  $P_0 = 465$  Вт, потери короткого замыкания 1970 Вт, схема и группа соединения обмоток: звезда/звезда с нулевым выводом

- 0.

Определить: 1) токи в обмотках трансформатора при заданной нагрузке; 2) напряжение на зажимах; 3) коэффициент полезного действия, если коэффициент нагрузки  $K_{н\Gamma} = 0,9$  и коэффициент мощности  $\cos\varphi_2 = 0,8$ ; 4) параметры короткого замыкания.

Решение:

ТМ100/35 - трехфазный трансформатор с естественным масляным охлаждением с переключением без возбуждения (ПБВ), полная номинальная мощность  $S_H = 100$  кВА, высшее напряжение  $U_{1H}$  = 35кВ.

1. Токи в обмотках трансформатора при заданной нагрузке

$$I_1 = K_{н\Gamma} * S_H / (\sqrt{3} * U_{1H}) = 0,9 * 100 / (1,73 * 35) = 1,49 \text{ A}$$

$$I_2 = K_{н\Gamma} * S_H / (\sqrt{3} * U_{2H}) = 0,9 * 100 / (1,73 * 0,4) = 131 \text{ A}$$

2. Напряжение на зажимах

2.1. Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_{ка} = P_K / (10 * S_H) = 1970 / (10 * 100) = 1,97\%$$

2.2. Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_{кр} = \sqrt{(u_k^2 - u_{ка}^2)} = \sqrt{(6,5^2 - 1,97^2)} = 6,17\%$$

2.3. Изменение вторичного напряжения

$$\Delta u = K_{н\Gamma} * (u_{ка} * \cos\varphi_2 + u_{кр} * \sin\varphi_2) = 0,9 * (1,97 * 0,8 + 6,17 * 0,6) = 4,75\%,$$

где  $\sin\varphi_2$  определяется по значению  $\cos\varphi_2$ .

2.4. Напряжение на зажимах

$$U_2 = U_{2H} - ((\Delta u / 100) * U_{2H}) = 400 - ((4,75 / 100) * 400) = 381 \text{ В}$$

3. Коэффициент полезного действия

$$\eta = (K_{н\Gamma} * S_H * \cos\varphi_2) / (K_{н\Gamma} * S_H * \cos\varphi_2 + K_{н\Gamma}^2 * P_K + P_0) =$$

$$= (0,9 * 100 * 0,8) / (0,9 * 100 * 0,8 + 0,9^2 * 1,97 + 0,465) = 0,965$$

4. Параметры короткого замыкания

4.1. Ток опытного короткого замыкания

$$I_K = I_{1H} = S_H / (\sqrt{3} * U_{1H}) = 100 / (1,73 * 35) = 1,65 \text{ A}$$

4.2. Активное сопротивление короткого замыкания

$$r_K = P_K / (3 * I_K^2) = 1970 / (3 * 1,65^2) = 242 \text{ Ом}$$

4.3. Фазное напряжение короткого замыкания

$$U_{кф} = (u_k * U_1) / (100 * \sqrt{3}) = ((6,5 * 35) / (100 * 1,73)) * 10^3 = 1320 \text{ В}$$

4.4. Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = U_{кф} / I_K = 1320 / 1,65 = 800 \text{ Ом}$$

4.5. Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_K = \sqrt{(Z_K^2 - r_K^2)} = \sqrt{(800^2 - 242^2)} = 764 \text{ Ом}$$

Особое внимание следует обратить на изучение темы 2.5. Запомните, что группа соединений обмоток отражает угол сдвига по фазе вторичного линейного напряжения относительно первичного и зависит от: а) маркировки выводов обмоток; б) способа намотки обмоток по направлению; в) способа соединения обмоток (звезда, зигзаг, два варианта соединения треугольником). Уясните области применения различных схем и групп соединения обмоток. Обратите внимание на преимущества схем соединений звезда/звезда с симметрирующим устройством, звезда/зигзаг и треугольник/звезда при неравномерной нагрузке фаз.

Группу соединений обмоток необходимо знать для включения трансформаторов на параллельную работу (тема 2.6).

При изучении специальных типов трансформаторов (тема 2.7) следует уяснить преимущества, недостатки и область применения автотрансформаторов, принцип получения крутопадающих внешних характеристик и способы регулирования сварочных токов у различных типов сварочных трансформаторов, назначение и особенности работы измерительных трансформаторов, пик трансформаторов и импульсных трансформаторов.



## Вопросы для самоконтроля

1. Каково назначение трансформатора в процессе передачи и распределения электрической энергии?
2. Запишите формулы для определения электродвижущей силы обмоток.
3. Каковы последствия ошибочного включения трансформатора в цепь постоянного тока?
4. Запишите зависимость между числами витков первичной и вторичной обмоток и их линейными напряжениями для схем соединений  $Y/Y$ ;  $D/Y$ ;  $D/D$ ;  $Y/D$ .
5. Каковы формулы для точного и приближенного определения коэффициента трансформации?
6. Вычертите схему устройства стержневого, броневое и витого магнитопровода трехфазного трансформатора.
7. В чем заключается свойство саморегулирования трансформатора?
8. Что понимается под приведенным трансформатором?
9. Как определяют потери в стали и меди трансформатора?
10. Что называется напряжением короткого замыкания?
11. Почему схема замещения в опыте короткого замыкания не содержит намагничивающей ветви?
12. Как изменяется вторичное напряжение трансформатора при увеличении активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузки?
13. Вычертите принципиальные схемы соединений и векторные диаграммы электродвижущей силы  $D/Y-11$ ;  $Y/D-11$ ;  $Y/Y-0$ .
14. Перечислите условия включения трансформаторов на параллельную работу.
15. Как производится фазировка трансформаторов с изолированной и заземленной нейтралью?
16. Как распределяется нагрузка между параллельно работающими трансформаторами при неравенстве коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания?
17. Какие схемы соединений обмоток применяются в трехобмоточных трансформаторах?
18. Каковы последствия включения трансформатора тока с разомкнутой вторичной обмоткой автотрансформаторов?

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №1

Контрольная работа содержит два вопроса (таблица 1.1) и две задачи (1.1 и 1.2), разработанные по стовариантной системе. Данные задач приведены соответственно в таблицах 1.2 и 1.3. Номера вариантов задач и контрольные вопросы выбираются по двум последним цифрам шифра.

**Таблица 1.1** Распределение вариантов.

<i>Варианты</i>	<i>Номера вопросов</i>	<i>Варианты</i>	<i>Номера вопросов</i>
01, 51	1, 18	26, 76	8, 28
02, 52	2, 19	27, 77	7, 18
03, 53	3, 20	28, 78	6, 19
04, 54	4, 21	29, 79	5, 20
05, 55	5, 22	30, 80	4, 21
06, 56	6, 23	31, 81	3, 22
07, 57	7, 24	32, 82	2, 23
08, 58	8, 25	33, 83	1, 24
09, 59	9, 26	34, 84	17, 25
10, 60	10, 27	35, 85	16, 26
11, 61	11, 28	36, 86	15, 27
12, 62	12, 29	37, 87	14, 28
13, 63	13, 30	38, 88	13, 29
14, 64	14, 18	39, 89	12, 30
15, 65	15, 19	40, 90	11, 18
16, 66	16, 20	41, 91	10, 19

17, 67	17, 21	42, 92	9, 20
18, 68	16, 22	43, 93	8, 21
19, 69	15, 23	44, 94	7, 22
20, 70	14, 24	45, 95	6, 23
21, 71	13, 25	46, 96	5, 24
22, 72	12, 26	47, 97	4, 25
23, 73	11, 27	48, 98	3, 26
24, 74	10, 28	49, 99	2, 27
25, 75	9, 29	50, 100	1, 28

### Перечень вопросов контрольной работы №1

1. Что называется реакцией якоря в машинах постоянного тока? Вредные последствия реакции якоря.
2. ЭДС обмотки якоря машины постоянного тока, способы её регулирования.
3. Устройство, принцип действия и назначение добавочных полюсов в машинах постоянного тока.
4. Понятие о процессе коммутации.
5. Способы улучшения коммутации.
6. Условия самовозбуждения генераторов постоянного тока с самовозбуждением.
7. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения. Схема, внешняя характеристика.
8. Генератор постоянного тока смешанного возбуждения. Схема, внешняя характеристика.
9. Устройство, принцип действия, схемы, применение тахогенераторов постоянного тока.
10. Принцип действия двигателей постоянного тока. Уравнение электромагнитного момента, уравнение равновесия моментов.
11. Устройство, схема, механическая характеристика двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
12. Устройство, схема, механическая характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
13. Пуск в ход, изменение направления вращения двигателей постоянного тока.
14. Способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока. Техникоэкономическая оценка способов регулирования.
15. Исполнительные двигатели постоянного тока, особенности конструкции, применение.
16. Классификация потерь в машинах постоянного тока.
17. Коэффициент полезного действия в машинах постоянного тока.
18. Принцип действия трансформаторов. Назначение Трансформаторов.
19. Холостой ход трансформатора Характер и величина мощности и тока холостого хода.
20. Работа трансформатора при нагрузке.
21. Определение параметров трансформатора по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.
22. Коэффициент полезного действия трансформатора.
23. Изменение вторичного напряжения трансформатора
24. Поясните «нулевую» группу соединения обмоток трёхфазных трансформаторов. Область её применения.
25. Поясните одиннадцатую группу соединения обмоток трёхфазных трансформаторов. Область её применения.
26. Условия включения трансформаторов на параллельную работу. Последствия при нарушении условий.
27. Принцип действия автотрансформатора. Достоинства и недостатки по сравнению с трансформатором.
28. Устройство, схемы сварочных трансформаторов.
29. Поворотные трансформаторы, устройство, принцип действия, применение.
30. Пик трансформаторы, устройство, принцип действия, применение.

