

**Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО  
«Уральский государственный  
горный университет»**

**В. Н. Полузадов**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Учебное пособие  
по дисциплине и контрольные задания  
для студентов специализаций 130 400 – «Электрификация и  
автоматизация горного производства» и «Горные машины и  
оборудование» ( специалисты ) и  
140 400 - «Электропривод и автоматика» ( бакалавры )**

**Екатеринбург  
2012**

Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО  
Уральский государственный горный университет

ОДОБРЕНО:  
Методической комиссией  
Горно-механического факультета  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012г.  
Председатель комиссии  
проф. В.П. Барановский

**В.Н. Полузадов**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Учебное пособие**

**по дисциплине и контрольные задания  
для студентов специализаций 130 400 – «Электрификация и  
автоматизация горного производства» и «Горные машины и  
оборудование» ( специалисты ) и  
140 400 - «Электропривод и автоматика» ( бакалавры )**

П53

***В. Н. Полузадов***

П53 Электрические машины: учебное пособие по дисциплине и контрольные задания для студентов специализаций 130 400 - «Электрификация и автоматизация горного производства» и «Горные машины и оборудование» (специалисты) и 140 400 - «Электропривод и автоматика» (бакалавры).

Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2012. 69 с.

В пособии приведены содержание дисциплины «Электрические машины» и вопросы и задания для самоконтроля, даны советы по эффективному изучению дисциплины, изложены объем курсового проекта и требования по его оформлению и приведены условия задач контрольного задания.

Пособие предназначено для студентов специализаций 130 400. - «Электрификация и автоматизация горного производства» и «Горные машины и оборудование» (специалисты) и 140 400. - «Электропривод и автоматика» (бакалавры).

Пособие рассмотрено на заседании кафедры электротехники 13.01.2012 г. (протокол № 5) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Рецензент: Елисеев В. В., канд.техн. наук, доцент кафедры ЭГП УГГУ.

© Полузадов В. Н. 2012  
© Уральский государственный  
горный университет, 2012

# ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

## 1.1. Цель преподавания дисциплины

Целью преподавания дисциплины «Электрические машины» является формирование у студентов прочных знаний об общих принципах построения и законах функционирования электромагнитных и электромеханических преобразователей энергии, о современных тенденциях развития электромашиностроения, об основных методах расчета, конструирования и экспериментальных исследований электромагнитных и электромеханических преобразователей энергии; привитие студентам твердых практических навыков самостоятельного решения инженерных задач в области разработки и эксплуатации электромеханического оборудования.

## 1.2. Задачи изучения дисциплины

В процессе изучения дисциплины «Электрические машины» студент должен приобрести следующие знания и умения, необходимые горному инженеру-электромеханику в практической работе по созданию и эксплуатации горных автоматизированных электроприводов и установок.

Студент, изучивший дисциплину «Электрические машины», *должен знать:*

- основные законы электромагнитного и электромеханического преобразования энергии;
- математическое описание процессов, протекающих в электромагнитных и электромеханических преобразователях энергии при их функционировании;
- принцип действия, устройство, основные характеристики, преимущества и недостатки, область применения электрических машин различных типов;
- основные методы экспериментального исследования электрических машин;
- инженерные методы расчета и конструирования конкретных типов электрических машин.

Изучив дисциплину «Электрические машины», студент *должен уметь:*

- самостоятельно проводить экспериментальные исследования электромагнитных и электромеханических преобразователей энергии;
- рассчитывать необходимые параметры электромагнитных и электромеханических преобразователей энергии по экспериментальным данным;
- рассчитывать конкретные типы электрических машин с использованием инженерных методик;
- выбирать и обосновывать тип электрической машины для конкретного горного оборудования;

- осваивать самостоятельно по специальной литературе разделы из области теории, экспериментальных исследований и эксплуатации электрических машин, не изученные в вузе.

### ***1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины***

Для успешного изучения дисциплины «Электрические машины» необходимы знания соответствующих разделов дисциплин физико-математического и электротехнического циклов.

*По дисциплине «Математика»:* линейная алгебра, аналитическая геометрия, дифференциальное и интегральное исчисления, дифференциальные уравнения, ряды, комплексные числа и функции комплексной переменной.

*По дисциплине «Физика»:* электростатика, постоянный ток, магнитное поле постоянного тока, электромагнитная индукция, магнитные свойства вещества, электромагнитные колебания.

*По дисциплине «Теоретические основы электротехники»:* электрические цепи при постоянном токе, электрические цепи при однофазном синусоидальном токе, четырехполюсники, круговые диаграммы, электрические цепи при несинусоидальном токе, трехфазные электрические цепи, магнитные цепи, нелинейные цепи при постоянном и переменном токах.

*По дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов»:* изоляционные, магнитные и проводниковые материалы.

*По дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация»:* основы метрологии, аналоговые измерительные приборы, цифровые измерительные приборы, масштабные измерительные преобразователи, измерение электрических величин методом непосредственной оценки.

## **2. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ СОВЕТЫ ПО ЕЕ ИЗУЧЕНИЮ**

### ***2.1. Введение***

Предмет изучения и его взаимосвязь с другими научными дисциплинами. Роль и значение электромагнитных и электромеханических преобразователей энергии в хозяйстве нашей страны и, в частности, в горной промышленности. Краткая история развития электромашиностроения. Достижения в области электротехники и основные направления ее развития.

Задачи и содержание учебной дисциплины «Электрические машины», ее роль в теоретической и профессиональной подготовке горного инженера-электромеханика.

#### ***Вопросы и задания для самопроверки***

1. Назовите фамилии русских ученых-электротехников и кратко расскажите об их основных изобретениях.
2. Какова роль электромагнитных и электромеханических преобразователей энергии в горной промышленности?
3. Расскажите о перспективах развития электромашиностроения.

### ***2.2. Трансформаторы***

Назначение, области применения и номинальные данные трансформаторов. Устройство трансформаторов: магнитная система, обмотки, способы охлаждения.

Математическое описание работы трансформатора в режимах холостого хода и нагрузки.

Векторные диаграммы трансформатора при активно-индуктивном и активно-емкостном характерах нагрузки.

Приведение величин и параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной. Принцип и методика приведения. Уравнения напряжений и МДС приведенного трансформатора.

Т-образная электрическая схема замещения приведенного трансформатора и основные энергетические соотношения: энергетическая диаграмма активной мощности, циркуляция реактивной энергии при различных характерах нагрузки.

Экспериментальное определение параметров Т-образной электрической схемы замещения: опыт холостого хода и короткого замыкания. Коррекция значений параметров для расчетной температуры, соответствующей заданному

классу нагревостойкости изоляции. Напряжение короткого замыкания, основной треугольник короткого замыкания.

Упрощенные электрическая схема замещения и векторные диаграммы трансформатора в режиме нагрузки.

Изменение вторичного напряжения и внешние характеристики трансформатора. Понятие «изменение вторичного напряжения». Вывод формулы для расчета изменения вторичного напряжения при изменении характера и значения нагрузки.

Вывод и анализ формулы КПД трансформатора: допущения, определение оптимального коэффициента нагрузки и расчет максимального КПД трансформатора.

Системы магнитопроводов, схемы и группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов. Независимая, почти независимая и связанная магнитные системы. Схемы соединения обмоток: звезда, треугольник, зигзаг. Понятие «группа соединения обмоток». Способы определения номера группы соединения обмоток.

Принцип действия, устройство и области применения автотрансформатора.

Регулирование напряжения в трансформаторах: принципы регулирования, переключение ответвлений без возбуждения и под нагрузкой, трансформаторы с плавным регулированием напряжения.

Устройство и принцип действия сварочного трансформатора.

Параллельная работа трансформаторов: требование, условия включения, параллельная работа при несоблюдении какого-либо условия.

### ***Методические советы по изучению раздела «Трансформаторы»***

Перед изучением трансформаторов повторите из курса «Теоретическая электротехника» в разделе «Переменный ток» теорию электрической цепи со сталью. Уясните отличия электрической цепи со сталью при постоянном токе от этой же цепи при переменном токе.

В трансформаторе реально существующее поле на основании наших физических представлений раскладывается на составляющие: основной поток и потоки рассеяния. Каждая составляющая потока наводит свою ЭДС в той обмотке, с которой она сцеплена. Эти ЭДС направлены навстречу приложенному напряжению (по закону Ленца) и поэтому могут быть представлены как падения напряжения на соответствующих индуктивных сопротивлениях. Таким образом, каждое сопротивление обусловлено соответствующим потоком, а его величина прямо пропорциональна магнитной проводимости для этого потока.

В основу построения теории трансформатора положен принцип постоянного рабочего потока, поскольку он создает основную противоЭДС, уравновешивающую постоянное по величине приложенное напряжение (ЭДС рассеяния малы). На основании этого выводится важнейшее уравнение МДС.

Сложные электромагнитные связи между первичной и вторичной обмотками заменяются электрической схемой замещения. Обратите внимание, что это оказалось возможным только после приведения вторичных величин к числу витков первичной обмотки. Поэтому удалось упростить векторную диаграмму трансформатора.

С помощью схемы замещения и упрощенной векторной диаграммы далее уже легко проанализировать процессы в трансформаторе, его свойства и характеристики, их зависимость от характера нагрузки и т. п.

Следует обратить внимание на физический смысл такого параметра, как «напряжение короткого замыкания», найти это напряжение на векторной диаграмме и в схеме замещения и отличать его от «изменения вторичного напряжения». Надо понимать, почему параметр «напряжение короткого замыкания» определяет рабочие характеристики, экономичность, возможность включения на параллельную работу и величину токов при аварийных коротких замыканиях.

Изучая группы соединений трехфазных трансформаторов, *необходимо* понять и запомнить, как изменяется группа соединений (т. е. на сколько электрических градусов сдвигается по фазе вторичное напряжение) при определенном изменении маркировки зажимов трансформатора.

Параллельная работа трансформатора возможна при выполнении определенных условий. Изучая эту тему, попытайтесь оценить допустимую величину отклонения от требуемых условий при включении трансформатора параллельно с другими.

При изучении специальных трансформаторов необходимо обратить внимание на основные соотношения, векторные диаграммы, схемы замещения этих трансформаторов. Необходимо уяснить отличие в теории спецтрансформаторов от построения теории обычного двухобмоточного трансформатора. Например, процесс преобразования энергии в автотрансформаторах, понижающих и повышающих, протекает неодинаково в отличие от двухобмоточного трансформатора.

### ***Вопросы и задания для самопроверки по разделу «Трансформаторы»***

1. Перечислите основные конструктивные элементы трансформатора.
2. Дайте краткую классификацию трансформаторов: по назначению, числу фаз, числу обмоток, исполнению магнитопровода, способу охлаждения.
3. Опишите конструкцию сердечника трансформатора, дайте краткую характеристику применяемых материалов.
4. Изобразите схематически расположение концентрических и чередующихся обмоток.
5. Назовите, на какие составляющие разделяют магнитное поле трансформатора при рассмотрении электромагнитных процессов в нем. Какие реактивные сопротивления вводятся при анализе работы трансформатора? Дайте



количественную оценку соотношениям величин этих реактивных сопротивлений.

6. Используя второй закон Кирхгофа, напишите уравнение напряжений для первичной и вторичной обмоток. Покажите связь отдельных слагаемых в этих уравнениях с соответствующими составляющими магнитного поля.

7. Как зависят от насыщения сердечника индуктивные сопротивления взаимоиндукции и рассеяния трансформатора?

8. Ток холостого хода в насыщенном однофазном трансформаторе несинусоидален. Однако в уравнениях в комплексной форме и в векторных диаграммах его представляют синусоидальным. На каком основании? Что при этом изображает вектор тока холостого хода?

9. Почему в векторной диаграмме ток холостого хода опережает поток на некоторый угол? От чего зависит величина этого угла? Как он изменится, если при том же приложенном напряжении в сердечнике трансформатора сделать воздушный зазор?

10. Как изменятся параметры схемы замещения и величина тока холостого хода, если трансформатор подключить к напряжению значительно больше номинального (например, в 2 раза)?

11. Потери холостого хода трансформатора состоят из потерь в меди первичной обмотки и потерь в стали. Оцените относительную величину первой составляющей, учитывая, что при номинальном напряжении ток холостого хода составляет примерно 5 % номинального, а потери в меди при полной нагрузке соизмеримы с потерями в стали.

12. Объясните, почему уменьшается коэффициент мощности трансформатора на холостом ходу с ростом напряжения.

13. При построении теории трансформатора все параметры вторичной стороны приводят к числу витков первичной обмотки. Какие это дает преимущества и удобства в дальнейшем?

14. Каким путем при построении теории трансформатора удалось заменить индуктивную связь между обмотками электрическим соединением их в схеме замещения? Сделайте вывод электрической схемы замещения трансформатора.

15. При нагрузке трансформатора вторичная МДС направлена почти навстречу первичной. Изменяется ли с ростом вторичного тока результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора? Если да, то почему и в каких пределах?

а) при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной;

б) в режиме установившегося короткого замыкания (к. з.)?

Как влияет величина индуктивных сопротивлений рассеяния на этот процесс?

16. С ростом нагрузки на вторичной стороне увеличивается одновременно ток, потребляемый первичной обмоткой из сети. Объясните, почему это происходит?

17. При каких условиях производится опыт к. з.? Почему в режиме к. з. можно пренебречь током в намагничивающем контуре схемы замещения? Оцените погрешность этого допущения.

18. Покажите, что мощность, потребляемая трансформатором в опыте к.з., практически является мощностью электрических потерь в обмотках трансформатора, а при номинальном токе в опыте к. з. она равна потерям в меди, которые имеют место при номинальном режиме работы трансформатора?

19. Оцените величину потерь в стали в опыте к. з. и в режиме установившегося к. з. при номинальном первичном напряжении по сравнению с потерями на холостом ходу трансформатора.

20. Покажите, что «величина напряжения к. з.» в процентах не зависит от того, с какой стороны, высокой или низкой, производится питание трансформатора во время опыта к. з.

21. Как рассчитать параметры схемы замещения по каталожным данным однофазного и трехфазного трансформаторов ( $S_n, U_n, I_0 \%, u_k \%, P_{он}, P_{кн}$ )?

22. Нарисуйте внешние характеристики трансформатора при разном характере нагрузки (активном, индуктивном, емкостном). Объясните отличия в кривых с помощью векторных диаграмм.

23. Почему на холостом ходу, а также при активной или смешанной индуктивной нагрузке трансформатор потребляет из сети отстающий реактивный ток, однако при емкостной нагрузке первичный ток может стать и опережающим?

24. Сформулируйте основные правила преобразования одной группы соединения в другую. Пользуясь этим правилом, преобразуйте:

$Y/Y-0$  в  $Y/Y-6$  и  $Y/\Delta-11$  в  $Y/\Delta-1$ .

25. Сформулируйте условия параллельной работы трансформаторов. Какое из этих условий должно быть выполнено абсолютно точно? Какие из них могут выполняться с некоторыми отступлениями?

26. Как распределяется нагрузка между параллельно работающими трансформаторами:

а) при неравенстве напряжений к. з.;

б) при неодинаковых коэффициентах трансформации.

### ***2.3. Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах***

Основные законы электромеханики (электромеханического преобразования энергии).

Пульсирующие и вращающиеся магнитные поля: уравнения пульсирующих и бегущих волн, принципы образования вращающегося магнитного поля, зависимость скорости вращения магнитного поля от числа пар полюсов.

Обмотки машин переменного тока: требования, основные элементы, классификация и области применения различных типов обмоток.

Расчет и конструирование трехфазных однослойных и двухслойных обмоток.

ЭДС, индуцируемые в обмотках машин переменного тока: ЭДС активного проводника, витка и катушки с полным и укороченным шагом, сосредоточенной и распределенной катушечной группы и фазы обмотки. Коэффициенты укорочения шага и распределения обмотки для основной и высших гармонических ЭДС. Способы подавления высших гармонических ЭДС.

МДС и магнитные поля фазной и трехфазной обмоток машины переменного тока.

### ***Методические советы по изучению раздела «Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах»***

Принцип действия трехфазных машин переменного тока основан на применении вращающегося магнитного поля. Вращающееся поле создается трехфазным симметричным током, протекающим по неподвижным, определенным образом расположенным в пространстве, обмоткам. Условия образования вращающегося поля, получения синусоидальной ЭДС, уменьшения высших гармоник в кривой распределения поля и др. требуют выполнения ряда обязательных правил при конструировании обмоток переменного тока, таких как сдвиг между фазами в пространстве, способы соединения начал и концов катушек одной фазы в однослойной и двухслойной обмотках, распределение обмотки и укорочение шага и т. д.

Обмотка машины переменного тока является ее электромагнитным «сердцем». Поэтому очень важно понять физические основы ее работы и конструкцию обмотки. Настоятельно рекомендуется в процессе изучения обмоток освоить построение кривой МДС трехфазных обмоток в различные моменты времени, определить скорость, направление вращения и величину высших пространственных гармоник поля статора, уяснить влияние высших пространственных гармоник на работу машины переменного тока и способы борьбы с этим влиянием. Необходимо научиться определять обмоточный коэффициент не только по формулам, но и с помощью векторной диаграммы. В этом разделе выводы всех формул следует обосновывать физическими представлениями.

### ***Вопросы и задания для самопроверки по разделу «Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах»***

1. Назовите необходимые условия получения кругового вращающегося магнитного поля с помощью различных систем переменного тока.

2. Изобразите радиальную схему однослойной, сосредоточенной диаметральной трехфазной обмотки статора с шестью пазами. На этом рисунке покажите схематически силовые линии и направление магнитной оси результирующего поля для двух моментов времени:

- 1) когда в фазе  $A$  мгновенное значение тока максимально (равно амплитуде);
- 2) когда ток фазы  $B$  равен нулю.

Проанализируйте полученную картину и ответьте на следующие вопросы. Сколько пар полюсов имеет результирующее поле? В какую сторону и с какой частотой оно вращается? Как частота вращения зависит от частоты тока? Где находится магнитная ось результирующего поля в тот момент времени, когда в одной из фаз ток проходит через амплитудное значение?

3. Определите частоту вращения многополюсного поля в геометрических и электрических радианах в секунду, а также в оборотах в секунду и в минуту. Напишите соответствующие формулы. Покажите в общем виде связь между электрическими и геометрическими радианами (градусами).

4. Перечислите преимущества и недостатки двухслойных обмоток по сравнению с однослойными.

5. На примере четырехполюсной машины покажите, как соединяются катушки одной фазы однослойной, а затем и двухслойной обмоток при последовательном соединении их? То же при параллельном?

6. Для чего обмотку переменного тока стремятся выполнить с укороченным шагом и распределенной? Какие это дает преимущества и недостатки?

7. Выведите формулу эффективного значения ЭДС фазы при синусоидальном распределении магнитной индукции вращающегося поля.

8. Каков физический смысл обмоточного коэффициента и его сомножителей? Выведите формулы для определения последних относительно основной и высших гармоник.

9. Вращающееся поле в общем случае, кроме основной, содержит высшие пространственные гармоники, которые искажают форму кривой ЭДС. Какие меры применяются для улучшения синусоидальности ЭДС?

## ***2.4. Асинхронные машины***

Устройство асинхронной машины: основные конструктивные элементы машин с короткозамкнутым и фазным роторами. Паспортные данные, области применения.

Параметры асинхронной машины с короткозамкнутым и фазным роторами. Приведение величин и параметров ротора к статору. Принцип и методика приведения. Уравнения напряжений и МДС приведенной асинхронной машины с заторможенным ротором.

Устройство и принцип действия фазорегулятора и индукционного регулятора напряжения.

Принцип действия асинхронного двигателя. Понятие «скольжение».

Электромагнитные процессы во вращающемся роторе. Зависимость величин и параметров ротора от скольжения. Электрическая схема замещения фазы вращающегося ротора и ее преобразование к эквивалентной электрической

схеме замещения неподвижного ротора. Электрические потери в роторе, электромагнитная и полная механическая мощности асинхронной машины.

Скорость вращения МДС ротора в пространстве. Уравнение МДС асинхронной машины.

T-образная электрическая схема замещения асинхронной машины. Режимы работы: асинхронный двигатель, асинхронный генератор, электромагнитный тормоз. Основные энергетические соотношения преобразования активной энергии и циркуляции реактивной энергии в каждом из режимов работы.

Точная и уточненная Г-образные электрические схемы замещения асинхронной машины. Условия эквивалентности T-образной и точной Г-образной схем замещения. Условия перехода от точной Г-образной схемы замещения к уточненной.

Вывод и анализ формулы электромагнитного момента асинхронной машины. Зависимости электромагнитного момента от основного магнитного потока и фазного тока ротора и от фазного напряжения статора и скольжения. Начальный пусковой момент и начальные пусковые токи ротора и статора. Параметры к. з. Критическое скольжение и максимальный момент. Естественная и искусственные механические характеристики асинхронного двигателя.

Построение механической характеристики по каталожным данным. Работа асинхронного двигателя при ненормальных условиях. Несимметричные режимы работы асинхронных двигателей.

Способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным роторами. Принцип расчета пускового реостата в цепи ротора.

Короткозамкнутые асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом.

