

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электротехники и электромеханики

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Информация о дисциплине
Рабочие учебные материалы
Информационные ресурсы дисциплины
Блок контроля освоения дисциплины

Институты:
радиоэлектроники
системного анализа, автоматики и управления

Специальности:
210106.65 – промышленная электроника
220301.65 – автоматизация технологических процессов и производств
в машиностроении

Направление подготовки бакалавра
210100.62 – электроника и микроэлектроника

Санкт-Петербург
Издательство СЗТУ
2007

Утверждено редакционно-издательским советом университета

УДК 621.313 (07)

Электрические машины: учебно-методический комплекс (информация о дисциплине, рабочие учебные материалы, информационные ресурсы дисциплины, блок контроля освоения дисциплины) / сост. Е. П. Брандина. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007.- 206 с.

Учебно-методический комплекс разработан в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования.

Дисциплина посвящена изучению устройства, принципа работы, основных вопросов теории, режимов работы и эксплуатационных свойств электрических машин.

Рецензенты: кафедра электротехники и электромеханики СЗТУ (зав. кафедрой В. И. Рябуха, д-р техн. наук, проф.); А. А. Сарвин, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой автоматизации производственных процессов СЗТУ, директор института системного анализа, автоматики и управления.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2007

© Брандина Е. П., 2007

1. Информация о дисциплине

1.1. Предисловие

Учебно- методический комплекс предназначен для студентов всех форм обучения специальностей 210106.65 –“Промышленная электроника” и 220301.65 –“Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении”.

Предлагаемый для изучения материал содержит следующие основные разделы дисциплины: «Трансформаторы», «Асинхронные двигатели», «Синхронные машины», «Машины постоянного тока». Основное внимание уделяется принципу действия, устройству и эксплуатационным свойствам электрических машин, используемых при автоматизации и механизации производственных процессов.

Дисциплина изучается в одном семестре на четвертом курсе.

В соответствии с учебным планом студент должен прослушать лекции, пройти лабораторный практикум, выполнить контрольную работу, сдать экзамен, а студенты специальности 210106, кроме вышесказанного, проходят практические занятия и сдают зачет.

Лекции посвящены основным принципиальным вопросам дисциплины, поэтому для успешного освоения материала необходима самостоятельная работа с рекомендуемой литературой.

Целью дисциплины является изучение принципа действия, устройства и эксплуатационных свойств электрических машин.

В результате изучения дисциплины студент должен:

- иметь представление об основных тенденциях развития систем управления и их элементной базе, об основных проблемах научно-технического развития промышленности;
- знать и уметь использовать принципы построения и реализации электромеханических систем, методы расчетов статических и динамических характеристик функциональных устройств систем автоматического управления процессами и оборудованием;
- иметь опыт составления электрических схем для анализа и синтеза сложных электромеханических систем, а также экспериментальных исследований систем управления.

Теоретической базой для освоения данного курса являются дисциплины : "Физика", "Высшая математика", "Теоретические основы электротехники", "Основы теории цепей", "Элементы электронной техники", "Основы преобразовательной техники", "Магнитные элементы электронных устройств". Курс "Электрические машины" в свою очередь является основной базой для изучения целого ряда дисциплин.

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы

1.2.1. Специальность 210106.65

Вид учебной работы	Всего часов		
	форма обучения		
	очная	очно-заочная	заочная
Общая трудоемкость дисциплины	110		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	66	66	66
В т.ч. аудиторные занятия:			
лекции	36	16	6
практические занятия (ПЗ)	4	4	4
лабораторные работы (ЛР)	16	12	4
Самостоятельная работа студента	44	44	44
Промежуточный контроль, количество	0	1	1
В т.ч.: контрольная работа	0	0	0
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	зачет, экзамен		

1.2.2. Специальность 220100.65

Вид учебной работы	Всего часов		
	форма обучения		
	очная	очно-заочная	заочная
Общая трудоемкость дисциплины	110		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	66	66	66
В т.ч. аудиторные занятия:			
лекции	40	16	6
практические занятия (ПЗ)			
лабораторные работы (ЛР)	16	12	8
Самостоятельная работа студента	44	44	44
Промежуточный контроль, количество	0	1	1
В т.ч. : контрольная работа	0	0	0
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	экзамен		

Виды практических занятий и контроля:

- тесты по каждому разделу дисциплины;
- одна контрольная работа (кроме очной формы обучения);
- лабораторные работы;
- экзамен;
- для студентов спец. 210106, кроме выше перечисленного, предусмотрены практические занятия и зачет по дисциплине.

2. Рабочие учебные материалы

2.1. Рабочая программа (Объем дисциплины 110 часов)

Введение (2 ч)
[1], с. 5...36, 52 ... 82

Содержание дисциплины и связь с другими дисциплинами.

Назначение электрических машин. Преобразование мощности. Принцип обратимости. Классификация электрических машин. Основные электромагнитные схемы.

Основные номинальные режимы работы. Нагревание электромеханических устройств, классы нагревостойкости изоляции, связь срока службы электромеханического устройства с величиной нагрузки.

Раздел 1. Трансформаторы (18 ч) [1], с. 83 147

Тема 1.1. Общие сведения. Исходные уравнения

Назначение и классификация трансформаторов. Принцип действия. Элементы конструкции и основные конструктивные модификации. Трехфазные силовые трансформаторы. Схемы и группы соединений. ЭДС обмоток. Уравнения напряжений и токов.

Тема 1.2. Схема замещения. Характеристики

Приведенный трансформатор. Эквивалентная схема замещения трансформатора.

Физические процессы в трансформаторе в режимах холостого хода, короткого замыкания, работы под нагрузкой. Изменение выходного напряжения при нагрузке, внешние характеристики. Потери и КПД. Условие максимума КПД.

Параллельная работа трансформаторов, условия включения на параллельную работу.

Понятие о несимметричных режимах работы.

Специальные типы трансформаторов: многообмоточные трансформаторы, автотрансформаторы, трансформаторы для преобразователей, измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Раздел 2. Асинхронные двигатели (30 ч)

[1], с. 36...52, с.150 ... 224; [2], с. 85...110

Тема 2.1. Общие сведения. Исходные уравнения. Схемы замещения

Общие свойства машин переменного тока, сходство и различие синхронных и асинхронных машин. Понятие об обмотках статора и ротора.

Электродвижущая сила (ЭДС) и магнитодвижущая сила (МДС) обмоток.

Принцип создания вращающегося магнитного поля.

Назначение и область применения асинхронных машин. Принцип действия, устройство.

Физические процессы в асинхронной машине. Схемы замещения.

Тема 2.2. Механические характеристики

Энергетическая диаграмма. Электромагнитный вращающий момент. Естественная механическая характеристика. Режимы работы и энергетические соотношения. Максимальный момент и критическое скольжение. Зона устойчивой работы. Пусковой момент.

Искусственные механические характеристики для асинхронного двигателя с фазным ротором.

Тема 2.3. Пуск. Регулирование. Способы торможения

Пуск в ход и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.

Способы торможения.

Особые виды и режимы работы многофазных асинхронных двигателей: двигатели с улучшенными пусковыми свойствами, с неподвижным ротором, с массивным ротором, с разомкнутым магнитопроводом статора (линейные двигатели).

Однофазные асинхронные двигатели.

Асинхронные микромашины автоматических устройств: исполнительные (управляемые) двигатели, тахогенераторы, вращающиеся (поворотные) трансформаторы, сельсины.

Асинхронные генераторы.

Раздел 3. Синхронные машины (30 ч)

[1], с. 226 ... 290

Тема 3.1. Общие сведения. Теория двух реакций

Назначение и область применения. Принцип действия, конструкция явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин.

Магнитные поля. Реакция якоря (статора). Теория двух реакций. Индуктивные сопротивления синхронных машин. Основные виды векторных диаграмм напряжений синхронной машины.

Тема 3.2. Характеристики синхронных машин

Синхронный генератор. Принцип работы. Характеристики. Синхронный двигатель. Принцип работы и векторные диаграммы, электромагнитный момент. Способы пуска и регулирования частоты вращения.

Тема 3.3. Параллельная работа синхронной машины с сетью

Условия включения синхронной машины в сеть. Метод точной и грубой синхронизации. Режимы работы. Синхронный компенсатор.

Уравнение электромагнитной мощности, угловая характеристика, работа при изменении тока возбуждения (V -образные характеристики) синхронных машин.

Синхронные микромашины автоматических систем: реактивный, гистерезисный, безредукторный, шаговый двигатели.

Раздел 4. Машины постоянного тока (28 ч)

[1], с. 295 ... 340

Тема 4.1. Общие сведения

Назначение и область применения электрических машин постоянного тока. Принцип действия в режимах работы генератора и двигателя. Принцип обратимости. Устройство униполярной и коллекторной машин постоянного тока.

Понятие об обмотках якоря. ЭДС обмотки якоря.

Электромагнитный момент.

Магнитные поля машины постоянного тока: магнитная цепь, понятие о реакции якоря и ее влияние на работу машины.

Сущность процесса коммутации и способы его улучшения.

Классификация электрических машин постоянного тока по способу возбуждения. Электрические схемы.

Тема 4.2. Генераторы постоянного тока

Классификация генераторов постоянного тока по способу возбуждения. Уравнения напряжения и тока. Характеристики генераторов постоянного тока. Сварочные генераторы постоянного тока.

Тема 4.3. Двигатели постоянного тока

Классификация двигателей постоянного тока по способу возбуждения. Области применения. Уравнения напряжения и тока.

Пуск и ход, регулирование частоты вращения. Двигатели параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Механические и регулировочные характеристики.

Импульсное питание двигателей постоянного тока. Крановые и металлургические двигатели.

Специальные типы машин постоянного тока. электромашинные усилители (ЭМУ), тахогенераторы, исполнительные (управляемые) двигатели, бесконтактные двигатели постоянного тока.

Заключение (2 ч)

Электрические машины составляют основу электроэнергетики, как в процессе производства, так и в процессе потребления электроэнергии во всех отраслях промышленности и транспорта.

Синхронные генераторы вырабатывают практически всю электроэнергию. С помощью трансформаторов электроэнергия передается на место потребления. Электродвигатель – основа электропривода рабочих машин. Асинхронные двигатели составляют основной парк всех электрических машин. Двигатели постоянного тока – это тяговые машины транспорта.

Совершенствование электрических машин с целью увеличения технико-экономических показателей ведется как в области улучшения технологии изготовления, так и в области повышения качества магнитных и электроизоляционных материалов.

Особенно перспективным направлением является переход к новым, нетрадиционным, принципам исполнения электрических машин. Сюда относятся магнитогидродинамические, криогенные и другие типы электрических машин.

2.2. Тематический план дисциплины

2.2.1. Специальность 210106.65

2.2.1.1. Очно-заочная форма обучения

№ п/п	Название раздела, темы	Количество часов по дневной форме	Виды занятий и контроля										
			Лекции		ПЗ		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольная работа	ПЗ (С)	ЛР
			Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ					
	Всего	110	16	12	4	10	12	12	44				
1	Раздел 1 Введение Трансформаторы	20							6	№1	зад 1		
1 1	Общие сведения Исходные уравнения		1										
1 2	Схема замещения Характеристики		1		4	4	4				№1	№1	
2	Раздел 2 Асинхронные двигатели	30							12	№2	зад 2		
2 1	Общие сведения Исходные уравнения Схемы замещения		1	1									
2 2	Механические характеристики		2		2	2	4	4				№2	№2
2 3	Пуск Регулирование Способы торможения		1	1									
3	Раздел 3 Синхронные машины	30							14	№3			
3 1	Общие сведения Теория двух реакций		2	2									
3 2	Характеристики синхронных машин		2	2		2						№3	
3 3	Параллельная работа с сетью		2	4									
4	Раздел 4 Машины постоянного тока Заключение	30							12	№4	зад 3		
4 1	Общие сведения		2										
4 2	Генераторы постоянного тока			2									
4 3	Двигатели постоянного тока		2		2	2	4	4				№4	№3

2.2.1.2. Заочная форма обучения

№ п/п	Название раздела, темы	Количество часов по дневной форме	Виды занятий и контроля										
			Лекции		ПЗ		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольная работа	ПЗ (С)	ЛР
			Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ					
Всего		110	6	38	4	10	4	4	44				
1	Раздел 1 Введение Трансформаторы	20							6	№1	зад 1		
1 1	Общие сведения Исходные уравнения		1	4									
1 2	Схема замещения Характеристики		1	4		4						№1	
2	Раздел 2 Асинхронные двигатели	30							12	№2	зад 2		
2 1	Общие сведения Исходные уравнения Схемы замещения		1	4									
2 2	Механические характеристики		1	4	2	2						№2	
2 3	Пуск Регулирование Способы торможения			4									
3	Раздел 3 Синхронные машины	30							14	№3			
3 1	Общие сведения Теория двух реакций			4									
3 2	Характеристики синхронных машин			4		2						№3	
3 3	Параллельная работа с сетью			6									
4	Раздел 4 Машины постоянного тока Заключение	30							12	№4	зад 3		
4 1	Общие сведения		1	1									
4 2	Генераторы постоянного тока			2									
4 3	Двигатели постоянного тока		1	1	2	2	4	4				№4	№3

2.2.2. Специальность 220301 65

2.2.2.1. Очная форма обучения

№ п/п	Название раздела, темы	Количество часов по дневной форме	Виды занятий и контроля											
			Лекции		ПЗ		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольная работа	ПЗ (С)	ЛР	
			Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ						
	Всего	110	40			2	16	8	44					
1	Раздел 1 Введение Трансформаторы	20							6	№1				
1 1	Общие сведения Исходные уравнения		4											
1 2	Схема замещения Характеристики		6				4						№1	
2	Раздел 2 Асинхронные двигатели	30							12	№2				
2 1	Общие сведения Исходные уравнения Схемы замещения		4											
2 2	Механические характеристики		4				4	4				№2	№2	
2 3	Пуск Регулирование Способы торможения		2											
3	Раздел 3 Синхронные машины	30							14	№3				
3 1	Общие сведения Теория двух реакций		4											
3 2	Характеристики синхронных машин		4			2						№3		
3 3	Параллельная работа с сетью		6											
4	Раздел 4 Машины постоянного тока Заключение	30							12	№4				
4 1	Общие сведения		2											
4 2	Генераторы постоянного тока		2											
4 3	Двигатели постоянного тока		2				8	4					№3 №4	

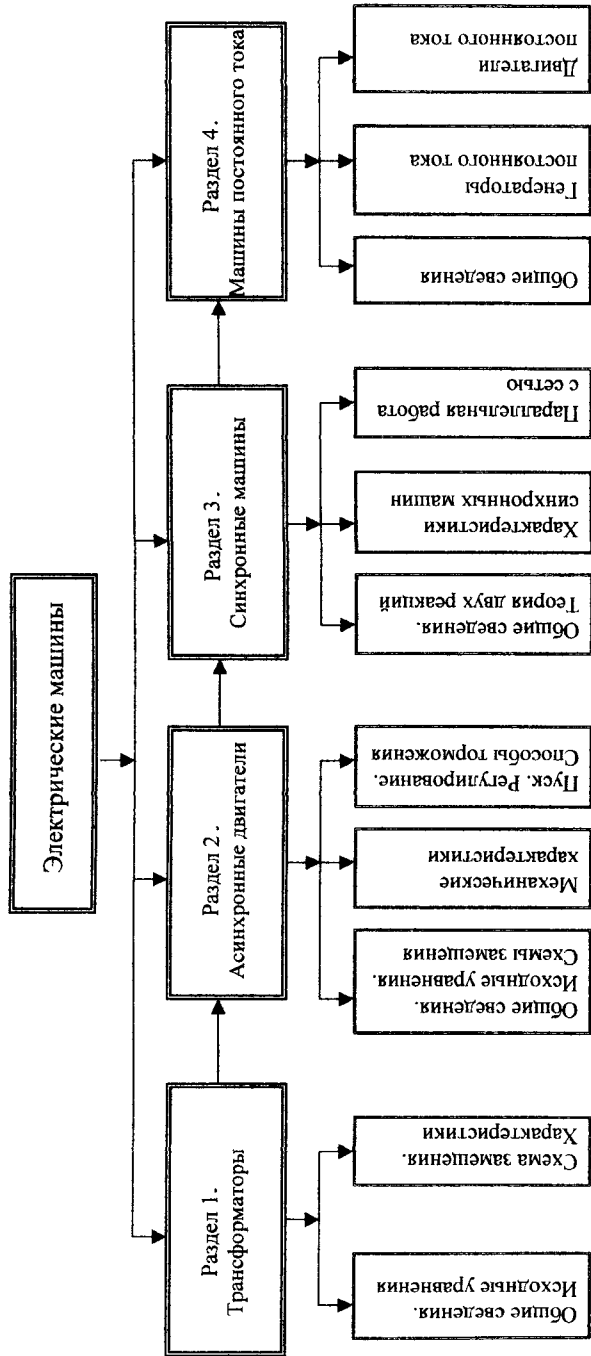
2.2.2.2. Очно-заочная форма обучения

№ п/п	Название раздела, темы	Количество часов по дневной форме	Виды занятий и контроля										
			Лекции		ПЗ		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольная работа	ПЗ (С)	ЛР
			Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ					
Всего		110	16	12		14	12	12	44				
1	Раздел 1 Введение Трансформаторы	20							6	№1	зад 1		
1 1	Общие сведения Исходные уравнения		1										
1 2	Схема замещения Характеристики		1			4	4	4				№1	№1
2	Раздел 2 Асинхронные двигатели	30							12	№2	зад 2		
2 1	Общие сведения Исходные уравнения Схемы замещения		1	1									
2 2	Механические характеристики		2			4	4	4				№2	№2
2 3	Пуск Регулирование Способы торможения		1	1									
3	Раздел 3 Синхронные машины	30							14	№3			
3 1	Общие сведения Теория двух реакций		2	2									
3 2	Характеристики синхронных машин		2	2		2						№3	
3 3	Параллельная работа с сетью		2	4									
4	Раздел 4 Машины постоянного тока Заключение	30							12	№4	зад 3		
4 1	Общие сведения		2										
4 2	Генераторы постоянного тока			2									
4 3	Двигатели постоянного тока		2			4	4	4				№4	№3

2.2.2.3. Заочная форма обучения

№ п/п	Название раздела, темы	Количество часов по дневной форме	Виды занятий и контроля										
			Лекции		ПЗ		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольная работа	ПЗ (С)	ЛР
			Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ	Аудит	ДОТ					
	Всего	110	6	30		14	8	8	44				
1	Раздел 1 Введение Трансформаторы	20							6	№1	зад 1		
1 1	Общие сведения Исходные уравнения		1	4									
1 2	Схема замещения Характеристики		1	4		4						№1	
2	Раздел 2 Асинхронные двигатели	30							12	№2	зад 2		
2 1	Общие сведения Исходные уравнения Схемы замещения		1	1									
2 2	Механические характеристики		1	2		4	4	4				№2	№2
2 3	Пуск Регулирование Способы торможения			1									
3	Раздел 3 Синхронные машины	30							14	№3			
3 1	Общие сведения Теория двух реакций			4									
3 2	Характеристики синхронных машин			4		2							
3 3	Параллельная работа с сетью			6								№3	
4	Раздел 4 Машины постоянного тока Заключение	30							12	№4	зад 3		
4 1	Общие сведения		1	1									
4 2	Генераторы постоянного тока			2									
4 3	Двигатели постоянного тока		1	1		4	4	4				№4	№3

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины «Электрические машины»



2.4. Временной график изучения дисциплины

№	Название раздела (темы)	Продолжительность изучения раздела (темы) (из расчета – 4 часа в день)
1	Раздел 1. Трансформаторы	5
2	Раздел 2. Асинхронный двигатель	8
3	Раздел 3. Синхронные машины	8
4	Раздел 4. Машины постоянного тока	8
	Итого:	29 дней

2.5. Практический блок

2.5.1. Практические занятия

2.5.1.1. Специальность 212106

Номер и название раздела	Наименование тем практических занятий	Количество часов	
		Аудиторно	ДОТ
1. Трансформатор	Решение задач по теме «Трансформатор»	0	4
2. Асинхронные двигатели	Решение задач по теме «Асинхронный двигатель»	2	2
3. Синхронные машины	Решение задач по теме «Синхронные машины»	0	2
4. Машины постоянного тока	Решение задач по теме «Машины постоянного тока»	2	2

2.5.1.2. Специальность 220301

Номер и название раздела	Наименование тем практических занятий	Количество часов
		с использованием ДОТ
1. Трансформатор	Решение задач по теме «Трансформатор»	4
2. Асинхронные двигатели	Решение задач по теме «Асинхронный двигатель»	4
3. Синхронные машины	Решение задач по теме «Синхронные машины»	2
4. Машины постоянного тока	Решение задач по теме «Машины постоянного тока»	4

2.5.2. Лабораторные работы

2.5.2.1. Специальность 210606

Номер и название раздела (темы)	Наименование лабораторной работы	Количество часов			
		очно-заочн.		заочн.	
		Аудит.	ДОТ	Ауд.	ДОТ
1. Трансформатор	Трансформатор	4	4	0	0
2. Асинхронный двигатель	Асинхронный двигатель	4	4	0	0
3. Машины постоянного тока	Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения	4	4	4	4

2.5.2.2. Специальность 220301

Номер и название раздела (темы)	Наименование лабораторной работы	Количество часов					
		очная		очно-заочн.		заочн.	
		Ауд.	ДОТ	Ауд.	ДОТ	Ауд.	ДОТ
1. Трансформатор	Трансформатор	4	0	4	4	0	0
2. Асинхронный двигатель	Асинхронный двигатель	4	4	4	4	4	4
3. Машины постоянного тока	Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения	4	4	4	4	4	4
	Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения	4	0	0	0	0	0

2.6. Рейтинговая система оценки знаний

Условием успешного завершения изучения дисциплины является выполнение лабораторных работ и контрольной работы, предусмотренных учебным планом. Оценка знаний производится по результатам контрольных мероприятий: тестирования и обязательного решения трех экзаменационных задач.