**Задача 1.1.** Для двигателя постоянного тока серии 2П параллельного возбуждения, технические данные которого приведены в таблице 1.2, определить: 1) потребляемую двигателем мощность; 2) суммарные потери мощности в двигателе; 3) потребляемый двигателем ток; 4) возбуждения и ток якоря; 5) противо-ЭДС; 6) электромагнитный вращающий момент двигателя, полезный момент на валу и момент холостого хода; 7) вычертите схему двигателя с пускорегулирующей аппаратурой и измерительными приборами.

**Таблица 1.2 Исходные данные к задаче 1.1.**

Варианты	Типоразмер двигателя	Номинальная мощность, кВт	КПД, %	Номинальное напряжение, В	Частота вращения, об/мин.	Сопротивление обмотки якоря, Ом	Сопротивление обмотки возбуждения, Ом
01, 51	2ПН 90М	0,37	61,5	110	3000	0,95	110,0
02, 52	2ПН 90L	0,55	67,5	110	3000	0,89	91,0
03, 53	2ПН 100М	0,75	71,5	110	3000	0,59	91,0
04, 54	2ПН 100L	1,1	74,0	110	3000	0,40	59,0
05, 55	2ПН 112М	1,5	70,0	110	3000	0,28	40,0
06, 56	2ПН 112L	2,2	75,0	110	3000	0,20	33,0
07, 57	2ПН 132М	4,0	79,0	110	3000	0,12	30,0
08, 58	2ПН 132L	5,5	80,5	110	3000	0,07	17,0
09, 59	2ПН 160М	7,5	83,0	110	3000	0,06	16,0
10, 60	2ПН 160L	11,4	85,5	110	3000	0,045	13,0
11, 61	2ПН 90М	0,37	61,5	220	3000	3,65	400
12, 62	2ПН 90L	0,55	67,5	220	3000	2,76	367
13, 63	2ПН 100М	0,75	71,5	220	3000	2,34	367
14, 64	2ПН 100L	1,1	74,0	220	3000	1,53	244
15, 65	2ПН 112М	1,5	70,0	220	3000	1,09	157
16, 66	2ПН 112L	2,2	76,0	220	3000	0,81	133
17, 67	2ПН 132М	4,0	79,0	220	3000	0,47	92
18, 68	2ПН 132L	5,5	80,5	220	3000	0,31	67
19, 69	2ПН 160М	7,5	83,0	220	3000	0,25	63
20, 70	2ПН 160L	11,0	85,5	220	3000	0,19	49
21, 71	2ПН 90М	0,37	61,5	110	1500	0,95	110
22, 72	2ПН 90L	0,55	67,5	110	1500	0,69	91
23, 73	2ПН 100М	0,75	71,5	110	1500	0,59	91
24, 74	2ПН 100L	1,1	74,0	110	1500	0,40	59
25, 75	2ПН 112М	1,5	70,0	440	3000	4,46	628
26, 76	2ПН 112L	2,2	75,0	440	3000	3,05	518
27, 77	2ПН 132М	4,0	79,0	440	3000	1,89	367
28, 78	2ПН 132L	5,5	80,5	440	3000	1,15	284
29, 79	2ПН 160М	7,5	83,0	440	3000	1,06	251
30, 80	2ПН 160L	11,0	85,5	440	1000	0,77	222
31, 81	2ПН 90М	0,37	61,5	110	1000	0,95	110
32, 82	2ПН 90L	0,55	67,5	110	1000	0,69	91
33, 83	2ПН 100М	7,5	71,5	110	1000	0,59	91
34, 84	2ПН 100L	1,1	74,0	110	1000	0,40	69
35, 85	2ПН 112М	1,5	70,0	220	1500	1,09	116
36, 86	2ПН 112L	2,2	75,0	220	1500	0,81	122
37, 87	2ПН 132М	4,0	79,0	220	1500	0,47	92
38, 88	2ПН 132L	5,5	80,5	220	1500	0,31	67
39, 89	2ПН 160М	7,5	83,0	220	1500	0,25	63
40, 90	2ПН 160L	11,0	85,5	220	1500	0,10	49
41, 91	2ПН 90М	0,37	61,5	220	1000	3,65	400

42, 92	2ПН 90L	0,55	67,5	220	1000	2,75	367
43, 93	2ПН 100M	0,75	71,5	220	1000	2,34	367
44, 94	2ПН 100L	1,1	74,0	220	1000	1,53	244
45, 95	2ПН 112M	1,5	70,0	440	1500	4,46	0,28
46, 96	2ПН 112L	2,2	75,0	440	1500	3,05	518
47, 97	2ПН 132M	4,0	79,0	440	1500	1,89	367
48, 98	2ПН 132L	5,5	80,5	440	1500	1,15	284
49, 99	2ПН 160M	7,5	83,0	440	1500	1,06	251
50, 100	2ПН 160L	11,0	85,5	440	1500	0,77	222

**Задача 1.2.** Для трёхфазного трансформатора, технические данные которого указаны в таблице 1..3, определить: 1) коэффициент трансформации; 2) токи в обмотках трансформатора при заданной нагрузке; 3) коэффициент полезного действия при заданной нагрузке трансформатора; 4) напряжение на зажимах трансформатора при заданной нагрузке; 5) ток холостого хода; 6) активные и индуктивные сопротивления  $R_1$ ;  $R_2$ ;  $x_1$ ;  $x_2$ ; принять, что  $R'_2 \approx R_1$   $x'_2 \approx x_1$ .

**Таблица 1.3** Исходные данные к задаче 1.2.

Варианты	Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ	Сочетание напряжений		Схема и группа соединения обмоток	Потери В		Напряжение короткого замыкания, %	Ток холостого хода, %	Коэффициент нагрузки	Коэффициент мощности
			ВН	НН		холостого хода	короткого замыкания				
01, 51	ТМ-25	25	6,3	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	155	600	4,5	3,85	1,0	0,9
02, 52	ТМ-25	25	6	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	155	600	4,5	3,85	0,9	0,9
03, 53	ТМ-25	25	10	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	155	600	4,5	3,85	0,8	0,8
04, 54	ТМ-25	25	10	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	155	600	4,7	3,85	0,5	0,8
05, 55	ТМ-40	40	6	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	220	880	4,5	3,6	1,0	0,9
06, 56	ТМ-40	40	6	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	220	880	4,5	3,6	0,9	0,9
07, 57	ТМ-40	40	10	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	220	880	4,5	3,6	0,8	0,8
08, 58	ТМ-40	40	10	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	220	1000	4,7	3,6	0,5	0,8
09, 59	ТМ-63	63	6	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	305	1280	4,5	2,8	1,0	0,8
10, 60	ТМ-63	63	6	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	305	1280	4,5	2,8	0,9	0,8
11, 61	ТМ-63	63	10	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	305	1280	4,5	2,8	0,8	0,8
12, 62	ТМ-63	63	10	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	305	1280	4,5	2,8	0,7	0,8
13, 63	ТМ-63	63	20	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	390	1280	5,0	2,8	0,6	1,0
14, 64	ТМ-100	100	6	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	420	1970	4,5	2,6	1,0	0,8
15, 65	ТМ-100	100	10	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	420	1970	4,5	2,6	0,9	0,8
16, 66	ТМ-100	100	6	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	420	1970	4,5	2,6	0,8	0,8
17, 67	ТМ-100	100	10	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	420	1970	4,5	2,6	0,7	0,8
18, 68	ТМ-100	100	20	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	535	1970	6,5	2,6	0,6	0,8
19, 69	ТМ-100	100	35	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	535	1970	6,5	2,6	0,5	1,0
20, 70	ТМ-160	160	6	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	650	2650	4,5	2,4	1,0	0,9
21, 71	ТМ-160	160	10	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	650	2650	4,5	2,4	0,9	0,9
22, 72	ТМ-160	160	6	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	650	2650	4,5	2,4	0,8	0,9
23, 73	ТМ-160	160	10	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	650	2650	4,5	2,4	0,7	0,8
24, 74	ТМ-160	160	6	0,69	У/Д <sub>Н</sub> -11	650	2650	4,5	2,4	0,6	0,8
25, 75	ТМ-160	160	10	0,69	У/Д <sub>Н</sub> -11	650	2650	4,5	2,4	0,5	0,8
26, 76	ТМ-250	250	6	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	945	3700	4,5	2,3	1,0	0,8
27, 77	ТМ-250	250	10	0,23	У/У <sub>Н</sub> -0	945	3700	4,5	2,3	0,9	0,8
28, 78	ТМ-250	250	6	0,4	У/У <sub>Н</sub> -0	945	3700	4,5	2,3	0,8	0,8