### ***Методические советы по изучению раздела «Асинхронные машины»***

При неподвижном роторе теория асинхронной машины легко сводится к теории трансформатора. Это объясняется тем, что реальное магнитное поле в асинхронной машине мы разложили на те же составляющие, что и в трансформаторе: на основное и на поля рассеяния.

Теория вращающейся асинхронной машины также приводится к теории неподвижного трансформатора. Это удастся сделать на основании следующих соображений. МДС обмотки ротора вращается относительно ротора с частотой, зависящей от скольжения.

Сумма частот вращения самого ротора и его МДС равна синхронной частоте МДС статора. Следовательно, МДС статора и ротора относительно друг друга неподвижны. Поэтому можно построить пространственную диаграмму МДС асинхронной машины (в отличие от временной диаграммы трансформатора). Далее, преобразуя уравнение МДС путем введения приведенного вторичного тока, мы получим то же самое уравнение МДС, но выраженное в виде геометрической суммы токов. Затем, применяя искусственный прием, фор-

мально математически освобождаем вторичные ЭДС и индуктивное сопротивление от скольжения, т. е. приводим их к величинам неподвижного ротора и получаем схему замещения асинхронной машины, все параметры которой приведены к частоте сети и не зависят от скольжения, за исключением активного сопротивления в цепи нагрузки схемы замещения.

С помощью схемы замещения и соответствующих ей уравнений и векторных диаграмм, так же как и в трансформаторах, легко можно проанализировать любые режимы и характеристики асинхронной машины.

Основной характеристикой асинхронной машины является зависимость  $M_{эм} = f(S)$ . Главное здесь – умение анализировать эту зависимость. Для тренировки постройте семейства кривых момента при разных значениях каждой величины, входящей в формулу момента при прочих равных условиях. Покажите, как при конструировании можно изменить в заданном направлении параметры, например, индуктивное сопротивление рассеяния статора, ротора, активное сопротивление ротора – с тем, чтобы получить требуемое значение пускового или максимального момента двигателя. Обратите внимание, каким образом повышается пусковой момент в глубокопазном двигателе или в двигателе с двойной клеткой.

### ***Вопросы и задания для самопроверки по разделу «Асинхронные машины»***

1. Каковы устройство и принцип действия асинхронной машины? Почему асинхронный двигатель принципиально не может достичь синхронной скорости?

2. Чему равно число фаз и количество витков в фазе короткозамкнутой обмотки ротора типа «беличья клетка»?

3. При заторможенном роторе построение теории асинхронной машины в основном повторяет методы, известные нам из теории трансформаторов. Какие отличия или особенности Вы при этом заметили, чем они обусловлены?

4. На какие основные составляющие раскладывается реальное магнитное поле при построении теории асинхронной машины?

5. Объясните физический смысл индуктивных сопротивлений взаимной индукции и рассеяния. Почему первое из них в асинхронной машине значительно меньше, чем в трансформаторе?

6. Чем отличается приведение вторичных величин к первичной обмотке в асинхронных машинах от аналогичной операции в трансформаторах?

7. Покажите, что МДС статора и вращающегося ротора неподвижны относительно друг друга при любом скольжении. Постройте пространственную векторную диаграмму МДС.

8. Ток ротора изменяется с частотой скольжения, ток статора с частотой сети. На каком основании векторы, соответствующие разночастотным токам, совмещены на одной векторной диаграмме?

9. Покажите, каким образом рабочий режим вращающегося асинхронного двигателя может быть приведен к режиму трансформатора с активной нагрузкой, зависящей от скольжения.

10. Объясните физический смысл параметров схемы замещения асинхронной машины. Как они зависят от насыщения? К какой частоте приведены параметры роторной цепи? Что и каким образом изменится в схеме замещения асинхронной машины, если воздушный зазор ее увеличить?

11. Почему и в каких режимах пренебрегают потерями в стали ротора?

12. Выведите формулу для вращающегося момента асинхронного двигателя. Исследуйте ее на максимум. Получите выражения для критического скольжения, максимального и пускового моментов.

13. Для чего в цепь фазного ротора на период пуска вводят добавочное сопротивление? При какой величине этого сопротивления пусковой момент будет равен максимальному. Нельзя ли вместо активного использовать индуктивное сопротивление?

14. Объясните, каким образом эффект вытеснения тока в короткозамкнутом роторе влияет на величину пускового момента? Почему этот эффект увеличивается с ростом отношения высоты паза к его ширине? Почему вытеснение тока в роторе исчезает в рабочем режиме двигателя?

15. В двухклеточном роторе индуктивное сопротивление верхней клетки должно быть меньше по сравнению с нижней. Как это конструктивно обеспечивается? Какое влияние оказывает разница в активных и индуктивных сопротивлениях клеток на механическую характеристику?

16. Из каких соображений выбирается тот или другой способ пуска асинхронного двигателя? Чем ограничивается применение прямого запуска (прямым включением в сеть)?

17. Почему асинхронные генераторы не получили широкого распространения, несмотря на то, что они имеют некоторые положительные свойства? Какие именно?

## ***2.5. Синхронные машины***

Назначение, паспортные данные, области применения. Анализ электромагнитной схемы синхронной машины. Конструкция явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин. Схемы возбуждения и системы охлаждения.

Магнитное поле и параметры обмотки возбуждения явнополюсного синхронного генератора.

Понятие «реакция якоря». Метод двух реакций. Качественный анализ реакции якоря при различных видах (характерах) нагрузки.

Магнитные поля, ЭДС и параметры обмотки якоря явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин.

Уравнения напряжений и векторные диаграммы явнополюсных и неявнополюсных синхронных генераторов.

Характеристики синхронных генераторов: холостого хода, установившегося трехфазного короткого замыкания, внешняя, регулировочная и индукционная нагрузочная. Построение и физическая сущность треугольника Потье.

Способы включения синхронной машины на параллельную работу с мощной сетью: способ точной синхронизации, способ грубой синхронизации, способ асинхронного пуска.

Синхронные режимы работы синхронной машины параллельно с мощной сетью: режим синхронного компенсатора, режим синхронного генератора и режим синхронного двигателя. Анализ работы недовозбужденной и перевозбужденной синхронной машины в режимах компенсатора, генератора и двигателя.

Угловые характеристики активной мощности и момента явно- и неявно-полюсных синхронных машин. Синхронизирующий момент, синхронизирующая мощность, коэффициенты синхронизирующего момента и синхронизирующей мощности (удельный синхронизирующий момент и удельная синхронизирующая мощность). Статическая перегружаемость и статическая устойчивость синхронной машины.

Регулирование реактивной мощности синхронной машины при параллельной работе с сетью и поддержании постоянной активной мощности ( $U$ -образные кривые).

Рабочие характеристики синхронного двигателя.

### ***Методические советы по изучению раздела «Синхронные машины»***

Теория синхронной машины отличается тем, что результирующее магнитное поле в ней для удобства расчетов раскладывается на большее число составляющих по сравнению с другими видами электрических машин. Это особенно относится к явнополюсной машине, у которой магнитные проводимости для потока реакции якоря по продольной и поперечной осям неодинаковы. Каждая составляющая потока наводит в обмотке якоря свою ЭДС. Уравнение для напряжения и, следовательно, векторная диаграмма синхронной машины содержат большее число слагаемых и выглядят сложнее, чем для других типов машин.

Поэтому при изучении синхронных машин необходимо внимательнее рассматривать физическую картину явлений и стремиться раскрыть физический смысл каждой величины в уравнениях, описывающих тот или иной процесс.

Одним из важнейших вопросов теории синхронной машины является реакция якоря. Положение поля реакции якоря относительно поля возбуждения в синхронной машине зависит от характера нагрузки (от угла сдвига между векторами тока и ЭДС).

Изучая влияние реакции якоря на характеристику синхронной машины, необходимо обращать внимание на возможность их построения двумя способами: аналитически (с помощью векторных диаграмм) и опытным путем. Здесь же должны быть усвоены методы определения параметров. Численное значение



параметров различных типов синхронных машин нужно запомнить, понимая при этом, почему тот или другой параметр должен иметь именно такой порядок.

Режим работы синхронной машин, работающей параллельно с сетью бесконечной мощности, отличается от режима работы отдельного синхронного генератора. Частота и напряжение сети постоянны.

Следовательно, частота вращения поля якоря и напряжение на его зажимах измениться не могут.

При изменении момента на валу и постоянном токе возбуждения синхронная машина работает в режиме угловой характеристики. Если двигательный момент со стороны турбины увеличивается, то индуктор, по-прежнему вращаясь с синхронной скоростью, начнет опережать поле якоря, синхронная машина начинает работать в режиме генератора и отдавать активную мощность в сеть. Если к валу синхронной машины приложить тормозной момент, то индуктор отстанет от поля якоря и машина будет работать в двигательном режиме.

При постоянном моменте с изменением тока возбуждения машина работает в режиме  $U$ -образной характеристики. В перевозбужденном состоянии реактивная энергия отдается в сеть, а в недовозбужденном – забирается из сети для подмагничивания. При отсутствии момента на валу машина может работать как синхронный компенсатор, регулируя напряжение сети и коэффициент мощности.

Статическая и динамическая устойчивости определяют способность машины устойчиво работать в энергетической системе. Пределом статической устойчивости является максимальная электромагнитная мощность. Для ее увеличения необходимо проектировать машину с большим значением ОКЗ, что приводит к росту воздушного зазора и, следовательно, к увеличению размеров, веса и стоимости машины. Поэтому лишний запас статической устойчивости экономически нецелесообразен. Динамическую устойчивость увеличивают искусственно путем создания быстроотзывчивых автоматических систем форсировки возбуждения.

При изучении синхронных двигателей обратите внимание на особенности их пуска, особенно на асинхронный пуск и возникающее при этом явление одноосного эффекта.

### ***Вопросы и задания для самопроверки по разделу «Синхронные машины»***

1. Объясните устройство и принцип работы синхронной машины. Почему при построении теории синхронных машин их подразделяют на явнополюсные и неявнополюсные?

2. Покажите, что характер реакции якоря в синхронной машине зависит от угла сдвига по фазе между ЭДС и током якоря.

3. Объясните, почему в явнополюсной машине МДС реакции якоря целесообразно представить в виде двух составляющих по продольной и поперечной осям?

4. На какие составляющие раскладывается реальное магнитное поле при построении теории синхронных машин? Найдите в уравнениях для ЭДС члены, соответствующие отдельным магнитным потокам (для неявнополюсных и для явнополюсных машин).

5. Объясните физический смысл параметров синхронной машины в установившемся режиме работы. Назовите по памяти их средние значения в относительных единицах. Как они изменятся, если воздушный зазор в машине увеличится? Как влияет насыщение основной магнитной цепи на величину того или другого параметра?

6. Постройте полные и упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного синхронного генератора для каждого из следующих режимов работы: холостой ход, активная нагрузка, смешанная индуктивная, смешанная емкостная, чисто индуктивная и емкостная нагрузки, режим симметричного к. з. То же для явнополюсного генератора. Проследите с помощью векторных диаграмм характер действия реакции якоря в каждом из режимов.

7. Как определить изменение напряжения генератора при сбросе или набросе нагрузки и ток возбуждения при номинальной нагрузке с помощью векторной диаграммы с учетом и без учета насыщения? Велика ли ошибка в определении перечисленных величин без учета насыщения?

8. Объясните физический смысл угла сдвига по фазе между векторами ЭДС холостого хода и напряжения. Как величина этого угла зависит от нагрузки?

9. Что такое ОКЗ генератора? Как его величина влияет на перегрузочную способность и размеры генератора? Чему равняются средние значения ОКЗ в относительных единицах для турбо- и гидрогенераторов? Как определить ОКЗ опытным путем?

10. Как с помощью экспериментальных характеристик определить величины параметров синхронного генератора в установившемся симметричном режиме работы?

11. Почему расчетное индуктивное сопротивление Потье отличается от индуктивного сопротивления рассеяния?

12. Как практически проконтролировать выполнение всех условий включения синхронного генератора на параллельную работу?

13. Покажите, к чему приводят отклонения от идеальных условий синхронизации при включении генератора параллельно с сетью?

14. Как загрузить вновь включенный на параллельную работу генератор активной мощностью, реактивной мощностью?

15. С помощью энергетической и векторных диаграмм найдите выражения для электромагнитной мощности (момента) неявно- и явнополюсного синхронных генераторов. Какое допущение делается при выводе уравнения для

явнополюсной машины? Объясните физический смысл и причину появления второго слагаемого в уравнении электромагнитной мощности явнополюсного генератора.

16. Объясните, почему вектор ЭДС холостого хода опережает вектор напряжения синхронной машины в генераторном режиме, совпадает с ним на холостом ходу и отстает в двигательном режиме. Почему с ростом нагрузки угол сдвига фаз между векторами увеличивается? Может ли он стать больше девяноста градусов?

17. Покажите, что величина и знак удельной синхронизирующей мощности характеризуют способность ротора генератора возвращаться в исходное положение (способность синхронизироваться с сетью) при случайных отклонениях его скорости от заданной сетью.

18. Каким образом величина воздушного зазора влияет на параметры, характеристики и стоимость синхронной машины?

19. Объясните, почему в семействе  $U$ -образных характеристик линия, соединяющая точки с коэффициентом мощности, равным единице, отклоняется вправо с ростом нагрузки. Почему при уменьшении тока возбуждения кривая обрывается тем раньше, чем больше нагрузка?

20. Возьмите произвольную точку на  $U$ -образной характеристике и найдите коэффициент мощности, при котором работает машина в этой точке.

21. Каким образом можно изменить коэффициент мощности синхронного генератора, работающего параллельно с мощной сетью?

22. Объясните с физической точки зрения, почему при недовозбуждении синхронная машина потребляет реактивную мощность из сети.

23. Как поведет себя нагруженный синхронный генератор, работающий параллельно с сетью:

а) при потере возбуждения;

б) при внезапном отключении от сети;

в) при прекращении подачи воды или пара в турбину?

24. С какой целью в синхронных генераторах устанавливается демпферная клетка?

25. Покажите, что синхронная машина обратима, может работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Объясните конструктивные отличия двигателей по сравнению с генераторами. Чем они обусловлены?

26. Перечислите способы пуска синхронных двигателей. Объясните, зачем при асинхронном пуске синхронного двигателя обмотку возбуждения замыкают на активное сопротивление. Почему не на индуктивное? Нельзя ли оставить обмотку возбуждения разомкнутой?

27. Каким образом при работе синхронного двигателя можно регулировать его коэффициент мощности?

28. Сравните свойства синхронного и асинхронного двигателей. Оцените достоинства и недостатки каждого из них.

29. Объясните назначение и принцип работы синхронного компенсатора, его конструктивные отличия от двигателя и генератора.

## **2.6. Машины постоянного тока**

Назначение, паспортные данные, области применения. Принцип действия машины постоянного тока: принцип действия генератора постоянного тока, обратимость машин постоянного тока, роль щеточно-коллекторного узла. Основные элементы и характеристики якорных обмоток.

Вывод и анализ формул ЭДС якоря и электромагнитного момента машины постоянного тока. Влияние сдвига щеток с геометрической нейтрали на значение ЭДС якоря в режиме холостого хода. Амплитуда и частота пульсаций ЭДС якоря и их зависимость от количества коллекторных пластин.

Магнитное поле машины постоянного тока при нагрузке и установке щеток на геометрической нейтрали (поперечная реакция якоря). Причины возникновения кругового огня по коллектору. Реакция якоря при сдвиге щеток с геометрической нейтрали. Влияние сдвига щеток с геометрической нейтрали на величину ЭДС якоря. Способы ограничения реакции якоря. Компенсация реакции якоря в пределах полюсных наконечников с помощью компенсационной обмотки.

Причины искрения на коллекторе и классы коммутации. Физическая сущность коммутации: период коммутации, зона коммутации, реактивная коммутационная ЭДС, коммутационная ЭДС вращения, коммутирующее магнитное поле, основное уравнение коммутации, прямолинейная, замедленная и ускоренная коммутации, степень некомпенсации реактивной коммутационной ЭДС. Способы улучшения коммутации. Настройка коммутации с помощью добавочных полюсов.

Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения.

Характеристики генераторов постоянного тока: холостого хода, внешняя, регулировочная, нагрузочная. Характеристический (реактивный) треугольник. Процесс самовозбуждения генератора параллельного возбуждения.

Характеристики двигателей постоянного тока: моментная, скоростная, механические и рабочие.

Способы пуска двигателей постоянного тока: прямой, реостатный и путем плавного повышения питающего напряжения.

Принципы регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока. Работа двигателей постоянного тока в тормозных режимах.

### ***Методические советы по изучению раздела «Машины постоянного тока»***

При изучении принципа действия генератора постоянного тока необходимо ясно представить, как переменная ЭДС, создаваемая в обмотке якоря, с помощью коллектора преобразуется в постоянную. Этот процесс надо просле-

дить при рассмотрении принципов образования обмоток якоря. Для лучшего освоения теории обмоток рекомендуется построить радиальную и развернутую схемы обмотки кольцевого якоря с числом секций, отличным от числа секций, приведенного в учебниках (например, для восьми секций).

Затем, с помощью схемы обмотки, постройте электрическую схему параллельных ветвей и векторную диаграмму ЭДС (многоугольник ЭДС). Оцените величину пульсации ЭДС на щетках. Далее, преобразуйте обмотку кольцевого якоря в обмотку барабанного якоря и постройте ее развернутую схему.

При изучении реакции якоря постройте на развернутой схеме кривую результирующего поля (МДС и индукции) без учета и с учетом насыщения для случая, когда щетки установлены на геометрической нейтрали. Обратите внимание на местоположение максимума индукции результирующего поля вблизи набегающего края щетки для генератора и сбегающего – для двигателя. Оцените действие поперечной реакции на величину результирующего потока, на распределение напряжения по коллектору при нагрузке. Последнее сравните с холостым ходом. Обратите внимание, из каких физических предпосылок выводится формула дополнительной МДС, необходимой для компенсации размагничивающего влияния поперечной реакции якоря.

Уточните назначение компенсационной обмотки. Изучение влияния продольной реакции якоря обычно не вызывает трудностей.

Коммутация тока – наиболее сложная тема в теории машин постоянного тока. Прежде всего необходимо уяснить физическую сущность коммутационного процесса, а затем уже разобрать основные положения «классической теории». При этом следует обратить внимание на вредное влияние добавочного тока и на способы его компенсации. Объясните с точки зрения «классической теории» способы улучшения коммутации, а также способы опытной настройки и проверки коммутации. Обратите внимание на условия работы дополнительных полюсов и на вытекающие из них требования к конструкции этих полюсов.

Вид характеристик двигателей и генераторов легко объясняется при помощи основных уравнений с учетом действия реакции якоря. Однако необходимо всегда точно формулировать условия, при которых существует та или другая характеристика. Стоит лишь немного изменить условия, как данная характеристика приобретает совсем другой вид. Исследуя характеристики, полезно оценить область применения машин постоянного тока с разными способами возбуждения. Особое внимание при изучении генераторов с параллельным возбуждением надо обратить на три условия самовозбуждения. Способы регулирования скорости и торможения двигателей исследуются легко с помощью соответствующих характеристик.

### ***Вопросы для самопроверки по разделу «Машины постоянного тока»***

1. Каковы принципы действия и устройство простейших машин с кольцевым якорем?

2. Назовите основные элементы конструкции современной машины? Перечислите, какие обмотки могут быть в машине, их расположение и назначение. Как устроен коллектор?

3. Что называется геометрической и физической нейтралью машины? Как понимать выражение «щетки стоят на геометрической нейтрали»? Где на коллекторе находится геометрическая нейтраль?

4. Выведите формулу для расчета ЭДС якоря при расположении щеток на геометрической нейтрали.

5. Как изменится ЭДС якоря (при одной и той же кривой распределения магнитной индукции вдоль воздушного зазора на полюсном делении), если щетки сместить с геометрической нейтрали? Чему будет равна эта ЭДС на холостом ходу генератора при смещении щеток на 90 электрических градусов?

6. Что понимается под реакцией якоря? Как распределяется вдоль воздушного зазора по окружности МДС якоря при нагрузке машины? Где проходит магнитная ось якоря? Что называется линейной нагрузкой якоря?

7. Расскажите о реакции якоря генератора и распределении поля в воздушном зазоре при расположении щеток на геометрической нейтрали.

8. То же при сдвиге щеток с геометрической нейтрали.

9. Какова картина реакции якоря машины в двигательном режиме?

10. Почему, хотя и не так сильно, поперечная реакция якоря приводит к уменьшению магнитного потока под полюсом машины? От чего зависит величина эффекта уменьшения потока?

11. Какими мерами можно ослабить или вовсе ликвидировать влияние реакции якоря на неблагоприятное распределение напряжения по коллектору или вообще на работу машины при нагрузке?

12. Как устроена и каким образом включается компенсационная обмотка? Изобразите ее схему, например, для двухполюсной машины. Сформулируйте условия полной компенсации реакции якоря на полюсной дуге с помощью этой обмотки.

13. Изобразите характеристики холостого хода и нагрузочную генератора с независимым возбуждением. Между этими характеристиками впишите характеристический треугольник. Объясните физический смысл катетов этого треугольника.