Тестирование проводится по четырем разделам дисциплины. Тест по каждому разделу содержит 10 вопросов, каждый правильный ответ оценивается в один балл. Максимальное количество баллов составляет $10 \cdot 4 = 40$. Повторно тесты не даются.

Экзаменационный билет содержит три задачи (по разделам 1, 2, 4). Каждая правильно решенная задача оценивается в 20 баллов, при недочетах балл может снижаться. Максимальное количество баллов составляет $20 \cdot 3 = 60$. Экзаменационные задачи можно получить повторно (другого содержания). Первая повторно полученная задача оценивается также в 20 баллов, каждая последующая задача оценивается на 5 баллов ниже.

Итак, максимальная оценка в баллах за правильные ответы:

- тестирование по четырем разделам дисциплины $10 \cdot 4 = 40$;
- решение трех экзаменационных задач $20 \cdot 3 = 60$.

Итого, максимально возможное количество баллов составляет 100.

Ранжирование результатов:

Оценка	удовлетворительно (зачтено)	хорошо	отлично
Кол-во набранных баллов (не менее)	40	65	85

Вы можете увеличить набранное количество баллов, решив дополнительную задачу по разделу 3. Кроме того, за качественное и своевременное выполнение контрольной и лабораторных работ начисляются поощрительные баллы: безошибочно выполненная контрольная работа и каждая лабораторная работа оцениваются в 5 баллов.

3. Информационные ресурсы дисциплины

3.1. Библиографический список

Основной:

1. Брандина, Е. П. Электрические машины: письменные лекции, примеры решения задач / Е. П. Брандина. - СПб.: СЗТУ, 2004.
2. Методические указания к выполнению расчетно-графических работ / сост. Е. П. Брандина. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006.
3. Электрические машины. Методические указания к выполнению лабораторных работ / сост. Е. П. Брандина, В. В. Воробьев. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007.
4. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. для вузов/А. И. Вольдек, В. В. Попов. -СПб.: Питер, 2007.

Дополнительный:

5. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И.П.Копылов. - М.: Высш. шк., 2006.
6. Кацман, М. М. Электрические машины: учеб. для электротехн. средн. спец. учебных заведений / М. М. Кацман. - М.: Высш. шк., 2003.
7. Читечян, В.И. Электрические машины: сборник задач / В. И. Читечян. - М.: Высш. шк., 1988.
8. Справочник по электрическим машинам: в 2 т./ под общ. ред. И. П. Копылова и Б.К. Клокова. - М: Энергоатомиздат, 1989.
9. Рябуха, В.И. Электрические машины. Общие вопросы теории машин переменного тока: сборник задач с ответами / В. И. Рябуха. -СПб.: СЗПИ, 1994.
10. Рябуха, В.И. Электрические машины. Трансформаторы: сборник задач с ответами / В. И. Рябуха. - СПб.: СЗПИ, 1994.
11. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
12. ГОСТ 16264.1-85. Двигатели асинхронные. Общие технические условия.
13. ГОСТ 16264.2-85. Двигатели синхронные. Общие технические условия.
14. ГОСТ 4.171-85. Турбогенераторы, гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и их системы возбуждения. Номенклатура показателей.
15. Ресурсы Internet: Библиотека. Единое окно доступа к образовательным ресурсам. Брандина Е.П. Электрические машины. www.edu.ru/window/library.

3.2. Опорный конспект

Введение

По назначению электрические машины разделяются на генераторы, двигатели и преобразователи. Электрический генератор преобразует механическую энергию приводного двигателя в электрическую энергию. Электрический двигатель, наоборот, преобразует подводимую электрическую энергию в механическую энергию вала. Электромашинный преобразователь преобразует электрическую энергию одного вида в электрическую энергию другого вида, изменяя род тока, величину напряжения, частоту, число фаз. Примером преобразователя может служить трансформатор.

По роду тока различают электрические машины постоянного, переменного тока и универсальные. Машины переменного тока по принципу работы разделяются на синхронные и асинхронные. Машины переменного тока по числу фаз могут быть одно-, двух- и трехфазные. Двигатели постоянного тока небольшой мощности могут использоваться и при работе на переменном токе, т.е. применяться как универсальные.

Машины постоянного тока относятся к коллекторным машинам, машины переменного тока – к бесколлекторным машинам, за исключением специального типа машин.

По мощности условно можно выделить следующие группы электрических машин:

- микромашины имеют мощность до 0,5 кВт;
- машины малой мощности - от 0,5 кВт до 10 кВт;
- машины средней мощности - от 10 кВт до 100 кВт;
- крупные машины имеют мощность свыше 100 кВт.

По применению различаются электромашины общепромышленного и специального назначения. Существуют и другие виды классификации электрических машин.

Каждая электрическая машина снабжается паспортом и обычно щитком, укрепленном на корпусе, где указаны тип машины и её эксплуатационные данные, относящиеся к номинальному режиму работы (режиму, для которого изготовлена машина). Величины, относящиеся к номинальному режиму работы называются номинальными данными и обычно снабжаются индексом "н". Например, номинальные значения мощности P_n , напряжения U_n , тока I_n , частоты вращения n_n , КПД η_n и т.д. На щитке могут быть указаны и другие данные (схема соединения обмоток и т.п.).

Электрические машины обладают принципом обратимости, т.е. машина может работать как в генераторном, так и в двигательном режиме.

Раздел 1. Трансформаторы

Более подробная информация по данной теме содержится в учебном пособии [1].

В разделе рассматриваются две темы:

- Общие сведения. Исходные уравнения.
- Схема замещения. Характеристики.

При работе с теоретическим материалом следует ответить на контрольные вопросы, приведенные в конце данного раздела.

После проработки теоретического материала раздела 1 следует обратиться к практикуму и разобрать примеры решения задач, а затем выполнить задачу №1 контрольной работы. После этого следует перейти к лабораторной работе №1, если это предусмотрено Вашим тематическим планом. При появлении затруднений следует обратиться к пособию [1].

После изучения данного раздела необходимо пройти контрольные мероприятия: ответить на вопросы теста №1 и решить экзаменационную задачу по данному разделу. Максимальное количество баллов, которые Вы можете получить по данному разделу, составляет 30: 10 баллов за тестирование и 20 баллов за решение экзаменационной задачи.

Введение

Обычно приемники электроэнергии расположены на значительном удалении от электростанции. При передаче электроэнергии требуется значительно повысить напряжение для уменьшения потерь мощности в линии электропередачи. Такое изменение или трансформация переменного тока осуществляется с помощью преобразователей, называемых трансформаторами. Наибольшее применение находят силовые трансформаторы напряжения. Суммарная мощность таких трансформаторов, установленных в электрических сетях, превышает мощность источников энергии в 7...10 раз.

Трансформаторы применяются в установках электросварки, в радио- и телеустановках, в системах автоматики, связи и многих других отраслях. Широкая область применения трансформаторов объясняет их конструктивное разнообразие и широкий диапазон мощностей.

Тема 1.1. Общие сведения. Исходные уравнения

1.1.1. Принцип работы

Трансформатор—электромагнитный статический аппарат, который преобразует параметры переменного тока: напряжение, ток, частоту, число фаз. В простейшем случае трансформатор представляет собой магнитопровод с размещенными на нем двумя обмотками (рис.1.1).

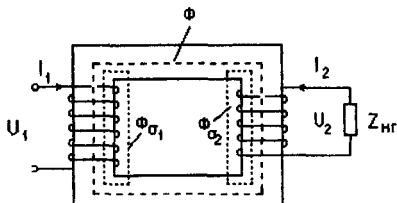


Рис.1.1

При включении первичной обмотки на переменное напряжение U_1 возникает ток I_1 , который создает переменное магнитное поле. Это поле наводит в обеих обмотках ЭДС E_1 и E_2 . Если вторичную обмотку включить на нагрузку ($Z_{нГ}$), то возникает ток I_2 . Основной магнитный поток Φ

создается суммарным действием токов I_1 и I_2 (рис.1.2).

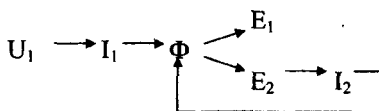


Рис.1.2

Магнитопровод трансформатора выполняется шихтованным, т.е. набранным из отдельных листов электротехнической стали.

При $f = 50$ Гц толщина листов обычно составляет 0,5 мм, при повышении частоты толщина листов уменьшается. Шихтовка применяется для уменьшения потерь в стали на вихревые токи.

1.1.2. Основные уравнения

1.1.2.1. ЭДС обмоток

По закону Максвелла ЭДС, индуцируемая в контуре с числом витков W переменным магнитным потоком Φ , равна

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.1)$$

Примем, что $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, где круговая частота $\omega = 2\pi f$,

f - частота питающей сети.

Тогда

$$e = -W\omega\Phi_m \cos\omega t = -W\omega\Phi_m \sin(90^\circ - \omega t) = W\omega\Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ). \quad (1.2)$$

Амплитуда ЭДС

$$E_m = W\omega\Phi_m.$$

Действующее значение ЭДС

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f \Phi_m W \approx 4,44 f \Phi_m W. \quad (1.3)$$

Индекс "m" у потока Φ обычно опускают.

Как следует из (1.1) и (1.2), по фазе ЭДС E отстает от потока Φ на 90° .

Согласно (1.3) ЭДС первичной и вторичной обмоток имеют вид

$$E_1 = 4,44 f \Phi W_1; \quad E_2 = 4,44 f \Phi W_2.$$

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (1.4)$$

Обмотки трехфазного трансформатора могут быть соединены в "звезду" (Y) или в "треугольник" (Δ).

Соотношение линейных и фазных напряжений и токов:

$$\text{для } Y - U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}, I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}; \quad \text{для } \Delta - U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}, I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}}.$$

Полная мощность :

$$\text{-- однофазного трансформатора } S = U \cdot I$$

$$\text{-- трехфазного трансформатора } S = 3 \cdot U_{\text{ф}} \cdot I_{\text{ф}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}}.$$

Активная мощность нагрузки $P = S \cos \phi$,

реактивная мощность $Q = S \sin \phi$, где ϕ - угол нагрузки.

1.1.2.2. Уравнения напряжений

Магнитный поток трансформатора (рис.1.1) можно представить в виде основного магнитного потока Φ , созданного совместным действием токов I_1 и I_2 , и сцепляющегося с обеими обмотками, и потоков рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, каждый из которых создается только своим током ($I_1 \rightarrow \Phi_{\sigma 1}$ и $I_2 \rightarrow \Phi_{\sigma 2}$) и сцепляется только со своей обмоткой. Основной магнитный поток Φ наводит основные ЭДС E_1 и E_2 . Потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ наводят соответственно ЭДС рассеяния $E_{\sigma 1}$ и $E_{\sigma 2}$ (каждый поток - в своей обмотке).

Действующее значение ЭДС рассеяния в комплексном виде

$$\dot{E}_{\sigma} = -jxI = -j\omega L\dot{I}, \quad (1.5)$$

где $x = \omega L$ - индуктивное сопротивление рассеяния (самоиндукции).

Наличие (-j) в формуле (1.5) означает, что вектор ЭДС \dot{E}_{σ} отстает по фазе от вектора тока \dot{I} на 90° .

Согласно (1.5) можно записать

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -jx_1\dot{I}_1, \quad \dot{E}_{\sigma 2} = -jx_2\dot{I}_2. \quad (1.6)$$

Применим закон Кирхгофа к первичной и вторичной обмоткам:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1,$$

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2.$$

С учетом (1.6) можно записать

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_2,\end{aligned}\quad (1.7)$$

где r_1 и r_2 - активные сопротивления обмоток.

1.1.2.3. Уравнение токов

Рассмотрим уравнение напряжения

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1.$$

Величина $I_1 z_1$ для трансформаторов средней мощности составляет 5-10 % U_1 , поэтому можно принять, что $U_1 \approx E_1 = 4,44 f\Phi W$. Так как напряжение сети по модулю $U_1 = \text{const}$, то отсюда следует, что поток, определяемый напряжением сети, $\Phi = \text{const}$. Следовательно, для всех режимов работы постоянна магнитодвижущая сила (МДС), создающая этот поток.

МДС при нагрузке

$$\dot{F} = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2.$$

МДС при холостом ходе (х.х.)

$$F = I_{10} W_1,$$

где I_{10} - ток х.х., $I_2 = 0$.

Приравнявая эти МДС, получаем уравнение

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_{10} W_1.$$

Разделим на W_1 и, с учетом $k = \frac{W_1}{W_2}$, получим уравнение токов

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{1}{k} = \dot{I}_{10}. \quad (1.8)$$

Тема 1.2. Схема замещения. Характеристики

1.2.1. Приведенный трансформатор

Уравнения напряжений (1.7) и токов (1.8) позволяют определить все режимы работы трансформатора. Однако неудобство этих расчетов заключается в том, что между обмотками существует не только электрическая, но и магнитная связь, а также, как правило, значительным отличием параметров и следовательно токов и напряжений первичной и вторичной обмоток, что затрудняет построение векторной диаграммы и т. д.

Для того, чтобы можно было связать первичную и вторичную обмотки электрически, устранить их магнитную связь и воспользоваться схемой замещения, принимают, что $E_1 = E_2$ и $W_1 = W_2$. Такой трансформатор называется приведенным. Параметры вторичной обмотки приведенного трансформатора обозначаются со штрихами. Уравнения напряжений и токов приведенного трансформатора согласно уравнениям (1.7 и 1.8) примут вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1; \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' r_2' - j \dot{I}_2' x_2'; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_{10}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Этим уравнениям соответствует схема замещения, представленная на рис.1.3. Схема замещения относится к одной фазе трансформатора.

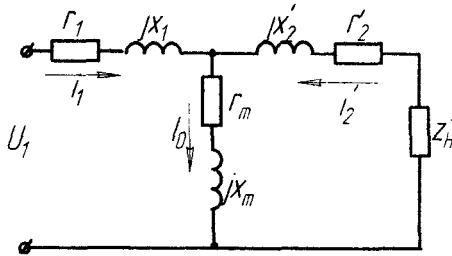


Рис.1.3

Параметры обмоток Z_1 и Z_2' на схеме замещения выносят отдельно.

Активное сопротивление r_m определяется потерями в стали.

Индуктивное сопротивление x_m отражает взаимоиндукцию обмоток.

Коэффициенты перехода от приведенного трансформатора к реальному определяются из условия сохранения энергетических показателей:

$$E_2' = E_2 \frac{W_1}{W_2} = k E_2;$$

$$I_2' = I_2 \frac{1}{k} \quad (\text{из равенства мощностей } E_2 I_2 = E_2' I_2');$$

$$r_2' = r_2 k^2 \quad (\text{из равенства потерь } I_2^2 r_2 = I_2'^2 r_2'),$$

аналогично, $x_2' = x_2 k^2$, $z_2' = z_2 k^2$.

1.2.2. Режим холостого хода

Так как в режиме х.х. вторичная обмотка разомкнута ($I_2 = 0$), то схема замещения имеет вид рис.1.4.

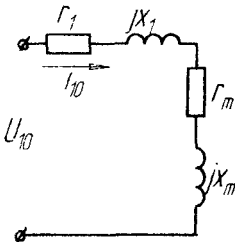


Рис. 1.4

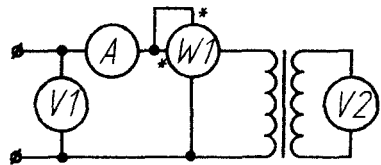


Рис.1.5

Поскольку $r_l \ll r_m$ и $x_l \ll x_m$, то сопротивлением r_l и x_l (рис.1.4) можно пренебречь.

Опытное определение параметров производится по схеме рис.1.5. В результате опыта определяем параметры:

$$k = \frac{U_1}{U_2}; \quad z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} \approx z_m; \quad r_0 = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} \approx r_m; \quad x_0 \approx x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}. \quad (1.10)$$

Значение I_{10} составляет 2...5% I_H .

Мощность p_0 , потребляемая трансформатором в режиме х.х, определяется в основном потерями в стали (на гистерезис и вихревые токи), так как потерями в первичной обмотке $p_{M1} = m_1 I_{10}^2 r_l$ можно пренебречь в силу малости тока I_{10} . Значение p_0 приводится в паспортных данных трансформатора.

1.2.3. Режим короткого замыкания ($U_2 = 0$)

В режиме короткого замыкания (к.з.) токи \dot{I}_1 и \dot{I}'_2 сдвинуты по фазе почти на 180° и примерно равны, поэтому

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_{10} \approx 0.$$

Это позволяет пренебречь контуром намагничивания (ветвью r_m, x_m).

Кроме того, если учесть, что сопротивления короткого замыкания

$$r_1 + r'_2 = r_k, \quad x_1 + x'_2 = x_k, \quad \text{то схема замещения примет вид рис.1.6.}$$

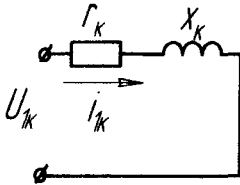


Рис. 1.6

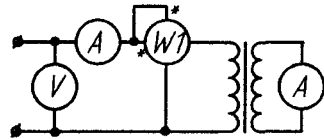


Рис. 1.7

Опытное определение параметров производится по схеме рис. 1.7.

В результате опыта определяем параметры:

$$z_k = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}; \quad r_k = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}; \quad r_1 \approx r'_2 = \frac{r_k}{2}; \quad x_1 \approx x'_2 = \frac{x_k}{2}. \quad (1.11)$$

Таким образом, опыты х.х. и к.з. позволяют определить все параметры схемы замещения (рис.1.3).

Напряжением короткого замыкания u_k называется такое напряжение, при котором ток короткого замыкания равен номинальному току $I_k = I_H$:

$$u_K = I_H z_K. \quad (1.12)$$

Активная и реактивная составляющие:

$$u_{KA} = I_H r_K = u_K \cos \varphi_K, \quad u_{KP} = I_H x_K = u_K \sin \varphi_K, \quad (1.13)$$

$$\text{где } \cos \varphi_K = r_K / z_K, \quad \sin \varphi_K = x_K / z_K. \quad (1.14)$$

Напряжение короткого замыкания выражается в процентах:

$$u_{K\%} = u_K / U_H 100 \% \quad (1.15)$$

и приводится в паспортных данных трансформатора, а также его активная и реактивная составляющие. Значение $u_{K\%}$ составляет примерно 5...10 %.

Мощность, потребляемая трансформатором в режиме к. з., определяется потерями в обмотках. Для номинального значения тока эта мощность равна

$$P_{KH} = m I_n^2 r_K. \quad (1.16)$$

Это значение приводится в паспортных данных.

Потери в обмотках для текущего значения тока определяют по формуле

$$P_K = P_{KH} (\kappa_{нз})^2, \quad (1.17)$$

где коэффициент нагрузки

$$\kappa_{нз} = I / I_H. \quad (1.18)$$

1.2.4. Внешние характеристики

Изменение напряжения при нагрузке трансформатора зависит от характера нагрузки (коэффициента мощности $\cos \varphi_2$) и может быть определено приближенной формулой [1]:

$$\Delta u_{\%} \approx (u_{KA} \cos \varphi_2 + u_{KP} \sin \varphi_2) \kappa_{нз}. \quad (1.19)$$

Вид внешних характеристик показан на рис. 1.8.