29, 79	TM-250	250	10	0,69	У/Д <sub>н</sub> -11	945	3700	4,5	2,3	0,5	1,0
30, 80	TM-400	400	6	0,23	У/Д-11	1210	5500	4,5	2,1	1,0	0,8
31, 81	TM-400	400	10	0,4	У/У <sub>н</sub> -0	1210	5500	4,5	2,1	0,9	0,8
32, 82	TM-400	400	6	0,69	У/Д-11	1210	5500	4,5	2,1	0,8	0,8
33, 83	TM-400	400	10	0,23	У/Д-11	1210	5500	4,5	2,1	0,7	0,9
34, 84	TM-400	400	10	0,23	У/У <sub>н</sub> -0	1210	5500	4,5	2,1	0,6	0,9
35, 85	TM-400	400	10	0,69	У/Д-11	1210	5500	4,5	2,1	0,5	0,9
36, 86	TM-400	400	36	0,4	У/У <sub>н</sub> -0	1210	5500	6,5	2,1	0,4	0,9
37, 87	TM-630	630	6	0,4	У/У <sub>н</sub> -0	1310	7600	5,5	2,0	1,0	0,8
38, 88	TM-630	630	10	0,4	У/У <sub>н</sub> -0	1310	7600	5,5	2,0	0,9	0,8
39, 89	TM-630	630	35	0,4	У/У <sub>н</sub> -0	1600	7600	5,5	2,0	0,8	0,9
40, 90	TM-630	630	35	6,3	У/Д-11	1600	7600	6,5	2,0	0,7	0,9
41, 91	TM-630	630	35	11	У/Д-11	1600	7600	6,5	2,0	0,6	0,9
42, 92	TM-1000	1000	10	0,69	У/У <sub>н</sub> -0	2100	12200	5,5	1,4	0,8	0,8
43, 93	TM-1000	1000	35	0,69	У/У <sub>н</sub> -0	2350	12000	6,5	1,5	0,7	0,8
44, 94	TM-1000	1000	35	11	У/Д-11	2350	11600	6,5	1,5	0,6	0,8
45, 95	TM-1600	1600	10	0,69	У/Д-11	2800	18000	5,5	1,3	0,9	0,8
46, 96	TM-1600	1600	35	0,69	У/Д-11	3100	18000	6,5	1,4	0,8	0,8
47, 97	TM-1600	1600	35	11	У/Д-11	3100	16500	6,5	1,4	0,7	0,8
48, 98	TM-2500	2500	10	0,69	У/Д-11	3900	25000	5,5	1,0	0,9	0,9
49, 99	TM-2500	2500	35	0,69	У/Д-11	4350	26000	6,5	1,1	0,8	0,8
50,100	TM-2500	2500	35	11	У/Д-11	4350	23500	6,5	1,1	0,7	0,7

У – звезда; У<sub>н</sub> – звезда с нулевым выводом; Д – треугольник.

# КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2

## РАЗДЕЛ 3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 30.1. Принцип действия и устройство синхронных генераторов

Основные определения синхронных машин. Назначение и принцип действия синхронных генераторов. Синхронные машины обращенного исполнения. Устройство синхронных машин и основные элементы конструкции: статор, ротор, возбудитель или выпрямитель; явнополюсные и неявнополюсные синхронные машины. Понятие о современных турбо- и гидрогенераторах. Автотракторные генераторы переменного тока. Зависимость частоты тока от частоты вращения.

*Литература:* 1 (с. 97-100, 239-248), 2 (с. 192-197), 4 (с. 159-163).

### 30.2. Способы возбуждения и схемы синхронных машин

Возбуждение синхронных генераторов. Схемы синхронных генераторов с машинным возбуждением, возбуждение от полупроводниковых и механических выпрямителей.

*Лабораторная работа (выполняется в учреждении образования).* Сборка схем, возбуждение генераторов, регулирование напряжения и частоты тока. Снятие и построение характеристики холостого хода.

*Литература:* 2 (с. 211-215).

### 30.3. Обмотки машин переменного тока

Основные элементы обмоток статора. Расчет основных параметров. Однофазные и трехфазные обмотки. Электродвижущая сила фазы обмотки статора. Обмоточный коэффициент.

Условия создания вращающегося магнитного поля при помощи трехфазной и двухфазной систем тока.

*Практическая работа.* Расчет и вычерчивание развернутых схем двухслойных трехфазных обмоток с полным и укороченным шагом. Выявление магнитных полюсов расстановкой токов по фазам и определение обмоточного коэффициента.

*Литература:* 1 (с. 102-104), 2 (с. 197-211, примеры 4, 5), 4 (с. 74-92).

### 30.4. Реакция якоря синхронного генератора

Реакция якоря синхронного генератора при активной, индуктивной, емкостной и смешанной нагрузках. Влияние реакции якоря на работу синхронного генератора.

*Литература:* 1 (с. 249-259), 2 (с. 218-222).

### 30.5. Характеристики синхронного генератора

Характеристики холостого хода и короткого замыкания. Система относительных единиц. Нормальная характеристика холостого хода. Отношение короткого замыкания. Внешние и регулировочные характеристики при различном характере нагрузки. Изменение напряжения генератора.

*Лабораторная работа (выполняется в учреждении образования).* Снятие характеристик синхронного генератора.

*Литература:* 1 (с. 262-265), 2 (с. 223-248), 4 (с. 171-177).

### 30.6. Параллельная работа синхронных генераторов

Необходимость и условия включения синхронных генераторов на параллельную работу. Способы точной синхронизации. Самосинхронизация. Параллельная работа синхронных генераторов на мощную сеть. Электромагнитная и синхронизирующая мощность. Регулирование активной и реактивной мощностей. Колебания синхронных машин и меры их уменьшения.

*Лабораторная работа.* Включение синхронных генераторов на параллельную работу методами точной синхронизации и самосинхронизации.

*Литература:* 1 (с. 270-288), 2 (с. 248-261), 4 (с. 178-185).

### 30.7. Синхронные двигатели и компенсаторы.

Принцип действия синхронного двигателя. Угловые характеристики и U-образные кривые. Рабочие характеристики. Способы пуска синхронных двигателей. Достоинства, недостатки и применение синхронных двигателей.

Синхронный компенсатор: назначение и принцип действия.

Потери и коэффициент полезного действия синхронных машин.

*Литература:* 1 (с. 289-301), 2 (с. 264-283), 4 (с. 186-192).

### 30.8. Синхронные машины малой мощности

Реактивный синхронный двигатель. Гистерезисный синхронный двигатель. Реактивно-гистерезисный двигатель. Шаговый (импульсный) двигатель. Синхронные двигатели с электромагнитной редукцией скорости (редукторные).

*Лабораторная работа.* Сборка схем, пуск, изменение направления вращения синхронных машин малой мощности.

*Литература:* 1 (с. 302-318), 3 (с. 101-114, 195-203), 4 (с. 193-

#### Методические указания

Синхронными называются электрические машины переменного тока, у которых частота вращения ротора совпадает с частотой вращения магнитного поля статора и не зависит от нагрузки.

Основная формула синхронных машин

$$n = 60 \cdot f / p$$

где  $f$  - частота тока;  $p$  - число пар полюсов.

Как и другие виды электрических машин, синхронные машины обратимы, т.е. могут работать в режимах генератора и двигателя. Кроме того, синхронные машины используются в качестве синхронных компенсаторов.

Синхронные машины наиболее сложные для изучения, так как в их работе участвуют два рода тока: ток статора переменный, а для возбуждения нужен постоянный ток. Отсюда вытекает сложность их устройства, эксплуатации, а для двигателей и сложность пуска.

В теме 3.2 изучаются схемы синхронных генераторов небольшой мощности передвижных и резервных электростанций сельскохозяйственного назначения. Для питания обмотки возбуждения постоянным током в них используется небольшой генератор постоянного тока (машинный возбудитель) либо полупроводниковые (твердые) выпрямители.

В теме 3.3 изучаются обмотки статора синхронных и асинхронных машин переменного тока. Прежде чем производить расчет обмоточных данных, необходимо повторить тему 1.2 и хорошо усвоить определения основных элементов обмотки: полюсное деление, полюс; катушка, катушечная группа, число пазов на полюс и фазу, фазовый шаг.

Необходимо обратить внимание на то, что распределением обмотки статора по пазам и укорочением шага улучшается форма кривой электродвижущей силы генератора и магнитодвижущей силы двигателя. Однако это приводит к уменьшению электродвижущей силы, что учитывается обмоточным коэффициентом, который определяется произведением коэффициентов укорочения и распределения.

Особое внимание следует обратить на способы и условия создания вращающегося магнитного поля статора. Для этого в статоре располагают не менее двух обмоток, имеющих пространственное смещение. Магнитодвижущие силы этих обмоток должны быть смещены во времени, то есть по фазе. Для получения кругового вращающегося магнитного поля в статоре трехфазных машин размещают три обмотки, смещенные в пространстве на 120 электрических градусов. Токи в этих обмотках должны быть смещены во времени на 1/3 периода (120 градусов по фазе), а магнитодвижущие силы обмоток должны быть равны  $I_a \cdot W_A = I_b \cdot W_b = I_c \cdot W_c$ .