14. Почему при уменьшении тока возбуждения генератора горизонтальный катет характеристического треугольника уменьшается? Чему он будет равен на участке, соответствующем прямолинейной части характеристики холостого хода при расположении щеток на геометрической нейтрали?

15. «Коммутация» буквально означает «переключение». Какой процесс коммутации (переключения) постоянно происходит при работе машины постоянного тока (что, из какой в какую цепь и когда переключается?) Что называется периодом коммутации? Оцените в секундах длительность периода коммутации.

16. Назовите и объясните физическую природу всех ЭДС, которые возникают в коммутируемой секции машины при положении щеток на геометрической нейтрали. Как они зависят от скорости вращения и тока якоря?

17. Для коммутируемой секции напишите уравнения Кирхгофа, решите их относительно тока в предположении равенства ширины щетки коллекторному делению и исследуйте полученное решение.

18. Какими способами можно получить практически прямолинейную коммутацию?

19. Где размещаются дополнительные полюса? Определите необходимую полярность дополнительных полюсов у генератора и двигателя. Как включается обмотка дополнительных полюсов? Не нарушится ли необходимая полярность дополнительных полюсов при использовании генератора двигателем или при изменении направления вращения?

20. Почему под дополнительными полюсами по сравнению с главными делают увеличенный воздушный зазор? С какой целью этот зазор частично, в виде немагнитных прокладок, переносят к месту крепления полюсов к станине?

21. Как рассчитать необходимую МДС обмотки дополнительного полюса машины без компенсационной обмотки и с компенсационной обмоткой?

22. Почему для получения удовлетворительной коммутации большое значение имеет сорт щеток? Назовите основные типы щеток и их область применения, а также допустимые средние плотности тока.

23. Как оценивается качество работы щеточных контактов машины? Назовите степени искрения и охарактеризуйте их.

24. Сформулируйте условия самовозбуждения генераторов с параллельным возбуждением. Напишите дифференциальное уравнение для процесса самовозбуждения на холостом ходу генератора. От чего зависит скорость процесса самовозбуждения? Охарактеризуйте установившийся режим этого процесса. Что такое критическое сопротивление цепи возбуждения? Как оно изменяется с ростом скорости генератора?

25. Что дает дополнительная последовательная обмотка возбуждения генератора со смешанным возбуждением? Как и почему изменяется внешняя характеристика генератора, если последовательную обмотку включить в магнитном отношении навстречу основной параллельной обмотке?

26. Напишите и поясните все основные соотношения для напряжений и токов в цепи якоря, а также скорости вращения и вращательного момента машины постоянного тока в двигательном режиме. Самостоятельно сделайте выводы этих соотношений.

27. Изобразите энергетические диаграммы для якоря в генераторном и двигательном режимах машины. Объясните их, сопровождая необходимыми соотношениями.

28. Как пускаются в ход двигатели постоянного тока? Изобразите принципиальную схему пуска двигателя параллельного возбуждения. Каково назначение пускового реостата? В каком положении должен находиться регулиро-

вочный реостат в цепи возбуждения? Почему нельзя цепь возбуждения подключить к выводам якоря двигателя, а рекомендуется подключить так, чтобы она была под полным напряжением питающей сети?

29. Как можно регулировать скорость вращения двигателей параллельного и последовательного возбуждения? Поясните необходимыми соотношениями, изобразите характеристики двигателей.

### ***2.7. Лабораторный практикум***

1. Маркировка, определение групп соединения и фазировка обмоток трехфазных трансформаторов.

2. Испытание трехфазного трансформатора косвенным методом.

3. Испытание асинхронного двигателя с фазным ротором.

4. Испытание синхронного генератора.

5. Испытание синхронного двигателя.

6. Испытание генераторов постоянного тока.

7. Испытание двигателя постоянного тока.

### ***2.8. Курсовой проект, содержание, требования к оформлению***

Курсовой проект выполняют студенты специализаций 130400 – «Электрификация и автоматизация горного производства» (ГД-11-7) и 140400 – «Электропривод и автоматика» (ЭЭТ-11-6).

Целью выполнения курсового проекта по дисциплине «Электрические машины» является закрепление теоретических положений дисциплины и формирование у студентов практических навыков и приемов расчета конкретных электрических машин.

Курсовой проект заключается в расчете и конструировании асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Выбор темы проектирования объясняется тем, что в настоящее время асинхронные двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода большинства машин и механизмов во всех отраслях народного хозяйства и, в частности, в горной промышленности.

При курсовом проектировании каждый студент получает на кафедре индивидуальное задание на расчет и конструирование конкретного асинхронного двигателя. Полученное техническое задание обязательно приводится на первой странице пояснительной записки.

*Техническое задание включает следующие данные:*

1) тип двигателя;

2) назначение;

3) номинальный режим работы;

4) номинальная мощность;

5) номинальное линейное напряжение  $U/\Delta$ ;



- 6) число полюсов;
- 7) базисная частота сети;
- 8) частоты сети, при которых рассчитываются рабочие характеристики асинхронного двигателя;
- 9) закон изменения напряжения сети в зависимости от значения частоты сети;
- 10) степень защиты;
- 11) способ охлаждения;
- 12) исполнение по способу монтажа;
- 13) климатические условия;
- 14) класс нагревостойкости изоляции.
- 15) маркировка взрывозащиты.

Также в задании приведены основные требования к проектируемому двигателю:

- значение КПД и коэффициента мощности в номинальном режиме должны быть не хуже, чем у аналогичных серийных двигателей;
- значения перегрузочной способности и кратности начального пускового момента и значения кратности начального пускового тока должны соответствовать требованиям задания.

#### *Содержание курсового проекта:*

1. Выбор главных размеров асинхронного двигателя. Выводы по разделу 1. В выводах необходимо объяснить, к какой границе оптимальной зоны приближается величина критерия правильности выбора главных размеров  $\lambda$  и какие это даёт преимущества.

2. Выбор типа обмотки статора. Расчет, составление таблицы укладки обмотки в пазы и чертежа схемы обмотки. Выводы по разделу 2. В выводах необходимо сформулировать основные требования, предъявляемые к трёхфазным обмоткам и объяснить преимущества и недостатки выбранной обмотки перед другими видами (однослойной перед двухслойной или наоборот).

3. Расчет размеров зубцовой зоны статора. Выводы по разделу 3. В выводах надо объяснить вводимые технологические ограничения на параметры обмоточного провода и почему наложены жёсткие ограничения на величину коэффициента заполнения паза обмоточным проводом  $k_z$ .

4. Выбор воздушного зазора. Расчет короткозамкнутого ротора. Выводы по разделу 4. В выводах необходимо объяснить влияние величины воздушного зазора на энергетические показатели двигателя.

5. Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя. Суть расчёта магнитной цепи, схема расчёта магнитной цепи. Выводы по разделу 5. В выводах надо оценить правильность выбранных размерных соотношений магнитопровода и обмоточных данных по величинам коэффициентов  $k_z$  и  $k_\mu$  и по значению намагничивающего тока  $I_\mu$ .

6. Расчет параметров асинхронного двигателя для номинального режима. Выводы по разделу 6. В выводах необходимо объяснить, каким образом оценивают правильность расчёта параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя. Также надо пояснить, на какие составляющие подразделяют реальное магнитное поле и какие индуктивные сопротивления характеризуют эти составляющие. Что такое коэффициент магнитной проводимости и какие коэффициенты магнитной проводимости рассчитываются при определении индуктивных сопротивлений рассеяния фаз статора и ротора. При расчёте  $r_2$  и  $x_2$  надо пояснить, какой электрической схемой представляется реальная короткозамкнутая обмотка ротора типа «беличья клетка», чему равны число фаз  $m_2$ , число витков в фазе  $w_2$  и обмоточный коэффициент  $k_{об2}$ , какую часть обмотки короткозамкнутого ротора принимают за фазу и какой ток считается фазным.

7. Расчет потерь и КПД асинхронного двигателя. Виды потерь. Когда учитывают поверхностные и пульсационные потери в магнитопроводах статора и ротора, а когда – только в магнитопроводе ротора. Выводы по разделу 7. В выводах надо пояснить, какие технические решения позволяют снизить магнитные потери.

8. Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя для заданных частот сети. Выводы по разделу 8. В выводах необходимо прокомментировать, как изменяются эксплуатационные характеристики  $\eta = f(P_2)$ ,  $\cos\phi = f(P_2)$  и  $\Omega_2 = f(M_{эм})$  при изменении частоты и напряжения сети.

9. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя. Физическая суть явлений вытеснения тока и насыщения в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором и использование этих явлений для улучшения пусковых свойств двигателя. Выводы по разделу 9. В выводах надо объяснить, какие технические решения позволяют увеличить значение начального пускового момента асинхронного двигателя и какие при этом необходимо учитывать ограничения.

10. Тепловой и вентиляционный расчеты асинхронного двигателя. Выводы по разделу 10. В выводах надо пояснить схему движения охлаждающего воздуха при используемой в двигателе степени защиты, назвать используемую систему вентиляции и доказать достаточно ли система самовентиляции при минимальной частоте сети.

11. Составление таблицы сравнения основных размеров, параметров, рабочих и пусковых характеристик рассчитанного двигателя с основными размерами, параметрами, рабочими и пусковыми характеристиками однотипного серийного двигателя (у аналога должны быть такие же номинальная мощность, степень защиты и число полюсов вращающегося магнитного поля). Выводы по таблице сравнения. В выводах необходимо показать, какие характеристики рассчитанного двигателя получились лучше, чем у аналога, а какие хуже и дать объяснение, почему получили такие результаты. Если характеристики рассчитанного двигателя уступают аналогу, то надо указать пути улучшения этих характеристик.

12. Обоснование и описание конструкции рассчитанного асинхронного двигателя: установочно-присоединительные размеры, сердечник и обмотка статора, сердечник и обмотка ротора, вентилятор, станина, подшипниковые щиты, подшипниковые узлы, выводное устройство.

13. Оформление пояснительной записки и выполнение графической части проекта. Графическая часть включает: продольный и поперечный разрезы двигателя, паз и зубец статора, паз и зубец ротора, катушку обмотки статора, спецификацию основных частей двигателя, спецификацию корпусной изоляции обмотки статора и выполняется на одном листе формата 841×594 мм в карандаше в соответствии с правилами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

Расчетная часть проекта оформляется в виде пояснительной записки на листах стандартного формата 210×297 мм. Необходимые графики, рисунки и схемы выполняются на листах миллиметровой бумаги формата 210×297 или 420×297 мм. Минимально необходимый набор рисунков включает условную схему фазы *A* обмотки, полную схему обмотки (каждая фазная обмотка вычерчивается своим цветом), пазы статора и ротора с буквенными обозначениями размеров, расчётную схему магнитной цепи, схемы замещения асинхронного двигателя и рабочие и пусковые характеристики двигателя.

Титульный лист записки выполняется по форме (рис. 2.1).

За титульным листом вставляется пустой лист с заголовком «Рецензия».

Текст записки располагается по указанной форме (табл. 2.1).

Цифровая подстановка в уравнения дается один раз без промежуточных сокращений и расчетов. Численное значение символа должно в формуле занимать то же место, что и сам символ.

Таблица 2.1

#### Оформление текста пояснительной записки

№ п/п	Наименование расчетных величин, формулы и пояснения	Обозначение	Величина	Размерность
5.	<p>Расчетная мощность</p> $P' = P_2 \frac{k_E}{\eta \cdot \cos\varphi} = 15 \cdot 10^3 \frac{0,97}{0,89 \cdot 0,88} = 18578 \text{ В} \cdot \text{А}$ <p>где <math>k_E</math> – рис. 6–8, с. 164, [1],  <math>\eta, \cos\varphi</math> – рис. 6–9, а, с. 165 [1]</p>	$P'$	18578	В·А

Расчеты сопровождаются пояснениями технической и экономической целесообразности выбираемых параметров. Для варьируемых величин указываются рекомендуемые пределы со ссылкой на литературу.

При выполнении расчета рабочих характеристик для базисной частоты приводится подробный расчет для скольжения:  $S_{н.пред} = r'_{2*}$ . Для остальных

значений скольжений данные расчета представляются в табличной форме. Рабочие характеристики рассчитываются для диапазона скольжений  $0,2S_{н.пред} - 1,2S_{н.пред}$  с шагом приращения скольжения  $T = 0,2S_{н.пред}$  и для скольжения  $S_{кр. пред}$ . Данные номинального режима ( $P_2 = P_{2н}$ ) могут быть рассчитаны аналитически или определены из графиков рабочих характеристик.

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО  
«Уральский государственный горный университет»

*Кафедра электротехники*

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО  
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ  
ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ  
(ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ИСПОЛНЕНИЯ)  
МОЩНОСТЬЮ 15 кВт, ЧИСЛОМ ПОЛЮСОВ  $2p=4$ ,  
СТЕПЕНЬЮ ЗАЩИТЫ IP44**

**Пояснительная записка к курсовому проекту  
по дисциплине «Электрические машины»**

Разработчик,  
студент группы ГД-11-7

**И. И. Иванов**

Руководитель проекта,  
профессор

**А. П. Петров**

Екатеринбург – 2012

Рис. 2.1. Титульный лист

Для частот сети, отличающихся от базисной  $f_{1н}$ , необходимо определить предварительные значения номинальных скольжений  $S_{н. пред}(f_{min}, f_{max})$ , которыми и надо пользоваться при расчёте рабочих характеристик при этих частотах.

Предварительные значения номинальных скольжений  $S_{н. пред (f min)}$  при  $f_{min}$ ,  $U_{1 min}$  и  $S_{н. пред (f max)}$  при  $f_{max}$ ,  $U_{1 max}$  рассчитаем по условию постоянства электрических потерь в обмотке ротора

$$\Delta p_{э2} = m_1 r_2' (I_{2н}')^2 = const,$$

где  $I_{2н}'$  – приведённый номинальный фазный ток ротора при  $f_{1н}$  и  $U_{1н}$ . Следовательно, и при других значениях частот и напряжений приведённый фазный ток ротора должен быть равен номинальному при номинальном скольжении.

Из уточнённой Г-образной схемы замещения

$$I_{2н}' = \frac{\alpha_U U_{1н}}{\sqrt{\left(r_1 + C_1 \frac{r_2'}{S_{н(f1)}}\right)^2 + (\alpha_f x_k)^2}},$$

где  $C_1 = 1 + x_1/x_{12}$ ,  $x_k = x_1 + C_1 x_2'$ .

Решая это уравнение относительно  $S_{н(f1)}$ , получим

$$d^2 + nd - k = 0,$$

где  $d = C_1 r_2' / S_{н(f1)}$ ,  $n = 2r_1$ ,  $k = \left(\frac{\alpha_U U_{1н}}{I_{2н}'}\right)^2 - r_1^2 - (\alpha_f x_k)^2$ .

При расчёте коэффициента  $k$  корректирующие коэффициенты  $\alpha_U$  и  $\alpha_f$  должны соответствовать значениям  $U_{1 min}$ ,  $f_{min}$  при вычислении  $S_{н пред (f min)}$  и  $U_{1 max}$ ,  $f_{max}$  при определении  $S_{н пред (f max)}$ .

$$d_{1,2} = -\frac{n}{2} \pm \sqrt{\frac{n^2}{4} + k}.$$

$$S_{н(f1)} = \frac{C_1 r_2'}{d}.$$

Корень квадратного уравнения выбираем по условию:  $0 < S_{н(f1)} < S_{кр(f1)}$ .

Предварительные значения критических скольжений при различных частотах сети рассчитываем по формуле

$$S_{кр. пред (f1)} = C_1 r_2' / \sqrt{r_1^2 + (\alpha_f x_k)^2}.$$

Рабочие характеристики рассчитывают

$$\begin{aligned} 0,2S_{н. пред (f1н)} \dots \dots \dots S_{н. пред (f1н)}, & \quad 1,2S_{н. пред (f1н)}, S_{н (f1н)}, S_{кр. пред (f1н)}; \\ 0,2S_{н. пред (f min)} \dots \dots \dots S_{н. пред (f min)}, & \quad 1,2S_{н. пред (f min)}, S_{н (f min)}, S_{кр. пред (f min)}; \\ 0,2S_{н. пред (f max)} \dots \dots \dots S_{н. пред (f max)}, & \quad 1,2S_{н. пред (f max)}, S_{н (f max)}, S_{кр. пред (f max)}. \end{aligned}$$

В разделе «Расчёт рабочих характеристик» приводится подробный расчёт рабочих характеристик для скольжений  $S_{н. пред (f1н)}$ ,  $S_{н. пред (f min)}$  и  $S_{н. пред (f max)}$ . Для остальных значений скольжений все расчёты сводятся в таблицы.

Результаты расчёта рабочих характеристик представляем в следующем виде:

Рис. 1.  $P_1 = f(P_2)$ ; Рис. 2.  $I_1 = f(P_2)$ ; Рис. 3.  $I_2 = f(P_2)$ ; Рис. 4.  $\cos\varphi = f(P_2)$ ;  
 Рис. 5.  $\eta = f(P_2)$ ; Рис. 6.  $S = f(P_2)$ ; Рис. 7.  $\Omega_2 = f(P_2)$ ; Рис. 8.  $M_{эм} = f(P_2)$ ;  
 Рис. 9.  $M_2 = f(P_2)$ .

На каждом рисунке функция изображается при трёх различных частотах (минимальной, номинальной и максимальной) и, соответствующих им, значениях напряжений.

После расчёта и построения графиков рабочих характеристик надо изобразить на одном рисунке три механические характеристики асинхронного двигателя:  $\Omega_{2(f_{1н})} = f(M_{эм})$  на участке  $\Omega_{1(f_{1н})} - \Omega_{2кр(f_{1н})}$ ;  $\Omega_{2(f_{мин})} = f(M_{эм})$  на участке  $\Omega_{1(f_{мин})} - \Omega_{2кр(f_{мин})}$ ; и  $\Omega_{2(f_{макс})} = f(M_{эм})$  на участке  $\Omega_{1(f_{макс})} - \Omega_{2кр(f_{макс})}$ .

$$\Omega_{1(f_1)} = 4\pi\alpha_f f_{1н} / 2p,$$

$$\Omega_{2кр(f_1)} = \Omega_{1(f_1)} / (1 - S_{кр.пред.(f_1)}).$$

Если разработчик предпочитает измерять скорость вращения ротора в об/мин, то надо произвести пересчёт по формуле:  $n = 30\Omega / \pi$ .

Завершая этот раздел, необходимо провести сравнительный анализ рабочих и механических характеристик при различных частотах и напряжениях, обратив особое внимание на характеристики:  $\cos\varphi = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$  и  $\Omega = f(M_{эм})$ , а также на перегрузочные способности двигателя при различных частотах.

При выполнении расчета пусковых характеристик приводится подробный расчет для скольжения  $S = 1$ . Для остальных значений скольжений (0,8; 0,6; 0,4; 0,2;  $S_{кр.пред}$ ;  $S_{кр}$ ;  $0,6S_{кр}$ ;  $0,4S_{кр}$ ) данные расчета представляются в табличной форме. Определение точного значения критического скольжения  $S_{кр}$  детально объясняется.

При составлении таблицы сравнения (раздел 11) данные аналогичного серийного двигателя берутся из книги\*:

а) для степени защиты IP44: табл. 2.1, с. 27–31; табл. 3.1, с. 66–70; табл. 6.1, с. 181–183 и с. 184–247;

б) для степени защиты IP23: табл. 2.2, с. 32–34; табл. 3.2, с. 71–73, табл. 6.2, с. 181–183 и с. 248–285.

При обосновании конструкции двигателя (раздел 12), кроме основных конструктивных узлов, необходимо выбрать стандартные размеры свободного конца вала (вал проверить на наибольший момент вращения), подшипники качения, количество и размеры вентиляционных лопаток ротора, а для двигателя со степенью защиты IP44 дополнительно – количество и размеры продольных ребер станины и центробежный вентилятор.

-----  
 \*Асинхронные двигатели серии 4 А: справочник / Э. А. Кравчик [и др.]. М.: Энергоиздат, 1982.

Основным материалом для разработки конструкции двигателя являются заводские чертежи и данные ГОСТ, справочников и каталогов.

Конструктивная компоновка двигателя начинается с вычерчивания активной части машины по размерам, полученным в результате расчета. Затем вычерчивается лобовая часть обмотки статора и подшипниковые щиты. Зазоры между лобовой частью и подшипниковыми щитами выбираются примерно такими же, как у серийных однотипных машин.

## **2.9. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

### **Основная литература**

*Полузадов В. Н.* Электрические машины: конспект лекций:

Часть 1. Трансформаторы. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2004. 103 с.

Часть 2. Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2004. 63 с.

Часть 3. Асинхронные машины. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 100 с.

Часть 4. Синхронные машины. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. 88 с.

Часть 5. Машины постоянного тока. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 120 с.

*Полузадов В. Н.* Электрические машины: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 512 с.

### **Дополнительная литература**

*Вольдек А. И.* Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. 832 с.

*Копылов В. П.* Электрические машины. М.: Логос, 2000. 607 с.

*Токарев Б. Ф.* Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1990. 624 с.