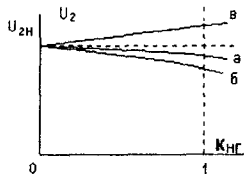


Рис. 1.8

а) активная нагрузка ($\cos \varphi_2 = 1$); б) активно-индуктивная; в) активно-емкостная нагрузка

1.2.5. КПД трансформатора

Коэффициент полезного действия (КПД) равен отношению полезной мощности P_2 к потребляемой мощности P_1

$$\eta = P_2 / P_1, \quad (1.20)$$

где $P_2 = S_H \kappa_{НГ} \cos \varphi_2$ – полезная активная мощность, (1.21)

$\cos \varphi_2$ - коэффициент мощности нагрузки,

$S_H = m U_{ФН} I_{ФН}$ - номинальная мощность трансформатора,

$P_1 = P_2 + p_0 + p_K$ – потребляемая активная мощность.

Таким образом,

$$\eta = \frac{S_H \kappa_{НГ} \cos \varphi_2}{S_H \kappa_{НГ} \cos \varphi_2 + p_0 + p_{КН} \kappa_{НГ}^2}. \quad (1.22)$$

Потери в стали p_0 называются постоянными потерями, так как они не зависят от тока нагрузки. Эти потери зависят от Φ^2 , т.е. от U^2 , и от частоты f питающей сети.

Потери в обмотках p_K (1.15) зависят от I^2 и называются переменными.

Чтобы определить оптимальное значение коэффициента нагрузки $\kappa_{НГ}$, соответствующее максимуму КПД, следует взять производную и приравнять

ее к нулю: $\frac{d\eta}{d\kappa_{НГ}} = 0$.

Отсюда получаем

$$p_0 = \kappa_{НГ}^2 p_{КН} \quad \text{и} \quad \kappa_{НГ} = \sqrt{\frac{p_0}{p_{КН}}}. \quad (1.23)$$

Условие максимума КПД трансформатора, как и электрических машин, соответствует равенству постоянных и переменных потерь.

Более подробная информация по данной теме содержится в учебном пособии [1].

Вопросы для самопроверки

1. Поясните принцип работы трансформатора.
2. Изобразите электрическую схему однофазного трансформатора.
3. Изобразите электрические схемы трехфазного трансформатора при соединении обмоток У/У - 0, У/У_n - 0, У/Д - 11.
4. Какая обмотка трансформатора называется первичной и какая - вторичной обмоткой?
5. Почему магнитопровод трансформатора выполняется шихтованным?
6. Как определяется коэффициент трансформации?
7. Напишите формулу ЭДС обмотки трансформатора.
8. Напишите уравнения напряжений для первичной и вторичной обмоток.
9. Напишите уравнения токов.
10. Для какой цели и каким образом производится приведение параметров вторичной обмотки к первичной?
11. Изобразите схему замещения трансформатора .
12. Какие параметры схемы замещения трансформатора определяются из опыта холостого хода и из опыта короткого замыкания?
13. Какие потери трансформатора определяются из опыта холостого хода и из опыта короткого замыкания?
14. Напишите формулу КПД трансформатора.
15. Как формулируются условия максимума КПД?
16. Почему при чисто активной нагрузке коэффициент мощности в первичной цепи меньше единицы?
17. Назовите примерное значение тока холостого хода.
18. Как определяется напряжение короткого замыкания? Назовите его примерное значение.
19. Как вычисляется изменение выходного напряжения трансформатора при нагрузке?
20. Изобразите внешние характеристики трансформатора для различных видов нагрузки (активная, активно-индуктивная, активно-емкостная).

Раздел 2. Асинхронные двигатели

Более подробная информация по данной теме содержится в учебном пособии [1].

В разделе рассматриваются три темы:

- Общие сведения. Исходные уравнения. Схемы замещения.
- Механические характеристики.
- Пуск. Регулирование частоты вращения. Способы торможения.

При работе с теоретическим материалом следует ответить на контрольные вопросы, приведенные в конце данного раздела.

После проработки теоретического материала раздела 2 следует обратиться к практикуму и разобрать примеры решения задач, а затем выполнить задачу №2 контрольной работы. После этого следует перейти к лабораторной работе №2, если это предусмотрено Вашим тематическим планом. При появлении затруднений следует обратиться к пособию [1].

После изучения данного раздела необходимо пройти контрольные мероприятия: ответить на вопросы теста №2 и решить экзаменационную задачу по данному разделу. Максимальное количество баллов, которые Вы можете получить по данному разделу равно 30: 10 баллов за тестирование и 20 баллов за решение экзаменационной задачи.

Введение

Асинхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы и могут работать как в режиме двигателя, так и генератора. Как правило, асинхронные машины используются в качестве двигателей (асинхронные двигатели - АД). На практике применяются преимущественно трехфазные АД, они находят применение во всех отраслях промышленности и составляют основной парк электрических машин.

Преимущество АД состоит в простоте конструкции и технологии изготовления, следовательно, сравнительно низкой стоимости, а также в высокой надежности работы.

Однофазные АД имеют ограниченное применение, они применяются в системах автоматики и бытовых устройствах.

Тема 2.1. Общие сведения. Исходные уравнения. Схемы замещения

2.1.1. Устройство

Неподвижная часть машины называется статором, подвижная часть - ротором. Сердечники статора и ротора асинхронных машин собираются (шихтуются) из отдельных листов электротехнической стали. Обмотка статора промышленных асинхронных машин выполняется трехфазной, подсоединяется

к сети трехфазного тока. Обмотка статора называется первичной обмоткой. Фазы обмотки статора могут иметь соединение "звезда" или "треугольник".

Обмотка ротора может быть выполнена трехфазной, аналогично обмотке статора. Концы фаз такой обмотки соединяются в «звезду», а начала с помощью контактных колец и металлографитных щеток выводятся наружу. Такая асинхронная машина называется машиной с фазным ротором. К контактным кольцам обычно присоединяется трехфазный пусковой или регулировочный реостат. Фазная обмотка ротора выполняется с тем же числом полюсов, как и статорная обмотка.

Другая разновидность обмотки ротора - обмотка в виде беличьей клетки. Концы стержней такой обмотки с обоих торцов соединены коротко кольцами, поэтому обмотка выводов не имеет. Такая асинхронная машина называется машиной с короткозамкнутым (к.з.) ротором. Отсутствие скользящего контакта на роторе обеспечивает высокую надежность работы такого двигателя, а простота технологии изготовления - дешевизну. По этим причинам асинхронные двигатели с к.з. ротором находят широкое применение и составляют основной парк электрических машин. Следует отметить, что обе эти конструкции асинхронного двигателя были изобретены М.О. Доливо-Добровольским в 1891 г. и сохранили по существу предложенный им вид.

2.1.2. Принцип действия

Обмотка статора при питании ее трехфазным током с частотой f_1 создает вращающийся магнитный поток Φ_1 с частотой вращения

$$n_1 = 60 f_1 / p, \quad (2.1)$$

где p - число пар полюсов обмотки статора.

Частота вращения магнитного поля n_1 называется синхронной.

Число полюсов определяется распределением обмотки по пазам, т.е. укладкой её проводников в пазы.

Ниже приводится соотношение между p и n_1 для $f_1 = 50$ Гц:

p	1	2	3	4	5	6
n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500

Вращающийся магнитный поток Φ_1 индуцирует электродвижущие силы (ЭДС) в обмотках статора и ротора. Поскольку обмотка ротора замкнута, то возникает система токов ротора I_2 и создается вращающийся поток ротора Φ_2 . Поток ротора вращается относительно статора в ту же сторону и с той частотой n_1 , что и поток статора Φ_1 и имеет то же количество полюсов, но ориентирован, согласно правилу Ленца, практически ему навстречу. В результате взаимодействия неподвижных друг относительно друга потоков статора и ротора образуется результирующий поток Φ . Взаимодействие потока Φ и тока ротора I_2 приводит к возникновению электромагнитных сил и электромагнитного момента.

В режиме двигателя под действием этого момента ротор вращается в сторону вращения магнитного поля. В режиме генератора ротор вращается с помощью приводного двигателя со скоростью $n > n_1$, при этом ЭДС обмотки статора превышает напряжение сети, и машина отдает энергию в сеть.

Частота вращения n ротора асинхронной машины всегда отлична от частоты вращения магнитного поля n_1 , которую называют синхронной. Отсюда происходит название машины - асинхронная, т.е. несинхронная, в которой $n \neq n_1$. В противном случае проводники ротора не будут пересекаться магнитными линиями вращающегося поля, в них не будет индуцироваться ЭДС, не будет возникать тока ротора и момента.

2.1.3. Скольжение

Отличие частоты вращения ротора n и магнитного поля n_1 характеризуется скольжением

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (2.2)$$

Скольжение может выражаться как в относительных единицах, так и в процентах. Частота вращения ротора

$$n = n_1(1 - s). \quad (2.3)$$

Ниже приводится связь частоты вращения ротора n и скольжения s с режимом работы машины:

Генератор	Двигатель	электродинамический тормоз
$n > n_1$	$0 < n < n_1$	$n < 0$
$-\infty < s < 0$	$0 < s < 1$	$1 < s < \infty$
$n=n_1$	$n=0$	
$s=0$	$s=1$ (режим к.з.)	

(режим идеального х.х.)

Для двигательного режима работы $0 < n < n_1$ и скольжение $0 < s \leq 1$. В начальный момент пуска АД $n=0$ (режим к.з.) и скольжение

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1.$$

При $n = n_1$ имеем $s = 0$. Этот режим невозможен для асинхронной машины согласно принципу её работы и называется режимом идеального холостого хода.

АД общего назначения в номинальном (т.е. в паспортном) режиме имеют величину номинального скольжения $s_H = 0,015 \dots 0,06$ (или 1,5...6 %). Чем крупнее АД, тем меньше номинальное скольжение.

Частота тока в обмотке статора определяется частотой f_1 напряжения сети. Частота тока в обмотке ротора f_2 зависит от скорости n_2 пересечения проводников ротора вращающимся полем

$$f_2 = \frac{p \cdot n_2}{60},$$

где $n_2 = n_1 - p = s n_1$.

Тогда

$$f_2 = \frac{p \cdot n_1}{60} s = s \cdot f_1. \quad (2.4)$$

Числовой пример.

Так, если $s = 3,3 \%$, то $f_2 = \frac{3,3}{100} \cdot 50 = 1,65$ Гц.

Обычно у нормально нагруженного АД $f_2 = 1 \dots 3$ Гц.

При неподвижном роторе $f_2 = f_1$.

2.1.4. Исходные уравнения

Физические процессы, происходящие в асинхронной машине, аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе (ТР). Отличие заключается лишь в особенностях их конструкции.

Основной магнитный поток Φ , вращаясь с частотой n_1 , индуцирует ЭДС взаимной индукции в обмотке статора E_1 и в обмотке ротора E_2 .

По аналогии с ТР формулы ЭДС можно записать в виде:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot W_1 \cdot k_{\sigma 01}; \quad (2.5)$$

$$E_{2S} = 4,44 \cdot f_2 \cdot \Phi \cdot W_2 \cdot k_{\sigma 02}, \quad (2.6)$$

где W_1, W_2 - числа последовательно соединенных витков обмоток статора и ротора.

Наличие обмоточных коэффициентов $k_{\sigma 01}, k_{\sigma 02}$ обмоток статора и ротора учитывает особенности конструкции обмоток электрических машин. Обычно величина $k_{\sigma 0} \approx 0,9 \dots 0,97$.

ЭДС взаимной индукции обмотки вращающегося ротора (2.6), с учетом формулы (2.4) для частоты f_2 , можно представить в виде

$$E_{2S} = 4,44 \cdot f_2 \cdot \Phi \cdot W_2 \cdot k_{\sigma 02} = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot W_2 \cdot k_{\sigma 02} = s \cdot E_2, \quad (2.7)$$

где $E_2 = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot W_2 \cdot k_{\sigma 02}$ - ЭДС неподвижного ротора.

Кроме ЭДС взаимной индукции в асинхронной машине, как и в ТР, существуют ЭДС самоиндукции (ЭДС рассеяния), наведенные потоками рассеяния:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_1 \cdot x_1, \quad \dot{E}_{\sigma 2S} = -j \dot{I}_2 \cdot x_{2S}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки вращающегося ротора

$$x_{2s} = \omega_2 \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2 L_2 = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_2 = s \cdot x_2, \quad (2.8)$$

где L_2 - коэффициент самоиндукции обмотки ротора,

$x_2 = 2\pi f_1 L_2$ - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки неподвижного ротора.

Полное сопротивление обмотки вращающегося ротора

$$Z_{2s} = r_2 + j \cdot x_{2s} = r_2 + j \cdot s \cdot x_2.$$

Уравнение напряжения обмотки вращающегося ротора

$$\dot{E}_{2s} = z_{2s} \cdot \dot{I}_2.$$

В преобразованном виде с учетом (2.7) и (2.8) это уравнение может быть записано в виде:

$$s \cdot \dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot r_2 + j \cdot s \cdot \dot{I}_2 \cdot x_2.$$

Разделив обе части уравнения на s , перейдем от уравнения вращающегося ротора к уравнению эквивалентного в электромагнитном отношении неподвижного ротора, в обмотке которого протекает ток частоты $f_2 = f_1$,

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot \frac{r_2}{s} + j \cdot \dot{I}_2 \cdot x_2. \quad (2.9)$$

Осуществление такого формального преобразования позволяет заменить реальный вращающийся ротор фиктивным неподвижным ротором, у которого активное сопротивление обмотки меняется в зависимости от скольжения, а величина ЭДС - постоянна. Последнее обстоятельство позволяет осуществить приведение обмотки ротора к обмотке статора аналогично тому, как это осуществляется в ТР, и анализировать процессы в АД с помощью схем замещения.

Рассмотрим формулы, позволяющие привести обмотку ротора к обмотке статора.

Отношение ЭДС при неподвижном роторе ($f_1 = f_2$) определяет коэффициент трансформации по ЭДС

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_{1\phi}}{W_{2\phi}} = k_e.$$

Для того, чтобы определить коэффициент трансформации по току k_i , следует исходить из равенства МДС с учетом числа фаз

$$m_1 I_1 W_{1\phi} = m_2 I_2 W_{2\phi},$$

где m_1 , m_2 - числа фаз обмоток статора и ротора.

Тогда

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 \cdot W_{1\phi}}{m_2 \cdot W_{2\phi}}.$$

Приведение числа витков вторичной обмотки (ротора) к числу витков первичной обмотки (статора) осуществляется аналогично ТР на основе сохранения энергетических показателей реального двигателя. При этом между фиктивными параметрами, относящимися к цепи обмотки неподвижного ротора, и реальными параметрами имеют место следующие соотношения (фиктивные параметры приведенной обмотки ротора обозначены штрихами):

$$E'_2 = k_e \cdot E_2 = E_1; \quad I'_2 = \frac{I_2}{k_i}; \quad r'_2 = k_e \cdot k_i \cdot r_2; \quad x'_2 = k_e \cdot k_i \cdot x_2; \quad z'_2 = \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2}.$$

2.1.5. Т-образная схема замещения

Для получения схемы замещения АД запишем уравнения напряжений для одной фазы обмотки статора и приведенной обмотки ротора .

Для фазы обмотки статора (аналогично первичной обмотке ТР)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j \cdot \dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1, \quad (2.10)$$

где U_1, I_1, r_1, x_1 – напряжение, ток, активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки.

Для фазы приведенной обмотки ротора ранее было получено соотношение (2.9) :

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 \cdot \frac{r'_2}{s} + j \cdot \dot{I}'_2 \cdot x'_2.$$

Уравнение токов (аналогично ТР)

$$\dot{I}_m = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2, \quad (2.11)$$

где I_m - ток намагничивания .

Уравнениям (2.9) - (2.11) соответствует схема замещения (рис.2.1).

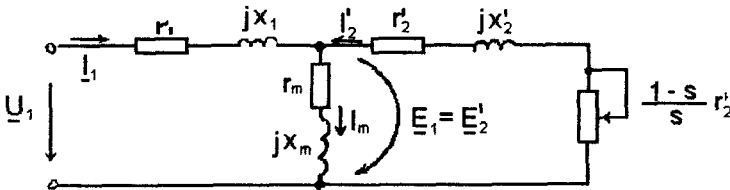


Рис. 2.1. Т-образная схема замещения

Индуктивное сопротивление x_m намагничивающего контура отражает сопротивление взаимоиндукции обмоток статора и ротора.

Сопротивление r_m намагничивающего контура введено в схему замещения искусственно для учета магнитных потерь мощности $p_{ст}$ (потерь в стали).

На схеме сопротивление $\frac{r'_2}{s}$ представлено в виде двух слагаемых:

$$\frac{r'_2}{s} = r'_2 + \frac{1-s}{s} \cdot r'_2.$$

Целесообразность такого разделения состоит в том, что схема замещения приобретает наглядный физический смысл: умножив первое слагаемое r'_2 на $I_2'^2$, получим электрические потери в обмотке ротора

$$P_{эл2} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r'_2. \quad (2.12)$$

Умножив второе слагаемое $\frac{r'_2 \cdot (1-s)}{s}$ на $I_2'^2$, получим полную механическую мощность $P_{мех}$.

Электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор от статора к ротору, согласно схеме замещения (рис.2.1), выделяется на сопротивлении $\frac{r'_2}{s}$:

$$P_{эм} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r'_2}{s}. \quad (2.13)$$

С учетом формулы потерь в обмотке ротора (2.12), электромагнитную мощность (2.13) можно представить в виде

$$P_{эм} = \frac{P_{эл2}}{s}. \quad (2.14)$$

С другой стороны

$$P_{эм} = \omega_1 \cdot M, \quad (2.15)$$

где M - электромагнитный момент, развиваемый двигателем.

Угловая частота вращения

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60} = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}. \quad (2.16)$$

Приравняв (2.13) и (2.15), с учетом (2.16) получим формулу электромагнитного момента

$$M = \frac{m_1 \cdot p \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r'_2}{s}}{2\pi \cdot f_1}. \quad (2.17)$$

Полезная мощность двигателя

$$P_2 = \omega \cdot M_2, \quad (2.18)$$

где M_2 - полезный момент на валу.

Угловая частота вращения ротора

$$\omega = 2\pi n / 60 = 0,105 n.$$

Тогда

$$P_2 = 0,105 \cdot n \cdot M_2 \quad (2.19)$$

КГД

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Для АД средней мощности ориентировочно $\eta \approx 70 \dots 90 \%$.

2.1.6. Г-образная схема замещения

Т-образная схема (рис.2.1) наглядно отражает физические процессы, происходящие в машине. Недостатком Т-образной схемы является то, что при изменении нагрузки и тока I_1 изменяется падение напряжения на сопротивлениях r_1 и x_1 и, следовательно, величина ЭДС $E_1 = E'_2$, что в ряде случаев затрудняет расчет. Более удобной в этом отношении является Г-образная схема замещения (рис.2.2), в которой параллельные ветви включены на первичное напряжение U_1 .

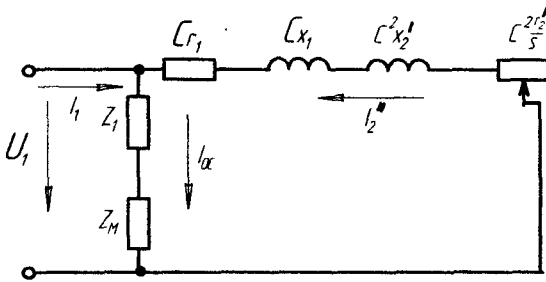


Рис.2.2. Г-образная схема замещения

При переходе от Т-образной к Г-образной схеме замещения все энергетические показатели сохраняются, благодаря введению коэффициента

$$c = 1 + \frac{Z_1}{Z_m} \approx 1 + \frac{X_1}{X_m}.$$

Обычно значение c изменяется в пределах $1,02 \dots 1,06$. Для приближенных расчетов можно принять $c = 1$.

Определим ток обмотки ротора из Г-образной схемы замещения:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{cx_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + cx_2')^2}}. \quad (2.20)$$

Тема 2.2. Механические характеристики

2.2.1. Электромагнитный момент

Вращающий электромагнитный момент АД создается в результате взаимодействия результирующего магнитного поля с током обмотки ротора. е. Подставим в формулу (2.17) электромагнитного момента формулу тока ротора (2.20) из Г-образной схемы замещения. Тогда электромагнитный момент можно представить в виде

$$M = \frac{m_1 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{cr_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + cx_2')^2}. \quad (2.21)$$

Так как значение коэффициента c изменяется в пределах 1,02...1,06, то часто при расчетах принимают $c = 1$.