В двухфазных и однофазных машинах в статоре размещают две обмотки, смещенные в пространстве на 90 электрических градусов. Токи в этих обмотках должны быть смещены во времени на 1/4 периода (90 градусов по фазе), а магнитодвижущие силы обмоток равны  $I_a \cdot W_A = I_b \cdot W_b$ .

Если же эти условия выполняются частично, то вращающееся поле становится эллиптическим и содержит основную прямо вращающуюся составляющую и обратно вращающуюся, которая

ухудшает эксплуатационные свойства электрических машин, а в двигателях создает тормозной момент.

**Пример 4.** Рассчитать и составить обмоточную таблицу и развернутую схему трехфазной двухслойной петлевой обмотки с укороченным шагом:  $Z=24$ ,  $2p = 4$ .

Решение:

1. Полусное деление

$$\tau = Z / 2 p = 24 / 4 = 6$$

2. Шаг обмотки укороченный

$$Y \approx 0,8 * \tau = 0,8 * 6 = 4,8.$$

Принимаем  $Y = 5$ .

3. Число пазов на полюс и фазу (число катушек в катушечной группе)

$$q = Z / 2p * m = 24 / 4 * 3 = 2$$

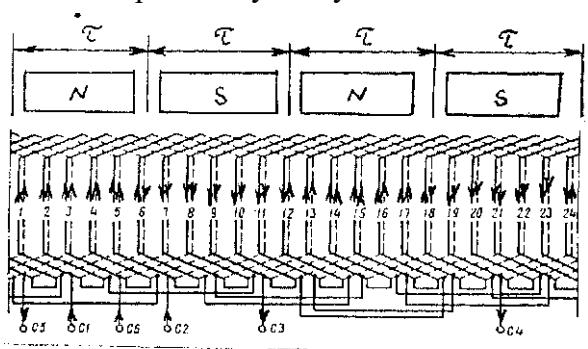
4. Число электрических градусов на один паз

$$\alpha = 360 * p / Z = 360 * 2 / 24 = 30 \text{ град.эл.}$$

5. Фазовый шаг

$$Y_{\phi} = 120 / \alpha = 120 / 30 = 4$$

Начало первой катушки укладываем в паз 1 (рис.4), а конец в нижнюю часть паза 6, так как  $Y = 5$  ( $1+5=6$ ).



а конец в нижнюю часть паза 6, так как  $Y = 5$  ( $1+5=6$ ). Поскольку  $q = 2$ , рядом укладываем вторую катушку в пазы 2-7'.

$q$  катушек, расположенных рядом друг с другом, образует катушечную группу. В нашем случае катушечная группа состоит из двух катушек. Для двухслойных обмоток количество катушечных групп в каждой фазе равно количеству полюсов  $2p$ . Каждая следующая группа катушек начинается через полюсное деление  $\tau$  от конца предыдущей в том же слое, в котором заканчивается предыдущая. Следовательно, вторая катушечная группа начинается в 13-м пазу:  $7' + \tau$

Рис.4. Развернутая схема трехфазной двухслойной обмотки с укороченным шагом:  $Z = 24$ ,  $2p = 4$ ,  $Y = 5$

$= 7' + 6 = 13'$ . Первую группу катушек укладывают по часовой стрелке, вторую - против часовой стрелки, то есть в обратном направлении, третью - по часовой стрелке и т.д. Так как в нашем примере  $2p = 4$ , то каждая фаза состоит из четырех катушечных групп. Вторая и третья фаза выполняются аналогично со смещением на фазовый шаг  $Y_{\phi} = 4$ .

Для облегчения вычерчивания развернутой схемы составляем обмоточную таблицу.

фаза А	фаза В	фаза С
1 - 6', 2 - 7'	5 - 10', 6 - 11'	9 - 14', 10 - 15'
13' - 8, 12' - 7	17' - 12, 16' - 11	21' - 16, 20' - 15
13 - 18', 14 - 19'	17 - 22', 18 - 23'	21 - 2', 22 - 3'
1' - 20, 24' - 19	5' - 24, 4' - 23	9' - 4, 8' - 3

Для выявления полюсов магнитного поля задаемся векторной диаграммой фазных токов для произвольно выбранного момента времени (рис. 5).

По направлению векторов расставляются направления токов в фазах обмотки. За положительное принимают направление тока от начала фазы к ее концу, за отрицательное - от конца фазы к началу. Расставив направления токов в фазах на развернутой схеме, определяем полюса магнитного поля.

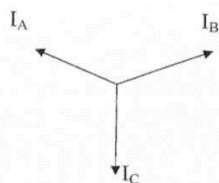


Рис.5. Векторная диаграмма токов

Полюсом называется часть пространства внутри статора, охватывающая рядом лежащие пазы, проводники которых в данный момент времени имеют одинаковое направление тока. Реакция якоря синхронного генератора (тема 3.4) имеет много общего с реакцией якоря машин постоянного тока. Но если для машин



постоянного тока влияние реакции якоря на работу машины зависит только от величины нагрузки, то для синхронных генераторов, кроме величины нагрузки, реакция якоря зависит и от характера нагрузки (активная, индуктивная, емкостная, смешанная). Этими же факторами определяется вид внешних и регулировочных характеристик синхронного генератора (тема 3,5).

Как правило, на электростанциях синхронные генераторы работают параллельно (тема 3.6). Здесь необходимо изучить условия и способы включения синхронных генераторов на параллельную работу, регулирование активной и реактивной мощности.

Если нагрузка синхронной машины превысит критическое значение (угол  $\theta$  выше критического), машина выпадает из синхронизма. Это тяжелый аварийный режим, при котором наблюдаются электрические и механические толчки, сопровождающиеся пульсирующим гулом в такт толчкам.

Также необходимо уяснить, что недозвужденная синхронная машина является потребителем реактивной энергии, а перевозвужденная машина генерирует в сеть реактивную энергию.

При изучении синхронных двигателей и компенсаторов (тема 3.7) следует обратить внимание на особенности их пуска и работы.

В теме 3.8 следует изучить отличие каждой машины малой мощности от синхронных машин общего назначения и область их применения.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Запишите основную формулу синхронных машин.
2. Каковы особенности конструкции и работы турбо- и гидрогенераторов?
3. Какие типы обмоток применяются в статорах машин переменного тока?
4. Что называется полюсом статора машины переменного тока?
5. Запишите формулу электродвижущей силы фазы обмотки статора и поясните сущность обмоточного коэффициента.
6. Каковы условия создания вращающегося магнитного поля однофазных и трехфазных машин?
7. Что представляет собой нормальная характеристика холостого хода? Для чего ее используют?
8. Как определяется коэффициент отношения короткого замыкания синхронного генератора?
9. Как изменяется напряжение синхронного генератора при различном характере нагрузки?
10. Как регулируют частоту тока и напряжение синхронных генераторов?
11. Перечислите условия включения синхронных генераторов на параллельную работу.
12. Как включают на параллельную работу синхронные генераторы методом точной синхронизации?
13. В чем сущность способа самосинхронизации?
14. Как регулируют активную и реактивную мощность при параллельной работе синхронных генераторов?
15. Назовите достоинства, недостатки и область применения синхронных двигателей.
16. Какова роль синхронных компенсаторов?
17. Почему возникают колебания синхронных машин? Каковы меры их уменьшения?
18. Поясните устройство и принцип действия реактивного синхронного двигателя.
19. Поясните устройство и принцип действия гистерезисного двигателя.
20. Поясните устройство и принцип действия шагового (импульсного) двигателя.

## РАЗДЕЛ 4. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 4.1. Принцип действия и устройство асинхронных двигателей

Основные определения. Принцип действия асинхронных двигателей. Скольжение. Устройство асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором (с контактными кольцами). Асинхронные двигатели обращенного исполнения с внешним ротором. Серии асинхронных двигателей, их номинальные данные.

*Литература:* 1 (с. 100-101, 137-145, 230-236), 2 (с. 285-293), 4 (с. 93-95).

### 4.2. Рабочий процесс асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель при неподвижном роторе. Опыты холостого хода и короткого замыкания. Приведение параметров ротора. Асинхронный двигатель при вращении ротора. Работа асинхронного двигателя при нагрузке. Векторная диаграмма асинхронного двигателя.

*Литература:* 1 (с. 154-158), 2 (с. 293-300), 4 (с. 95-98).

### 4.3. Схема замещения асинхронного двигателя

Определение схемы замещения из векторных уравнений и векторных диаграмм асинхронного двигателя. Т-образная и Г-образная схемы замещения. Определение параметров схем замещения по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

*Литература:* 1 (с. 158-161), 4 (с. 101-105).

### 4.4. Электромагнитный момент асинхронной машины

Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя. Электромагнитный момент. Зависимость электромагнитного момента от скольжения, напряжения и активного сопротивления ротора. Уравнение моментов. Механическая характеристика асинхронного двигателя. Моменты: номинальный, максимальный, минимальный и пусковой. Критическое скольжение. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении активного сопротивления ротора и напряжения сети. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

*Практическая работа.* Определение токов и моментов асинхронного двигателя.