*Электрические машины: Асинхронные машины: учеб. для электромех. спец. вузов / В. И. Радин [и др.] // М.: Высшая шк., 1988. 328 с.*

*Электрические машины: Машины постоянного тока: учеб. для студ. электромех. спец. вузов / В. С. Хвостов // М.: Высшая шк., 1988. 336 с.*

*Электрические машины: Сборник задач и упражнений / А. Данку, А. Фаркаш А., Л. Надь // М.: Энергоатомиздат, 1984. 360 с.*

*Электрические машины: Сборник задач: учеб. пособие для спец. «Электромеханика» / В. И. Читечян // М.: Высшая шк., 1988. 231 с.*

*Электрические машины: Синхронные машины: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян // М.: Высшая шк., 1990. 304 с.*

*Электрические машины: Трансформаторы: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б. Н. Сергеевков [и др.] // М.: Высшая шк., 1989. 352 с.*

*Электрические машины: учеб. для электротехн. спец. вузов. В 2-х ч. Ч. 1 и 2. 2-е изд. / Д. Э. Брускин [и др.]. М.: Высшая шк., 1987. 319 с., 335 с.*

### **Методические пособия по лабораторным работам**

*Босько Ф. Д.* Испытание асинхронного двигателя с фазным ротором: методическое пособие. Екатеринбург, Изд-во УГГГА, 2001. 44 с.

*Испытание двигателя постоянного тока с независимым возбуждением:* методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Электрические машины» для самостоятельной работы студентов электротехнических специальностей / сост.: Д.П. Банников. Свердловск: Изд-во СГИ, 1987. 28 с.

*Испытание синхронного генератора:* методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Электрические машины» для самостоятельной работы студентов электротехнических специальностей / сост.: В. Н. Полузадов. Свердловск: Изд-во СГИ, 1988. 38 с.

*Испытание синхронного двигателя:* методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Электрические машины» для самостоятельной работы студентов электротехнических специальностей / сост.: В. Н. Полузадов. Свердловск: Изд-во СГИ, 1988. 38 с.

*Методические указания к лабораторной работе «Испытание трехфазного трансформатора косвенным методом» по дисциплине «Электрические машины» для студентов специальностей 0634 – «Электрификация и автоматизация горных работ» и 0506 – «Эксплуатация электромеханического оборудования шахт и карьеров» / сост.: Г. С. Хронусов. –Свердловск: Изд-во СГИ, 1987. 34 с.*

*Методические указания к лабораторной работе «Маркировка, определение групп соединения и фазировка обмоток трехфазных трансформаторов» по дисциплине «Электрические машины» для студентов специальностей 0634 – «Электрификация и автоматизация горных работ» и 0506 – «Эксплуатация электромеханического оборудования шахт и карьеров» / сост.: Г. С. Хронусов. Свердловск: Изд-во СГИ, 1987. 36 с.*

*Хахин Ю. М.* Испытание генераторов постоянного тока: методическое пособие. Екатеринбург. Изд-во УГГГА, 2000. 44 с.

### ***Учебная и методическая литература по курсовому проектированию***

#### ***Основная***

*Полузадов В. Н., Дружинин А. В.* Проектирование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 202 с.

*Полузадов В. Н., Дружинина Е. А.* Электрические машины. Проектирование асинхронных двигателей общего назначения и взрывозащищенных исполнений. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 381 с.

#### ***Дополнительная***

*Асинхронные двигатели серии 4А:* Справочник / Э. А. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

*Проектирование электрических машин:* учеб. для вузов / под ред. И. П. Копылова. 4-е изд. М.: Высшая школа, 2005. 767 с.

*Справочник по электрическим машинам:* В 2 т. / под ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова М.: Энергоатомиздат, 1988.



### **3. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ**

#### ***3.1. Цель контрольного задания***

Целью контрольного задания является развитие у студентов самостоятельного творческого научного мышления в области теории и расчета электромагнитных и электромеханических преобразователей энергии.

Знание и понимание предмета, умение применять свои знания на практике, а главное, самостоятельное творческое мышление студента наиболее полно выявляется при решении им специально подобранных задач. Поэтому для каждого студента умение решать задачи является одним из главных требований при изучении дисциплины.

Академик П. Л. Капица в книге «Эксперимент, теория и практика» сформулировал эту мысль так: «Решение задач дает возможность не только самому студенту применять свои знания к решению практических проблем, но и для преподавателя задачи являются одним из наиболее эффективных способов проверить, насколько глубоко понимает студент предмет, не являются ли его знания только накоплением заученного наизусть».

К решению каждой задачи контрольного задания следует приступать только после изучения соответствующего раздела теоретического курса в объеме учебной программы по одному из рекомендованных в ней учебников.

Перед самостоятельным решением задачи контрольного задания рекомендуется разобрать ход решения нескольких типовых задач.

При таком подходе к изучению дисциплины знание и понимание предмета у студента трансформируется в специфическое сознание и развивается его самостоятельное аналитическое и творческое мышление.

#### ***3.2. Требования к выполнению и оформлению контрольного задания***

1. Контрольное задание состоит из шести задач. Студенты специальности 130400 – «Горное дело» специализации «Электрификация и автоматизация горного производства» и бакалавры направления 140400 – «Электроэнергетика и электротехника» решают контрольное задание полностью, а студенты специализации 130400 – «Горные машины и оборудование» – решают задачи № 1, 3А, 4 и 5.

2. При сдаче экзамена (теоретического зачета) студенты заочной формы обучения обязаны представить рецензию на контрольное задание и уметь отвечать на замечания, приведенные в ней.

3. Студенты заочной формы обучения определяют номер варианта контрольного задания, как сумму двух последних цифр учебного шифра студента. Например, если учебный шифр 35011, то номер варианта – 2.

4. Контрольная работа выполняется в отдельной тетради, на обложке которой должны быть написаны: название контрольной работы, фамилия, имя,

отчество студента, его домашний адрес, номер учебного шифра, наименование и год издания использованных методических указаний.

5. На каждой странице должны быть оставлены поля шириной не менее 3 см для замечаний рецензента.

6. Контрольное задание выполняется *чернилами*, графическая часть задания (схемы, кривые, векторные диаграммы) – карандашом в масштабе (с указанием последнего).

7. Каждую из задач контрольного задания следует начинать с новой страницы.

8. Электрические схемы вычерчиваются согласно стандарту.

9. Условия задачи выписываются полностью без сокращений.

10. Решения задач сопровождаются краткими пояснениями. Названия всех вычисляемых величин обязательно приводятся.

11. Текст, формулы, числовые выкладки должны быть четкими и без помарок. Цифровая подстановка в уравнения должна даваться один раз без промежуточных сокращений и расчетов. Численное значение каждого символа должно обязательно занимать то же место в формуле, что и сам символ. Все расчеты необходимо вести в системе СИ. Сокращенные обозначения единиц измерения всех вычисленных физических величин должны быть обязательно приведены.

12. В конце контрольной работы необходима подпись автора и дата выполнения работы.

13. Если контрольное задание не зачтено, студент обязан исправить ошибки, указанные преподавателем, и представить его на повторную рецензию.

14. Студенты, не сдавшие на проверку до начала лабораторно-экзаменационной сессии соответствующих решенных контрольных заданий, к сдаче зачета и экзамена по этой части дисциплины не допускаются.

### ***3.3. Условия контрольного задания и варианты расчета***

#### ***3.3.1. Раздел 1. Трансформаторы***

##### ***Задача № 1***

Известны следующие паспортные данные трансформатора (табл. 3.1):

- число фаз  $m = 3$ ; частота сети  $f = 50$  Гц;
- схема и группа соединения обмоток ВН/НН –  $N$ ;
- номинальная мощность  $S_H$  ;
- номинальное (линейное) напряжение обмотки ВН  $U_{лн(вн)}$ ;
- номинальное (линейное) напряжение обмотки НН  $U_{лн(нн)}$ ;
- потери холостого хода (мощность холостого хода при номинальном напряжении)  $P_{он}$ ;
- потери короткого замыкания (мощность короткого замыкания при напряжении короткого замыкания и расчетный для данного класса изоляции температуре)  $P_{кн(75)}$ ;

- напряжение короткого замыкания  $u_{к(75)} \%$ ;
  - ток холостого хода  $i_0 \%$  ( $i_0\% = (I_0/I_{1H})100$ );
  - расчетная температура обмоток трансформатора  $\theta = 75^\circ \text{C}$ .
- При всех расчетах первичной считать обмотку ВН.

Таблица 3.1

## Исходные данные к задаче № 1

Номер варианта	Схема ВН/НН	$S_H$ , кВ·А	$U_{лн(вн)}$ , кВ	$U_{лн(нн)}$ , кВ	$P_{OH}$ , Вт	$P_{KH(75^\circ)}$ , Вт	$u_{к(75^\circ)}$ , %	$i_0$ , %	$Z_{нар}$ , Ом	$\cos\varphi_{нар}$
0	Y/Y <sub>n</sub> -0	250	6	0,23	660	3700	4,5	4	0,265	0,8
1	Δ/Y <sub>n</sub> -11	250	10	0,69	660	4200	4,7	4	2,4	0,85
2	Y/Δ-11	400	10	0,23	920	5500	4,5	3,5	0,495	0,8
3	Δ/Y <sub>n</sub> -11	400	6	0,69	920	5900	4,5	3,5	1,5	0,85
4	Y/Y <sub>n</sub> -0	630	10	0,4	1310	7600	5,5	3	0,315	0,8
5	Δ/Y <sub>n</sub> -11	630	6	0,69	1310	8500	5,5	3	0,95	0,85
6	Y/Δ-11	200	6	0,4	875	2535	2,8	2,5	3,0	0,8
7	Y/Y <sub>n</sub> -0	200	6	0,69	875	2535	2,8	2,5	3,0	0,85
8	Y/Δ-11	250	6	0,4	740	3350	3,4	2,3	2,4	0,8
9	Y/Y <sub>n</sub> -0	250	6	0,69	740	3350	3,4	2,3	2,4	0,75
10	Y/Δ-11	400	6	0,4	2180	3700	3,5	2,1	1,5	0,8
11	Y/Y <sub>n</sub> -0	400	6	0,69	2180	3700	3,5	2,1	1,5	0,75
12	Y/Δ-11	630	6	0,4	1560	8500	5,5	2,0	0,949	0,8
13	Y/Y-0	630	6	0,69	1560	8500	5,5	2,0	0,95	0,75
14	Y/Δ-11	320	6	0,4	1675	2630	2,5	2,2	1,85	0,8
15	Y/Y <sub>n</sub> -0	320	6	0,69	1675	2630	2,5	2,2	1,875	0,7
16	Y/Y <sub>n</sub> -0	630	35	0,69	1900	7600	6,5	2,0	0,95	0,7
17	Y/Δ-11	630	35	0,4	1900	7600	6,5	2,0	0,948	0,65
18	Y/Y <sub>n</sub> -0	400	35	0,69	1350	5500	6,5	2,1	1,5	0,7
19	Y/Δ-11	400	35	0,4	1350	5500	6,5	2,1	1,866	0,65
20	Y/Y <sub>n</sub> -0	250	35	0,69	1000	3700	6,5	2,3	2,4	0,7
21	Y/Δ-11	250	35	0,4	1000	3700	6,5	2,3	2,385	0,65
22	Y/Y <sub>n</sub> -0	160	35	0,69	700	2650	6,5	2,4	3,75	0,8
23	Y/Δ-11	160	35	0,4	700	2650	6,5	2,4	4,16	0,7
24	Y/Y <sub>n</sub> -0	100	35	0,69	465	1970	6,5	2,6	6,0	0,8

**По известным паспортным данным необходимо сделать следующие расчеты и построения:**

1. Начертите схему соединения обмоток трансформатора заданной группы и постройте векторную диаграмму ЭДС для доказательства того, что начерченная Вами, схема соответствует данной группе.

2. На схеме соединения обмоток трансформатора покажите линейные и фазные напряжения и токи.

3. Определите номинальные фазные значения напряжений и токов обмоток ВН и НН:  $U_{1H}$ ,  $U_{2H}$ ,  $I_{1H}$ ,  $I_{2H}$ . Укажите, какие фазные напряжения и токи Вы

приняли за первичные и какие – за вторичные.

4. Рассчитайте коэффициент трансформации  $K$ .

5. Определите параметры Т-образной электрической схемы замещения трансформатора:  $r_m$ ,  $x_m$ ,  $r_1$ ,  $r'_2$ ,  $x_1$ ,  $x'_2$  (при расчете полагать  $r_1 = r'_2$  и  $x_1 = x'_2$ ). Начертите Т-образную схему замещения с указанием численных значений всех параметров и электрических величин.

6. Рассчитайте параметры основного треугольника короткого замыкания  $u_{к(75)} \%$ ,  $u_{ка(75)} \%$  и  $u_{кг(75)} \%$  и начертите основной треугольник короткого замыкания.

7. Переведите все параметры Т-образной схемы замещения в относительные единицы (о. е.):

$$r_{m*}, x_{m*}, r_{1*}, r'_{2*}, x_{1*}, x'_{2*}, \underline{Z}'_{\text{нагр}*} = r'_{\text{нагр}*} + jx'_{\text{нагр}*}, \\ \cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{инд}).$$

8. Определите истинные значения сопротивлений обмотки НН при температуре  $\theta = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $r_{2(75^\circ)}$ ,  $x_2$  и истинные значения активных сопротивлений обмоток ВН и НН при температуре  $V = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $r_{1(20^\circ)}$  и  $r_{2(20^\circ)}$ . При расчете считать, что обмотки выполнены из медного провода. Указать, будут ли изменяться значения индуктивных сопротивлений при изменении температуры обмоток.

9. Составьте упрощенную электрическую схему замещения трансформатора и определите фазные значения тока  $I_2$  и напряжения  $U_2$  при включении во вторичную цепь обмотки НН нагрузки  $\underline{Z}_{\text{нагр}} (\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{инд}))$ . При расчете определите в комплексной форме приведенные значения тока  $-\dot{I}'_2$  и  $-\dot{U}'_2$ , а затем их действующие значения  $I'_2$  и  $U'_2$ . От значений  $I'_2$  и  $U'_2$  перейдите к истинным значениям  $I_2$  и  $U_2$ . Повторите расчет при  $\underline{Z}_{\text{нагр}} (\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{емк}))$ .

10. Определите значения коэффициента нагрузки  $\beta$  при включении во вторичную цепь обмотки НН сопротивления  $\underline{Z}_{\text{нагр}} (\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{инд}))$  и оптимальное значение коэффициента нагрузки трансформатора  $\beta_{\text{опт}}$ .

11. Ввиду того, что коэффициент мощности  $\cos \varphi_2$  предприятия, согласно действующему стандарту, должен находиться в пределах  $0,92 - 0,95$ , нужно рассчитать емкость батареи статических конденсаторов, которую необходимо подключить к вторичной обмотке НН трансформатора, чтобы достичь уровня коэффициента мощности  $0,95$  при нагрузке  $\underline{Z}_{\text{нагр}} (\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{инд}))$ . Кратко поясните, почему стандарт устанавливает значения коэффициента мощности предприятия на уровне  $0,92 - 0,95$ , т. е. близким к единице, и почему экономически не выгодна эксплуатация электрооборудования с низким значением коэффициента мощности. Рассчитайте, во сколько раз уменьшается ток  $I_1$  и электрические потери  $\Delta p$ , во всех звеньях линии электропередачи (ЛЭП) при включении батареи конденсаторов. Определите реактивную мощность конденсаторной батареи  $Q_C$  при  $U_2 = U_{2Н}$ . Расчеты должны быть проиллюстрированы электриче-

схемой замещения и диаграммой проводимостей на комплексной плоскости.

12. Рассчитайте изменения вторичных напряжений и значения вторичных напряжений при включении во вторичную цепь обмотки

$$\underline{Z}_{\text{нагр}} (\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{инд})) \text{ и } \underline{Z}_{\text{нагр}} (\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{емк})).$$

13. Определите КПД трансформатора:

а) при включении во вторичную цепь обмотки НН нагрузки

$$\underline{Z}_{\text{нагр}} (\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{инд})) ;$$

б) при оптимальном коэффициенте нагрузки  $\beta_{\text{опт}}$  и коэффициенте мощности  $\cos \varphi_2 = 0,95$  (инд). Сравните полученные в пунктах «а» и «б» значения КПД и сделайте вывод о том, при каких коэффициентах нагрузки и коэффициенте мощности экономически более целесообразна эксплуатация трансформатора.

14. При заданных коэффициентах мощности нагрузки

( $\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{инд})$  и  $\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{емк})$ ) постройте следующие графики:

- внешние характеристики  $U_2 = f(\beta)$  при  $U_{1\text{H}} = \text{const}$  и при  $\varphi_2 > 0$  и  $\varphi_2 < 0$  (если ( $\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{инд})$ ), то  $\varphi_2 > 0$ , а если ( $\cos \varphi_{\text{нагр}} (\text{емк})$ ), то  $\varphi_2 < 0$ );

- зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки  $\eta = f(\beta)$  при  $U_{1\text{H}} = \text{const}$ ,  $\Delta U = 0$ , т. е.  $U_2 = U_{2\text{H}} = \text{const}$ ;

Построить зависимость  $\eta = f(\beta)$  с достаточной точностью можно по следующим точкам: 0; 0,3  $\beta_{\text{опт}}$ ; 0,6  $\beta_{\text{опт}}$ ;  $\beta_{\text{опт}}$ ; 1,0; 1,2.

### Методические рекомендации

При расчетах многофазных симметричных электрических цепей переменного тока последние выполняют, как правило, на одну фазу, т. е. используя фазные значения напряжений и токов, а все энергетические параметры: мощности на входе и выходе электромагнитных и электромеханических преобразователей, потери в самих преобразователях и т. п. обычно рассчитывают на все фазы. Например,  $S = mU_{\Phi} I_{\Phi}$ ,  $P = mU_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi$ ,  $Q = mU_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi$ ,  $\Delta p = mrI_{\Phi}^2$  и т. д., где  $m$  – число фаз.

К пункту 7. При пересчете величин и параметров в относительные единицы (о. е.) за базовые принимают следующие значения:  $U_{1\text{H}}$ ,  $I_{1\text{H}}$ ,  $Z_{\text{H}} = U_{1\text{H}}/I_{1\text{H}}$  и  $S_{\text{H}} = mU_{1\text{H}}I_{1\text{H}}$ . Следовательно, все напряжения и ЭДС делят на  $U_{1\text{H}}$ , все токи – на  $I_{1\text{H}}$ , все сопротивления – на  $Z_{\text{H}}$  и все мощности – на  $S_{\text{H}}$ . Например,

$$U_{1*} = \frac{U_1}{U_{1\text{H}}}, \quad U'_{2*} = \frac{U'_2}{U_{1\text{H}}}, \quad I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1\text{H}}}, \quad I'_{2*} = \frac{I'_2}{I_{1\text{H}}}, \quad r_{1*} = \frac{r_1}{Z_{\text{H}}} = \frac{r_1 I_{1\text{H}}}{U_{1\text{H}}},$$

$$x'_{2*} = \frac{x'_2}{Z_{\text{H}}} = \frac{x'_2 I_{1\text{H}}}{U_{1\text{H}}}, \quad P_{1*} = \frac{P_1}{S_{\text{H}}} \text{ и т. д.}$$

К пункту 8. Действующим стандартом рекомендуется для приведения значения сопротивления  $r_0$ , измеренного при температуре  $V_0$  в °С, к другой температуре  $V_x$ , использовать формулу

$$r_x = r_0 \cdot \frac{T + V_x}{T + V_0},$$

где  $r_x$  – сопротивление при температуре  $V_x$ ;

$T$  – коэффициент, равный 235 °С для меди и 225 °С для алюминия.

К пункту 9. При переходе от Т-образной электрической схемы замещения приведенного трансформатора к упрощенной пренебрегают током холостого хода ( $I_0 = 0$ ). В этом случае приведенный трансформатор заменяется эквивалентной электрической схемой замещения, представляющей собой комплексное полное сопротивление к. з.  $Z_{к(75)^\circ} = r_{к(75)^\circ} + jx_k$ .

К пункту 10. Оптимальным называется значение коэффициента нагрузки, соответствующее максимальному КПД трансформатора при заданном коэффициенте мощности.

К пункту 11. При расчете емкости батареи конденсаторов полагать  $U_2 = U_{2н} = \text{const}$ , т. е. изменением вторичного напряжения пренебречь. Формулу для расчета емкости конденсатора вывести, используя соотношения диаграммы проводимостей нагрузки без конденсаторов ( $Y_{\text{нагр}} = g_{\text{нагр}} - jb_{L,\text{нагр}}$ ) и с конденсаторами ( $Y_{\text{нагр}}^{(c)} = g_{\text{нагр}} - j(b_{L,\text{нагр}} - b_c)$ ). При вычислении соотношения токов с батареей конденсаторов и без батареи конденсаторов используйте зависимость  $\frac{I_1^{(c)}}{I_1} \approx \frac{I_2^{(c)}}{I_2}$ . Эту же зависимость нужно использовать при вычислении

отношения электрических потерь в ЛЭП ( $\frac{\Delta p_3^{(c)}}{\Delta p_3}$ ).