Следует обратить особое внимание, что электромагнитный момент асинхронной машины пропорционален квадрату напряжения сети U_1^2 . Такая зависимость приводит к значительному уменьшению момента при уменьшении напряжения сети, что является недостатком АД.

Числовой пример.

Определить, как изменится вращающий момент АД, если напряжение сети снизилось на 10 %.

Момент двигателя уменьшится примерно на 20 % : $M = 0,9^2 M_{11} = 0,81 M_{11}$.

2.2.2. Механические характеристики

График механической характеристики $M = f(s)$ для двигательного режима работы, соответственно формуле (2.21), представлен на рис.2.3.а. В других координатах механическая характеристика $n = f(M)$ показана на рис. 2.3.б.

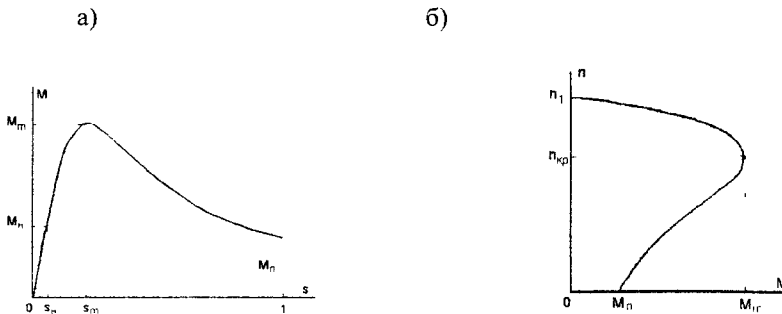


Рис 2.3 Механические характеристики АД

Режим пуска на графике механической характеристики соответствует значению $n=0$ (или $s=1$) и характеризуется начальным пусковым моментом $M_{п}$. Формулу пускового момента можно получить из (2.21) при $s=1$

$$M_{п} = \frac{m_1 p}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_1^2 \cdot r_2'}{(r_k)^2 + (x_k)^2}, \quad (2.22)$$

где $r_k = r_1 + r_2'$, $x_k = x_1 + x_2'$ - сопротивления короткого замыкания.

В среднем кратность пускового момента составляет $K_{п} = \frac{M_{п}}{M_H} = 1...2$.

Критическое скольжение s_m (его также иногда обозначают s_{cp}) соответствует максимальному моменту M_m . Диапазон изменения скольжения $s_0 \leq s \leq s_m$ является рабочим диапазоном и соответствует устойчивому участку механической характеристики (s_0 - скольжение холостого хода). Диапазон $s_m < s < 1$ нерабочий, так как работа здесь неустойчива. Обычно $s_m = 0,08...0,2$, таким образом, рабочая зона АД достаточно узкая. Асинхронный двигатель промышленного назначения имеет жесткую механическую характеристику с небольшим изменением скорости.

Для того, чтобы получить формулу критического скольжения s_m , необходимо взять производную $\frac{dM}{ds}$ и приравнять её к нулю. Решив это уравнение, получим в результате

$$s_m = \frac{cr_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + cx_2')^2}}. \quad (2.23)$$

Приближенная формула имеет вид

$$s_m = \frac{r_2'}{x_k}. \quad (2.24)$$

Подставив s_m в (2.21), получим формулу максимального момента

$$M_m = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi \cdot f_1 (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} \approx \frac{m_1 p}{4\pi \cdot f_1} \cdot \frac{U_1^2}{x_k}. \quad (2.25)$$

Обычно кратность максимального момента составляет $K_M = \frac{M_m}{M_H} = 1,8...2,8$.

Величина K_M характеризует перегрузочную способность АД.

Критическое скольжение можно определить, зная K_M и s_H :

$$s_m = s_H (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}). \quad (2.26)$$

Широкое распространение получило приближенное аналитическое выражение механической характеристики (формула Клосса)

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2}{\left(\frac{s_m}{s}\right) + \left(\frac{s}{s_m}\right)}. \quad (2.27)$$

Необходимо отметить, что формула Клосса дает хорошие результаты расчета в рабочем диапазоне механической характеристики, однако при расчете пускового момента эта формула дает большую погрешность, поэтому пусковой режим обычно определяют по паспортным данным.

Максимальный момент (2.25) не зависит от активного сопротивления r'_2 роторной цепи, однако критическое скольжение s_m прямопропорционально r'_2 , поэтому при увеличении r'_2 место расположения максимума момента сдвигается вправо, а пусковой момент увеличивается (рис.2.4).

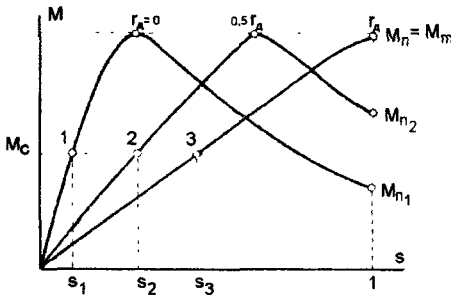


Рис.2.4. Механические характеристики АД при различных добавочных сопротивлениях r'_d в цепи ротора

Это свойство широко используется на практике для АД с фазным ротором, где есть возможность увеличить активное сопротивление цепи ротора путем подключения пускового реостата. Величину пускового реостата рассчитывают так, чтобы получить при пуске максимально возможный момент $M_n = M_m$, при этом $s_m=1$ и согласно (2.24) сопротивление пускового реостата определяется в виде

$$r'_d = x_k - r'_2. \quad (2.28)$$

Механическая характеристика при отсутствии добавочного сопротивления (кривая 1, рис.2.4) называется естественной механической характеристикой, остальные характеристики называются искусственными.

Тема 2.3. Пуск. Регулирование частоты вращения. Способы торможения

2.3.1. Пуск асинхронных двигателей

Практическое применение находят следующие способы пуска при :

- непосредственном подключении к сети (прямой пуск);
- пониженном напряжении, подаваемом на обмотку статора;
- использовании особой конфигурации стержней ротора;
- подключении к обмотке ротора пускового реостата.

Прямой пуск путем непосредственного подключения обмотки статора к сети – самый распространенный способ пуска АД с короткозамкнутым (к.з.) ротором. Недостатком данного способа пуска является значительный бросок пускового тока $I_{\Pi} = 5...7,5 I_{\Pi H}$. Обычно мощности энергетических систем достаточно велики и бросок пускового тока двигателей даже большой мощности не оказывает существенного влияния на напряжение сети. Однако при недостаточно мощной электросети пусковой ток АД может вызвать значительное уменьшение напряжения и автоматическое отключение потребителей. В этом случае для уменьшения пускового тока АД с к.з. ротором пускают при пониженном напряжении с помощью автотрансформатора или при включении в обмотку статора добавочного сопротивления (обычно реактивного). Недостатком такого пуска является значительное уменьшение пускового и максимального моментов АД, которые пропорциональны квадрату напряжения, приложенного к обмотке статора, поэтому такой пуск используют только при малой нагрузке.

Для повышения пускового момента АД применяют особую конфигурацию стержней короткозамкнутого ротора. Различают глубокопазные и двухклеточные двигатели, с двумя короткозамкнутыми обмотками: пусковой и рабочей. Увеличение пускового момента таких двигателей достигается из-за увеличения активного сопротивления обмотки ротора при пуске за счет вытеснения тока в верхнюю часть стержня (явление поверхностного эффекта).

Пуск АД с фазным ротором осуществляют при подключении к обмотке ротора пускового реостата, что позволяет уменьшить пусковой ток, увеличить пусковой момент и сократить время пуска.

2.3.2. Регулирование частоты вращения

Частота вращения АД в соответствии с формулой n_1 (2.1) имеет вид

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s).$$

Отсюда следует возможность регулирования частоты вращения тремя способами: изменением f_1 , p , и s .

Частотное регулирование является лучшим способом регулирования, однако возможно только при питании АД от отдельного синхронного

генератора с переменной частотой вращения либо от преобразователя частоты. При этом необходимо соблюдать закон регулирования (закон Костенко), который при постоянстве момента сопротивления на валу имеет вид

$$U_1 / f_1 = \text{const}$$

Регулирование частоты вращения путем изменения числа пар полюсов широко применяется в АД с к.з. ротором. При этом обмотка статора переключается с последовательного соединения секций на параллельное соединение или наоборот, что позволяет изменять число полюсов и частоту вращения в два раза. Таков принцип получения двухскоростного АД. Трех- и четырехскоростные АД имеют на статоре еще одну обмотку, что позволяет получить дополнительно два варианта полюсности двигателя.

Многоскоростные АД имеют большую стоимость, чем двигатели нормального исполнения. Кроме того, регулирование здесь осуществляется ступенчато.

Регулирование частоты вращения изменением скольжения применяется как в АД с короткозамкнутым ротором, так и в АД с фазным ротором. В АД с к.з. ротором этот способ реализуется за счет плавного снижения питающего напряжения. При этом максимальный момент $M_m \cong U_1^2$ будет понижаться, а скольжение расти (рис.2.5).

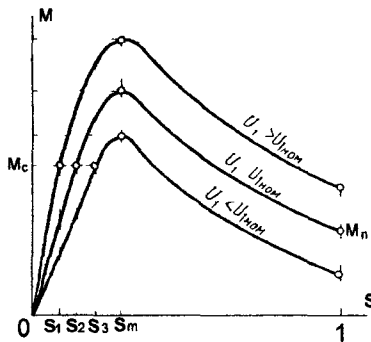


Рис 2 5 Механические характеристики АД при различных напряжениях U_1

Момент, развиваемый двигателем, всегда равен моменту нагрузки на валу $M = M_C$, поэтому уменьшение напряжения можно производить до тех пор, пока $M_m \geq M_C$. При скольжении $s > s_m$ АД теряет устойчивость. В связи с этим, регулирование возможно в узких пределах $s_n \leq s \leq s_m$. Реально для АД средней и большой мощностей, работающих с номинальной нагрузкой, удастся снизить частоту вращения n на 3...5 %. АД малой мощности, имеющие большие активные сопротивления, позволяют уменьшить частоту вращения на 40 . 50 %.

В АД с фазным ротором скольжение можно изменять включением в цепь ротора добавочного активного сопротивления. При этом скольжение может меняться в широких пределах $s_n \leq s \leq 1$, т.е. практически до полной остановки двигателя. Однако наряду с плавностью и широтой диапазона регулирования имеют место большие потери энергии в регулировочном реостате, что

существенно снижает энергетические показатели. Можно полезно использовать электрическую энергию, выделяющуюся в цепи ротора. Посредством преобразовательной установки эту энергию передают обратно в питающую сеть или к вспомогательному двигателю. Последний сообщает дополнительную механическую энергию валу основного двигателя. Такие электромеханические системы называют асинхронными каскадами и применяются в установках большой мощности.

2.3.3 Способы электрического торможения АД

Для выполнения ряда производственных процессов требуется быстрое и плавное торможение АД. Электрическое торможение, в отличие от механического, является более предпочтительным. Существует три основных способа электрического торможения: противовключение, генераторное; динамическое.

При торможении противовключением изменяют направление вращения поля путем переключения двух линейных проводов, питающих обмотку статора. Ротор при этом вращается навстречу полю со скольжением $s = \frac{n_1 + n}{n_1}$, развивая

тормозной момент. Частота вращения n уменьшается до нуля, и если АД не отключить, то он начнет вращаться в обратную сторону. Таким образом осуществляется реверс, т.е. изменение направления вращения двигателя.

При генераторном торможении частота вращения ротора n превосходит частоту вращения поля n_1 . Переход в генераторный режим АД происходит в электроприводах при изменении направления нагрузочного момента. На практике его часто используют для подтормаживания, т.е. для ограничения скорости механизма. Типичный пример – спуск груза краном, когда АД вращается согласно с направлением спуска и скорость движения груза ограничивается, поскольку в этом режиме электромагнитный момент является тормозящим. При этом происходит рекуперация, т.е. энергия отдается в сеть. Такой режим генераторного торможения широко применяется, например, для двухскоростных АД с переключением числа полюсов. Так, например, если при $p=1$ ротор имел частоту вращения $n = 3000$ об/мин, то при переключении на $p = 2$ он будет тормозиться до $n = 1500$ об/мин, возвращая энергию в сеть.

При динамическом торможении обмотку статора АД отключают от сети, а затем две фазы подключают к источнику постоянного тока. В результате появляется постоянный магнитный поток, индуцирующий в обмотке вращающегося ротора переменную ЭДС. Создается тормозной электромагнитный момент. В этом режиме АД представляет собой обращенный синхронный генератор, в котором статор создает постоянное магнитное поле, а ротор представляет собой якорь генератора.

Более подробная информация по данному разделу содержится в учебном пособии [1].

Вопросы для самопроверки

1. Поясните устройство и принцип работы асинхронного двигателя (АД).
2. Чем отличается конструкция короткозамкнутого и фазного ротора?
3. В чем заключается аналогия между асинхронной машиной и трансформатором?
4. Какими факторами определяется частота вращения АД?
5. Какую максимально возможную скорость АД можно получить при частоте сети 50 Гц ?
6. В каких пределах может изменяться скольжение АД?
7. Чему равна частота ЭДС в роторе, если частота в сети равна 50 Гц, а скольжение составляет 2 % ?
8. Как осуществить изменение направления вращения АД?
9. При каких условиях асинхронная машина работает в режиме: а) генератора; б) электромагнитного тормоза?
10. Какими факторами определяется электромагнитный момента АД?
Как зависит величина момента от напряжения сети?
11. Изобразите механическую характеристику $M = f(s)$.
12. Укажите на механической характеристике область устойчивой работы.
13. Укажите на механической характеристике режим холостого хода, номинальный режим и пусковой.
14. Как влияет величина активного сопротивления цепи ротора на пусковые свойства двигателя?
15. Как влияет активное сопротивление цепи ротора на величину максимального (критического) момента?
16. Как влияет активное сопротивление цепи ротора на величину критического скольжения?
17. Начертите искусственную механическую характеристику двигателя с фазным ротором при регулировании частоты вращения путем включения реостата в цепь ротора.
18. Какие существуют способы уменьшения пускового тока в двигателе с короткозамкнутым ротором и в двигателе с фазным ротором?
19. Перечислите возможные способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.
20. Как осуществляется изменение числа пар полюсов обмотки статора?

Раздел 3. Синхронные машины

Более подробная информация по данному разделу содержится в учебном пособии [1].

В данном разделе рассматриваются три темы:

- Общие сведения. Теория двух реакций.
- Характеристики синхронных машин.
- Параллельная работа с сетью.

При работе с теоретическим материалом следует ответить на контрольные вопросы, приведенные в конце раздела, после этого следует обратиться к практикуму и разобрать примеры решения задач.

После изучения данного раздела необходимо ответить на вопросы теста №3. Максимальное количество баллов, которые Вы можете получить по данному разделу, составляет 10 баллов за тестирование. Экзаменационная задача по данному разделу не предусмотрена, однако при желании Вы можете попытаться решить такую задачу и увеличить количество баллов на 20 (до 30).

Введение

Синхронные машины характеризуются постоянной (синхронной) частотой вращения ротора, величина которой зависит от частоты питающей сети и конструкции ротора. Синхронные машины применяются как в качестве генераторов, так и в качестве двигателей.

Практически всю электроэнергию вырабатывают синхронные генераторы электростанций. Единичная мощность синхронного генератора может составить миллион киловатт и более.

Синхронные промышленные двигатели обычно применяются в установках большой мощности (турбомоторы). Синхронные двигатели малой мощности находят применение в устройствах автоматики и приборной техники.

Тема 3.1. Общие сведения. Теория двух реакций

3.1.1. Устройство и принцип работы

Статор синхронной машины (СМ) называется якорем. На статоре расположена трехфазная обмотка, равномерно распределенная по пазам (обмотка якоря). Число полюсов обмотки статора равно числу полюсов ротора.

Ротор СМ называется индуктором и имеет обмотку возбуждения (ОВ), питаемую постоянным током. Токоподвод осуществляется через два контактных кольца и щетки. Машины малой мощности могут иметь возбуждение от постоянных магнитов. По конструкции ротора различают

явнополюсные и неявнополюсные СМ (рис.3.1).

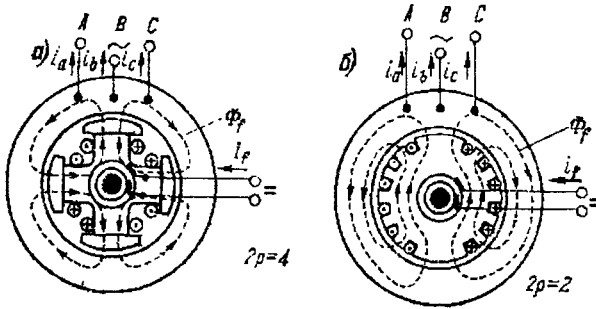


Рис.3.1. Принцип устройства явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) СМ

В неявнополюсной конструкции примерно одна треть полюсного деления ротора свободна от пазов и представляет собой, так называемый, большой зуб. Такая конструкция обеспечивает высокую механическую прочность ротора и используется в двухполюсных машинах, имеющих высокую частоту вращения ротора (турбогенераторы и мощные синхронные двигатели - турбомоторы).

В режиме генератора необходимо ротор привести во вращение со скоростью n и возбудить его, тогда поток возбуждения Φ будет пересекать проводники обмотки якоря и индуцировать в них ЭДС с частотой

$$f = p \cdot n / 60, \quad (3.1)$$

где p - число пар полюсов.

При $f = 50$ Гц частота вращения n должна соответствовать p :

p	1	2	3	4	5	6
n , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500

Таким образом, чем больше p , тем меньше частота вращения n .

Синхронная машина может работать и в качестве двигателя, если подвести к обмотке статора трехфазный ток. В этом случае в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора поле статора увлекает за собой ротор. При этом ротор вращается в ту же сторону и с той же скоростью, что и поле статора. Пуск синхронных двигателей производится за счет асинхронного момента. Для этого в полюсных наконечниках размещаются стержни пусковой обмотки [1].

3.1.2. Магнитные поля и основные параметры

3.1.2.1. Магнитное поле и параметры обмотки возбуждения

На рис. 3.2 показана картина магнитного поля обмотки возбуждения в воздушном зазоре явнополюсной СМ [1]. Распределение магнитной

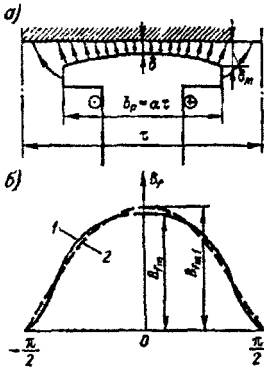


Рис.3.2

Магнитодвижущая сила (МДС) обмотки возбуждения на один полюс

$$F_f = W_f \cdot i_f / 2p, \quad (3.3)$$

где W_f - число витков и i_f - ток обмотки возбуждения.

Амплитуда основной гармоники поля возбуждения

$$B_{fm1} = k_f \cdot B_{fm} = \frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot F_f \cdot k_f = \frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_d \cdot \delta} \cdot \frac{W_f \cdot i_f}{2p} \cdot k_f, \quad (3.4)$$

где $k_{\mu d}$ - коэффициент насыщения магнитной цепи по продольной оси, т.е. по оси полюсов.

Поток основной гармоники поля возбуждения

$$\Phi_{f1} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{fm1} \cdot \tau \cdot l_{\delta} = \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta}}{\pi \cdot k_{\mu \delta} \cdot \delta} \cdot \frac{W_f \cdot i_f}{p} \cdot k_f, \quad (3.5)$$

где l_{δ} - длина воздушного зазора, полюсное деление

$$\tau = \pi D / 2p. \quad (3.6)$$

Потокосцепление основной гармоники поля возбуждения с фазой обмотки якоря, когда ось фазы совпадает с осью полюсов

$$\Psi_{fad} = W \cdot k_{\text{об}} \cdot \Phi_{f1} = M_{fad} \cdot i_f. \quad (3.7)$$

При вращении ротора с электрической угловой скоростью

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f \quad (3.8)$$

потокосцепление с фазой обмотки якоря изменяется по закону

$$\Psi_{fad} = \Psi_{fad} \cdot \cos \omega t = M_{fad} \cdot i_f \cdot \cos \omega t. \quad (3.9)$$

При этом в якоре индуцируется ЭДС

$$e = -\frac{d\Psi_{fad}}{dt} = \omega_1 \cdot M_{fad} \cdot i_f \cdot \sin \omega t = x_{fad} \cdot i_f \cdot \sin \omega t, \quad (3.10)$$

индукции поля возбуждения B_f показано кривой 1, а основной гармоники B_{f1} - кривой 2. Отношение амплитуды B_{fm1} основной гармоники поля возбуждения к реальному максимальному значению этого поля B_{fm}

$$k_f = \frac{B_{fm1}}{B_{fm}} \quad (3.2)$$

называется коэффициентом формы кривой поля возбуждения. Значения k_f зависят от геометрии машины и даются в учебниках.