*Лабораторная работа (выполняется в учреждении образования).* Снятие рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

*Литература:* 1 (с. 162-168, пример 13.2), 2 (с. 300-311, примеры 1-4), 4 (с. 110-115).

### 4.5. Пуск и регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей

Прямой пуск асинхронных двигателей. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором изменением частоты тока, числа пар полюсов обмотки статора и величины питающего напряжения.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором, реостатом в цепи ротора.

Сравнительная оценка и область применения различных способов регулирования частоты вращения.

*Лабораторные работы:*

1. Пуск асинхронных двигателей при полном и пониженном напряжении. Изменение направления вращения (*выполняется в учреждении образования*).

2. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором. Определение коэффициента трансформации и частоты скольжения.

*Литература:* 1 (с. 193-207), 2 (с. 318-332), 4 (с. 123-132).

### 4.6. Асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

Асинхронные двигатели с двойной беличьей клеткой и с глубоким пазом: устройство, принцип действия, механические характеристики, применение.

*Литература:* 1 (с. 199-202), 2 (с. 333-336).

#### **4.7. Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели**

Принцип действия однофазных асинхронных двигателей. Аварийный переход трехфазных двигателей в однофазный режим. Однофазные асинхронные двигатели с конденсаторным пуском, пусковым сопротивлением и пусковой обмоткой повышенного активного сопротивления.

Асинхронные конденсаторные двигатели (двухфазные). Способы получения вращающегося магнитного поля с помощью емкости, емкости и добавочного сопротивления, емкости и подбора соотношения напряжений.

Сравнительная характеристика однофазных и конденсаторных асинхронных двигателей.

Универсальные асинхронные двигатели для работы от однофазной и трехфазной сети.

*Лабораторная работа.* Исследование однофазных и конденсаторных асинхронных двигателей: ознакомление с конструкциями, сборка схем, пуск и изменение направления вращения.

*Литература:* 1 (с. 208-214), 2 (с. 343-347), 3 (с.73-79, 84), 4 (с. 136-145).

#### **4.8. Асинхронные генераторы**

Принцип действия асинхронных генераторов с возбуждением от сети и от конденсаторов. Регулирование напряжения и частоты тока. Достоинства, недостатки и применение асинхронных генераторов.

*Лабораторная работа* Включение асинхронного двигателя в режиме генератора с возбуждением от сети и от конденсаторов.

*Литература:* 2 (с. 311-316), 4 (с.146 - 149).

#### **4.9. Индукционные регуляторы и фазорегуляторы**

Трехфазный и однофазный индукционный регуляторы (поворотные автотрансформаторы), их схемы, принцип работы, векторные диаграммы и применение.

Фазорегуляторы (поворотные трансформаторы), принцип работы и применение.

*Лабораторная работа.* Исследование трехфазного индукционного регулятора. Снятие и построение графика зависимости напряжения на выходе от угла поворота ротора. Построение векторных диаграмм напряжений.

*Литература:* 1 (с. 218-219), 2 (с. 337-342).

#### **4.10. Асинхронные и коллекторные машины малой мощности**

Асинхронные исполнительные двигатели: устройство, типы роторов, принцип действия, способы управления и применение. Асинхронные тахогенераторы.

Однофазный асинхронный двигатель с расщепленными (экранированными) полюсами.

Однофазные коллекторные двигатели: особенности конструкций и работы. Универсальный коллекторный двигатель.

Понятие о вентильных двигателях.

Электрические машины синхронной связи (сельсины): устройство контактных и бесконтактных сельсинов, принцип работы и применение.

*Лабораторная работа.* Изменение режимов работы асинхронных исполнительных и универсальных коллекторных двигателей.

*Литература:* 1 (с. 216, 220-223, 410), 2 (с. 350-357), 3 (с. 185-195, 205-213, 219-240), 4 (с. 151-157).

#### **4.11. Электромашинные преобразователи**

Электромашинные преобразователи двигатель-генераторного типа, одноякорные преобразователи, совмещающие в одной машине двигатель и генератор. Вращающиеся преобразователи частоты: устройство, принцип работы и применение.

*Лабораторная работа.* Исследование преобразователей частоты.

*Литература:* 1 (с. 219-220), 2 (с. 363-370).

#### **Методические указания**

Асинхронные двигатели (тема 4.1) наиболее простые по устройству и надежные в

эксплуатации, имеют высокий коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, поэтому они нашли широкое применение в промышленности и особенно в сельском хозяйстве. Промышленностью выпускаются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором четвертой и пятой серии 4А, 4АМ (модернизированные) и 5А, 4АН и серии «Интерэлектро» АИР, А ПС, а также двигатели с фазным ротором 4АК, 4АНК (К - с контактными кольцами). В этих сериях предусмотрено множество модификаций, в том числе и двигатели сельскохозяйственного исполнения, предназначенные для работы на открытом воздухе и в агрессивных средах (4А...СУ1, АИР...СУ1), а также со встроенной температурной защитой (АИР...БСУ2).

В эксплуатации, особенно в промышленности, находится множество асинхронных двигателей и старых серий АО2, А2, АО3, АК2 и др., выпуск которых прекращен.

Теория рабочего процесса асинхронного двигателя (темы 4.2 и 4.3) схожа с теорией рабочего процесса трансформатора (темы 2.3 и 2.4). Обмотки статора рассматриваются как первичные обмотки трансформатора, а обмотки ротора как вторичные. Разница параметров холостого хода и короткого замыкания трансформатора и асинхронного двигателя объясняется наличием воздушного зазора между статором и ротором.

Важнейшей характеристикой любого электрического двигателя, в том числе и асинхронного, является механическая характеристика. Поэтому особое внимание следует уделить изучению темы 4.4, связанной с этой характеристикой: устойчивая и неустойчивая часть характеристики; характерные точки, соответствующие идеальному холостому ходу ( $S = 0, M = 0$ ), номинальной нагрузке

( $S = S_H, M = M_H$ ), критическому режиму ( $S = S_K, M = M_{max}$ ) и режиму пуска ( $S = 1, M = M_{п}$ ); перегрузочная способность  $K_{max} = M_{max}/M_H$ , кратность пускового момента  $K_{п} = M_{п}/M_H$  и кратность минимального момента  $K_{min} = M_{min}/M_H$ . Максимальный момент необходимо знать для определения возможности работы двигателя при перегрузках, а минимальный момент - для определения возможности пуска двигателя под нагрузкой. Для практических расчетов критическое скольжение определяют по формуле  $S_K = S_H * (K_{max} + \sqrt{K_{max}^2 - 1})$

Обратите внимание, что вращающий момент асинхронного двигателя зависит от квадрата приложенного напряжения  $M \equiv U^2$ .

Поэтому снижение напряжения может привести к невозможности пуска двигателя ( $M_{min} < M_{ст}$ ) или к невозможности его работы ( $M_{max} < M_{ст}$ ).

*Пример 5.* Асинхронный двигатель АИР200L6У3 имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность  $P_H = 300$  кВт, номинальное напряжение  $U_H = 380$  В, номинальное скольжение  $S_H = 2,5\%$ , коэффициент полезного действия  $\eta = 90\%$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,85$ , кратность пускового тока  $K_i = 6,5$ , кратность пускового момента  $K_{п} = 1,6$ , перегрузочная способность  $K_{max} = 2,4$ , кратность минимального момента  $K_{min} = 1,4$ . Частота тока в сети  $f = 50$  Гц.

Определить: потребляемую мощность, номинальный и пусковой токи, номинальный, пусковой, максимальный и минимальный моменты, а также момент холостого хода и электромагнитный момент. Как изменится пусковой ток, пусковой, максимальный и минимальный моменты при снижении напряжения на 10%?

Решение:

АИР200L6У3 - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в чугунном корпусе, закрытый, обдуваемый, серии «Интерэлектро», Р - первый вариант привязки мощности к установочным размерам, высота оси вращения 200 мм, L - длинная станина, 6 - число полюсов, У - для умеренного климата, 3 - категория размещения: для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий (например, в неотапливаемых помещениях).

1. Потребляемая из сети мощность

$$P_1 = P_H / \eta = 300 / 0,9 = 333,33 \text{ кВт.}$$

2. Номинальный и пусковой токи

$$I_H = P_1 / (\sqrt{3} * U_H * \cos\varphi) = 333,33 * 10^3 / (1,73 * 380 * 0,85) = 59,6 \text{ А}$$

$$I_{п} = I_H * K_i = 59,6 * 6,5 = 387,4 \text{ А.}$$

3. Номинальная частота вращения ротора

$$n_H = n_1 * (1 - S_H) = 1000 * (1 - 0,025) = 975 \text{ об/мин,}$$

где  $n_1$  - синхронная частота вращения магнитного поля

$$n_1 = 60 * f / p = (60 * 50) / 3 = 1000 \text{ об/мин.}$$

4. Номинальный, пусковой, максимальный и минимальный моменты

$$M_n = 9550 * (P_n / n_n) = 9550 * (30 / 975) = 294 \text{ Н*м;}$$

$$M_{\text{п}} = M_n * K_{\text{п}} = 294 * 1,6 = 470 \text{ Н*м;}$$

$$M_{\text{макс}} = M_n * K_{\text{макс}} = 294 * 2,4 = 705 \text{ Н*м;}$$

$$M_{\text{мин}} = M_n * K_{\text{мин}} = 294 * 1,4 = 412 \text{ Н*м.}$$

5. Пусковой ток при снижении напряжения на 10% также снизится на 10%

$$I_{\text{п}}' = 0,9 * I_{\text{п}} = 0,9 * 387 = 348 \text{ А.}$$

6. Пусковой, максимальный и минимальный моменты зависят от квадрата напряжения

$$M_n' = 0,9^2 * M_n = 0,81 * 470 = 381 \text{ Н*м;}$$

$$M_{\text{макс}}' = 0,9^2 * M_{\text{макс}} = 0,81 * 705 = 571 \text{ Н*м;}$$

$$M_{\text{мин}}' = 0,9^2 * M_{\text{мин}} = 0,81 * 412 = 334 \text{ Н*м.}$$

Моменты снизятся на 19%.