### 3.3.2. Раздел 2. Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах

#### Задача № 2

Рассчитать и сконструировать трёхфазную обмотку машины переменного тока.

1. Однослойная концентрическая обмотка ([1], с. 142 –147).

Известно (табл. 3.2):

$m_1 = 3$  – число фаз обмотки;

$2p$  – число полюсов вращающегося магнитного поля;

$Z_1$  – число пазов в магнитопроводе.

Выполнить следующие расчёты и построения:

- сделать расчёт обмотки;
- составить таблицу укладки катушек обмотки в пазы;
- начертить условные схемы фазы  $A$  со всеми возможными вариантами параллельных ветвей;

- начертить полную схему трёхфазной обмотки с заданным числом параллельных ветвей «а» (каждая фаза обмотки вычерчивается своим цветом);
- рассчитать коэффициенты укорочения  $k_{y\nu}$ , распределения  $k_{p\nu}$  и обмоточный  $k_{об\nu}$  для номеров гармоник  $\nu=1, 3, 5, 7, 9, 11$ . Сделать вывод об эффективности подавления высших гармонических ЭДС.

2. Двухслойная петлевая обмотка с укороченным шагом и целым числом пазов на полюс и фазу ([1], с. 147 –153).

Известно (табл. 3. 2):

$m_1=3$  – число фаз обмотки;

$2p$  – число полюсов вращающегося магнитного поля;

$Z_1$  – число пазов в магнитопроводе.

Выполнить все расчёты и построения п. 1 для двухслойной обмотки.

### 3.3.3. Раздел 3. Асинхронные машины

#### Задача № 3А

Известны следующие технические данные асинхронного двигателя с фазным ротором, предназначенного для работы в сети с частотой  $f_1 = 50$  Гц (табл. 3.3А):

- число фаз  $m = 3$ ;
- схема соединения фаз обмотки статора  $\Delta/Y$ ;
- число полюсов  $2p$ ;
- номинальная мощность  $P_{2н}$ ;
- номинальное линейное напряжение обмотки статора  $U_{лн(\Delta)}/U_{лн(Y)}$ ;
- номинальный КПД  $\eta_n$ ;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos \varphi_n$ ;
- номинальная частота вращения  $n_{2н}$ ;
- кратность максимального момента  $K_M = M_{max}/M_{2н}$ ;
- активное сопротивление фазы обмотки статора при расчетной температуре  $r_1$ ;
- схема соединения фаз обмотки ротора  $Y$ ;
- линейная ЭДС ротора при нулевой скорости вращения ротора  $E_{2л}$ ;
- коэффициент уточненной Г-образной электрической схемы замещения асинхронного двигателя  $C_1 = (1+x_1/x_m) = 1$ ;
- активное сопротивление фазы обмотки ротора при расчетной температуре  $r_2$ ;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки неподвижного ротора  $x_2$ .

#### Сделайте следующие расчеты и построения:

1. Определите следующие значения, соответствующие номинальному режиму:

- номинальные активную  $P_{1н}$  и реактивную  $Q_{1н}$  мощности на зажимах обмотки статора асинхронного двигателя;



Таблица 3.2

## Исходные данные к задаче № 2

Данные обмотки	Номер варианта																								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	<i>Однослойная обмотка</i>																								
$2p$	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	6	6	6	6	8	8	8	8	2	4	6	8	2	4	6
$Z_1$ , паз.	24	30	36	42	48	36	42	48	60	72	36	54	72	90	48	72	84	96	42	48	54	48	36	60	36
Заданное число параллельных ветвей «а»	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1
	<i>Двухслойная обмотка</i>																								
$2p$	8	8	8	8	6	6	6	6	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	8	6	4	2	8	6	4
$Z_1$ , паз.	96	84	72	48	90	72	54	36	72	60	48	42	36	48	42	36	30	24	72	54	48	36	84	72	60
Заданное число параллельных ветвей «а»	4	8	2	1	3	6	2	1	4	2	1	4	2	2	1	2	1	2	8	1	4	1	4	2	4

- кратко поясните, почему асинхронный двигатель наряду с активной энергией потребляет и реактивную энергию;
- номинальные фазные напряжения  $U_{1н}$  и ток  $I_{1н}$  статора;
- фазную ЭДС неподвижного ротора  $E_2$ ;
- номинальное скольжение  $S_n$ ;
- номинальный момент на валу  $M_{2н}$ .

2. Начертите электрическую схему замещения фазы обмотки вращающегося ротора и рассчитайте:

- частоту ЭДС и тока ротора в номинальном режиме  $f_2$ ;
- номинальную фазную ЭДС ротора  $E_{2Sн}$ ;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора в номинальном режиме  $x_{2Sн}$ ;
- номинальный фазный ток ротора  $I_{2н}$ .

3. Рассчитайте энергетические параметры асинхронного двигателя, работающего в номинальном режиме:

- номинальные электромагнитную мощность  $P_{эм.н}$  и электромагнитный момент  $M_{эм.н}$ ;
- номинальную полную механическую мощность  $P_{мех.н}$ ;
- сумму потерь  $\sum \Delta p = \Delta p_{э1} + \Delta p_m + \Delta p_{э2} + \Delta p_{мех} + \Delta p_d$  и каждый вид потерь в отдельности,

где  $\Delta p_{э1}$  – электрические потери в обмотке статора;

$\Delta p_{э2}$  – электрические потери в обмотке ротора;

$\Delta p_m$  – магнитные потери;

$\Delta p_{мех}$  – механические потери;

$\Delta p_d$  – добавочные потери;

- постройте энергетическую диаграмму преобразования активной энергии при работе двигателя в номинальном режиме;

- кратко поясните, почему при одной и той же нагрузке двигателя электромагнитный момент больше полезного момента на валу. Оцените эту разницу в процентах для номинального режима  $\Delta M \% = 100(M_{эм.н} - M_{2н}) / M_{эм.н}$ .

4. Вычислите параметры электрической схемы замещения фазы неподвижного ротора, эквивалентной электрической схеме замещения фазы вращающегося ротора. Приведите величины и параметры электрической схемы замещения фазы неподвижного ротора к статору ( $r'_2, x'_2, E'_2$ ). Начертите схему замещения фазы неподвижного ротора и рассчитайте по ней приведенный номинальный фазный ток ротора  $I'_{2н}$ .

Сравните вычисленное значение приведенного номинального фазного тока ротора с полученным ранее при расчете электрической схемы замещения фазы вращающегося ротора, которое надо привести к статору:

$$I'_{2н} = \frac{1}{K_1} I_{2н} .$$

5. Запишите полную формулу Клосса и объясните, при каких допущениях ее можно привести к виду

$$M_{эм} / M_{max} = 2 / (S / S_{кр} + S_{кр} / S)$$

(упрощенная формула Клосса). Можно ли при Ваших параметрах двигателя использовать упрощенную формулу Клосса?

Вычислите значения критического скольжения по полной и упрощенной формулам Клосса и сравните их. Сделайте вывод ( $\Delta S \% = 100(S_{кр}^{упр} - S_{кр})/S_{кр}$ ).

6. Вычислите значение критического скольжения  $S_{кр}$  при работе асинхронного двигателя с закороченным ротором по точной формуле.

7. Определите параметры короткого замыкания  $r_k$  и  $x_k$  асинхронного двигателя.

8. Объясните, каким образом в асинхронном двигателе с фазным ротором добиваются увеличения кратности пускового момента при одновременном уменьшении кратности начального пускового тока. Начертите электрическую схему пуска асинхронного двигателя с фазным ротором.

9. В одной системе координат постройте следующие механические характеристики  $\Omega_2 = f(M_{эм})$  или  $n_2 = f(M_{эм})$ :

- естественную (обмотка статора соединена в треугольник и подключена к сети с линейным напряжением 220 В, обмотка ротора закорочена);

- искусственную при том же соединении обмотки статора и включении в цепь ротора пускового реостата  $r_d$ , сопротивление которого необходимо выбрать таким образом, чтобы начальный пусковой момент был равен максимальному ( $M_n = M_{max}$ ). Рассчитайте значение этого сопротивления  $r_d$ ;

- искусственную при соединении обмотки статора звездой и подключении к той же сети с линейным напряжением 220 В и закороченном роторе;

- искусственную при соединении обмотки статора звездой и подключении к сети с линейным напряжением 220 В и включении в обмотку ротора сопротивления  $r_d$ .

10. Поясните в какие режимы перейдет асинхронный двигатель при работе на каждой из механических характеристик (п. 9), если к его валу приложить реактивный момент сопротивления  $M_c = 1,1 M_{2н} = const$ . Будут ли эти режимы работы аварийными?

Для нахождения скоростей вращения и скольжений двигателя при работе на каждой из механических характеристик на этом же рисунке начертите механическую характеристику механизма  $M_c = const$ .

Точки пересечения механической характеристики механизма  $M_c = const$  с механическими характеристиками двигателя – это скорости вращения двигателя при данном моменте сопротивления на валу. Определив эти скорости, можно рассчитать соответствующие им скольжения ( $s = (n_1 - n_2) / n_1$ ).

Если механическая характеристика механизма пересекает механическую характеристику двигателя на устойчивой и неустойчивой частях, то необходимо рассмотреть два режима: первый – переключение на эту механическую характеристику двигателя во время его устойчивой работы на другой механической характеристике и второй – пуск двигателя с этим моментом сопротивления на валу.

Таблица 3.3А

## Исходные данные к задаче № 3А

№ п/п	Тип двигателя	$2p$	$P_{2н}$ , кВт	$\frac{U_{ЛН(\Delta)}}{U_{ЛН(Y)}}$ , В	$\eta_n$ , %	$\cos\varphi_n$	$n_{2н}$ , об/мин	$K_m$	$r_1$ , Ом	$E_{2л}$ , В	$r_2$ , Ом	$x_2$ , Ом
0	4АК16084УЗ	4	11,0	220/380	86,5	0,86	1438	3,2	0,373	305	0,321	0,576
1	4АК160М4УЗ	4	14,0	220/380	88,0	0,87	1448	3,5	0,255	300	0,207	0,385
2	4АК180М4УЗ	4	18,5	220/380	89,5	0,88	1457	4,0	0,135	294	0,125	0,232
3	4АК200М4УЗ	4	22,0	220/380	90,0	0,87	1467	4,0	0,124	338	0,107	0,309
4	4АК200Б4УЗ	4	30,0	220/380	90,0	0,87	1462	4,0	0,099	349	0,0964	0,281
5	4АК16086УЗ	6	7,5	220/380	82,5	0,77	951	3,5	0,564	300	0,518	0,906
6	4АК160М6УЗ	6	10,0	220/380	84,5	0,76	959	3,8	0,401	310	0,358	0,800
7	4АК180М6УЗ	6	13,0	220/380	86,0	0,80	957	4,0	0,267	324	0,317	0,609
8	4АК200М6УЗ	6	18,5	220/380	88,5	0,81	971	3,5	0,168	360	0,19	0,387
9	4АК200L6УЗ	6	22,0	220/380	88,0	0,80	969	3,5	0,149	330	0,143	0,308
10	4АК225М6УЗ	6	30,0	220/380	90,0	0,85	976	2,5	0,106	141	0,015	0,046
11	4АК16088УЗ	8	5,5	220/380	80,0	0,70	706	2,5	0,887	301	0,861	1,605
12	4АК160М8УЗ	8	7,1	220/380	82,0	0,70	712	3,0	0,622	290	0,537	1,413
13	4АК180М8УЗ	8	11,0	220/380	85,5	0,72	718	3,5	0,333	267	0,253	0,684
14	4АК200М8УЗ	8	15,0	220/380	86,0	0,73	719	3,0	0,233	356	0,322	0,625
15	4АК20088УЗ	8	18,5	220/380	87,0	0,73	727	3,0	0,187	301	0,1405	0,366
16	4АНК16084УЗ	4	14,0	220/380	85,0	0,85	1425	3,0	0,358	328	0,349	0,572
17	4АНК160М4УЗ	4	17,0	220/380	87,5	0,87	1441	3,5	0,229	314	0,21	0,388
18	4АНК18084УЗ	4	22,0	220/380	87,0	0,86	1423	3,2	0,163	299	0,19	0,315
19	4АНК180М4УЗ	4	30,0	220/380	90,0	0,86	1450	3,2 -	0,097	291	0,088	0,164
20	4АНК18086УЗ	6	13,0	220/380	83,5	0,81	940	3,0	0,363	204	0,173	0,240
21	4АНК180М6УЗ	6	18,5	220/380	85,0	0,82	941	3,0	0,241	336	0,326	0,466
22	4АНК200М6УЗ	6	22,0	220/380	89,0	0,81	967	3,0	0,1505	379	0,201	0,514
23	4АНК18088УЗ	8	11,0	220/380	85,0	0,76	711	3,2	0,417	315	0,431	0,640
24	4АНК180М8УЗ	8	14,0	220/380	86,5	0,77	722	3,5	0,303	307	0,235	0,392
25	4АНК200М8УЗ	8	18,5	220/380	86,5	0,78	721	2,5	0,242	382	0,283	0,734
26	4АНК200Б8УЗ	8	22,0	220/380	86,0	0,79	713	2,5	0,1905	330	0,224	0,470

Примечание. Значение коэффициента уточненной Г-образной электрической схемы замещения асинхронного двигателя  $C_1$  принять равным единице для всех вариантов.

11. В одной системе координат построить механические характеристики двигателя:

- естественную (обмотка статора соединена в треугольник и подключена к сети с линейным напряжением 220 В и частотой сети 50 Гц, обмотка ротора замкнута);

- естественную (обмотка статора соединена в треугольник и подключена к сети с линейным напряжением 220 В и частотой сети 60 Гц, обмотка ротора замкнута).

Найти отношения  $M_{\max(50\text{Гц})}/M_{\max(60\text{Гц})}$  и  $M_{\Pi(50\text{Гц})}/M_{\Pi(60\text{Гц})}$ .

Перед построением механической характеристики для частоты 60 Гц необходимо пересчитать индуктивное сопротивление короткого замыкания

$x_k = x_1 + c_1 x_2'$  на частоту 60 Гц ( $x_1 = \omega_1 L_{\sigma 1}$ ,  $x_2' = k_z x_2 = k_z \omega_1 L_{\sigma 2}$ , где  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $L_{\sigma 1} = \text{const}$  – индуктивность рассеяния фазы статора;  $L_{\sigma 2} = \text{const}$  – индуктивность рассеяния фазы ротора).

Следовательно,  $x_{k(60\text{Гц})} = 1,2x_{k(50\text{Гц})}$

### Методические рекомендации

К пункту 1. Все вычисления производить с точностью до третьего знака после запятой. Значение скольжения рассчитать с точностью до пятого знака после запятой.

К пункту 3. Добавочные потери в асинхронном двигателе могут быть определены по формуле

$$\Delta p_d = 0,005 P_{1н} \left( \frac{I_1}{I_{1н}} \right)^2.$$

К пункту 4. В связи с тем, что в асинхронном двигателе с фазным ротором число фаз обмотки статора всегда равно числу фаз обмотки ротора ( $m_1 = m_2$ ). Коэффициент приведения ЭДС равен коэффициенту приведения токов ( $K_E = K_I$ ), коэффициент приведения ЭДС можно определить из паспортных данных

$$K_E = \frac{(K_{об1} W_1)}{(K_{об2} W_2)} \approx \frac{U_{1н}}{E_2}.$$

К пункту 5. Формулой Клосса называется отношение  $M_{эм}/M_{\max}$ . Следовательно, чтобы получить формулу Клосса надо общую формулу для определения значения электромагнитного момента разделить на выражение максимального момента:

$$\frac{M_{эм}}{M_{\max}} = \frac{2(1 + \rho S_{кр})}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + 2\rho S_{кр}},$$

где  $\rho = \frac{r_1}{C_1 r_2'}$ .

К пункту 6. Значение критического скольжения можно рассчитать по формуле Клосса, так как известны кратность максимального момента  $K_M = M_{\max}/M_{2H}$ , номинальное скольжение и коэффициент  $\rho$ . При решении квадратного уравнения необходимо выбрать корень, удовлетворяющий условию  $S_{\text{кр}} > S_H$ .

Также значение критического скольжения можно рассчитать по точной формуле

$$S_{\text{кр}} = \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}},$$

причем величину индуктивного сопротивления к. з., входящую в формулу критического скольжения, можно определить из выражения

$$M_{\max} = \frac{m_1}{2C_1 \Omega_1} \cdot \frac{U_{1H}^2}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2}},$$

где  $M_{\max} = K_M M_{2H}$ ;  $\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p}$  – угловая скорость вращения магнитного поля в воздушном зазоре.

Для упрощения расчета из формулы максимального электромагнитного момента можно сразу вычислить значение  $\sqrt{r_1^2 + x_k^2}$ .

К пункту 9. Построить механическую характеристику с достаточной степенью точности можно по следующим шести точкам:

$$S_1 = 0; \quad S_2 = S_H; \quad S_3 = S_H + \frac{S_{\text{кр}} - S_H}{2}; \quad S_4 = S_{\text{кр}}; \quad S_5 = S_{\text{кр}} + \frac{1 - S_{\text{кр}}}{2}; \quad S_6 = 1.$$

При расчете уравнение электромагнитного момента запишите в буквенном виде, а все вычисления значений скорости вращения и электромагнитного момента сведите в таблицу. При расчете и построении механических характеристик необходимо помнить, что величина электромагнитного момента прямо пропорциональна квадрату напряжения питания ( $M_{\text{эм}} \sim U_1^2$ ).

Некоторое отличие электромагнитного момента при номинальном скольжении от номинального электромагнитного момента  $M_{\text{эм.н}}$ , вычисленного в пункте 3, объясняется тем, что ток ротора в уравнении  $M_{\text{эм}}$  определяется на основании уточненной Г-образной схемы замещения, не учитывающей комплексный характер коэффициента  $C_1$ .

К пункту 10. Для обоснования аварийности режима необходимо для всех четырех случаев пункта 9 при  $M_C = 1,1M_{2H}$  вычислить значения фазных токов ротора и сравнить их с номинальным фазным током ротора ( $I_2/I_{2H}$  или  $I_2'/I'_{2H}$ ). На основании анализа этих соотношений сделайте соответствующие выводы.

К реактивным моментам относятся статические моменты от трения, от резания, например, металла или дерева, от растяжения и скручивания неупру-

гих тел и т. п. Эти моменты всегда направлены встречно относительно вращающего момента двигателя, т. е. всегда препятствуют движению. Поэтому при приложении реактивного момента к валу асинхронного двигателя ротор не может изменить направление вращения.

### 3.3.3. Раздел 4. Асинхронные машины

#### Задача № 3Б

Для расчёта частотно-регулируемого электропривода необходимо определить параметры Т-образной схемы замещения трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по данным справочника.

Известно (табл. 3.3Б):

1.  $P_{2н}$  – номинальная активная мощность на валу двигателя.
2.  $U_{1н}$  – номинальное фазное напряжение.
3.  $f_{1н}$  – номинальная частота.
4.  $2p$  – число полюсов вращающегося магнитного поля.
5.  $S_n$  – номинальное скольжение.
6.  $\eta_n$  – номинальный КПД.
7.  $\cos\varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности.
8.  $k_m = M_{max}/M_{2н}$  – перегрузочная способность двигателя.
9.  $U_1 = f(f_1)$ , если  $f_1 < f_{1н}$  и  $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ , если  $f_1 \geq f_{1н}$  – закон изменения напряжения на выходе частотно-регулируемого преобразователя в зависимости от его частоты.
10.  $f_{min}$  – минимальная частота преобразователя.
11.  $f_{max}$  – максимальная частота преобразователя.

#### Сделать следующие расчёты и построения:

1. Начертить Т-образную схему замещения асинхронного двигателя и определить её параметры ( $r_1, r_2, x_1, x_2, x_m, r_m$ ) для номинального режима двигателя ( $U_{1н}, f_{1н}$ ) и для режимов ( $U_{min}, f_{min}$ ) и ( $U_{max}, f_{max}$ ).
2. Рассчитать значения перегрузочных способностей асинхронного двигателя  $k_m$  в режимах ( $U_{min}, f_{min}$ ) и ( $U_{max}, f_{max}$ ).
3. Рассчитать и изобразить на одном рисунке механические характеристики асинхронного двигателя  $\Omega_2 = f(M_{эм})$  для режимов ( $U_{min}, f_{min}$ ), ( $U_{1н}, f_{1н}$ ) и ( $U_{1н}, f_{max}$ ).