где $x_{fad} = \omega_1 \cdot M_{fad}$ -сопротивление взаимной индукции обмотки возбуждения с обмоткой якоря.

Амплитуду M_{fad} взаимной индуктивности обмоток возбуждения и якоря можно определить с помощью х.х.х. $E = f(i_f)$ по формуле

$$M_{fad} = \frac{x_{fad}}{\omega_1} = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{\omega_1 \cdot i_f}. \quad (3.11)$$

Для неявнополюсной машины кривая распределения индукции поля возбуждения имеет вид трапеции. В этом случае коэффициент формы поля может быть рассчитан аналитически [1] в виде

$$k_f = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma \cdot \frac{\pi}{2}}{\gamma \cdot \frac{\pi}{2}}. \quad (3.12)$$

Величина γ представляет собой отношение обмотанной части ротора ко всей окружности ротора .

3.1.2.2. Магнитное поле и параметры обмотки якоря

При нагрузке обмотки якоря током она создает собственное магнитное поле, взаимодействие которого с полем возбуждения называется реакцией якоря. Реакция якоря оказывает весьма значительное влияние на характеристики СМ.

Индуктор (ротор) явнополюсной машины имеет магнитную несимметрию, так как магнитное сопротивление потока, действующему по поперечной оси q , т.е. по оси междуполюсного пространства, значительно больше магнитного сопротивления потоку по продольной оси d (оси полюсов). Поэтому одинаковая по величине МДС якоря при её действии по продольной оси создает больший магнитный поток, чем по поперечной. Кроме того, ротор как явнополюсной, так и неявнополюсной машины имеет электрическую несимметрию, так обмотка возбуждения расположена по продольной оси d , т.е. создает поток, действующий по оси d и сцепляется только с потоком якоря, действующим по этой оси. Электрическая несимметрия ротора существенным образом проявляется при несимметричных и переходных режимах работы.

Ввиду несимметричного устройства индуктора действие реакции якоря рассматривают по продольной и поперечной осям в отдельности. Метод такого рассмотрения впервые был предложен французским электротехником А.Блонделем в 1895 г. и называется методом или теорией двух реакций. Этот метод основан на принципе наложения в предположении, что магнитные потоки, действующие по двум осям не влияют друг на друга, хотя из-за насыщения магнитной цепи это не совсем так.

Рассмотрим действие реакции якоря СМ на примере трехфазного двухполюсного генератора (рис.3.3). Предположим, что угол сдвига фаз ϕ между током якоря \dot{I} и ЭДС \dot{E} , индуцируемой в обмотке якоря полем

возбуждения, равен нулю (рис.3.3,а), а величина ЭДС фазы А максимальна. Так как $\phi=0$, то ток фазы А тоже максимальный. Направления ЭДС и токов можно определить по правилу правой руки. При этом магнитный поток Φ_a обмотки якоря направлен поперек оси полюсов. Следовательно, при $\phi=0$ поле реакции якоря является чисто поперечным и вызывает искажение поля возбуждения и кроме того, индуцирует ЭДС в обмотке якоря.

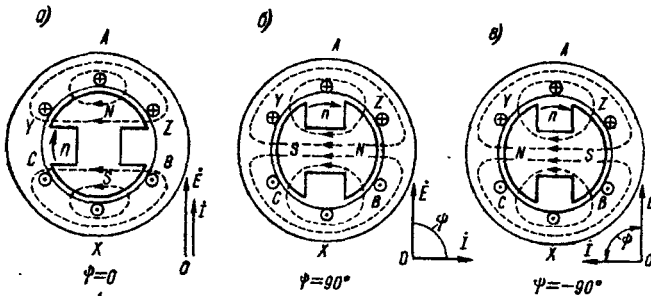


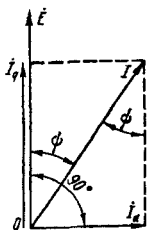
Рис. 3.3. Поперечная (а), продольная размагничивающая (б) и продольная намагничивающая (в) реакции якоря СМ

Если ток \dot{I} отстает от ЭДС \dot{E} на $\phi = 90^\circ$, то максимум тока отстает от ЭДС на четверть периода, когда ротор повернется на 90° . При этом реакция якоря действует по продольной оси и является по отношению к полю возбуждения чисто размагничивающей (продольная размагничивающая реакция якоря).

Если ток опережает ЭДС на $\phi = -90^\circ$, то максимум тока наступает на четверть периода раньше, чем максимум ЭДС. При опережающем токе поле якоря также действует по продольной оси, но является по отношению к полю возбуждения чисто намагничивающей, т.е. она увеличивает поток возбуждения (продольная намагничивающая реакция якоря).

В общем случае, когда $0 < \phi < 90^\circ$, ток \dot{I} можно разложить на две составляющие (рис.3.4):

$$I_d = I \cdot \sin \phi, \quad I_q = I \cdot \cos \phi, \quad (3.13)$$



первая из которых называется продольной составляющей тока якоря (продольным током) и создает продольную реакцию якоря, а вторая - поперечной составляющей тока (поперечным током) и создает поперечную реакцию якоря. Угол ϕ считается положительным, когда \dot{I} отстает от \dot{E} .

Рис. 3.4. Разложение тока якоря I на продольную I_d и поперечную I_q составляющие

Амплитуды основной гармоники продольной и поперечной МДС реакции

якоря [1]

$$F_{ad} = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{ob}}{p} \cdot I_d; \quad F_{aq} = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{ob}}{p} \cdot I_q. \quad (3.14)$$

можно рассматривать как составляющие полной МДС якоря по осям d и q

$$F_a = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{ob}}{p} \cdot I. \quad (3.15)$$

Тогда

$$F_{ad} = F_a \sin \varphi; \quad F_{aq} = F_a \cos \varphi. \quad (3.16)$$

Максимумы волн МДС F_{ad} совпадают с продольной осью, а F_{aq} с поперечной (рис.3.5, кривые 1). Если бы величина зазора δ была по всей окружности одинакова, то МДС F_{ad} и F_{aq} создали синусоидальные волны магнитного поля (рис.3.5, кривые 2) с амплитудами

$$B_{adm} = \frac{\mu_0}{k_{\mu d} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot F_{ad}; \quad B_{aqm} = \frac{\mu_0}{k_{\mu q} \cdot k_{\delta} \cdot \delta} \cdot F_{aq}. \quad (3.17)$$

Вследствие неравномерности воздушного зазора действительные кривые индукции 3 не будут синусоидальными. Кривая 4 показывает основные гармоники поля продольной и поперечной реакции якоря с амплитудами B_{adm1} и B_{aqm1} . Отношения

$$k_{ad} = \frac{B_{adm1}}{B_{adm}}; \quad k_{aq} = \frac{B_{aqm1}}{B_{aqm}} \quad (3.18)$$

меньше единицы, причем $k_{aq} < k_{ad}$. Величины k_{ad} и k_{aq} называются коэффициентами формы поля продольной и поперечной реакции якоря.

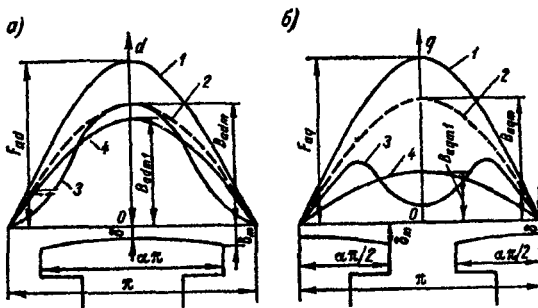


Рис.3.5. Кривые поля реакции якоря явнополюсной синхронной машины по продольной (а) и поперечной (б) осям

Зависимости k_{ad} , k_{aq} даются в учебниках. Для неявнополюсной машины вследствие равномерности зазора $k_{ad} = k_{aq} = 1$.

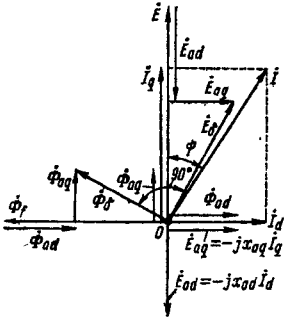
Основные гармоники полей продольной и поперечной реакции якоря создают потоки реакции якоря

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{adm1} \cdot \tau \cdot l_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot k_{ad} \cdot B_{adm} \cdot \tau \cdot l_{\delta}; \quad \Phi_{aq} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{aqm1} \cdot \tau \cdot l_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot k_{aq} \cdot B_{aqm} \cdot \tau \cdot l_{\delta}.$$

Потоки Φ_{ad} и Φ_{aq} индуцируют в обмотке якоря ЭДС самоиндукции

$$E_{ad} = \pi\sqrt{2}f_1W \cdot k_{об} \cdot \Phi_{ad}, \quad E_{aq} = \pi\sqrt{2}f_1W \cdot k_{об} \cdot \Phi_{aq},$$

которые называются ЭДС продольной и поперечной реакции якоря.



На рис. 3.6 [1] представлена векторная диаграмма токов, потоков и ЭДС реакции якоря синхронного генератора при смешанной активной-индуктивной нагрузке, которая обычно встречается на практике. Здесь E – ЭДС, индуцируемая в якоря потоком возбуждения. Потоки совпадают по фазе с создающими их токами, а ЭДС отстают от потоков на 90° .

Рис.3.6. Векторные диаграммы потоков и ЭДС реакции якоря

Результирующий поток основной гармоника поля в воздушном зазоре

$$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_j + \dot{\Phi}_{ad} + \dot{\Phi}_{aq}. \quad (3.19)$$

Этот поток индуцирует в обмотке якоря результирующую ЭДС от основной гармоника результирующего поля в зазоре

$$\dot{E}_\delta = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}, \quad (3.20)$$

$$\text{где } \dot{E}_{ad} = -jx_{ad} \cdot I_d \text{ и } \dot{E}_{aq} = -jx_{aq} \cdot I_q. \quad (3.21)$$

3.1.2.3. Индуктивные сопротивления

Индуктивные сопротивления обмотки якоря x_{ad} и x_{aq} называются соответственно индуктивными сопротивлениями продольной и поперечной реакции якоря. С учетом ранее полученных формул, имеем

$$x_{ad} = 4mf_1 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu d} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{W^2 \cdot k_{об}^2}{p} \cdot k_{ad},$$

$$x_{aq} = 4mf_1 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu q} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{W^2 \cdot k_{об}^2}{p} \cdot k_{aq}. \quad (3.22)$$

В относительных единицах получим

$$x_{ad}^* = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu d} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{A_H}{B_{\delta H}} \cdot k_{ad}, \quad x_{aq}^* = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot k_{\mu q} \cdot k_\delta \cdot \delta} \cdot \frac{A_H}{B_{\delta H}} \cdot k_{aq}. \quad (3.23)$$

Для неявнополюсной синхронной машины

$$x_{ad} = x_{aq}. \quad (3.24)$$

Из этих двух обозначений сохраним x_{ad} .

Чем меньше x_{ad} и x_{aq} , тем выше запас статической устойчивости СМ. Для ограничения влияния реакции якоря значения x_{ad} и x_{aq} не должны превосходить определенных пределов. Поэтому величину зазора δ в СМ приходится увеличивать. Это требует усиления обмотки возбуждения, что увеличивает расход обмоточного провода и потери. Рост габаритов обмотки возбуждения может привести к увеличению габаритов всей машины. Поэтому уменьшение x_{ad} и x_{aq} ведет к удорожанию машины.

Стремление к увеличению мощности машин при заданных габаритах привело к применению более интенсивных способов охлаждения (внутреннее водородное и водяное охлаждение обмоток).

МДС обмотки якоря, кроме основной гармоник, содержит также высшие гармоники, что учитывается индуктивным сопротивлением дифференциального рассеяния. Существует также пазовое и лобовое рассеяние якоря. Можно считать, что индуктивное рассеяние $x_{\sigma a}$ одинаково для обеих осей.

Активное сопротивление фазы обмотки якоря относительно мало (на порядок меньше, чем $x_{\sigma a}$), поэтому его обычно не учитывают.

Полную ЭДС рассеяния можно разложить на составляющие

$$E_{\sigma ad} = E_{\sigma a} \sin\phi = x_{\sigma a} I \sin\phi = x_{\sigma a} I_d; \quad E_{\sigma aq} = E_{\sigma a} \cos\phi = x_{\sigma a} I \cos\phi = x_{\sigma a} I_q.$$

Так как ЭДС $E_{\sigma ad}$ и E_{ad} совпадают по фазе, то их можно сложить арифметически. Аналогично, для ЭДС $E_{\sigma aq}$ и E_{aq} :

$$\begin{aligned} E_d &= E_{ad} + E_{\sigma ad} = x_{ad} I_d + x_{\sigma a} I_d = x_d I_d; \\ E_q &= E_{aq} + E_{\sigma aq} = x_{aq} I_q + x_{\sigma a} I_q = x_q I_q, \end{aligned} \quad (3.25)$$

где синхронные сопротивления по продольной оси и по поперечной оси

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma a}, \quad x_q = x_{aq} + x_{\sigma a}. \quad (3.26)$$

3.1.2.4. Приведение электромагнитных величин обмоток.

Относительные единицы

Иногда возникает необходимость определения потоков и ЭДС, создаваемых совместным действием обмоток (возбуждения и якоря).

Необходимо найти ток или МДС возбуждения, эквивалентные данному току или МДС якоря, иначе говоря, привести ток или МДС якоря к обмотке возбуждения. Величины якоря, приведенные к обмотке возбуждения, будем обозначать дополнительно штрихами. Приведенная к обмотке возбуждения продольная и поперечная МДС якоря

$$F'_{ad} = k_d \cdot F_{ad}, \quad F'_{aq} = k_q \cdot F_{aq}, \quad (3.27)$$

где коэффициенты реакции якоря

$$k_d = \frac{k_{ad}}{k_f} \quad \text{и} \quad k_q = \frac{k_{aq}}{k_f}. \quad (3.28)$$

Вместо приведенных МДС можно рассматривать также токи якоря:

$$I'_d = k_{ad} \cdot I_d, \quad I'_q = k_{aq} \cdot I_q, \quad (3.29)$$

где коэффициенты приведения

$$k_{ad} = \frac{m \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{об}}{W_f} \cdot k_d, \quad k_{aq} = \frac{m \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W \cdot k_{об}}{W_f} \cdot k_q. \quad (3.30)$$

Для неявнополюсных машин

$$k_d = k_q = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\gamma \cdot \frac{\pi}{2}}{\sin \frac{\gamma \cdot \pi}{2}}; \quad (3.31)$$

$$F'_a = k_d \cdot F_a; \quad I' = k_{ad} \cdot I. \quad (3.32)$$

Иногда целесообразно привести обмотку возбуждения к обмотке якоря.

Реальная обмотка возбуждения с током i_f и приведенная обмотка с током i'_f должны создавать одинаковое поле основной гармонике в воздушном зазоре, поэтому

$$\frac{\mu_0}{k_g k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{w_f}{2p} i_f k_f = \frac{\mu_0}{k_0 k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{wk_{об}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i'_f}{\sqrt{2}} \cdot k_{ad}.$$

Откуда

$$i'_f = i_f / k_i,$$

где коэффициент приведения тока возбуждения отличается от k_{ad} на $\sqrt{2}$:

$$k_i = \frac{2m}{\pi} \cdot \frac{wk_{об}}{w_f} k_d. \quad (3.33)$$

В теории электрических машин широко пользуются относительными единицами. При этом за единицы или базисные величины, принимают номинальные фазные значения:

$$U_H, I_H, z_H = \frac{U_H}{I_H}, \quad L_H = \frac{z_H}{\omega_1} = \frac{z_1}{2\pi \cdot f}. \quad (3.34)$$

Относительные значения:

$$U_* = \frac{U}{U_H}, \quad I_* = \frac{I}{I_H},$$

$$r_* = \frac{r}{z_H}, \quad x_* = \frac{x}{z_H}, \quad z_* = \frac{z}{z_H}, \quad L_* = \frac{L}{L_H} = \frac{\omega_1 \cdot L}{z_H} = \frac{x}{z_H}. \quad (3.35)$$

Тема 3.2. Характеристики синхронных машин

3.2.1. Основные виды векторных диаграмм синхронных генераторов

Напряжение фазы обмотки равно сумме индуцируемых в ней ЭДС минус падение напряжения в активном сопротивлении фазы:

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I}. \quad (3.36)$$

ЭДС реакции якоря и рассеяния можно выразить через соответствующие токи и индуктивные сопротивления:

$$\dot{E}_{ad} = -jx_{ad}\dot{I}_d, \quad \dot{E}_{aq} = -jx_{aq}\dot{I}_q, \quad \dot{E}_{\sigma a} = -jx_{\sigma a}\dot{I}.$$

Тогда

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_{ad}\dot{I}_d - jx_{aq}\dot{I}_q - jx_{\sigma a}\dot{I} - r_a\dot{I} = \dot{E}_\delta - jx_{\sigma a}\dot{I} - r_a\dot{I}. \quad (3.37)$$

Уравнению напряжения (3.37) соответствуют векторные диаграммы Blondеля при активно-индуктивной нагрузке, наиболее часто встречающейся на практике (рис.3.7).

Угол Θ между векторами \dot{E} и \dot{U} называется углом нагрузки. В режиме генератора ЭДС \dot{E} опережает \dot{U} и угол Θ считается положительным.

Кроме рассмотренных диаграмм Blondеля (рис.3.7), пользуются видоизмененными диаграммами (рис.3.8), исходя из (3.25) и (3.26). Тогда

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_d\dot{I}_d - jx_q\dot{I}_q - r_a\dot{I} \quad (3.38)$$

$$\text{или } \dot{E} = \dot{U} + r_a\dot{I}_a + jx_q\dot{I}_q + jx_d\dot{I}_d. \quad (3.39)$$

Проведем из точки А диаграммы (рис.3.7 и 3.8) отрезки перпендикулярно вектору \dot{I} до пересечения в точке Q с вектором \dot{E} . Из прямоугольного треугольника AQB определим длины этих отрезков, где угол QAB равен Ψ . Для рис.3.7

$$AQ = \frac{AB}{\cos \varphi} = \frac{x_{aq}I_q}{\cos \varphi} = \frac{x_{aq}I \cos \varphi}{\cos \varphi} = x_{aq}I, \quad (3.40)$$

для рис.3.8

$$AQ = \frac{AB}{\cos \varphi} = \frac{x_q I_q}{\cos \varphi} = x_q I. \quad (3.41)$$

Иногда этими соотношениями удобно пользоваться, чтобы по величине отрезка AQ определить направление вектора \dot{E} и угол Ψ .

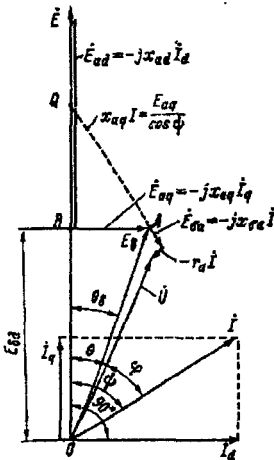


Рис.3.7. Первый вид векторных диаграмм напряжений явнополюсного синхронного генератора

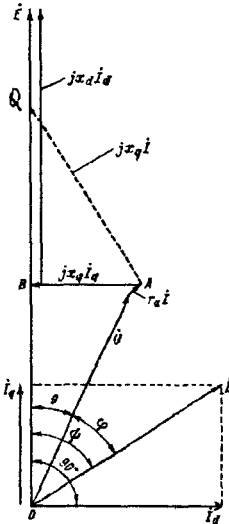


Рис. 3.8. Второй вид векторной диаграммы синхронного генератора

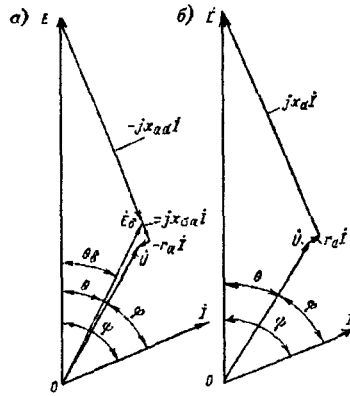


Рис. 3.9. Векторные диаграммы напряжений неявнополюсного синхронного генератора

Для неявнополюсной машины векторные диаграммы представлены на рис.3.9.