7. Момент холостого хода

$$M_0 = 9550 * ((P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}) / n_n) = 9550 * ((0,6 + 0,167) / 975) = 7,5 \text{ Н*м}$$

где механические потери принимаем 2% от  $P_n$ .

$$P_{\text{мех}} = 0,02 * P_n = 0,02 * 30 = 0,6 \text{ кВт}$$

Добавочные потери составляют 0,5% от  $P_i$

$$P_{\text{доб}} = 0,005 * P_1 = 0,005 * 33,33 = 0,167 \text{ кВт.}$$

8. Электромагнитный момент определяется из уравнения моментов

$$M = M_n + M_0 = 294 + 7,5 = 301,5 \text{ Н*м.}$$

При изучении темы 4.5 обратите внимание, что при пуске асинхронного двигателя с понижением напряжения уменьшается пусковой ток, но одновременно в квадратичной зависимости уменьшается и пусковой момент. Например, при пуске переключением со звезды на треугольник линейный пусковой ток уменьшается в 3 раза, пусковой момент также уменьшается в 3 раза. Поэтому методы пуска при пониженном напряжении применяются для легких пусков. Уменьшить пусковой ток при одновременном увеличении пускового момента можно увеличив активное сопротивление цепи ротора в момент пуска, что достигается в двигателях с фазным ротором с помощью пускового реостата и естественным путем у двигателей с глубоким пазом или с двойной беличьей клеткой (тема 4.6).

Расчет сопротивления пускового реостата приведен в рекомендованной литературе (2, с. 310-311).

Трудность эффективного регулирования частоты вращения – один из основных недостатков асинхронного двигателя. Обратите внимание на принцип частотного регулирования, который, в связи с развитием электронной техники, находит все большее применение.

В автоматике и бытовой технике широко применяются однофазные и двухфазные асинхронные двигатели, а при необходимости получения частоты вращения свыше 3000 об/мин при частоте тока 50 Гц применяют однофазные коллекторные двигатели (тема 4.7).

Среди новых разработок важное место занимают бесконтактные вентильные двигатели, в которых щеточно-коллекторный узел заменен электронным коммутатором, который, в свою очередь, управляется сигналами датчика положения ротора.

Пример 6. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором включен в сеть с напряжением  $U_c = 380$  В, частотой  $f = 50$  Гц и имеет следующие фазные параметры: число витков статорной обмотки  $W_1 = 180$  и обмоточный коэффициент  $K_{o61} = 0,94$ ; для фазного ротора  $W_2 = 70$ ,  $K_{o62} = 96$ ,  $r_2 = 0,14$  Ом,  $X_2 = 0,48$  Ом. Обмотки статора и ротора соединены звездой.

Определить электродвижущую силу  $E_1$  и  $E_2$  фазных обмоток статора и ротора и ток  $I_{2п}$  при неподвижном роторе; частоту тока  $f_2$ , электродвижущую силу  $E_{2s}$  и ток  $I_2$  при вращении ротора со скольжением  $S = 2,67\%$ ; магнитный поток статора.

Падение напряжения в обмотках статора принять равным 8%.

Решение:

1. Электродвижущая сила фазной обмотки статора при падении напряжения в ней на 8%

$$E_1 = 0,92 * (U_n / \sqrt{3}) = 0,92 * (380 / 1,73) = 202 \text{ В.}$$

2. Коэффициент трансформации электродвижущей силы

$$K_e = (W_1 * K_{o61}) / (W_2 * K_{o62}) = (180 * 0,94) / (70 * 96) = 2,52$$

3. Электродвижущая сила и ток в неподвижном роторе

$$E_2 = E_1 / K_e = 202 / 2,52 = 80 \text{ В}$$

$$I_{2п} = E_2 / (\sqrt{r_2^2 + x_2^2}) = 80 / (\sqrt{0,14^2 + 0,48^2}) = 160 \text{ А}$$

4. Магнитный поток статора определяется из формулы электродвижущей силы

$$E_1 = 4,44 * \Phi * f * W_1 * K_{o61};$$

$$\Phi = E_1 / (4,44 * f * W_1 * K_{o61}) = 202 / (4,44 * 50 * 180 * 0,94) = 0,0054 \text{ Вб.}$$

5. Электродвижущая сила и частота тока вращающегося ротора зависят от скольжения

$$E_{2s} = E_2 * S = 80 * (2,67 / 100) = 2,14 \text{ В}$$

$$f_2 = f_1 * S = 50 * 0,0267 = 1,34 \text{ Гц}$$

6. Ток вращающегося ротора

$$I_2 = E_{2s} / Z_{2s} = E_{2s} / \sqrt{(r_2/S)^2 + x_2^2} = 80 / \sqrt{(0,14/0,0267)^2 + 0,48^2} = 15,2 \text{ А.}$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Назовите достоинства и недостатки асинхронных двигателей.
2. Определите скольжение восьмиполюсного асинхронного двигателя, если частота вращения ротора равна 735 об/мин. Чему будет равно скольжение, если ротор вращать против поля с той же частотой вращения?
3. Напишите ряд стандартных синхронных частот вращения при частоте тока 50 и 60 Гц.
4. Что называется частотой скольжения? Как она определяется?
5. Электродвижущая сила в обмотке неподвижного ротора равна 68 В. Определите электро-

движущую силу ротора при скольжении 3%.

6. Напишите формулу для тока в обмотке вращающегося ротора.
7. Почему ток холостого хода асинхронного двигателя значительно больше тока холостого хода трансформатора?
8. Напишите формулу электромагнитного момента асинхронного двигателя.
9. Начертите механическую характеристику асинхронного двигателя и укажите ее характерные участки и точки.
10. При напряжении 380 В асинхронный двигатель развивает момент 60 Н\*м. Чему будет равен момент при напряжении 304 В?
11. Что называется перегрузочной способностью асинхронного двигателя?
12. Начертите семейство механических характеристик асинхронного двигателя при различном напряжении сети.
13. Начертите семейство искусственных механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором.
14. Каковы особенности конструкции асинхронных короткозамкнутых двигателей с повышенным пусковым моментом?
15. Какие схемы пуска асинхронных двигателей Вам известны?
16. На щитке двигателя указано напряжение 220/380В. Как должны быть соединены его обмотки при напряжении сети 380В? Возможен ли пуск данного двигателя переключением со звезды на треугольник?
17. Какими способами можно регулировать частоту вращения асинхронных двигателей?
18. Какие схемы соединения обмоток применяются в асинхронных двигателях на две, три и четыре частоты вращения?
19. Каковы последствия исчезновения фазы у трехфазного асинхронного двигателя?
20. Чем отличаются однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели?
21. При каких условиях асинхронный двигатель может перейти в генераторный режим?
22. Какие типы роторов применяются в исполнительных асинхронных двигателях?
23. Каковы особенности работы коллекторных двигателей на переменном токе?
24. Что представляют собой вентильные двигатели переменного тока?
25. С какой целью для электроприводов ручного электрифицированного инструмента применяют ток повышенной частоты 200 и 400 Гц?

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2

Контрольная работа содержит два вопроса (таблица 2.1) и три задачи (2.1, 2.2 и 2.3), разработанные по стовариантной системе. Данные задач приведены соответственно в таблицах 2.2, 2.3 и

2.4. Номера вариантов задач и контрольные вопросы выбираются по двум последним цифрам шифра.