Таблица 3.3Б

**Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, исполнение ICA0141, степень защиты IP54, номинальное линейное напряжение Y/Δ, 380/220 В, номинальная частота 50 Гц**

Номер варианта	Число полюсов 2р	Мощность $P_{2H}$ , кВт	Скольжение $S_H$ , %	КПД $\eta_H$ , %	Коэф. мощности $\cos \varphi_H$ , о. е.	Перегр. способ $K_M$ , о. е.	Мин. частота $f_{min}$ , Гц.	Макс. частота $f_{max}$ , Гц	Закон понижения напряжения $U_1=f_1 < f_{1H}^*$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
0	2	22,0	2,0	88,5	0,91	2,2	20	65	1
1	2	30,0	1,9	90,5	0,90	2,2	25	70	2
2	2	37,0	1,9	90,0	0,89	2,2	30	75	3
3	2	45,0	1,8	91,0	0,90	2,2	35	80	1
4	2	55,0	1,8	91,0	0,92	2,2	20	65	2
5	2	75,0	1,4	91,0	0,89	2,2	25	70	3
6	4	11,0	2,8	87,5	0,87	2,2	30	75	1
7	4	15,0	2,3	88,5	0,88	2,2	35	80	2
8	4	18,5	2,2	90,0	0,88	2,2	20	65	3
9	4	22,0	2,0	90,0	0,90	2,2	25	70	1
10	4	30,0	1,9	91,0	0,89	2,2	30	75	2
11	4	37,0	1,7	91,0	0,90	2,2	35	80	3
12	4	45,0	1,6	92,0	0,90	2,2	20	65	1



Окончание таблицы 3.3Б

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
13	4	55,0	1,4	92,5	0,90	2,2	25	70	2
14	6	15,0	2,6	87,5	0,87	2,0	30	75	3
15	6	18,5	2,7	88,0	0,87	2,0	35	80	1
16	6	22,0	2,3	90,0	0,90	2,0	20	65	2
17	6	30,0	2,1	90,5	0,90	2,0	25	70	3
18	6	37,0	1,8	91,0	0,89	2,0	30	75	1
19	6	45,0	1,4	91,5	0,89	2,0	35	80	2
20	8	55,0	2,5	87,0	0,75	2,2	20	65	3
21	8	15,0	2,6	87,0	0,82	2,0	25	70	1
22	8	18,5	2,3	88,5	0,84	2,2	30	75	2
23	8	22,0	2,7	88,5	0,84	2,0	35	80	3
24	8	30,0	1,8	90,0	0,81	2,0	20	65	1
25	8	37,0	1,6	90,0	0,83	2,0	25	70	2

Примечание.\* 1 →  $U_1 = (f_1 / f_{1н}) U_{1н}$ ;  
 2 → ;  $U_1 = (f_1 / f_{1н})^2 U_{1н}$   
 3 →  $U_1 = U_{1н} \sqrt{(f_1 / f_{1н})}$ .

### Методические рекомендации

При расчёте систем управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом используют параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя (рис. 3.1).

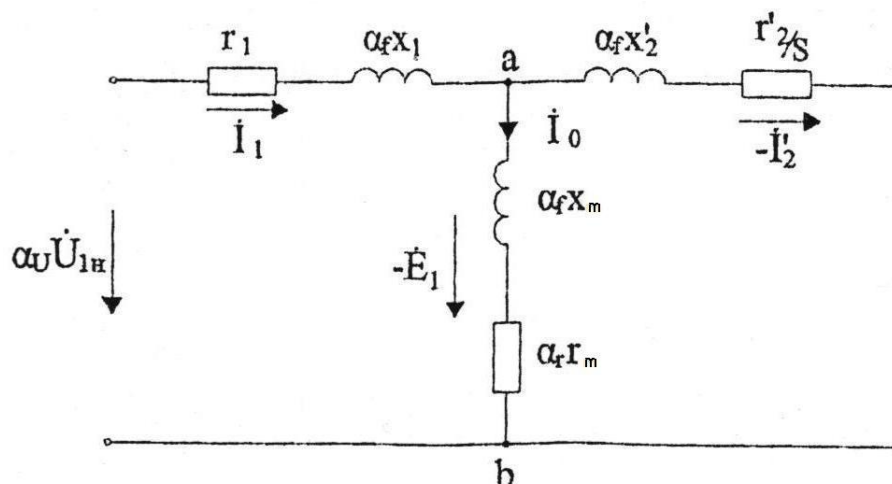


Рис. 3.1. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

В схеме замещения (см. рис. 3.1):

$r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_m$  – активные сопротивления фазы статора, фазы ротора, приведённого к статору, и контура намагничивания;

$x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_m$  – индуктивные сопротивления рассеяния фазы статора, фазы ротора, приведённого к статору, и сопротивление взаимной индукции.

В связи с тем, что асинхронный двигатель работает при изменяющихся значениях частоты сети и напряжения, в схему замещения введены корректирующие коэффициенты:

$$\alpha_U = \frac{U_1}{U_{1H}} \text{ – относительное фазное напряжение статора;}$$

$$\alpha_f = \frac{f_1}{f_{1H}} \text{ – относительная частота напряжения статора;}$$

$$\alpha_r = \frac{\alpha_{ст} \alpha_\phi}{\alpha_U^2} \text{ – коэффициент коррекции активного сопротивления кон-}$$

тура намагничивания;

$$\alpha_{ст} = \left( \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^{1,5} \text{ – коэффициент коррекции основных магнитных потерь;}$$

$$\alpha_\phi = \left( \frac{\alpha_U}{\alpha_f} \right)^2 \text{ – коэффициент коррекции магнитных потерь при измене-}$$

нии магнитного потока.

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя не всегда доступны разработчикам систем управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом, поэтому возникает необходимость расчёта этих параметров по общедоступным справочным данным. В настоящее время разработаны итерационные методики расчёта параметров схемы замещения асинхронного двигателя, которые не нашли широкого применения на практике из-за сложности вычислений.

Предлагаемая методика позволяет с погрешностью, не превосходящей 10 – 15 %, рассчитать параметры Т-образных схем замещения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором для диапазона номинальных мощностей  $5,5 \text{ кВт} \leq P_{2н} \leq 90 \text{ кВт}$ , работающих при скольжениях  $0 < S < S_{кр.}$ , по данным номинального режима и перегрузочной способности двигателя.

В каталогах и справочниках обычно приводятся следующие данные асинхронных двигателей:  $h$  – высота оси вращения;  $2p$  – число полюсов; номинальные линейные напряжения при соединении фаз статора в звезду и треугольник;  $f_{1н}$  – частота сети;  $P_{2н}$  – номинальная полезная мощность;  $S_n$  – номинальное скольжение или  $n_{2н}$ -номинальная частота вращения ротора;  $\eta_n$  – номинальный КПД;  $\cos\varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности и  $\kappa_m = M_{max}/M_{2н}$  – перегрузочная способность двигателя.

По данным номинального режима и перегрузочной способности асинхронного двигателя можно определить параметры Т-образной схемы замещения, которые в относительных единицах будут находиться внутри диапазонов, характерных для реальных серийных двигателей, а механическая характеристика, рассчитанная для конкретного двигателя, на участке  $0 \leq S \leq S_{кр}$  будет практически совпадать с механической характеристикой реального асинхронного двигателя (условие эквивалентности математической модели и реального двигателя).

По справочным данным предварительно рассчитывают следующие величины асинхронного двигателя:

$P_{1н} = P_{2н} / \eta_n$  – номинальная активная мощность на входе двигателя;

$I_{1н} = P_{1н} / (m_1 U_{1н} \cos\varphi_n)$  – номинальный фазный ток статора ( $m_1$  – число фаз,  $U_{1н}$  – номинальное фазное напряжение);

$\Omega_1 = 2\pi f_{1н} / p$  – угловая скорость вращения магнитного поля при номинальной частоте;

$\Omega_{2н} = \Omega_1 (1 - S_n)$  – номинальная угловая скорость вращения ротора;

$M_{2н} = P_{2н} / \Omega_{2н}$  – номинальный момент на валу двигателя;

$M_{max} = \kappa_m M_{2н}$  – максимальный момент;

$\sum \Delta p = P_{1н} - P_{2н}$  – сумма потерь в номинальном режиме;

$\Delta p_d = 0,005 P_{1н}$  – добавочные потери в номинальном режиме;

$\Delta p_{мех. пр.} = 0,08 \sum \Delta p$  – механические потери (в асинхронных двигателях механические потери составляют 5 – 10 % от суммы потерь);

$M_0 = (\Delta p_d + \Delta p_{\text{мех. пр.}}) / \Omega_{2H}$  – момент холостого хода;

$M_{\text{эм. н.}} = M_{2H} + M_0$  – номинальный электромагнитный момент.

В начале основного расчёта использовано свойство короткозамкнутых асинхронных двигателей  $r'_{2*} \approx S_H$  и формула  $r_1 = C_1 \rho r'_{2*}$ , где  $r'_{2*} = r'_{2} I_{1H} / U_{1H}$ ;

$$C_1 = 1 + (x_1 / x_m) = 1,02 - 1,06; \quad \rho = r_1 / (C_1 r'_{2*}).$$

Коэффициент  $\rho$  для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с высотами осей вращения 56 – 250 мм находится в диапазоне 1,15 – 2,7 и выявить его зависимость от известных данных не удаётся. Поэтому, в общем случае, можно получить несколько вариантов параметров Т-образной схемы замещения при различных значениях коэффициента  $\rho$ , взятых из приведённого диапазона, которые будут отвечать условию эквивалентности.

В статье рассмотрена методика определения параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя с использованием усреднённых значений коэффициентов  $C_1$  и  $\rho$  ( $C_1 = 1,04$ ;  $\rho = 1,65$ ).

При использовании предлагаемой методики достоверность полученных данных проверяется на всех этапах расчёта (они должны лежать внутри диапазонов, характерных для серийных асинхронных двигателей).

Расчёт параметров Т-образной схемы замещения начинаем с определения активного сопротивления фазы статора

$$r_1 = \rho C_1 S_H U_{1H} / I_{1H}.$$

В относительных единицах

$$r_{1*} = r_1 I_{1H} / U_{1H}.$$

Для серийных асинхронных двигателей  $r_{1*} = 0,01 - 0,07$ .

Для расчёта индуктивного сопротивления короткого замыкания используем формулу максимального момента

$$M_{\text{max}} = \frac{m_1 U_{1H}^2}{2 C_1 \Omega_1 \left( r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \right)},$$

которую преобразуем для вычисления индуктивного сопротивления короткого замыкания

$$x_k = \sqrt{\left( \frac{m_1 U_{1H}^2}{2 C_1 \Omega_1 M_{\text{max}}} - r_1 \right)^2 - r_1^2}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора

$$x_1 = 0,42 x_k.$$

В относительных единицах  $x_{1*} = 0,08 - 0,14$ , где  $x_{1*} = x_1 I_{1H} / U_{1H}$ .

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора, приведённое к статору

$$x'_{2*} = 0,58 x_k / C_1.$$

В относительных единицах  $x'_{2*} = 0,1 - 0,16$ , где  $x'_{2*} = x'_{2} I_{1H} / U_{1H}$ .

Для расчёта активного сопротивления фазы ротора, приведённого к статору, используем формулу для вычисления номинального электромагнитного момента

$$M_{\text{эмн}} = \frac{m_1 U_{1\text{н}}^2 \frac{r'_2}{S_{\text{н}}}}{\Omega_1 \left[ \left( r_1 + C_1 \frac{r'_2}{S_{\text{н}}} \right)^2 + x_{\text{к}}^2 \right]}.$$

Решая это уравнение относительно  $r'_2$ , получим

$$y^2 - ay + b = 0,$$

где  $y = C_1 r'_2 / S_{\text{н}}$ ;  $a = \frac{m_1 U_{1\text{н}}^2}{C_1 \Omega_1 M_{\text{эмн}}} - 2r_1$ ;  $b = r_1^2 + x_{\text{к}}^2$

$$r'_2 = S_{\text{н}} y / C_1.$$

Выбираем корень квадратного уравнения, удовлетворяющий условию  $r'_{2*} = r'_2 I_{1\text{н}} / U_{1\text{н}} = 0,01 - 0,07$ .

По известным данным номинального режима и вычисленным параметрам  $r_1, x_1, r'_2, x'_2$  рассчитываем ЭДС, ток и параметры контура намагничивания.

Фазная ЭДС статора

$$-\dot{E}_1 = \dot{U}_{a\phi} = \dot{U}_{1\text{н}} - (r_1 + jx_1) \dot{I}_{1\text{н}} = U_a - jU_p = U_{ab} e^{-j\Psi_{ab}},$$

где  $\dot{I}_{1\text{н}} = I_{1\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}} - j I_{1\text{н}} \sin \varphi_{\text{н}} = I_{1\text{на}} - j I_{1\text{нр}}$ ,  $U_a = U_{1\text{н}} - r_1 I_{1\text{на}} - x_1 I_{1\text{нр}}$ ,

$$U_p = x_1 I_{1\text{на}} - r_1 I_{1\text{нр}}, \quad U_{ab} = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}, \quad \Psi_{ab} = \arctg(-U_p / U_a).$$

Номинальный фазный ток ротора, приведённый к статору

$$-\dot{I}'_{2\text{н}} = \dot{U}_{a\phi} / ((r'_2 / S_{\text{н}}) + jx'_2) = I'_{2\text{на}} - jI'_{2\text{нр}},$$

где  $I'_{2\text{на}} = ((r'_2 U_a / S_{\text{н}}) - x'_2 U_p) / ((r'_2 / S_{\text{н}})^2 + (x'_2)^2)$ ,

$$I'_{2\text{нр}} = ((r'_2 U_p / S_{\text{н}}) + x'_2 U_a) / ((r'_2 / S_{\text{н}})^2 + (x'_2)^2).$$

В связи с тем, что при расчёте получили  $-\dot{I}'_{2\text{н}}$ , то

$$\dot{I}'_{2\text{н}} = -I'_{2\text{на}} + jI'_{2\text{нр}}$$

Действующее значение фазного тока ротора

$$I'_{2\text{н}} = \sqrt{(I'_{2\text{на}})^2 + (I'_{2\text{нр}})^2}.$$

Правильность расчёта проверяем по значению номинальной электромагнитной мощности

$$P_{1\text{н}} > P_{\text{эмн}} > P_{2\text{н}},$$

где  $P_{\text{эмн}} = m_1 (I'_{2\text{н}})^2 r'_2 / S_{\text{н}}$ .

Ток холостого хода рассчитываем, решая уравнение  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$ .

Для номинального режима (рис. 3.2)

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{1\text{н}} + \dot{I}'_{2\text{н}} = I_{0\text{а}} - jI_{0\text{р}},$$

где  $I_{0\text{а}} = I_{1\text{на}} - I'_{2\text{на}}$ ;  $I_{0\text{р}} = I_{1\text{нр}} - I'_{2\text{нр}}$ ,  $I_0 = \sqrt{I_{0\text{а}}^2 + I_{0\text{р}}^2}$ ,  $\Psi_i = \arctg(-I_{0\text{р}} / I_{0\text{а}})$ .

При вычислении угла  $\psi_i$  ток  $I_{0\text{а}}$  надо в формулу подставлять со своим знаком.

Для расчёта намагничивающего тока  $I_\mu$  и комплексного полного сопротивления контура намагничивания  $Z_m$  повернём систему координат комплексной плоскости на угол  $-\Psi_{ab}$  (см. рис. 3.2). В этом случае вектор ЭДС  $-\dot{E}_1 = \dot{U}_{ab}$  совпадёт с осью вещественных чисел  $(+1)'$ , а векторы магнитного потока  $\dot{\Phi}_m$  и намагничивающего тока  $\dot{I}_\mu$  — с осью мнимых чисел  $(-j)'$ . В системе координат  $(\pm 1)' - (\pm j)'$  ток холостого хода

$$\dot{I}''_0 = \dot{I}'_{0a} - jI_\mu,$$

где  $\dot{I}''_0 = I_0$ ,  $\dot{I}'_{0a} = I_0 \cos \varphi_0$ ,  $I_\mu = I_0 \sin \varphi_0$ ,  $\varphi_0 = -\psi'_i$ ,  $\Psi'_i = \Psi_i - \Psi_{ab}$ , если  $\Psi_i < 0$  и  $\Psi'_i = (-180^\circ + \Psi_i) - \Psi_{ab}$ , если  $\Psi_i > 0$ .

Комплексное сопротивление контура намагничивания

$$Z_m = U_{ab} / \dot{I}''_0 = U_{ab} / (\dot{I}'_{0a} - jI_\mu) = r_m + jx_m,$$

где  $r_m = U_{ab} I'_{0a} / ((I'_{0a})^2 + I_\mu^2)$ ,  $x_m = U_{ab} I_\mu / ((I'_{0a})^2 + I_\mu^2)$ .

В относительных единицах  $r_{m*} = r_m I_{1H} / U_{1H}$ ,  $x_{m*} = x_m I_{1H} / U_{1H}$ .

В серийных асинхронных двигателях  $r_{m*} = 0,05 - 0,2$ ;  $x_{m*} = 2 - 5,5$ .

В случае попадания всех параметров Т-образной схемы замещения в заданные диапазоны необходимо провести дополнительную проверку на совпадение механической характеристики, рассчитанной по параметрам математической модели двигателя, с механической характеристикой реального двигателя на участке  $0 \leq S \leq S_{кр}$ . В противном случае надо изменить значение коэффициента  $\rho$  и повторно провести расчёт.

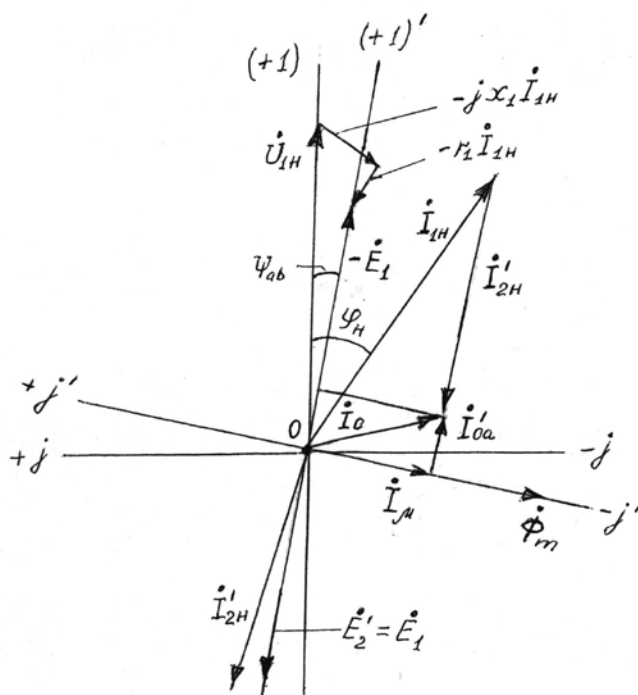


Рис. 3.2. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Перед расчётом механической характеристики уточняем значение коэффициента эквивалентности Т и Г-образных схем замещения и определяем величину критического скольжения.

$$C_{1y} = 1 + (x_1/x_m).$$

$$S_{кр} = C_{1y} r_2' / \sqrt{r_1^2 + x_k^2}.$$

Окончательную проверку выполненного расчёта проводим путём вычисления номинального и максимального электромагнитных моментов и их отклонений от паспортных значений ( $S=S_H$  и  $S=S_{кр}$ ).

$$M_{эм.расч} = \frac{m_1 U_{1H}^2 r_2'}{S \Omega_1 \left[ \left( r_1 + C_{1y} \frac{r_2'}{S} \right)^2 + x_k^2 \right]}.$$

$$\Delta M_H \% = 100(M_{эм.н} - M_{эм.н.расч})/M_{эм.н}.$$

$$\Delta M_{max} \% = 100(M_{max} - M_{max.расч})/M_{max}.$$

При расчёте значений максимальных моментов в режимах ( $U_{min}, f_{min}$ ) и ( $U_{max}, f_{max}$ ) и расчёте механических характеристик для этих режимов надо в формулы максимального момента и электромагнитного момента подставлять значения:  $\alpha_U U_{1H}, \alpha_f x_k, C_{1y}$  и  $\alpha_f \Omega_1$ , где  $\alpha_U$  и  $\alpha_f$  должны соответствовать рассчитываемому режиму, а  $U_{1H}, x_k$  и  $\Omega_1$  – номинальному. Данные расчёта механических характеристик представить в табличной форме.

### 3.3.4. Раздел 4. Синхронные машины

#### Задача № 4

Синхронный гидрогенератор работает в номинальном режиме со следующими техническими данными (табл. 3.4):

- номинальная мощность  $S_H$ ;
- частота сети  $f = 50$  Гц;
- число фаз обмотки якоря  $m = 3$ ;
- соединение фаз обмотки якоря  $Y_N$ ;
- номинальное напряжение (линейное)  $U_{лн}$ ;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_H$  (нагрузка активно-индуктивного характера);
- синхронная скорость вращения  $n$ ;
- номинальный КПД  $\eta_H$ ;
- продольное синхронное индуктивное сопротивление в о. е.  $x_{d*}$ ;
- поперечное синхронное индуктивное сопротивление в о. е.  $x_{q*}$ ;
- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря в о. е.  $x_{\sigma a*}$ ;
- активное сопротивление фазы якоря  $r_a$ .

**Необходимо сделать следующие расчеты и построения:**

1. Определите

- число полюсов индуктора гидрогенератора  $2p$ ;
- номинальные фазные значения напряжения  $U_H$  и тока  $I_H$  якоря;

- номинальную активную мощность на выводах гидрогенератора  $P_{2H}$ ;
- номинальную мощность на входе (на валу) гидрогенератора и номинальный момент гидравлической турбины  $M_{1H}$ .