3.2.2. Характеристики синхронного генератора

Особый интерес представляют зависимости между напряжением якоря U , током якоря I и током i_f при постоянной частоте сети f и частоте вращения n_n . Схема для снятия характеристик с помощью нагрузочных сопротивлений дана на рис.3.10.

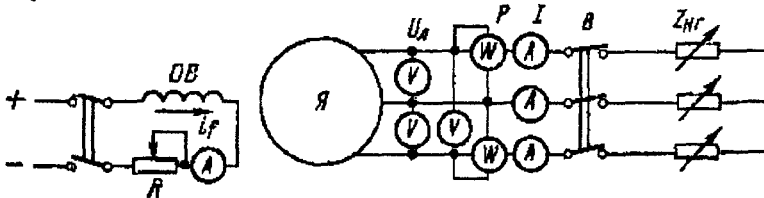
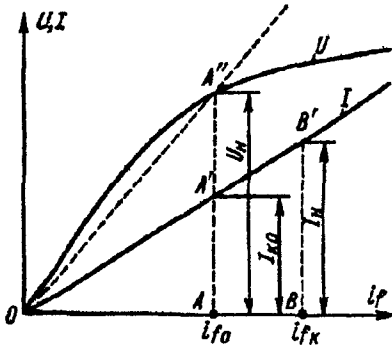


Рис. 3.10. Схема для опытного определения характеристик синхронного генератора

Характеристики явнополюсных и неявнополюсных генераторов в основном одинаковы. Все характеристики целесообразно строить в относительных единицах.

Характеристика холостого хода (х.х.х.) $U = f(i_f), I = 0$.

Ниже дана нормальная характеристика холостого хода, которая может быть принята единой для всех синхронных генераторов:



E^*	0,58	1,0	1,21	1,33	1,44
F_f	0,50	1,0	1,50	2,00	2,50

Х.х.х. $U = f(i_f)$ в относительных единицах представлена на рис. 3.11.

Рис. 3.11. Характеристики холостого хода и короткого замыкания

Касательная к х.х.х. будет соответствовать ненасыщенной магнитной цепи. Прямая OA' , проведенная через начало координат и рабочую точку, соответствует некоторому среднему насыщению магнитной цепи.

Характеристика короткого замыкания $I = f(i_f)$ при $U = 0$.

Характеристика короткого замыкания (х.к.з.) снимается при замыкании всех фаз обмотки якоря накоротко. Так как активное сопротивление r_a обмотки якоря незначительно, то практически сопротивление цепи якоря в режиме к.з. будет чисто индуктивным, поэтому $I = I_d, I_q = 0, \Psi = 90^\circ, \dot{E} = jx_d \dot{I}$.

В режиме к.з. реакция якоря является чисто размагничивающей.

ЭДС от результирующего потока Φ_δ воздушного зазора

$$E\delta = E - x_{ad}I = x_{ad}I$$

весьма мала, вследствие чего поток Φ_δ мал. Поэтому при к.з. магнитная цепь ненасыщена и х.к.з. $I = f(i_f)$ прямолинейна (рис.3.11).

Опытное определение x_d . Х.х.х. и х.к.з. позволяют определить значение продольного синхронного сопротивления $x_d = \frac{E}{I}$. Особый интерес

представляет значение ненасыщенного сопротивления $x_{d\infty}$, которое определяется по спрямленной х.х.х.

Отношение короткого замыкания. Отношением короткого замыкания (о.к.з.) $k_{о.к.з}$ называется отношение установившегося тока короткого замыкания $I_{к0}$ при токе возбуждения, который при холостом ходе и $p = p_H$ дает $E = U_H$, к номинальному току якоря I_H

$$k_{о.к.з} = \frac{I_{к0}}{I_H}. \quad (3.42)$$

В соответствии с рис. 3.11 и изложенным выше $I_{K0} = \frac{U_H}{x_d}$,

где x_d - насыщенное значение продольного синхронного сопротивления, соответствующее $E_\delta = U_H$. На основании этих выражений

$$k_{окз} = \frac{U_H}{x_d I_H} = \frac{I}{x_{d*}} = \frac{k_{уд}}{x_{до*}},$$

т.е. о.к.з. равно обратному значению x_{d*} .

У многих машин $x_{d*} > 1$, и тогда $k_{окз} < 1$, т.е. при этом установившийся ток короткого замыкания меньше номинального, что объясняется сильной размагничивающей реакцией якоря.

Если i_{f0} и i_{fK} - соответственно токи возбуждения на холостом ходу, когда $U = U_H$, и при установившемся коротком замыкании, когда $I = I_H$, то на основании подобия треугольников ОАА' и ОВВ' (рис.3.11)

$$k_{окз} = \frac{f_{r0}}{i_{fK}}. \quad (3.43)$$

Величина о.к.з., как и величина x_d , определяет предельную величину нагрузки, которую способен нести генератор при установившемся режиме работы, причем, чем больше о.к.з., тем больше предельная нагрузка.

У гидрогенераторов обычно $k_{окз} = 0,8 \dots 1,8$, а у турбогенераторов $k_{окз} = 0,4 \dots 1,0$. Величина о.к.з. тем больше, чем больше величина зазора δ между статором и ротором. Поэтому машины с большим о.к.з. дороже.

Внешняя характеристика $U = f(I)$ при $i_f = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.

Внешняя характеристика показывает как изменяется напряжение U при изменении нагрузки и неизменном токе возбуждения.

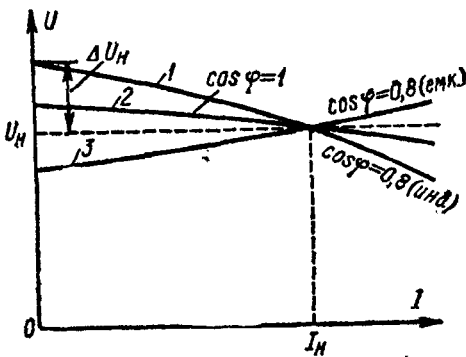


Рис.3.12. Внешние характеристики синхронного генератора

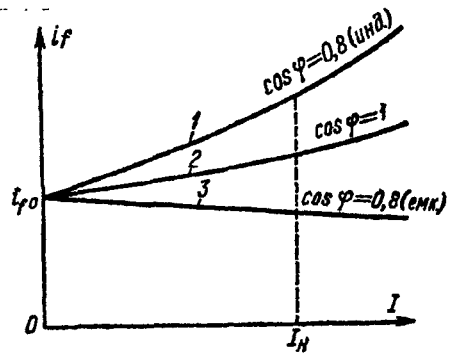


Рис.3.13. Регулировочные характеристики синхронного генератора

Вид внешней характеристики (рис.3.12) определяется характером нагрузки и действием реакции якоря. Следует отметить, что значение i_f для характеристик рис.3.12 различно, наибольшее i_f соответствует характеристике 1.

Величина i_f при номинальной нагрузке называется номинальным током возбуждения.

Номинальное изменение напряжения синхронного генератора ΔU_H - это изменение напряжения на зажимах генератора при изменении нагрузки от номинального значения до нуля и при неизменном токе возбуждения. Синхронные генераторы обычно рассчитываются для работы с номинальной активно-индуктивной нагрузкой (при отстающем токе) и $\cos \varphi = 0,8$, при этом $\Delta U_H = 25 \dots 35 \%$.

Регулировочная характеристика $i_f = f(I)$ при $U = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$.

Регулировочная характеристика показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение оставалось неизменным. Вид регулировочных характеристик (рис.3.13) зависит от влияния тока якоря, т. е. от характера нагрузки. При номинальной нагрузке и $\cos \varphi = 0,8$ увеличение тока возбуждения по сравнению с режимом х.х. составляет 1,7...2,2 раза.

Нагрузочная характеристика. Наибольший интерес представляет чисто индуктивная нагрузка (индукционная нагрузочная характеристика) при номинальном токе (рис. 3.14). В данном случае существует чисто продольная размагничивающая реакция якоря. Поэтому индукционная характеристика (кривая 2) идет ниже х.х.х. (кривая 1). Точка А соответствует режиму к.з. ($I = I_H$ и $U = 0$).

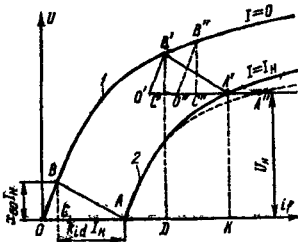


Рис.3.14. Индукционная нагрузочная характеристика и реактивный треугольник синхронного генератора

Треугольник Потье. Треугольником Потье (реактивным треугольником) называется ΔABC (рис.3.14). Вертикальный катет BC равен падению напряжения в сопротивлении рассеяния якоря $k_{sd} I_H$, а горизонтальный катет AC равен МДС обмотки якоря $k_{ad} I_H$ в масштабе тока возбуждения.

Реактивный треугольник ABC можно построить, если известны:

- ток возбуждения $i_{jk} = OA$ в режиме к.з. и $I = I_H$,
- сопротивление $x_{\sigma\sigma}$,
- начальная прямолинейная часть х.х.х.

Составляющая ОС тока возбуждения OA при к.з. индуцирует ЭДС

$$E_{\sigma\sigma} = x_{\sigma\sigma} I_H,$$

а другая составляющая этого тока CA компенсирует размагничивающее действие МДС обмотки якоря

$$CA = k_{ad} I_H.$$

Индукционную характеристику 2 (рис.3.14) можно построить с помощью х.х.х. (кривая 1) и реактивного ΔABC , передвигая его так, чтобы вершина B скользила по х.х.х.

Если $x_{\sigma\sigma}$ и k_{ad} неизвестны, то ΔABC можно построить с помощью характеристик 1 и 2. Отложив из некоторой точки A характеристики 2 отрезок $A'O' = OA$, проводим линию $O'B'$ параллельно OB и находим точку пересечения B' с кривой 1. Отрезок $B'C'$ дает значение

$$x_{\sigma\sigma} = \frac{B'C'}{I_H},$$

а отрезок $C'A'$ - величину МДС реакции якоря.

Индуктивное сопротивление Потье. Опытная индукционная характеристика в действительности отклоняется вправо от характеристики, построенной с помощью х.х.х. и реактивного треугольника (штриховая кривая рис. 3.14). Причина заключается в том, что хотя для точки B х.х.х. и точки A' индукционной характеристики величины ЭДС E_δ и потока Φ_δ одинаковы, соответствующие токи возбуждения OD и OK различны. Так как $OK > OD$, то в режиме индукционной характеристики поток рассеяния обмотки возбуждения больше, что вызывает увеличение насыщения полюсов и ярма индуктора. Если произвести построение реактивного треугольника от точки A'' , то получим отрезок $C''B'' > C'B'$.

Поэтому вместо $x_{\sigma\sigma}$ получим сопротивление

$$x_p = \frac{C''B''}{I_H},$$

которое называется индуктивным сопротивлением Потье или расчетным индуктивным сопротивлением рассеяния обмотки якоря.

3.2.3. Диаграмма Потье

Для неявнополюсных генераторов пользуются диаграммой Потье (рис.3.15), которая строится следующим образом.

При заданных U , I , $\cos\phi$ стоят векторы \dot{U} и \dot{I} и к вектору \dot{U} прибавляют векторы падений напряжения $r_a \dot{I}$ и $jx_{\sigma\sigma} \dot{I}$. При этом получают ЭДС \dot{E}_δ ,

которая индуцируется результирующим потоком зазора $\dot{\Phi}_\delta$ и определяет поэтому степень насыщения магнитной цепи в данном режиме работы.

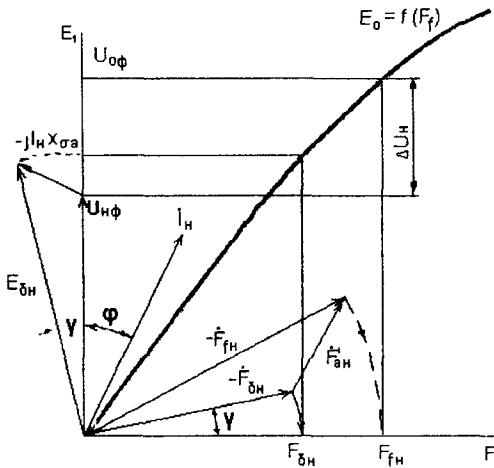


Рис. 3.15. Диаграмма Потье

При практическом пользовании диаграммой Потье её совмещают с х.х.х. При этом вектор \dot{U} направляют по оси ординат, величину \dot{E}_δ сносят на эту же ось, затем на х.х.х., в результате чего находят ток i_{fc} .

К этому току под углом $(90^\circ + \varphi + \delta)$ прибавляют $\dot{I}' = k_d \dot{I}$, в результате чего находят ток i_f . Если ток i_f снести на ось абсцисс, то по х.х.х. можно найти напряжение U_0 , которое получится после сброса нагрузки при неизменной величине i_f , а также изменение напряжения ΔU . Активным сопротивлением r_a обычно пренебрегают.

Диаграмма (рис.3.15) построена в относительных единицах для номинальной нагрузки $U_* = 1, I_* = 1, \cos\varphi = 0,8$ (инд.), причем использована нормальная х.х.х. турбогенератора и принято, что $r_a = 0$.

В диаграмме Потье МДС реакции якоря не раскладывается на составляющие по осям d и q , и поэтому диаграмма Потье действительна только для неявнополюсных машин. Тем не менее ею пользуются также для явнополюсных машин, так как ошибка в определении тока i_f в случае $\cos\varphi = 0,8$ обычно не превышает 5...10 %.

Приведение полного тока I или МДС якоря F_a к обмотке возбуждения производится так же, как приведение продольного тока МДС якоря.

При построении диаграммы Потье обычно вместо $x_\sigma I$ откладывают $x_\sigma I$, что дает более точные результаты.

Затем по х.х.х. находят необходимую для создания \dot{E}_δ МДС F_{fc} или ток возбуждения i_{fc} . Вектор $F_{fc}(i_{fc})$ опережает вектор \dot{E}_δ на 90° . Полная МДС возбуждения $F_f(i_f)$ равна разности $F_{fc}(i_{fc})$ и приведенной МДС якоря $F_a' = k_d F_a (I' = k_d I)$. Диаграмма Потье состоит, таким образом, из двух частей: диаграммы ЭДС или напряжений и диаграммы МДС. Последнюю следует рассматривать как пространственную диаграмму МДС.

Тема 3.3. Параллельная работа с сетью (синхронные режимы работы)

3.3.1. Работа на сеть бесконечной мощности

Режим работы синхронной машины параллельно с сетью называется синхронным. Предположим, что сеть является бесконечно мощной, т.е. в ней $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$. Это означает, что изменение режима работы машины не влияет на напряжение и частоту сети.

Напряжение параллельно работающего генератора равно напряжению сети. Для простоты предположим, что включаемая машина является неявнополюсной и сопротивления якоря $r_a = 0$. Тогда, согласно диаграмме рис.3.9 ток якоря машины определяется зависимостью

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{jx_d} = \frac{\Delta \dot{U}}{jx_d}. \quad (3.44)$$

Изменение реактивной мощности. Режим компенсатора.

Предположим, что при включении на параллельную работу с сетью условия включения (синхронизации) генератора были соблюдены в точности. Тогда $\dot{I} = 0$, т.е. машина после включения не примет на себя никакой нагрузки.

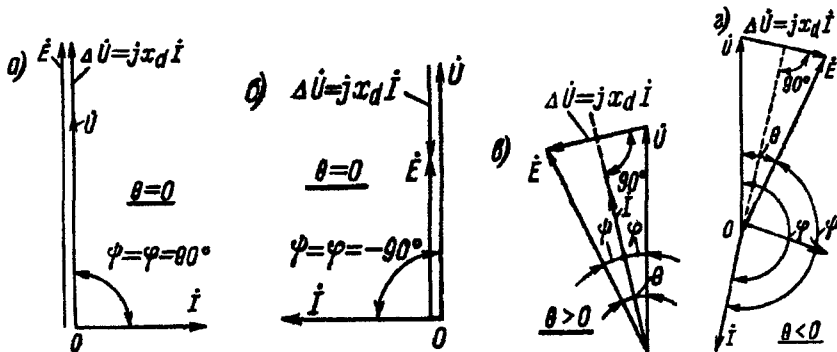


Рис. 3.16. Векторные диаграммы неявнополюсной синхронной машины при работе в режиме компенсатора (а,б), генератора (в) и двигателя (г)

Предположим, что ток возбуждения после синхронизации был увеличен и поэтому $\dot{E} > \dot{U}$ (рис.3.16,а). Возникает ток \dot{I} , отстающий от $\Delta \dot{U}$, а также от \dot{E} и \dot{U} на 90° . Машина будет отдавать в сеть чисто индуктивный ток и реактивную мощность. Если ток возбуждения уменьшить, так что $\dot{E} < \dot{U}$ (рис.3.16,б), то ток \dot{I} также будет отставать от $\Delta \dot{U}$ на 90° , но будет опережать \dot{E} и \dot{U} на 90° , т.е. машина будет отдавать в сеть емкостной ток и потреблять из сети реактивную мощность. Таким образом, изменение тока возбуждения

синхронной машины вызывает изменение только реактивного тока и реактивной мощности. При $E > U$ синхронная машина называется перевозбужденной, а при $E < U$ - недовозбужденной. При равенстве активной мощности нулю перевозбужденная синхронная машина по отношению к сети эквивалентна емкости, а недовозбужденная - индуктивности.

Синхронная машина, не несущая активной нагрузки и загруженная реактивным током, называется синхронным компенсатором. Компенсаторы применяются для повышения коэффициента мощности и поддержания напряжения сети. Если, например, такой компенсатор установить в районе большой промышленной нагрузки и перевозбудить его, то он будет снабжать асинхронные двигатели промышленных предприятий реактивной мощностью, питающая сеть и генераторы электрических станций будут разгружены от этой мощности, коэффициент мощности генераторов и сети повысится, потери мощности и падения напряжения в них уменьшатся и напряжение сети у потребителей сохранится на нормальном уровне.

Изменение активной мощности. Режимы генератора и двигателя.

Изменение тока возбуждения не вызывает появления активной нагрузки или её изменения. Чтобы включенная на параллельную работу машина, приняла на себя активную нагрузку и работала в режиме генератора, необходимо увеличить механический вращающий момент на её валу, увеличив, например, поступление воды или пара в турбину. Тогда равенство моментов на валу нарушится, ротор генератора и, следовательно, вектор ЭДС генератора \vec{E} забегают вперед на некоторый угол Θ . При этом возникнет ток \vec{I} , отстающий, как и ранее, от $\Delta \vec{U} = \vec{E} - \vec{U}$ на 90° . Но, как следует из рис.3.16,в в данном случае $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$ и

$$P = mUI \cos \varphi > 0,$$

т.е. машина отдает в сеть активную мощность.

Если, наоборот, притормозить ротор машины, создав на его валу механическую нагрузку, то ЭДС \vec{E} отстанет от \vec{U} на некоторый угол Θ , ток \vec{I} будет отставать от \vec{U} на угол $90^\circ < \varphi < 270^\circ$ (рис.3.16, г). При этом мощность машины $P = mUI \cos \varphi < 0$ и машина будет работать в режиме двигателя, потребляя мощность из сети.

Как следует из рис.3.16,в,г, у генератора вектор \vec{U} отстает от вектора \vec{E} , а у двигателя - наоборот. Угол нагрузки Θ в первом случае будем считать положительным, а во втором - отрицательным.

3.3.2. Работа на сеть ограниченной мощности

В этих условиях изменение режима работы одного генератора оказывает заметное влияние на режим работы других генераторов. Допустим, что параллельно на общую сеть работают два генератора одинаковой мощности. Если, например, увеличить одновременно токи возбуждения i_{11} , i_{12} этих

генераторов, то напряжение U обоих генераторов и всей сети возрастет. Для перераспределения общей реактивной мощности между отдельными генераторами при $U = \text{const}$ нужно токи возбуждения одних генераторов увеличивать, а других – уменьшать.

Если увеличить частоту вращения первичных двигателей всех генераторов в системе ограниченной мощности, то частота сети будет возрастать. При этом повысится также мощность потребителей. Для сохранения $f = \text{const}$ при увеличении мощности первичного двигателя одного генератора мощность первичного двигателя второго нужно уменьшить. При этом происходит перераспределение активных мощностей.