**Таблица 2.1** Распределение вопросов контрольной работы

<i>Варианты</i>	<i>Номера вопросов</i>	<i>Варианты</i>	<i>Номера вопросов</i>
01, 51	1, 31	26, 76	10, 26
02, 52	2, 30	27, 77	11, 27
03, 53	3, 29	28, 78	12, 28
04, 54	4, 28	29, 79	13, 29
05, 55	5, 27	30, 80	14, 30
06, 56	6, 26	31, 81	15, 31
07, 57	7, 25	32, 82	1, 30
08, 58	8, 24	33, 83	2, 29
09, 59	9, 23	34, 84	3, 28
10, 60	10, 22	35, 85	4, 27
11, 61	11, 21	36, 86	5, 26
12, 62	12, 20	37, 87	6, 25

13, 63	13, 19	38, 88	7, 24
14, 64	14, 18	39, 89	8, 23
15, 65	15, 17	40, 90	9, 22
16, 66	4, 16	41, 91	10, 21
17, 67	1, 17	42, 92	11, 20
18, 68	2, 18	43, 93	12, 19
19, 69	3, 19	44, 94	13, 18
20, 70	4, 20	45, 95	14, 17
21, 71	5, 21	46, 96	15, 22
22, 72	6, 22	47, 97	1, 23
23, 73	7, 23	48, 98	2, 24
24, 74	8, 25	49, 99	3, 28
25, 75	9, 24	50, 100	6, 29

### Вопросы к контрольной работе 2.

1. Принцип действия и устройство синхронных машин.
2. Системы возбуждения синхронных генераторов и область их применения.
3. Синхронный генератор с возбуждением от полупроводниковых выпрямителей. Схема, принцип возбуждения
4. Электродвижущая сила фазы обмотки статора, формула, сущность обмоточного коэффициента.
5. Типы обмоток для асинхронных электродвигателей, применение. Основные требования, предъявляемые к обмоткам электрических машин.
6. Синхронные машины обращенного исполнения.
7. Синхронные генераторы с электромашинным возбудителем. Принцип действия, устройство, применение.
8. Принцип действия, устройство и область применения синхронных тахогенераторов.
9. Внешние характеристики синхронного генератора при активной нагрузке.
10. Внешние характеристики синхронного генератора при смешанной активно-индуктивной нагрузке.
11. Регулировочные характеристики синхронного генератора при различном характере нагрузки.
12. Потери, коэффициент полезного действия и энергетическая диаграмма синхронного генератора.
13. Реактивный синхронный двигатель: устройство, схема, электромагнитный момент, область применения двигателя.
14. Гистерезисный синхронный двигатель: устройство, принцип действия, область применения.
15. Шаговый (импульсный) двигатель, принцип действия, устройство и применение.
16. Устройство, принцип действия асинхронного электродвигателя, понятие о скольжении.
17. Режим работы асинхронных машин.
18. Холостой ход асинхронного двигателя при вращении ротора. Величина и характер тока холостого хода двигателя, потери.
19. ЭДС, частота и ток неподвижного и вращающегося ротора асинхронного электродвигателя.
20. Схемы замещения асинхронного двигателя и их параметры.
21. Энергетическая диаграмма асинхронного электродвигателя.
22. Уравнение электромагнитного момента асинхронного электродвигателя и его зависимость от скольжения и величины, приложенного напряжения.
23. Моменты: номинальный, пусковой, максимальный. Критическое скольжение.
24. Механическая характеристика трёхфазного асинхронного электродвигателя.
25. Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором, применение.
26. Электрические машины синхронной связи: устройство, принцип действия, схемы и применение.
27. Однофазные коллекторные двигатели переменного тока: принцип действия и устройство, Универсальный коллекторный двигатель, особенности работы и применение.
28. Пусковые свойства асинхронных двигателей. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором.



29. Способ пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, Сравнительная оценка и применение различных способов пуска.

30. Принцип действия и устройство однофазных асинхронных электродвигателей. Способы создания пускового момента.

31. Назначение, принцип действия, устройство и схемы асинхронных исполнительных двигателей. Способы управления.

**Задача 2.1.** Для трёхфазной машины переменного тока, данные которой приведены в таблице начертить развернутую схему двухслойной петлевой обмотки с укороченным шагом. Обмотку выполнить с последовательным соединением катушечных групп. Каждую фазу начертить своим цветом. Частота тока  $f = 50$  Гц.

**Таблица 2.2** Исходные данные к задаче 2.1.

В а р и а н т ы	Число полюсов $2p$	Числопазов
01, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91	2	12
02, 12, 22, 32, 42, 52, 62, 72, 82, 92	2	18
03, 13, 23, 33, 43, 53, 63, 73, 83, 93	2	30
04, 14, 24, 34, 44, 54, 64, 74, 84, 94	2	24
05, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95	4	24
06, 16, 26, 36, 46, 56, 66, 76, 86, 96	4	36
07, 17, 27, 37, 47, 57, 67, 77, 87, 97	6	36
08, 18, 28, 38, 48, 58, 68, 78, 88, 98	2	36
09, 19, 29, 39, 49, 59, 69, 79, 89, 99	4	48
10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 00	6	54

**Задача 2.2.** Для асинхронного электродвигателя данные которого указаны в таблице определить: 1) номинальную частоту вращения; 2) номинальный и пусковой ток; 3) полезный момент на валу двигателя, момент холостого хода и электромагнитный момент; 4) пусковой и максимальный моменты; 5) возможен ли запуск двигателя при снижении напряжения в сети на 20%, если момент сопротивления  $M_{ст} = M_n = \text{пост}$ ; 6) пусковой ток при снижении напряжения на 20%; 7) возможна ли работа двигателя при снижении напряжения на 20%. если момент сопротивления  $M_{ст} = \text{пост.} = M_n$ ; 8) ориентировочно по 4 точкам:  $S = 0, S_n, S_k$  и  $S_n = 1$  построить механическую характеристику. Напряжение сети 380 В.

Потери механические и добавочные принять:

$P_{мех} = (1.5 \dots 3) \% \text{ от } P_n$ ;  $P_{доб} = 0,5\% \text{ от } P_1$

где  $P_1$  – потребляемая мощность двигателя.

**Таблица 2.3** Исходные данные к задаче 2.2

Варианты	Типоразмер электродвигателя	Номинальная мощность, кВт	Энергетические показатели		Механические характеристики				Кратность пускового тока. $K_1$
			КПД %	$\cos \varphi_n$	$m_n$	$m_k$	$S_{ном}, \%$	$S_k, \%$	
01, 51	4AA63A2Y3	0,37	70,0	0,86	2,0	2,2	8,3	50,5	4,5
02, 52	4AA63B2Y3	0,55	73,0	0,86	2,0	2,2	8,5	54,5	4,5
03, 53	4A71A2Y3	0,75	77,0	0,87	2,0	2,2	5,9	38,0	5,5
04, 54	4A71B2Y3	1,1	77,5	0,87	2,0	2,2	6,3	39,0	5,5
05, 55	4A80A2Y3	1,5	81,0	0,85	2,1	2,6	4,2	35,5	6,5
06, 56	4A80B2Y3	2,2	83,0	0,87	2,1	2,6	4,3	38,0	6,5
07, 57	4A90L2Y3	3,0	84,5	0,88	2,1	2,5	4,3	32,5	6,5
08, 58	4A100S2Y3	4,0	86,5	0,89	2,0	2,5	3,3	28,0	7,5

09, 59	4A100L2Y3	5,5	87,5	0,91	2,0	2,5	3,4	29,0	7,5
10, 60	4A112M2Y3	7,5	87,5	0,88	2,0	2,8	2,5	17,0	7,5
11, 61	4A132M2Y3	11,0	88,0	0,90	1,7	2,8	2,3	19,0	7,5
12, 62	4A160S2Y3	15,0	88,0	0,91	1,4	2,2	2,1	12,0	7,0
13, 63	4A160M2Y3	18,5	88,5	0,92	1,4	2,2	2,1	12,5	7,0
14, 64	4A180S2Y3	22,0	88,5	0,91	1,4	2,5	1,9	12,5	7,5
15, 65	4A180M2Y3	30,0	90,5	0,90	1,4	2,5	1,8	12,5	7,5
16, 66	4A200M2Y3	37,0	90,0	0,89	1,4	2,5	1,9	11,5	7,5
17, 67	4AA63B4Y3	0,37	68,0	0,69	2,0	2,2	9,0	48,0	4,0
18, 68	4A71A4Y3	0,55	70,5	0,70	2,0	2,2	7,3	39,0	4,5
19, 69	4A71B4Y3	0,75	72,0	0,73	2,0	2,2	7,5	40,0	4,5
20, 70	4A80A4Y3	1,1	75,0	0,81	2,0	2,2	5,4	34,0	5,0
21, 71	4A80B4Y3	1,5	77,0	0,83	2,0	2,2	5,8	34,5	5,0
22, 72	4A90S4Y3	2,2	80,0	0,83	2,1	2,4	5,1	33,0	6,0
23, 73	4A100L4Y3	3,0	82,0	0,83	2,0	2,4	4,4	31,0	6,0
24, 74	4A100S4Y3	4,0	84,0	0,84	2,0	2,4	4,6	31,5	6,0
25, 75	4A112M4Y3	5,5	85,5	0,85	2,0	2,2	3,6	25,0	7,0
26, 76	4A132L4Y3	7,5	87,5	0,86	2,2	3,0	2,9	19,5	7,5
27, 77	4A132M4Y3	11,0	87,5	0,87	2,2	3,0	2,8	19,5	7,5
28, 78	4A160S4Y3	15,0	88,5	0,88	1,4	2,3	2,3	16,0	7,0
29, 79	4A160M4Y3	18,5	89,5	0,88	1,4	2,3	2,2	16,0	7,0
30, 80	4A180S4Y3	22,0	90,0	0,90	1,4	2,3	2,0	14,0	6,5
31, 81	4A180M4Y3	30,0	91,0	0,89	1,4	2,3	1,9	14,0	6,5
32, 82	4A200M4Y3	37,0	91,0	0,90	1,4	2,5	1,7	10,0	7,0
33, 83	4A71A6Y3	0,37	64,5	0,69	2,0	2,2	9,2	49,0	4,0
34, 84	4A71B6Y3	0,55	67,5	0,71	2,0	2,2	10,0	49,0	4,0
35, 85	4A80A6Y3	0,75	59,0	0,74	2,0	2,2	8,4	37,0	4,0
36, 86	4A80B6Y3	1,1	74,0	0,74	2,0	2,2	8,0	38,0	4,0
37, 87	4A90L6Y3	1,5	75,0	0,74	2,0	2,2	6,4	31,0	4,5
38, 88	4A100L6Y3	2,2	81,0	0,73	2,0	2,2	5,1	25,5	5,0
39, 89	4A112MA6Y3	3,0	81,0	0,76	2,0	2,5	4,7	37,0	6,0
40, 90	4A112MB6Y3	4,0	82,0	0,81	2,0	2,5	5,1	38,0	6,0
41, 91	4A132L6Y3	5,5	85,0	0,80	2,0	2,5	3,3	36,0	6,0
42, 92	4A132M6Y3	7,5	85,5	0,81	2,0	2,5	3,2	26,0	6,0
43, 93	4A160S6Y3	11,0	86,0	0,86	1,2	2,0	2,7	15,0	6,0
44, 94	4A160M6Y3	15,0	87,5	0,87	1,2	2,0	2,6	14,0	6,0
45, 95	4A180M6Y3	18,5	88,0	0,87	1,2	2,0	2,4	13,5	6,0
46, 96	4A200M6Y3	22,0	90,0	0,90	1,3	2,4	2,3	13,5	6,5
47, 97	4A200L6Y3	30,0	90,5	0,90	1,3	2,4	2,1	13,5	6,5
48, 98	4A225M6Y3	37,0	91,0	0,89	1,2	2,3	1,8	11,5	6,5
49, 99	4A80A8Y2	0,37	61,5	0,65	1,6	1,7	12,7	45,0	3,0
50, 100	4A80B8Y3	0,55	64,0	0,65	1,6	1,7	8,9	33,0	3,5