2. Постройте векторную диаграмму Blondеля для номинального режима работы гидрогенератора. Построение ведите в о. е.

3. По векторной диаграмме Blondеля и расчетным путем определите:

- ЭДС, индуцируемую в фазной обмотке якоря магнитным полем возбуждения в о. е.  $E_{0*}$  и в вольтах  $E_0$ ;
- ЭДС, индуцируемую в фазной обмотке якоря результирующим магнитным полем в о. е.  $E_{\delta*}$  и в вольтах  $E_{\delta}$ ;
- угол сдвига фаз  $\psi_H = (\dot{E}_0 \wedge \dot{I}_H)$ ;
- номинальный угол нагрузки  $\theta_H = (\dot{E}_0 \wedge \dot{U}_H)$ ;
- номинальный внутренний угол нагрузки  $\theta_{\delta H} = (\dot{E}_0 \wedge \dot{E}_{\delta})$ .

4. Рассчитайте и постройте угловые характеристики активной  $P=f(\theta)$  и реактивной  $Q=f(\theta)$  мощностей. Укажите на них точку номинального режима. Определите критический угол нагрузки  $\theta_{кр}$  и максимальную активную мощность  $P_{max}$  синхронного гидрогенератора. Рассчитайте максимальную реактивную мощность  $Q_{max}$ , которую может генерировать синхронный гидрогенератор в сеть и предельный угол нагрузки  $\theta_{пред}$ , при котором генерация реактивной энергии в сеть прекращается. При расчете угловых характеристик используйте значение ЭДС  $E_0$ , полученное при построении векторной диаграммы Blondеля.

5. Рассчитайте статическую перегружаемость гидрогенератора  $K_{\Pi} = P_{max} / P_H = P_{max*} / P_{H*}$ , коэффициенты синхронизирующей мощности  $P_{см}$  и синхронизирующего момента  $M_{см}$ , и вычислите значения синхронизирующей мощности  $\Delta P$  и синхронизирующего момента  $\Delta M$  при отклонении угла нагрузки от номинального значения на  $\Delta\theta = 2^\circ$

Таблица 3.4

**Исходные данные к задаче № 4**

Тип гидрогенератора	$S_H$ , МВ·А	$U_{лн}$ , кВ	$\cos \varphi_H$	$n$ , об/мин	$\eta_H$ , %	$x_{d*}$ , о. е.	$x_{q*}$ , о. е.	$x_{\sigma a*}$ , о. е.	$r_{a(75)}$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0. СВ663/100-40УХЛ4	31,18	10,5	0,85	150	97,4	1,17	0,75	0,168	0,0059
1. СВФ-1690/175-64	590	15,75	0,85	93,8	97,9	1,57	0,96	0,202	0,0054
2. ВГС 1190/215-48	282,5	15,75	0,85	125	98,4	1,22	0,78	0,173	0,0024
3. СВ 1130/220-44ХЛ4	253	15,75	0,85	136,4	98,3	1,05	0,6	0,137	0,0024
4. СВ1260/235-6СТ	206	15,75	0,85	100	97,1	1,01	0,67	0,143	0,0023
5. СВ1490/220-96ГВ4	195,5	13,8	0,9	75	98,05	0,61	0,53	0,152	0,003
6. СВ1500/175-84	190	15,75	0,9	71,5	98,2	1,09	0,73	0,174	0,0036
7. СВ1420/190-80ТВ4	150	13,8	0,9	75	98,39	0,85	0,56	0,131	0,003
8. СВ1500/200-88	133,33	13,8	0,9	68,2	97,77	0,54	0,36	0,093	0,0037
9. СВ1470/149-104УХЛ4	91,8	13,8	0,85	57,7	97,9	0,72	0,51	0,143	0,0047



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10. СВ710/235-20УХЛ4	203,5	13,8	0,85	300	96,0	1,05	0,69	0,109	0,0021
11. СВ800/230-32УХЛ4	144,44	10,5	0,9	187,5	98,1	1,16	0,78	0,143	0,0022
12. СВ627/230-20Т	127,7	11,0	0,9	300	98,0	0,86	0,54	0,097	0,00305
13. СВ460/210-12	107	13,8	0,8	500	97,6	1,44	0,82	0,117	0,002
14. СВ430/210-14	68,75	10,5	0,8	428,6	97,5	1,14	0,69	0,111	0,0021
15. СВ505/190-16Т	66,7	11,0	0,9	375	97,49	0,88	0,54	0,084	0,00185
16. СВ375/195-12	65,5	10,5	0,8	500	97,41	1,29	0,77	0,096	0,0028
17. СВ735/116-30	63	10,5	0,8	200	97,7	1,06	0,65	0,118	0,0036
18. СВ425/110-16У4	31,25	10,5	0,8	375	96,67	1,22	0,73	0,119	0,0039
19. СВФ 1285/275-42У4	711	15,75	0,9	142,8	98,3	1,58	0,97	0,184	0,0034

### Методические рекомендации

К пункту 1. При расчете энергетических соотношений используйте блок-схему силового канала электромеханического преобразования энергии, представленную на рис. 3.3.

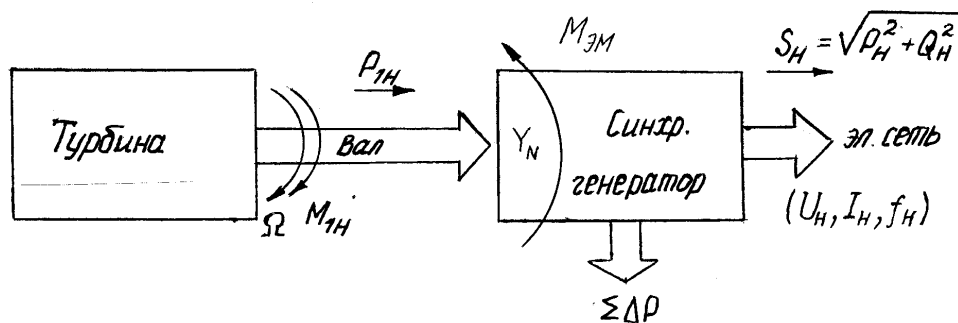


Рис. 3.3. Блок-схема силового канала электромеханического преобразования энергии

К пунктам 2 и 3. Векторная диаграмма – это графическое решение уравнения электрического состояния фазной обмотки якоря на комплексной плоскости. Векторная диаграмма Blondеля строится по уравнению

$$\dot{U}_{H*} = \dot{E}_{0*} - jx_{ad*}\dot{I}_{d*} - jx_{aq*}\dot{I}_{q*} - jx_{\sigma a*}\dot{I}_{H*} - r_a*\dot{I}_{H*} = \dot{E}_{\delta*} - jx_{\sigma a*}\dot{I}_{H*} - r_a*\dot{I}_{H*},$$

где  $\dot{E}_{\delta*} = \dot{E}_{0*} - jx_{ad*}\dot{I}_{d*} - jx_{aq*}\dot{I}_{q*}$ .

В нашем случае неизвестной величиной является  $\dot{E}_{0*}$ , поэтому уравнение должно быть решено относительно  $\dot{E}_{0*}$ . После записи уравнения в буквенном виде необходимо рассчитать величины всех векторов, входящих в правую часть полученного комплексного уравнения ( $x_{ad*}\dot{I}_{d*}$ ,  $x_{aq*}\dot{I}_{q*}$ ,  $x_{\sigma a*}\dot{I}_{H*}$ ,  $\dot{U}_{H*}$ ), и записать их в таблицу 3.5. При построении векторной диаграммы необходимо учитывать, что умножение вектора на мнимую единицу соответствует его повороту на комплексной плоскости на  $90^\circ$  против часовой стрелки относительно

исходного вектора, а умножение вектора на мнимую единицу со знаком минус соответствует его повороту на комплексной плоскости на  $90^\circ$  по часовой стрелке относительно исходного вектора. Например, при умножении вектора  $x_{ad*} \dot{I}_{d*}$  на мнимую единицу получается вектор  $jx_{ad*} \dot{I}_{d*}$ , который по величине равен исходному вектору  $x_{ad*} \dot{I}_{d*}$ , а по фазе опережает вектор тока  $\dot{I}_{d*}$  на  $\pi/2$ , т. е. на комплексной плоскости вектор повернут относительно вектора тока  $\dot{I}_{d*}$  на  $90^\circ$  против часовой стрелки.

Так как решение уравнения производится в о. е., то надо все значения перевести в о. е. При этом за базовые, как и в теории трансформаторов, принимаются  $U_n, I_n, Z_n = U_n/I_n$  и  $S_n = mU_n I_n$ . Пересчитайте активное сопротивление фазной обмотки якоря в о. е. и сравните полученное значение со значениями реактивных сопротивлений. Сделайте вывод о возможности пренебрежения активным сопротивлением в дальнейших расчетах ( $r_{a*} \approx 0$ ).

Для правильного построения векторной диаграммы необходимо определить направление продольной  $d$  и поперечной  $q$  осей на комплексной плоскости. При решении этой задачи воспользуемся примечательным свойством диаграммы Blondеля. На комплексной плоскости построим в выбранном масштабе векторы  $\dot{U}_{H*}$  и  $\dot{I}_{H*}$  (рис. 4.2). При построении диаграммы удобно принимать масштаб: 1 о. е. = 100 мм. Из точки  $A$  опустим перпендикуляр на вектор тока  $\dot{I}_{H*}$  и на продолжении этого перпендикуляра отложим отрезок  $AC = x_{q*} \dot{I}_{H*}$ . Проведя прямую через точку  $C$  и начало координат  $O$ , получим поперечную ось  $q$ . Продольная ось  $d$  расположена под углом  $90^\circ$  к поперечной оси  $q$ . Вектор  $\dot{E}_{0*}$  всегда совпадает по направлению с поперечной осью, поэтому угол  $\psi_n = (\dot{E}_{0*} \wedge \dot{I}_{H*})$  можно определить следующим образом. Из треугольника  $OAB$  найдем катеты

$$\begin{aligned} AB &= U_{H*} \sin \varphi_n, \\ OB &= U_{H*} \cos \varphi_n. \end{aligned}$$

Рассмотрим треугольник  $OBC$ .

$$\text{Катет } BC = AB + AC = U_{H*} \sin \varphi_n + x_{q*} I_{H*}.$$

$$\text{Тогда } \operatorname{tg} \psi_n = \frac{BC}{OB} = \frac{U_{H*} \sin \varphi_n + x_{q*} I_{H*}}{U_{H*} \cos \varphi_n} = \frac{x_{q*} + \sin \varphi_n}{\cos \varphi_n},$$

так как  $U_{H*} = I_{H*} = 1$ .

$$\text{Следовательно, } \psi_n = \operatorname{arctg} \frac{x_{q*} + \sin \varphi_n}{\cos \varphi_n}.$$

Номинальный угол нагрузки  $\theta_n = \psi_n - \varphi_n$ .

Полученные расчетные значения углов  $\psi_H$  и  $\theta_H$  должны совпадать со значениями этих углов на векторной диаграмме.

Перед дальнейшим построением векторной диаграммы Blondеля надо разложить фазный ток якоря на продольную и поперечную составляющие  $I_{d^*}$  и  $I_{q^*}$  и заполнить табл. 3.5.

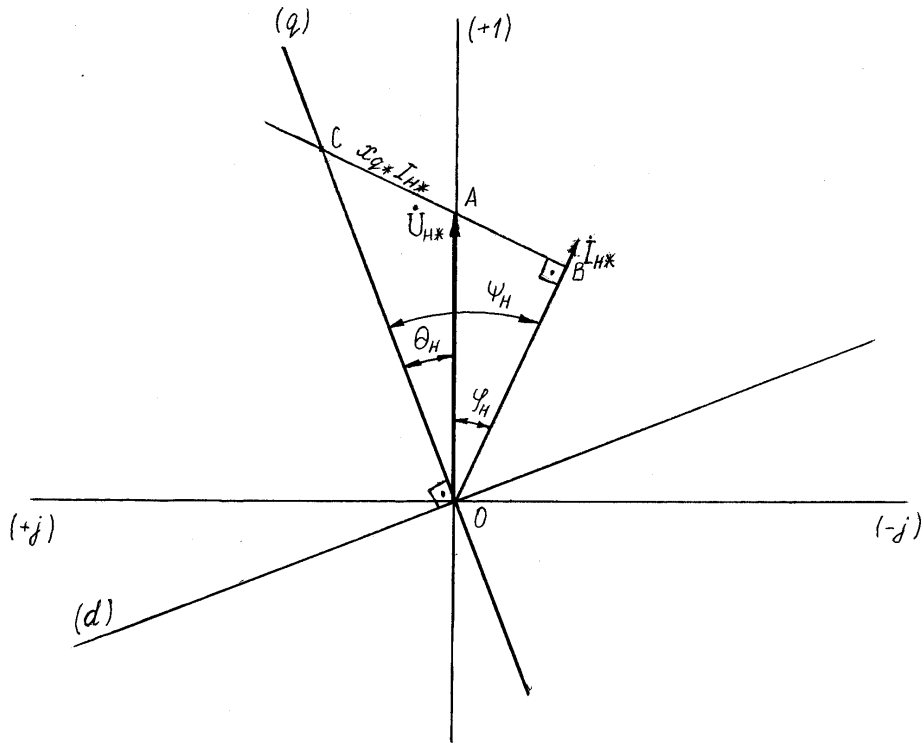


Рис. 3.4. Нахождение направлений поперечной  $q$  и продольной  $d$  осей.

Таблица 3.5

**Численные значения величин,  
необходимых для построения диаграммы Blondеля**

$U_{H^*}$	$I_{H^*}$	$\varphi_H$	$X_{q^*} I_{H^*}$	$\Psi_H$	$\theta_H$	$I_{q^*}$	$I_{d^*}$	$x_{\sigma\sigma^*} I_{H^*}$	$x_{aq^*} I_{q^*}$	$x_{ad^*} I_{d^*}$

Определенные из векторной диаграммы, продольную  $I_{d^*}$  и поперечную  $I_{q^*}$  составляющие тока якоря  $I_{H^*}$  сравнить с расчетными значениями:

$$I_{d^*} = I_{H^*} \sin \psi_H = \sin \psi_H; \quad I_{q^*} = I_{H^*} \cos \psi_H = \cos \psi_H.$$

После построения векторной диаграммы Blondеля и определения по ней ЭДС  $E_{0^*}$  и  $E_{\delta^*}$  необходимо вычислить эти значения ЭДС расчетным путем и сравнить со значениями, полученными из векторной диаграммы. Формулы для вычисления ЭДС  $E_{0^*}$  и  $E_{\delta^*}$  могут быть получены из анализа векторной диаграммы Blondеля (рис. 3.5).

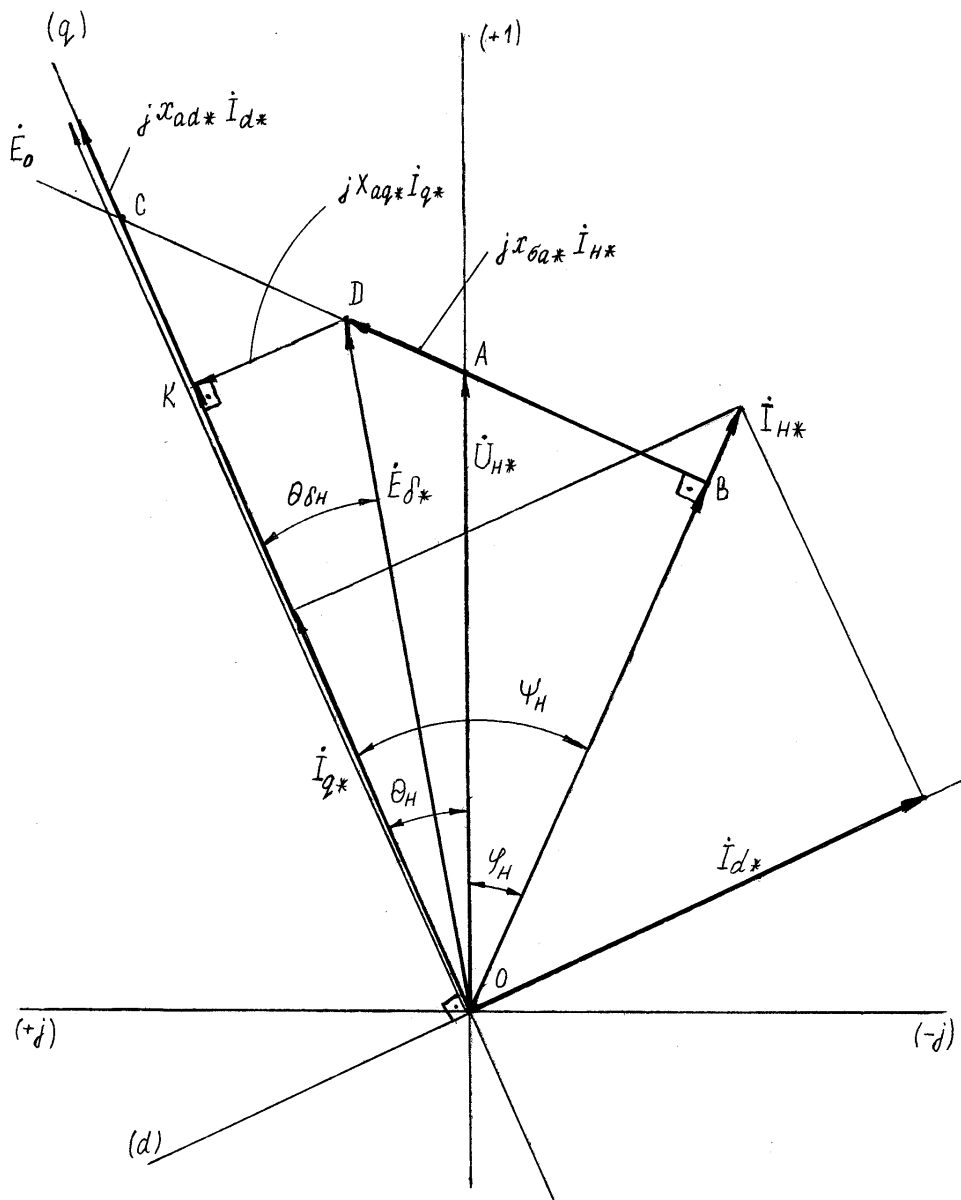


Рис. 3.5. Векторная диаграмма Blondеля явнополюсного синхронного генератора

Рассмотрим треугольник  $ОВД$ .

$$BD = AB + DA = U_{H^*} \sin \varphi_H + x_{\sigma a^*} I_{H^*} = \sin \varphi_H + x_{\sigma a^*}$$

$$E_{\delta^*} = OD = \sqrt{OB^2 + BD^2} = \sqrt{\cos^2 \varphi_H + (\sin \varphi_H + x_{\sigma a^*})^2}$$

Отрезок  $OK$  найдем из треугольника  $ODK$ .

$$OK = \sqrt{OD^2 - DK^2} = \sqrt{\cos^2 \varphi_H + (\sin \varphi_H + x_{\sigma a^*})^2 - (x_{aq^*} I_{q^*})^2}$$

Значение ЭДС  $E_{0^*}$  может быть вычислено следующим образом:

$$E_{0^*} = OK + x_{ad^*} I_{d^*} = \sqrt{\cos^2 \varphi_H + (\sin \varphi_H + x_{\sigma a^*})^2 - (x_{aq^*} I_{q^*})^2} + x_{ad^*} I_{d^*}$$

К пункту 4. В связи с тем, что критический угол нагрузки соответствует максимальной активной мощности синхронного генератора, для нахождения значения этого угла исследуем функцию мощности на экстремум. Функция активной мощности в относительных единицах при условии  $U_{H*} = 1$  имеет вид

$$P_* = \frac{P}{S_H} = \frac{mU_H I \cos \varphi}{mU_H I_H} = I_* \cos \varphi = \frac{E_{0*}}{x_{d*}} \sin \theta + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\theta.$$

Необходимое условие максимума функции соответствует равенству нулю первой частной производной этой функции  $\frac{\partial P_*}{\partial \theta} = 0$ .

Следовательно

$$\frac{\partial P_*}{\partial \theta} = \frac{E_{0*}}{x_{d*}} \cos \theta_{кр} + \left( \frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \cos 2\theta_{кр} = 0.$$

Введем обозначения

$$a = \frac{E_{0*}}{x_{d*}}, \quad \epsilon = \left( \frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right).$$

В этом случае уравнение примет вид:

$$a \cos \theta_{кр} + \epsilon \cos 2\theta_{кр} = 0$$

Преобразуем косинус двойного угла

$$\cos 2\theta_{кр} = \cos^2 \theta_{кр} - \sin^2 \theta_{кр},$$

$$\sin^2 \theta_{кр} = 1 - \cos^2 \theta_{кр},$$

$$\cos 2\theta_{кр} = 2\cos^2 \theta_{кр} - 1.$$

Тогда необходимое условие максимума функции активной мощности преобразуется к виду

$$\cos^2 \theta_{кр} + \frac{a}{2\epsilon} \cos \theta_{кр} - 0,5 = 0.$$

Введем новое обозначение:  $p = a/2\epsilon$ . В этом случае уравнение приобретает каноническую форму:

$$\cos^2 \theta_{кр} + p \cos \theta_{кр} - 0,5 = 0.$$

Корни квадратного уравнения найдем по формуле

$$\cos \theta_{кр.1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} + 0,5}.$$

Физический смысл имеет только корень уравнения, удовлетворяющий условию  $0 < \cos \theta_{кр} < 1$ .