При недостатке генерируемой активной мощности в системе частота f будет падать, что нарушит нормальное энергоснабжение потребителей. При недостатке генерируемой реактивной мощности напряжение системы будет падать, при определенных условиях даже катастрофически (лавина напряжения). Поэтому сохранение баланса реактивных мощностей не менее важно, чем сохранение баланса активных мощностей.

3.3.3. Угловые характеристики мощности синхронных машин

Мощность СМ зависит от угла нагрузки Θ между векторами ЭДС \dot{E} и напряжения \dot{U} машины. Зависимость $P = f(\theta)$ при $E = \text{const}$ и $U = \text{const}$ называется угловой характеристикой активной мощности СМ. Примем $r_d = 0$. Спроектируем (рис.3.8) векторы ЭДС, напряжений и падений напряжения на направление вектора \dot{E} и на направление, перпендикулярное ему. Тогда получим

$$E = x_d I_d + U \cos \theta, \quad x_q I_q = U \sin \theta,$$

откуда

$$I_d = \frac{E - U \cos \theta}{x_d}, \quad I_q = \frac{U \sin \theta}{x_q}. \quad (3.45)$$

Учитывая, что $\varphi = \varphi - \theta$ (рис.3.8), для мощности генератора имеем

$$\begin{aligned} P &= mUI \cos \varphi = mUI \cos(\varphi - \theta) = mU(I \cos \varphi \cdot \cos \theta + I \sin \varphi \sin \theta) = \\ &= mU(I_q \cos \theta + I_d \sin \theta). \end{aligned}$$

Заменив здесь I_d и I_q по формулам (3.44), получим

$$P = \frac{mU^2}{x_q} \sin \theta \cdot \cos \theta + \frac{mEU}{x_d} \sin \theta - \frac{mU^2}{x_d} \sin \theta \cdot \cos \theta$$

или

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (3.46)$$

Неявнополюсная машина. Понятие о статической устойчивости.

Предполагаем, что машина работает на сеть бесконечной мощности: $U = \text{const}$, $f = \text{const}$ и ток возбуждения не изменяется.

Для неявнополюсной машины $x_q = x_d$ и на основании (3.45)

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin \theta. \quad (3.47)$$

Таким образом, зависимость $P = f(\theta)$ представляет собой синусоиду. Полувольты $P > 0$ соответствуют генераторному режиму работы и полувольты $P < 0$ - двигательному. Критический угол нагрузки $\theta_{\text{кр}} = 90^\circ$ соответствует максимальной мощности

$$P_m = \frac{mEU}{x_d}. \quad (3.48)$$

Максимальная мощность обратно пропорциональна величине x_d . Для уменьшения x_d в СМ зазор выполняется больше, чем в асинхронных.

Режим работы называется статически устойчивым, если при наличии весьма небольших возмущений параметров (напряжения, тока возбуждения и т.д.) изменение режима работы также будут небольшими и при прекращении этих возмущений восстановится прежний режим работы.

Режим работы синхронной машины статически устойчив, если

$$dP/d\Theta > 0. \quad (3.49)$$

Работа неявнополюсного генератора устойчива в области $\Theta < 90^\circ$.

Критический угол нагрузки $\theta_{\text{кр}} = \pm 90^\circ$.

Невозбужденная явнополюсная машина.

Если $i_f = 0$, то и $E = 0$, так как ЭДС от остаточного магнитного потока пренебрежимо мала. В этом случае зависимость $P = f(\theta)$ на основании (3.45) представляет собой синусоиду удвоенной частоты

$$P = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (3.50)$$

Явнополюсная машина в состоянии развивать мощность без возбуждения. Устойчивая работа в режиме генератора происходит при $0 < \theta < 45^\circ$. Пределу устойчивой работы соответствует $\theta_{\text{кр}} = \pm 45^\circ$. В машине существует только поток реакции якоря. При неявнополюсном роторе, когда $x_d = x_q$, положение ротора относительно вращающегося поля реакции якоря безразлично, поэтому машина не развивает мощности. В явнополюсной машине ротор стремится занять по отношению к вращающемуся полю положение, при котором сопротивление магнитному потоку минимально. Невозбужденная явнополюсная машина развивает электромагнитный момент исключительно вследствие действия поля реакции якоря при наличии неравномерности воздушного зазора ($x_d \neq x_q$) и называется поэтому реактивной. Реактивный режим работы может возникнуть в случае, когда явнополюсный генератор по какой-либо причине теряет возбуждение и был при этом слабо нагружен.

Последнее обстоятельство существенно потому, что предельная мощность, которую может развить генератор в этом режиме, невелика.

Числовой пример. В относительных единицах

$$P_* = \frac{P}{S_H} = \frac{P}{mU_H I_H} = \frac{U_*^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\theta.$$

Если $U_* = 1$, $x_{d*} = 1,1$, $x_{q*} = 0,75$, то

$$P_* = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,75} - \frac{1}{1,1} \right) \sin 2\theta = 0,212 \sin 2\theta, \text{ т.е. } P_{m*} = 0,212.$$

Машина в этом режиме потребляет большой реактивный ток для создания магнитного поля. На холостом ходу ($\theta = 0$)

$$I = \frac{U}{x_d}.$$

Числовой пример. При $U_* = 1$ и $x_{d*} = 1,1$ будет $I_* = 0,91$.

На практике применяются синхронные явнополюсные двигатели малой мощности без обмотки возбуждения (реактивные двигатели).

Возбужденная явнополюсная машина. В этом случае машина развивает мощность как за счет электромагнитного момента, создаваемого потоком возбуждения, так и за счет реактивного электромагнитного момента. На рис. 3.17 изображены кривые 1 и 2 обеих составляющих мощности и кривая 3 суммарной мощности. Максимальная мощность и предел устойчивости работы в данном случае наступают при критическом угле $\theta_{кр}$, значение которого определяется равенством

$$\cos \theta_{кр} = \frac{\sqrt{A^2 + 8B^2} - A}{4B},$$

$$\text{где } A = \frac{mEU}{x_q}, \quad B = mU^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right).$$

В относительных единицах

$$P_* = \frac{E_* U_*}{x_q} \sin \theta + \frac{U_*^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \sin 2\theta.$$

Числовой пример (рис. 3.17).

У генератора с $x_{d*} = 1,1$, $x_{q*} = 0,75$ и $\cos \varphi_H = 0,8$ (инд.) при номинальной нагрузке ($U_* = 1, I_* = 1$) ЭДС от потока возбуждения $E_* = 1,87$ и $\theta = 22^\circ 27'$, что можно установить путем построения векторной диаграммы.

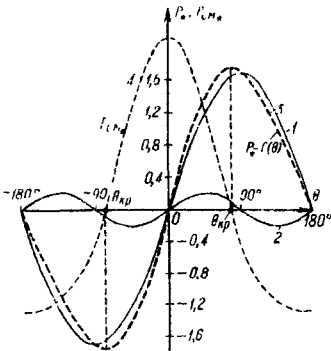


Рис. 3.17. Угловая характеристика активной мощности возбужденного явнополюсного генератора при $E_* = 1,87$, $U_* = 1$, $x_{d*} = 1,1$, $x_{q*} = 0,75$

Таким образом,

$$P_{н*} = \frac{1,87 \cdot 1}{1,1} \sin 22^\circ 27' + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,75} - \frac{1}{1,1} \right) \sin 2 \cdot 22^\circ 27' = 1,7 \cdot 0,382 + 0,212 \cdot 0,706 = 0,65 + 0,15 = 0,8.$$

Вторая составляющая мощности незначительна и в данном случае составляет 19 % от всей мощности. Для данного генератора при $E_* = 1,87$ и $U_* = 1$ критический угол нагрузки $\theta_{кр} = 77^\circ$ и предельная мощность $P_{м*} = 1,75$, т.е. примерно в два раза больше номинальной активной мощности ($P_{н*} = 0,8$).

3.3.4. Синхронизирующая мощность и статическая перегружаемость

При изменении угла нагрузки Θ в определенных пределах синхронная машина способна сохранять синхронный режим работы. Устойчивое состояние работы обеспечивает синхронизирующую мощность, представляющую собой разность между подводимой и отдаваемой ею мощностью, и соответствующий ей синхронизирующий момент

$$P_{см} = \frac{\partial P}{\partial \Theta}, \quad M_{см} = \frac{\partial M}{\partial \Theta}.$$

На основании (3.45) для явнополюсной машины

$$P_{см} = \frac{mEU}{x_d} \cos \Theta + mU^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\Theta. \quad (3.51)$$

Для неявнополюсной машины $x_q = x_d$ и выражение (3.51) упрощается.

Кривая синхронизирующей мощности $P_{см}$ показана на рис. 3.17 в виде пунктирной кривой. Режим работы синхронной машины устойчив, когда синхронизирующие мощность и момент положительны. Синхронизирующая мощность и момент для перевозбужденной машины ($E > U$) больше, чем недо возбужденной ($E < U$), поэтому перевозбужденная машина в большей степени способна сохранять устойчивый режим работы, чем недо возбужденная.

При увеличении механической мощности на валу синхронной машины свыше ее максимальной мощности P_m машина выйдет из синхронизма и ротор ее будет вращаться асинхронно с некоторым скольжением s относительно поля статора. Подобный режим недопустим, так как он опасен для машины и нарушает нормальную работу сети. Поэтому при эксплуатации синхронных машин необходимо обеспечить их устойчивую синхронную работу.

Статическая перегружаемость синхронной машины характеризуется отношением максимальной мощности P_m (3.47) при номинальных значениях напряжения и тока возбуждения к номинальной мощности

$$k_n = \frac{P_m}{P_n} = \frac{M_m}{M_n}. \quad (3.52)$$

Величина k_n тем больше, чем меньше угол θ_n при номинальной нагрузке.

Обычно $\theta_H = 20 \dots 35^\circ$ [1].

Номинальная мощность

$$P_H = mU_H I_H \cos \varphi_H = S_H \cos \varphi_H = \frac{mU_H^2}{z_H} \cos \varphi_H. \quad (3.53)$$

Для неявнополюсной машины

$$k_{\Pi} = \frac{E_{H*}}{x_{d*}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H}, \quad (3.54)$$

где $x_{d*} = x_{d*} I_{H*} = E_{k*}$.

ЭДС E_{k*} индуцируется током возбуждения $i_f = i_{jk}$ при установившемся трехфазном коротком замыкании, когда $I = I_H$.

Поскольку ЭДС E_H и E_k пропорциональны току возбуждения i_{jH} и i_{jK} , то

$$\frac{E_{H*}}{x_{d*}} = \frac{E_{H*}}{E_{k*}} = \frac{i_{jH}}{i_{jK}}.$$

Поэтому вместо (3.53) с учетом (3.43) можно написать

$$k_{\Pi} = \frac{i_{jH}}{i_{jK}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_H} = k_{OK3} \frac{1}{\cos \varphi_H}, \quad (3.55)$$

где i_{j0} - ток возбуждения холостого хода при $U = U_H$.

Статическая перегружаемость синхронных машин тем больше, чем больше их о.к.з., т.е. чем меньше относительное значение x_d или чем больше воздушный зазор.

Для неявнополюсной машины на основании равенств (3.46) и (3.47)

$$k_{\Pi} = \frac{1}{\sin \theta_H}. \quad (3.56)$$

Статическая перегружаемость явнополюсных синхронных машин также выражается (3.53) ... (3.55) с введением добавочного множителя

$$\varepsilon = \frac{x_{d*} - x_{q*}}{E_{H*} x_{q*}}. \quad (3.57)$$

Величина статической перегружаемости стандартизирована [11, 12]: для турбогенераторов не менее 1,6...1,7, гидрогенераторов - 1,7, двигателей - 1,65.

3.3.5. Работа синхронной машины при постоянной мощности и переменном возбуждении

Рассмотрим зависимость тока I от тока возбуждения i_f при постоянной активной мощности $P = mUI \cos \varphi$ в случае параллельной работы машины с сетью бесконечной мощности ($U = \text{const}$). Для простоты определим эту зависимость для неявнополюсной машины (рис.3.18). Полученные результаты будут характерны также для явнополюсной машины [1]. При этом будем рассматривать ток возбуждения, приведенный к обмотке якоря.

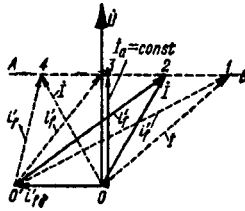


Рис.3.18. Упрощенная векторная диаграмма
невнуполюсного синхронного генератора

При $P = \text{const}$ активная составляющая тока $I_a = I \cos \varphi = \text{const}$. Поэтому на векторной диаграмме рис.3.18 конец вектора тока I скользит по прямой АВ. Если положить для простоты $X_{aa} = 0$, то внутренняя ЭДС $E_b = U = \text{const}$ и составляющая тока возбуждения $i'_{f\delta}$, создающая результирующий поток Φ_δ , также постоянна. Полный ток возбуждения $i'_f = i'_{f\delta} = \dot{I}$ легко определяется по диаграмме.

Из рис. 3.18 следует, что при изменении тока возбуждения ток I и $\cos \varphi$ также изменяются, причем при некотором значении тока возбуждения i_f величина $I = I_a$ и $\cos \varphi = 1$. При увеличении (режим перевозбуждения) и уменьшении тока возбуждения (режим недо возбуждения) величина тока I возрастает, так как растет его реактивная составляющая.

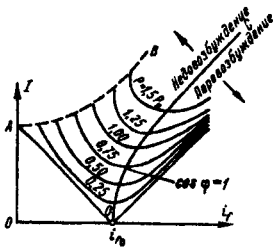


Рис. 3.19. U - образные
характеристики СМ

отдаче в сеть индуктивного тока и реактивной мощности, а левые части - недо возбужденной машине, отдаче в сеть емкостного тока и потреблению реактивной мощности. Кривая ОС, соединяющая точки минимального значения тока (тока I_a), соответствует условию $\cos \varphi = 1$. Кривая ОС отклоняется вправо при увеличении мощности, так как при возрастании тока I увеличивается падение напряжения $x_{oa} I$ и ЭДС E_b , что вызывает рост необходимого тока возбуждения. Кривая ОС представляет собой регулировочную характеристику машины при $\cos \varphi = 1$, представленную на рис. 3.13.

На рис. 3.19 представлен характер зависимостей $I = f(i_f)$ при различных значениях

$P = \text{const}$. Эти зависимости по их виду называют U – образными характеристиками. Минимальное значение I для каждой кривой определяет активную составляющую тока якоря I_a и величину мощности $P = m U I_a$, для которой построена данная кривая. Нижняя кривая соответствует $P = 0$, причем i_{f0} - значение тока возбуждения при $E = U$. Правые части кривых соответствуют перевозбужденной машине и

Точка А на рис. 3.19 соответствует току холостого хода недовозбужденной машины, при этом из сети потребляется намагничивающий ток

$$I = \frac{U}{x_d}.$$

Линия АВ представляет собой границу устойчивости, на которой $\Theta = \Theta_{кр}$. При дальнейшем увеличении тока возбуждения машина выпадает из синхронизма.

U-образные характеристики генератора и двигателя практически одинаковы.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроена синхронная машина (СМ)? В чем отличие конструкции ротора явно- и неявнополюсной СМ?
2. Сколько полюсов имеет неявнополюсный ротор?
3. Изложите принцип работы СМ в режиме генератора, двигателя, компенсатора.
4. Напишите выражение для действующего значения ЭДС синхронного генератора (СГ) при холостом ходе.
5. Что такое реакция якоря?
6. В чем заключается сущность теории двух реакций?
7. Как зависит реакция якоря от характера нагрузки? Какая реакция якоря будет при активной, индуктивной, емкостной нагрузке?
8. Какие ЭДС наводят магнитные потоки реакции якоря и какими индуктивными сопротивлениями эти ЭДС характеризуются?
9. Начертите характеристику холостого хода (х.х.х.) СГ.
10. Начертите характеристику короткого замыкания СГ. Почему она имеет вид прямой в отличие от х.х.х.?
11. Что представляет собой параметр о.к.з.? Как он влияет на работу СМ?
12. Как влияет характер нагрузки на вид внешней и регулировочной характеристик?
13. Перечислите условия и порядок включения СГ на параллельную работу с сетью.
14. Как нагрузить СГ после включения на параллельную работу с сетью?
15. Перечислите способы пуска синхронного двигателя (СД).
16. Поясните назначение пусковой обмотки СД.
17. Как зависит момент СД от напряжения сети?
18. Начертите угловую характеристику СД.
19. Что представляют собой U-образные характеристики?
20. Как влияет изменение тока возбуждения на коэффициент мощности?
21. Возможно ли регулирование частоты вращения СД?
22. Какая СМ называется реактивной?
23. Для какой цели применяются синхронные компенсаторы?

Раздел 4. Машины постоянного тока

Более подробная информация по данной теме содержится в учебном пособии [1].

В разделе 4 рассматриваются три темы:

- Общие сведения.
- Генераторы постоянного тока.
- Двигатели постоянного тока.

После проработки теоретического материала следует ответить на контрольные вопросы, приведенные в конце раздела. Затем следует обратиться к практикуму и разобрать примеры решения задач, далее выполнить задачу №3 контрольной работы. После этого следует перейти к лабораторным работам №3 и №4, если это предусмотрено Вашим тематическим планом.

При появлении затруднений следует обратиться к пособию [1].

После изучения данного раздела необходимо пройти контрольные мероприятия: ответить на вопросы теста №4 и решить экзаменационную задачу №3 по данному разделу. Максимальное количество баллов, которые Вы можете получить по данному разделу равно 30: 10 баллов за тестирование и 20 баллов за решение экзаменационной задачи.

Введение

Машины постоянного тока могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя (свойство обратимости). Однако наибольшее применение находят именно двигатели постоянного тока, так как в связи с развитием промышленной электроники в последнее время источником постоянного тока могут служить полупроводниковые выпрямительные устройства. Основные преимущества двигателей постоянного тока заключаются в хороших регулировочных свойствах, дающих широкий диапазон регулирования скорости и возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин. К недостаткам машин постоянного тока относятся: относительно высокая стоимость и пониженная надежность работы, что обусловлено наличием коллектора. Машины постоянного тока широко применяются в качестве крановых двигателей, тяговых двигателей на транспорте, привода прокатных станков и других механизмов, а также в системах автоматики.

Можно отметить, что несмотря на сложность конструкции, машины постоянного тока были изобретены ранее других электрических машин.

Тема 4. 1. Общие сведения

4.1.1. Устройство

Неподвижная часть электрической машины называется статором, вращающаяся часть - ротором. Эти части разделены воздушным зазором.

Статор состоит из станины, на внутренней поверхности которой расположены главные полюса. Станина, помимо механической нагрузки, выполняет роль элемента магнитной цепи и служит для замыкания магнитного потока.

Главные полюса машины состоят из сердечника полюса, полюсного наконечника и катушки возбуждения. Катушки всех главных полюсов электрически соединяются, образуя обмотку возбуждения, питаемую постоянным током. В машинах малой мощности главные полюса могут выполняться в виде постоянных магнитов. Полярность полюсов чередуется. Число полюсов $2p$ всегда четное. В теории обычно рассматриваются двухполюсные машины, так как процессы под каждой парой полюсов идентичны, хотя в реальных машинах число полюсов может быть больше двух. Между главными полюсами устанавливают дополнительные полюса для уменьшения искрения под щетками.

Ротор МПТ называется якорем. Сердечник якоря представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали. Листы стали окисляются для уменьшения потерь на вихревые токи, которые возникают в результате вращения якоря в магнитном поле. Листы стали имеют пазы для укладки обмотки.

Обмотка укладывается в пазы якоря и закрепляется проволочным бандажом или клиньями. Концы обмотки якоря присоединяются к коллектору, укрепленному на валу. Коллектор представляет собой набор медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. На коллектор налегают щетки. Щетки соединены с коробкой выводов. В машинах специального назначения полюсные наконечники могут иметь пазы, в которых располагается компенсационная обмотка, питаемая от обмотки якоря.

4.1.2. Режим генератора

Рассмотрим простейший генератор, представляющий собой рамку в виде двух проводников длиной l , соединенных в виток (рис.4.1).