**Задача 2.3.** Трёхфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет основные величины, значения которых приведены в таблице. Частота тока сети  $f = 50$  Гц. Схема соединений обмоток - звезда

Определить: 1) магнитный поток статора  $\Phi$ ,

2) ЭДС индуцируемую в фазах неподвижного и вращающегося ротора  $E_2$ ;  $E_{2s}$

3) ток в неподвижном  $I_{2H}$  и вращающемся роторе  $I_{2s}$ ;

4) частоту ЭДС во вращающемся роторе  $f_2$ .

**Таблица 2.4 Исходные данные к задаче 2.3.**

№ п/п	Наименование величин	Ед. из м	Вариант по последней цифре шифра									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	Напряжение сети $U_{л}$	В	220	660	380	220	380	660	220	380	220	660
2	Число полюсов, $2p$	-	4	2	6	8	2	4	6	2	10	4
3	Скольжение, $s$	%	2,5	3,0	4	2	4	3	5	3,5	2	4
4	Число витков на фазу статора, $W_1$	-	350	100	130	120	300	180	125	120	120	320
5	Число витков на фазу ротора, $W_2$	-	35	80	26	80	40	72	25	30	80	40
6	Обмоточный коэффициент статора, $k_{об1}$	-	0,93	0,94	0,93	0,94	0,93	0,94	0,93	0,95	0,96	0,94
7	Обмоточный коэффициент ротора, $k_{об2}$	-	0,95	0,96	0,95	0,96	0,96	0,95	0,96	0,95	0,96	0,95
8	Активное сопротивление фазы ротора, $r_2$	Ом	0,1	0,3	0,3	0,25	0,15	0,25	0,1	0,2	0,3	0,3
9	Индуктивное сопротивление фазы ротора, $x_2$	Ом	0,25	0,5	0,55	0,45	0,32	0,42	0,2	0,45	0,5	0,55

**Примерный перечень экзаменационных вопросов**

1. Классификация электрических машин, их роль в сельскохозяйственном производстве.
2. История и перспективы развития электрических машин.
3. Основные законы электротехники в применении к теории электрических машин. Условия работы и элементы конструкции электрической машины.
4. Принцип действия генераторов переменного и постоянного тока. Коллекторные и униполярные генераторы постоянного тока.
5. Устройство и серии машин постоянного тока.
6. Системы возбуждения и схемы машин постоянного тока. Условия самовозбуждения генераторов.
7. Генератор параллельного возбуждения, его характеристики.
8. Двигатель параллельного возбуждения, его характеристики.
9. Двигатель последовательного возбуждения, его характеристики.
10. Двигатель смешанного возбуждения, его характеристики. Достоинства и недостатки двигателей постоянного тока.
11. Назначение и принцип действия трансформаторов.
12. Устройства и типы силовых трансформаторов.
13. Схемы соединений обмоток трехфазных трансформаторов, область их применения.
14. Группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов, область их применения.
15. Опыт холостого хода трансформатора, его практическое значение.
16. Опыт короткого замыкания трансформатора, его практическое значение.
17. Значение и условия включения трансформаторов на параллельную работу.
18. Автотрансформаторы: принцип действия, достоинства и недостатки, область применения.
19. Сварочные трансформаторы и выпрямители: внешние характеристики и конструкции.
20. Измерительные трансформаторы тока и напряжения: назначение, особенности конструкции и работы.
21. Назначение и принцип действия синхронных генераторов. Обращенное исполнение синхронных машин.
22. Устройство синхронных машин. Особенности конструкций дизель-генераторов, турбогенераторов и гидрогенераторов.

23. Синхронный генератор с машинным возбудителем.
24. Синхронный генератор с возбуждением от полупроводниковых выпрямителей.
25. Основные элементы трехфазной обмотки статора.
26. Способы получения вращающегося магнитного поля статора.
27. Условия и способы включения синхронных генераторов на параллельную работу.
28. Принцип действия, свойства и область применения синхронных двигателей.
29. Способы пуска синхронных двигателей.
30. Синхронные компенсаторы, их значение.
31. Реактивный синхронный двигатель.
32. Назначение и принцип действия асинхронных двигателей. Их достоинства, недостатки и применение.
33. Устройство и область применения асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.
34. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.
35. Механическая характеристика асинхронного двигателя, ее характерные точки.
36. Способы пуска асинхронных двигателей.
37. Асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми свойствами: глубоководный и двухклеточный.
38. Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей, область их применения.
39. Асинхронный генератор с возбуждением от сети.
40. Асинхронный генератор с возбуждением от конденсаторов.
41. Принцип действия однофазного асинхронного двигателя. Аварийный переход трехфазных двигателей в однофазный режим.
42. Способы пуска в ход однофазных асинхронных двигателей с помощью пусковой обмотки.
43. Асинхронные конденсаторные двигатели (двухфазные).
44. Коллекторные двигатели переменного тока. Универсальный коллекторный двигатель.
45. Трехфазный индукционный регулятор.
46. Трехфазный фазорегулятор.
47. Асинхронные исполнительные двигатели и тахогенераторы.
48. Асинхронный двигатель с расщепленными (экранированными) полюсами.
49. Электрические машины синхронной связи (сельсины).
50. Вращающиеся преобразователи частоты.

#### **Типы экзаменационных задач**

1. Определение токов, электродвижущей силы, моментов, потерь и коэффициента полезного действия машин постоянного тока различного возбуждения
  2. Определение коэффициента трансформации, токов, коэффициента полезного действия, напряжений трехфазных трансформаторов с различными схемами и группами соединений. Построение векторных диаграмм, отражающих группы соединений.
  3. Расчет основных параметров трехфазных обмоток статоров машин переменного тока. Определение обмоточного коэффициента.
  4. Определение токов, моментов, скольжения, потерь в асинхронных двигателях. Построение механических характеристик при номинальном и пониженном напряжении в сети.
- Наряду с задачами в экзаменационные билеты могут быть включены задания по составлению и сборке схем включения, пуску и регулированию частоты вращения различных электродвигателей, регулированию напряжения генераторов и т.п.

#### **Существенные ошибки**

К категории существенных ошибок относятся ошибки, свидетельствующие о том, что учащийся не усвоил основной учебный материал, не умеет оперировать им и применять его при выполнении заданий.

Незнание формул, правил, законов, единиц измерения, принципов учебной дисциплины, единиц измерения;

Неумение оперировать формулами, правилами, законами, принципами и применять их к решению задач и оценке полученного результата;  
Ошибки, связанные с недостаточной глубиной и осознанностью ответа;  
Недостаточно полное описание основных признаков, понятий, определений и формул;  
Незавершённость отдельных этапов выполнения практического задания;  
Нарушена последовательность, логичность выполнения задания;  
Неточный порядок изложения процессов работы агрегатов и машин.

### **Несущественные ошибки**

Недостаточно продуманный план устного и письменного ответа;  
Нерациональные методы работы со справочной литературой;  
Нерациональный способ решения задания;  
Небрежное оформление записей, рисунков, графиков, схем, таблиц, грамматические ошибки в терминах;  
Неправильно записанные единицы измерения.