Для проверки правильности решения необходимо воспользоваться свойствами корней квадратного уравнения:

$$\cos\theta_{\text{кр.1}} + \cos\theta_{\text{кр.2}} = -p; \quad \cos\theta_{\text{кр.1}} \cdot \cos\theta_{\text{кр.2}} = -0,5.$$

Критический угол нагрузки находим по значению выбранного корня квадратного уравнения, а максимальную активную мощность – по уравнению:

$$P_{\text{max}*} = \frac{E_{0*}}{x_{d*}} \sin\theta_{\text{кр}} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\theta_{\text{кр}},$$

$$P_{\text{max}} = P_{\text{max}*} S_{\text{H}}$$

При нахождении номинального режима гидрогенератора на угловой характеристике активной мощности необходимо помнить, что номинальному углу нагрузки  $\theta_{\text{H}}$  соответствует номинальная активная мощность, которая в относительных единицах выражается следующим равенством:

$$P_{\text{H}*} = \frac{P_{\text{H}}}{S_{\text{H}}} = \frac{mU_{\text{H}} I_{\text{H}} \cos\varphi_{\text{H}}}{mU_{\text{H}} I_{\text{H}}} = \cos\varphi_{\text{H}}.$$

Угловую характеристику реактивной мощности строят по зависимости

$$Q_* = \frac{Q}{S_{\text{H}}} = \frac{mU_{\text{H}} I \sin\varphi}{mU_{\text{H}} I_{\text{H}}} = I_* \sin\varphi = \\ = \frac{E_{0*}}{x_{d*}} \cos\theta + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \cos 2\theta - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x_{q*}} + \frac{1}{x_{d*}} \right).$$

При построении угловой характеристики реактивной мощности необходимо учитывать, что максимальное значение мощности соответствует углу нагрузки  $\theta = 0$ . Значение предельного угла нагрузки  $\theta_{\text{пред}}$ , при достижении которого генерация реактивной энергии в сеть прекращается ( $Q_* = 0$ ), может быть рассчитано следующим образом:

$$Q_* = \frac{E_{0*}}{x_{d*}} \cos\theta_{\text{пред}} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \cos 2\theta_{\text{пред}} - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x_{q*}} + \frac{1}{x_{d*}} \right) = 0.$$

Введем следующие обозначения:

$$a = \frac{E_{0*}}{x_{d*}}; \quad v = \left( \frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right); \quad c = \left( \frac{1}{x_{q*}} + \frac{1}{x_{d*}} \right),$$

тогда уравнение примет вид

$$a \cos\theta_{\text{пред}} + \frac{1}{2} v \cos 2\theta_{\text{пред}} - \frac{1}{2} c = 0.$$

Преобразуем косинус двойного угла

$$\cos 2\theta_{\text{пред}} = \cos^2 \theta_{\text{пред}} - \sin^2 \theta_{\text{пред}},$$

$$\sin^2 \theta_{\text{пред}} = 1 - \cos^2 \theta_{\text{пред}},$$

следовательно,  $\cos 2\theta_{\text{пред}} = 2\cos^2 \theta_{\text{пред}} - 1$ .

Подставим найденное значение косинуса двойного угла в уравнение реактивной мощности

$$a \cos \theta_{\text{пред}} + \frac{1}{2} b (2 \cos^2 \theta_{\text{пред}} - 1) - \frac{1}{2} c = 0.$$

Полученное уравнение перепишем в следующем виде:

$$\cos^2 \theta_{\text{пред}} + \frac{a}{b} \cos \theta_{\text{пред}} - \frac{c}{2b} - \frac{1}{2} = 0.$$

Введем обозначения:  $p = \frac{a}{b}$ ,  $m = \frac{c}{2b} + \frac{1}{2}$ , тогда уравнение примет вид

$$\cos^2 \theta_{\text{пред}} + p \cos \theta_{\text{пред}} - m = 0.$$

Корни квадратного уравнения найдем по формуле

$$\cos \theta_{\text{пред.1,2}} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} + m}.$$

Физический смысл имеет только корень уравнения, удовлетворяющий условию:  $0 < \cos \theta_{\text{пред}} < 1$ .

По угловой характеристике активной мощности надо определить значение активной мощности, соответствующее  $\theta_{\text{пред}}$ , т. е. значение нагрузки гидрогенератора, при котором он прекращает генерировать в сеть реактивную мощность.

При построении угловой характеристики активной мощности рассчитайте  $P_*$  для следующих углов нагрузки:

$$0^\circ; \theta_{\text{н}}; \theta_{\text{н}} + \frac{\theta_{\text{кр}} - \theta_{\text{н}}}{3}; \theta_{\text{н}} + 2 \frac{\theta_{\text{кр}} - \theta_{\text{н}}}{3}; \theta_{\text{кр}}; \theta_{\text{кр}} + \frac{180^\circ - \theta_{\text{кр}}}{4};$$

$$\theta_{\text{кр}} + \frac{180^\circ - \theta_{\text{кр}}}{2}; \theta_{\text{кр}} + 3 \frac{180^\circ - \theta_{\text{кр}}}{4}; 180^\circ.$$

При построении угловой характеристики реактивной мощности рассчитайте  $Q_*$  для следующих углов нагрузки:

$$0^\circ; \frac{\theta_{\text{пр}}}{4}; \frac{\theta_{\text{пр}}}{2}; \frac{2\theta_{\text{пр}}}{3}; \theta_{\text{пр}}; \theta_{\text{пр}} + \frac{\theta_{\text{пр}}}{3}; \theta_{\text{пр}} + \frac{2\theta_{\text{пр}}}{3}; \theta_{\text{кр}}.$$

К пункту 5. Синхронизирующую мощность в относительных единицах  $\Delta P_*$  при отклонении угла нагрузки от номинального на два градуса ( $\Delta\theta = 2^\circ$ ) можно определить по формуле

$$\Delta P_* = P'_* - P_{\text{н}*},$$

где  $P'_*$  рассчитывается для угла нагрузки  $\theta' = \theta_{\text{н}} + \Delta\theta$ .

В абсолютных единицах синхронизирующие мощность и моменты равны  $\Delta P = \Delta P_* \cdot S_{\text{н}}$ ,  $\Delta M = \Delta P / \Omega$ .

Коэффициенты синхронизирующей мощности и момента можно определить по выражениям:  $P_{\text{см}} = \Delta P / \Delta\theta$ ,  $M_{\text{см}} = \Delta M / \Delta\theta$ .

### 3.3.5. Раздел 5. Машины постоянного тока

#### Задача № 5

Известны следующие технические данные двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением (табл. 3.6):

- номинальная полезная мощность  $P_{2н}$ ;
- номинальное напряжение якоря и обмотки параллельного возбуждения  $U_n$ ;
- номинальная скорость вращения  $n_n$ ;
- номинальный КПД  $\eta_n$ ;
- сопротивление обмотки якоря при 15 °С  $R_{a(15^\circ)}$ ;
- сопротивление обмотки добавочных полюсов при 15 °С  $R_{д.п.(15^\circ)}$ ;
- сопротивление обмотки параллельного возбуждения при 15 °С  $r_{в(15^\circ)}$ ;
- падение напряжения на щетках:  $\Delta U_{щ} = 2$  В при  $I_a \neq 0$ ;
- класс изоляции В (расчетная температура 75 °С);
- материал обмоток – медь;
- сопротивление регулировочного реостата в цепи якоря:  $R_p = \dots R_{a(75^\circ)}$ ;
- сопротивление регулировочного реостата в цепи обмотки параллельного возбуждения:  $r_p = \dots r_{в(75^\circ)}$ ;
- отношение остаточного магнитного потока к номинальному:  $\Phi_{ост}/\Phi_n$ .

Таблица 3.6

Исходные данные к задаче № 5

Номер варианта	$P_{2н}$ , кВт	$U_n$ , В	$n_n$ , об/мин	$\eta_n$ , %	$R_{a(15^\circ)}$ , Ом	$R_{дп(15^\circ)}$ , Ом	$r_{в(15^\circ)}$ , Ом	$R_p$ , Ом	$r_p$ , Ом	$\Phi_{ост}/\Phi_n$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	1,0	110	3000	71,5	0,6	0,35	92	$5R_a$	$r_B$	0,05
1	0,9	110	2000	73	0,644	0,4	87	$7R_a$	$0,5 r_B$	0,04
2	1,3	110	3150	76	0,355	0,355	87	$9R_a$	$r_B$	0,03
3	0,55	220	3000	71	3,99	2,55	810	$10R_a$	$0,5 r_B$	0,05
4	0,75	110	3000	78,5	0,644	0,4	192	$4R_a$	$r_B$	0,03
5	1,2	220	2200	76,5	1,792	0,93	395	$6R_a$	$0,5 r_B$	0,04
6	2	110	3000	78,5	0,201	0,135	73	$8R_a$	$r_B$	0,05
7	1,1	220	1500	74	2,2	1,57	295	$10R_a$	$0,5 r_B$	0,03
8	1,7	110	2200	77	0,294	0,235	81	$5R_a$	$r_B$	0,04
9	2,2	220	3150	81	0,52	0,51	295	$7R_a$	$0,5 r_B$	0,05
10	1,5	110	1500	70	0,42	0,355	44	$9R_a$	$r_B$	0,03
11	2,5	220	2200	76	0,788	0,682	156	$4R_a$	$0,5 r_B$	0,04
12	3,4	110	3350	79,5	0,198	0,051	33,5	$6R_a$	$r_B$	0,05
13	5,3	220	3000	80	0,242	0,195	96,3	$8R_a$	$r_B$	0,03
14	1,4	110	3000	78,5	0,196	0,134	111	$10R_a$	$0,5 r_B$	0,04
15	1,6	110	750	68	0,472	0,308	35	$5R_a$	$r_B$	0,05
16	7,0	110	2200	81	0,067	0,049	25,6	$7R_a$	$0,5 r_B$	0,04
17	4,0	220	1500	79	0,564	0,336	134	$9R_a$	$r_B$	0,05
18	10,5	440	3000	85	0,564	0,336	222	$4R_a$	$0,5 r_B$	0,03



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
19	1,9	110	750	71	0,322	0,27	37,5	$6 R_a$	$r_B$	0,04
20	3,0	220	1000	75,5	0,88	0,64	138	$8 R_a$	$0,5 r_B$	0,05
21	5,5	110	1500	80	0,08	0,066	27,8	$10 R_a$	$r_B$	0,03
22	8,5	440	2240	84,5	0,67	0,445	178	$5 R_a$	$r_B$	0,04
23	3,7	220	2360	81	0,346	0,224	202	$7 R_a$	$r_B$	0,05
24	6,7	440	3000	86,5	0,518	0,323	276	$9 R_a$	$0,5 r_B$	0,03

**При решении задачи выполните следующие операции:**

1. Начертите электрическую схему двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с включением добавочных регулировочных реостатов в цепь якоря  $R_p$  и в цепь обмотки параллельного возбуждения  $r_p$ .

2. Сопротивления якоря, добавочных полюсов и обмотки параллельного возбуждения приведите к расчетной температуре, соответствующей классу изоляции В.

3. Определите номинальную мощность на входе двигателя постоянного тока  $P_{1н}$ , номинальные токи якоря  $I_{ан}$  и возбуждения  $i_{вн}$  и номинальный момент на валу  $M_{2н}$ .

4. Выведите уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока  $\Omega = f(M_{эм})$  и приведите его к виду  $\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega - \Delta\Omega_{щ}$ , где  $\Omega_0$  – угловая скорость идеального холостого хода;  $\Delta\Omega$  – перепад скорости, обусловленный моментом сопротивления на валу;  $\Delta\Omega_{щ}$  – перепад скорости из-за падения напряжения на щетках.

Рассчитайте  $C\Phi_n$  и номинальный электромагнитный момент  $M_{эм.н}$  и сравните его с номинальным моментом на валу  $\Delta M \% = 100(M_{эм.н} - M_{2н}) / M_{эм.н}$ .

5. Рассчитайте и постройте в одной системе координат следующие механические характеристики двигателя постоянного тока, включенного в сеть с напряжением  $U_n$ :

а) естественную ( $R_p = 0, r_p = 0$ );

б) искусственную при включении регулировочного реостата в цепь якоря ( $R_p \neq 0, r_p = 0$ );

в) искусственную при включении регулировочного реостата в цепь обмотки параллельного возбуждения ( $R_p = 0, r_p \neq 0$ );

г) искусственную при включении регулировочного реостата  $R_p$  в цепь якоря и регулировочного реостата  $r_p$  в цепь обмотки параллельного возбуждения ( $R_p \neq 0, r_p \neq 0$ ).

При расчете механических характеристик явлениями насыщения и реакции якоря необходимо пренебречь.

6. Определите ток якоря  $I_a$  и скорость вращения  $\Omega$  при обрыве цепи обмотки параллельного возбуждения и реактивном статическом моменте сопротивления на валу, равном номинальному  $M_c = M_{2н}$ , если известно отношение остаточного магнитного потока к номинальному  $\Phi_{ост} / \Phi_n$ . Найдите отношения

$\Omega / \Omega_n$  и  $I_a / I_{ан}$ , сделайте вывод, что произойдет с двигателем, если система автоматической защиты из-за неисправности не отключит вовремя двигатель от сети. Постройте механическую характеристику.

7. Повторите все расчеты и построения п. 6 при реактивном статическом моменте сопротивления на валу:  $M_c = 0,1M_{2н}$ .

8. Повторите все расчеты и построения п. 6 при активном статическом моменте сопротивления на валу:  $M_c = 1,1M_{2н}$ .

9. Рассчитайте максимальное значение сопротивления пускового реостата  $R_{max}$ , включенного в цепь якоря, при реостатном способе пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, если известно, что пусковой ток не должен превышать двойного номинального значения ( $I_{ап} = 2 I_{ан}$ ). Кратко поясните, по каким соображениям при пуске двигателей постоянного тока ограничивают значение тока якоря.

10. Рассчитайте минимальное значение напряжения  $U_{min}$  при безреостатном способе пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, если известно, что  $I_{ап} = 2 I_{ан}$ . Кратко поясните, почему этот способ пуска не применяется в двигателях постоянного тока с параллельным возбуждением.

11. Рассчитайте ток и скорость вращения якоря двигателя с параллельным возбуждением при его подключении к сети с напряжением  $U_{min}$  без нагрузки на валу ( $R_p = 0$ ;  $r_p = 0$ ;  $M_c = M_o = M_{эм. н} - M_{2н}$ ). Сравните полученные значения тока и скорости вращения якоря с их номинальными значениями. Сделайте вывод.

12. Начертите схему динамического торможения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением. Объясните, почему в этом режиме электромагнитный момент становится тормозным. Рассчитайте значение добавочного сопротивления в цепи якоря, которое обеспечивает в момент переключения в режим динамического торможения ток якоря, равный номинальному ( $I_a = I_{ан}$ ). До момента переключения на торможение двигатель работал в номинальном режиме на естественной механической характеристике.

Начертите механическую характеристику двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением в режиме динамического торможения с рассчитанным значением добавочного сопротивления в цепи якоря.

### ***Методические рекомендации***

*К пункту 3.* В двигателе постоянного тока с параллельным возбуждением номинальный ток  $I_n = I_{ан} + i_{вн}$ , где  $I_{ан}$  – номинальный ток якоря;  $i_{вн}$  – номинальный ток обмотки параллельного возбуждения.

*К пункту 5.* Для решения задачи необходимо рассчитать произведение конструктивной постоянной электрической машины на номинальный магнитный поток  $c\Phi_n$  при номинальном питающем напряжении. Это значение можно определить из паспортных данных двигателя, используя выражения:

$$E_{ан} = c\Phi_n \Omega_n ; \quad E_{ан} = U_n - I_{ан} (R_{a(75^0)} + R_{дп(75^0)}) - \Delta U_{щ}.$$

К пунктам 6 – 8. При обрыве цепи обмотки параллельного возбуждения ( $i_b = 0$ ) магнитопровод двигателя постоянного тока сохраняет остаточную индукцию, обусловленную явлением магнитного гистерезиса, поэтому  $\Phi_{ост} > 0$ .

К реактивным относятся статические моменты от трения, резания, например, металла или дерева, от растяжения и скручивания неупругих тел и т. п. Эти моменты всегда направлены встречно относительно вращающего момента двигателя, т. е. всегда препятствуют движению. Поэтому при приложении реактивного момента к валу двигателя постоянного тока якорь не может изменить направление вращения. Для определения режима работы двигателя в этом случае надо рассчитать начальный пусковой момент  $M_{п.ост}$  и сравнить его со значением реактивного момента сопротивления на валу  $M_c$ . Если  $M_{п.ост} > M_c$ , то двигательный режим работы сохраняется, в противном случае двигатель переходит в режим короткого замыкания.

$$M_{п.ост} = c\Phi_{ост} I_{ап},$$

где  $I_{ап} = \frac{U_n - \Delta U_{щ}}{R_{а(75^0)} + R_{д.п(75^0)}}$  – начальный пусковой ток якоря (ток короткого замыкания).

К активным относятся статические моменты, обусловленные наличием массы тела, сжатием, растяжением или скручиванием тел. В противоположность реактивным активные статические моменты сохраняют свой знак при изменении вращения якоря. Например, активный статический момент, создаваемый грузом подъемного механизма, сохраняет свой знак как при подъеме груза, так и при опускании. При приложении активного момента к валу двигателя в случае  $M_c > M_{п.ост}$  двигатель переходит в тормозной режим противовключения (электромагнитного торможения). В этом случае  $\Omega < 0$  и ЭДС  $E_a$  имеет противоположный знак и складывается с напряжением сети  $U_n$ , вследствие чего

$$I_a = \frac{U_n + E_a - \Delta U_{щ}}{R_{а(75^0)} + R_{д.п(75^0)}} > I_{ап}.$$

Для нахождения тока якоря при работе в режиме двигателя и известных моментах сопротивления на валу можно воспользоваться равенством:

$$M_c \approx M_{эм} = c\Phi I_a.$$

При обрыве цепи обмотки возбуждения в этой формуле необходимо использовать значение  $c\Phi_{ост}$ .

При работе двигателя в режиме короткого замыкания  $\Omega = 0$ ,  $E_a = 0$  и  $I_a = I_{ап}$ .

К пункту 11. В двигателях постоянного тока с параллельным возбуждением обмотка параллельного возбуждения, расположенная на главных полюсах и создающая основной магнитный поток, подключается параллельно обмотке якоря к одному источнику электрической энергии. При пренебрежении реакцией якоря результирующее магнитное поле в воздушном зазоре двигателя создается обмоткой параллельного возбуждения. Анализ работы двигателя при пото-

ках возбуждения, меньших номинального значения, т. е. при ненасыщенной магнитной системе, показал, что основной магнитный поток изменяется пропорционально значению тока возбуждения, что позволяет рассчитать произведение конструктивного коэффициента двигателя на основной магнитный поток ( $c\Phi$ ) при этих токах возбуждения.

$$c\Phi_{\min} = c\Phi_n (i_{B.\min}/i_{BH}).$$

*Например*

- 1) в цепь обмотки параллельного возбуждения включен регулировочный реостат  $r_p$ , тогда

$$i_{B.\min} = U_n / (r_{B(75^\circ)} + r_p) ;$$

- 2) двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением подключен к источнику электрической энергии с напряжением  $U_{\min}$ , тогда

$$i_{B.\min} = U_{\min} / r_{B(75^\circ)}.$$

Если двигатель постоянного тока в номинальном режиме работает на сгибе магнитной характеристики, то при увеличении тока возбуждения ( $i_{B.\max} > i_{BH}$ ) пользоваться вышеприведенной формулой для расчета  $c\Phi_{\max}$  нельзя, так как при насыщении магнитопровода и дальнейшем увеличении тока возбуждения магнитный поток изменяется в небольших пределах по нелинейному закону.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ. . . . .	3
1.1. Цель преподавания дисциплины. . . . .	3
1.2. Задачи изучения дисциплины . . . . .	3
1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины. . . . .	4
2. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ СОВЕТЫ ПО ЕЕ ИЗУЧЕНИЮ. . . . .	5
2.1. Введение. . . . .	5
2.2. Трансформаторы. . . . .	5
2.3. Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах. . . . .	9
2.4. Асинхронные машины . . . . .	11
2.5. Синхронные машины. . . . .	14
2.6. Машины постоянного тока . . . . .	19
2.7. Лабораторный практикум. . . . .	23
2.8. Курсовой проект: содержание, требования к оформлению. . . . .	23
2.9. Учебно-методическое обеспечение дисциплины. . . . .	30
3. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ. . . . .	32
3.1. Цель контрольного задания. . . . .	32
3.2. Требования к выполнению и оформлению контрольного задания . . . . .	33
3.3. Условия контрольного задания и варианты расчета. . . . .	33