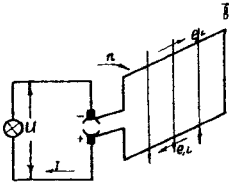


Рис.4.1

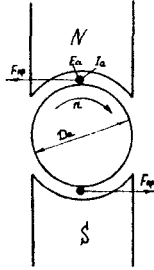
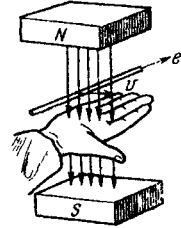


Рис. 4.2



Обмотка возбуждения создает магнитное поле с индукцией B . Предположим, что якорь машины приводится во вращение по часовой стрелке и линейная скорость проводников равна v . Тогда в проводниках обмотки якоря индуцируется ЭДС вращения, величина которой определяется по закону Фарадея

$$e_{np} = B \cdot l \cdot v. \quad (4.1)$$

Направление ЭДС проводника показано на рис. 4.1 и может быть определено по мнемоническому правилу правой руки: силовые линии входят в ладонь, большой палец показывает направление движения проводника, четыре пальца - направление ЭДС (рис.4. 2).

Как видно из рис. 4.1, ЭДС двух проводников по контуру витка складываются и полная ЭДС данного витка: $e_{\sigma} = 2 e_{np}$

ЭДС обмотки якоря является переменной во времени, так как проводники обмотки якоря проходят попеременно под северным и южным полюсами, в результате чего направление ЭДС в проводниках меняется.

Частота ЭДС

$$f = p n / 60, \quad (4.2)$$

где p - число пар полюсов; n - частота вращения (об/мин).

Если обмотка якоря с помощью щеток замкнута на внешнюю цепь, то возникает ток. В обмотке якоря этот ток будет переменным и кривая его по форме аналогична кривой ЭДС. Однако во внешней цепи направление ЭДС и тока будет постоянным, что объясняется действием коллектора. Действительно, при повороте якоря и коллектора на 180° и изменении направления ЭДС и тока в проводниках одновременно происходит смена коллекторных пластин под щетками. В результате этого полярность щеток и

направление тока во внешней цепи остаются неизменными. Таким образом, в генераторе коллектор является механическим выпрямителем, который преобразует переменный ток обмотки якоря в постоянный ток внешней цепи.

Величина ЭДС обмотки якоря определяется общим числом проводников N обмотки, их соединением в параллельные ветви $2a$, числом полюсов $2p$ машины, магнитным потоком полюса в воздушном зазоре Φ , частотой вращения n

$$E = C_E \Phi n, \quad (4.3)$$

где конструктивная постоянная машины

$$C_E = \frac{pN}{60a}. \quad (4.4)$$

ЭДС обмотки якоря можно также выразить формулой

$$E = C_M \Phi \omega, \quad (4.5)$$

где угловая частота вращения

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad (4.6)$$

конструктивная постоянная

$$C_M = \frac{pN}{2\pi a}. \quad (4.7)$$

Выходное напряжение (напряжение нагрузки) будет меньше, чем величина ЭДС

$$U = E - I R_\alpha - 2\Delta U_{щ}, \quad (4.8)$$

где падение напряжения в якорной цепи

$$\Delta U_\alpha = I R_\alpha + 2\Delta U_{щ}, \quad (4.9)$$

где R_α - сопротивление цепи якоря; $2\Delta U_{щ}$ - падение напряжения в щеточном контакте. Обычно применяются угольно-графитные щетки, для которых принимается $2\Delta U_{щ} = 2\text{В}$.

Объединяя два последних члена, можно записать:

$$U = E - I_\alpha R, \quad (4.10)$$

где R - суммарное сопротивление якорной цепи с учетом сопротивления щеточного контакта.

При протекании тока по проводникам якоря, находящимся в магнитном поле, на них будут действовать электромагнитная сила Ампера (рис. 4.1)

$$F_{np} = B l i_{np}. \quad (4.11)$$

Направление силы определяется по правилу левой руки (рис.4.3): силовые линии входят в ладонь, четыре пальца показывают направление тока, большой палец покажет направление силы. Эти электромагнитные силы, действующие на проводники с током, помещенные в магнитное поле, создают электромагнитный момент. В режиме генератора электромагнитный момент является тормозным, так как он действует против направления вращения якоря.

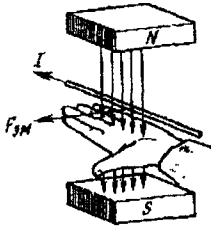


Рис.4.3

Величина момента определяется формулой

$$M = c_m \Phi I_a. \quad (4.12)$$

Полезная мощность генератора

$$P_2 = UI.$$

4.1.3. Режим двигателя

Электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя (принцип обратимости). В режиме двигателя (рис.4.4) необходимо к обмотке якоря подвести постоянный ток от внешнего источника.

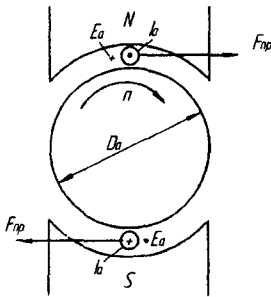


Рис.4.4

При этом коллектор превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в переменный ток обмотки якоря и работает в качестве механического инвертора тока.

На проводники с током обмотки якоря действуют электромагнитные силы (4.11) и возникает электромагнитный момент (4.12)

$$M = c_m \Phi I_a.$$

Момент двигателя является движущим и приводит якорь во вращение.

После того, как ротор якоря придет во вращение, в проводниках обмотки якоря будет индуцироваться ЭДС (4.3), (4.5)

$$E = C_e \Phi n, \quad E = C_m \Phi \omega.$$

В режиме двигателя направление ЭДС E и направление тока якоря I_a противоположны, поэтому ЭДС якоря двигателя называют противо-ЭДС. (В режиме генератора направление ЭДС E и тока I_a якоря совпадают).

Приложенное к якорю двигателя напряжение уравнивается ЭДС E и

падением напряжения в обмотке якоря:

$$U = E + IR_{я} + 2\Delta U_{и} \quad (4.13)$$

или

$$U = E + IR. \quad (4.14)$$

Из сравнения формул напряжения генератора и двигателя видно, что в генераторе $U < E$, а в двигателе $U > E$.

Полезная мощность двигателя

$$P_2 = \omega M_2, \quad (4.15)$$

где M_2 - полезный момент на валу, угловая частота вращения (4.6).

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) представляет собой отношение полезной P_2 мощности к потребляемой P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (4.16)$$

Так как величина электрических потерь зависит от нагрузки машины, то с ее изменением меняется величина КПД. Максимум КПД соответствует равенству постоянных и переменных потерь.

4.1.4. Реакция якоря

Подробно данный материал приводится в учебном пособии [1].

В режиме холостого хода машины имеется только магнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения. При нагрузке машины в обмотке якоря протекает ток I , который создает свое магнитное поле якоря (реакция якоря). При обычном расположении щеток на геометрической нейтрали, ось магнитного поля якоря направлена поперек оси поля возбуждения, поэтому реакция якоря называется поперечной. Результирующее магнитное поле машины образуется совместным действием магнитных полей обмотки возбуждения и обмотки якоря. Под действием поля якоря результирующее поле машины не только искажается, но и при наличии насыщения магнитной цепи уменьшает свою величину. Уменьшение величины магнитного поля называется размагничивающим действием поперечной реакции якоря $\Delta F_{як}$.

Процесс прохождения проводника под щеткой называется коммутацией. Поток обмотки якоря оказывает вредное влияние на коммутацию, вызывая искрение под щетками. Для уменьшения реакции якоря в машине устанавливаются дополнительные (добавочные) полюса, обмотка которых

соединяется последовательно с обмоткой якоря. Магнитный поток дополнительного полюса направлен встречно потоку обмотки якоря и компенсирует его.

4.1.5. Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения

На рис. 4.5 показаны электрические схемы МПТ. В зависимости от способа включения обмоток возбуждения различают МПТ с независимым возбуждением (рис. 4.5, а, б) и с самовозбуждением: параллельным (рис. 4.5, в), последовательным (рис. 4.5, г) и смешанным (рис. 4.5, д).

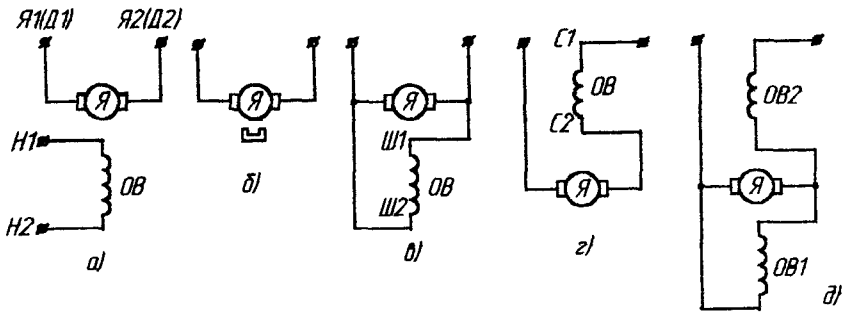


Рис. 4.5

В машинах смешанного возбуждения имеется параллельная и последовательная обмотки возбуждения, в общем случае эти обмотки могут иметь согласное и встречное включение. При согласном включении магнитные потоки обмоток складываются, при встречном включении - вычитаются. С возбуждением от постоянных магнитов (рис. 4.5, б) обычно изготавливают машины небольшой мощности.

4.2. Генераторы постоянного тока

4.2.1. Основные уравнения

Генераторы постоянного тока (ГПТ) могут иметь следующие способы возбуждения: независимое, параллельное, последовательное или смешанное (рис. 4.5).

Генераторы последовательного возбуждения имеют специфические характеристики, отличные от других типов генераторов, и применяются только в специальных установках; в связи с ограничением области применения эти генераторы в дальнейшем не рассматриваются.

Основные формулы ГПТ были рассмотрены в п. 4.1.2.

Уравнение напряжения на зажимах генератора согласно (4.10)

$$U = E - I_A R.$$

ЭДС, индуктируемая в обмотке якоря, согласно (4.3)

$$E = C_e \Phi n.$$

Работа генератора характеризуется следующими основными величинами: напряжением на зажимах генератора U , током нагрузки I , током в обмотке возбуждения i_B и частотой вращения n . ГПТ обычно работают при практически постоянной частоте вращения, поэтому характеристики генераторов будем рассматривать при номинальной частоте вращения n_n . В этом случае соотношение величин U , I и i_B образуют три семейства характеристик, которые рассмотрены ниже.

4.2.2. Характеристики генераторов постоянного тока

4.2.2.1. Нагрузочные характеристики

Нагрузочные характеристики - это зависимость напряжения генератора U от тока возбуждения i_B : $U = f(i_B)$ при неизменном токе нагрузки $I = \text{const}$. Наибольший практический интерес представляют нагрузочные характеристики при $I = 0$ (характеристика холостого хода) и при номинальной нагрузке $I = I_n$.

а) Характеристика холостого хода

$$E = f(i_e) \text{ при } I = 0, n = n_n.$$

Характеристика холостого хода (х.х.х.) снимается, как правило, при независимом возбуждении генератора. Она представляет собой зависимость ЭДС E на зажимах генератора от тока возбуждения i_B при отсутствии тока якоря ($I = 0$) (рис. 4.6, кривая 1).

Аналитическое выражение характеристики холостого хода имеет вид

$$E = C_E \Phi n = C_E \frac{F_B}{R_\mu} n = C_E \frac{i_B W_B}{R_\mu}. \quad (4.17)$$

Магнитодвижущая сила (МДС) обмотки возбуждения

$$F_B = i_B W_B, \quad (4.18)$$

где i_B и W_B - ток и число витков обмотки возбуждения.

Связь между магнитным потоком Φ и МДС

$$\Phi = F_B / R_\mu, \quad (4.19)$$

где R_μ - сопротивление магнитной цепи.

С ростом тока возбуждения растет насыщение магнитной цепи и величина R_μ , а рост ЭДС соответственно замедляется.

Снятие характеристики холостого хода опытным путем проводят при монотонном уменьшении тока возбуждения от максимального значения, соответствующего $E \approx 1,3 U_H$, до нуля. Остаточная ЭДС $E_{ост}$ при $i_B=0$ наводится потоком остаточного намагничивания из-за явления гистерезиса (остаточного магнетизма) в материале полюсов и яра. Обычно $E_{ост} = 2 \dots 5 \% U_H$.

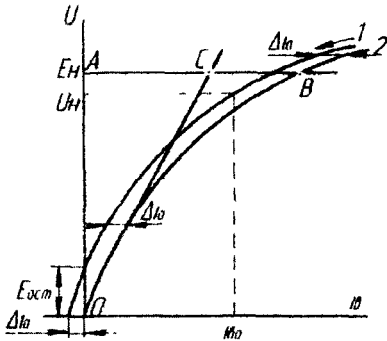


Рис.4.6

Приведенную характеристику холостого хода (кривая 2) получают путем смещения оси координат на величину Δi_0 . Аналогично снимают восходящую ветвь характеристики, получив полную петлю. На практике пользуются средней кривой.

По характеристике холостого хода определяется ток возбуждения i_B , соответствующий номинальному напряжению U_H . Х.х.х. позволяет определить коэффициент насыщения магнитной системы $K_\mu = AB/AC$, характеризующий степень отклонения х.х.х. от линейной зависимости. Коэффициент K_μ обычно определяется для номинального значения ЭДС

$$E_H = U_H + I_H R_a + 2\Delta U_{щ}.$$

Для большинства генераторов нормального исполнения $K_\mu = 1,2 \dots 1,35$.

б) Нагрузочные характеристики при номинальном токе

На рис.4.7 представлены нагрузочные характеристики генератора при независимом (кривая 2) и смешанном возбуждении при согласном включении обмоток (кривая 3), здесь же приведена х.х.х. (кривая 1). Нагрузочная характеристика генератора независимого возбуждения смещается по отношению к х.х.х. вниз на величину падения напряжения в якорной цепи $\Delta U_{я}$ (4.9) и вправо на величину тока возбуждения, необходимого для компенсации размагничивающего действия поперечной реакции якоря $\Delta F_{щ}$. При смешанном возбуждении характеристика смещается влево на величину МДС последовательной обмотки F_c .

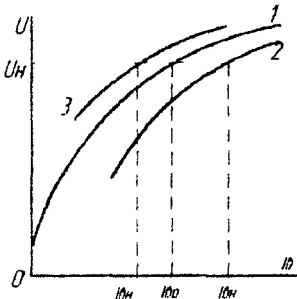


Рис.4.7

При достаточно большой величине F_c нагрузочная

характеристика может располагаться левее и выше характеристики холостого хода (х.х.х.). По нагрузочным характеристикам при $U = U_H$ определяют номинальные значения тока возбуждения при независимом и смешанном возбуждении генератора.

4.2.2.2. Внешние характеристики $U = f(I)$ при $R_{\text{об}} = R_{\text{вн}}$ и $n = n_n$

Внешние характеристики - это зависимости напряжения генератора U от тока нагрузки I : $U = f(I)$ при нерегулируемом токе возбуждения, т.е. при постоянном сопротивлении цепи обмотки возбуждения $R_{\text{об}} = \text{const}$. Наибольший практический интерес представляет внешняя характеристика при таком $R_{\text{об}}$, которое обеспечивает номинальное напряжение при номинальном токе нагрузки, т.е. при $R_{\text{об}} = R_{\text{вн}}$.

Внешние характеристики генератора снимаются при независимом, параллельном и смешанном способах возбуждения. Эти характеристики должны сниматься при уменьшении тока нагрузки. Вид внешних характеристик показан на рис. 4.8.

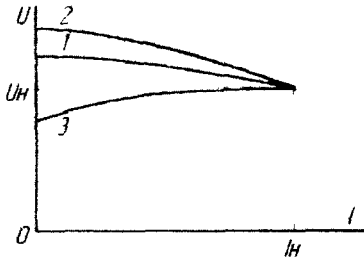


Рис.4.8

При испытании генератора независимого возбуждения (кривая 1) условие $R_{\text{об}} = \text{const}$ приводит к условию $i_B = i_{\text{вн}} = \text{const}$ и с изменением тока нагрузки напряжение U изменяется из-за действия двух факторов: падения напряжения в якорной цепи $\Delta U_{\text{я}}$ (4.9) и размагничивающего действия реакции якоря $\Delta F_{\text{я}}$.

При параллельном возбуждении ток возбуждения определяется величиной напряжения генератора и не остается постоянным. С изменением тока возбуждения изменяется величина магнитного потока, индуктируемая им ЭДС якоря и напряжение на зажимах U . Таким образом, при параллельном возбуждении действует, кроме вышеназванных факторов $\Delta U_{\text{я}}$ и $\Delta F_{\text{я}}$, третий фактор - изменение тока возбуждения i_B . Поэтому действие тока якоря на величину выходного напряжения проявляется в большей степени.

При смешанном возбуждении генератора последовательная обмотка компенсирует перечисленные факторы. При достаточно большой МДС последовательной обмотки внешняя характеристика может иметь вид кривой 3, рис.4.8.

По внешним характеристикам можно определить изменение напряжения ΔU при изменении нагрузки от номинальной до холостого хода

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100\%, \quad (4.20)$$

где U_0 - напряжение генератора при холостом ходе.

4.2.2.3. Регулировочные характеристики

$$i_B = f(I) \text{ при } U = U_H \text{ и } n = n_H$$

Регулировочные характеристики - это зависимости тока возбуждения i_B от тока нагрузки I : $i_B = f(I)$ при постоянном напряжении U генератора.

Наибольший интерес представляет характеристика, снятая при номинальном напряжении генератора $U = U_H$. Регулировочные характеристики обычно снимаются при независимом и смешанном возбуждении. При параллельном возбуждении регулировочная характеристика аналогична характеристике при независимом возбуждении. Регулировочные характеристики также, как и внешние, снимаются при уменьшении тока нагрузки от номинального до нуля. В процессе снятия характеристики ток возбуждения изменяют так, чтобы напряжение оставалось номинальным.

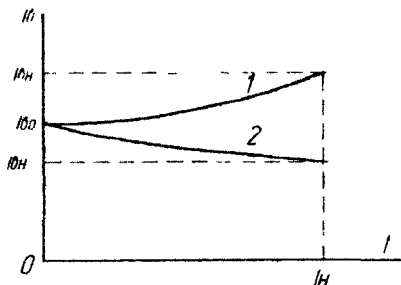


Рис.4.9

Вид характеристик показан на рис.4.9.

При независимом возбуждении на характеристику (кривая 1) влияют падение напряжения в якорной цепи ΔU_H и размагничивающее действие поперечной реакции якоря $\Delta F_{\text{як}}$. Нелинейность характеристики зависит от степени насыщения магнитной системы генератора.

При смешанном возбуждении генератора вид характеристики (кривая 2) зависит от величины МДС последовательной обмотки возбуждения F_C . При

значительной МДС F_C ток возбуждения i_B при нагрузке может быть меньше, чем при холостом ходе.

По регулировочным характеристикам для каждого способа возбуждения определяется изменение тока возбуждения при изменении нагрузки от номинальной до нуля

$$\Delta i_B = \frac{i_{BH} - i_{B0}}{i_{B0}} 100 \% . \quad (4.21)$$

4.3. Двигатели постоянного тока

4.3.1. Основные уравнения

Двигатели постоянного тока могут иметь следующие способы возбуждения: независимое, параллельное, последовательное, смешанное (рис. 4.5).

В отличие от генераторного режима работы, когда с обмотки якоря снимается выходное напряжение, в режиме двигателя к обмотке якоря подводится напряжение питания. Взаимодействие тока проводников якоря с магнитным полем обмотки возбуждения создает силу Ампера, выталкивающую проводники якоря из магнитного поля, т.е. возникает электромагнитный момент, под действием которого якорь приходит во вращение. Таким образом, электрический двигатель преобразует потребляемую электрическую энергию в механическую энергию вращения. Подробнее принцип работы двигателя рассмотрен в п. 4.1.3.

Электромагнитный момент двигателя (4.12)

$$M = C_M \Phi I_A.$$

При работе с установившейся частотой вращения электромагнитный момент уравновешивается статическим моментом на валу M_c

$$M_c = M_0 + M_2,$$

где M_0 - момент холостого хода, обусловленный собственными потерями двигателя; M_2 - полезный момент (момент нагрузки на валу).

При работе в динамическом режиме с изменением частоты вращения на вал двигателя действует статический M_c и динамический M_d моменты

$$M = M_c \pm M_d. \quad (4.22)$$

Динамический момент пропорционален моменту инерции J вращающихся частей двигателя и приводного механизма

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.23)$$

где угловая скорость двигателя $\omega = \frac{2\pi n}{60}$.

Уравнения ЭДС (4.3), (4.5) и напряжения на зажимах двигателя (4.14)

$$E = C_E \Phi n = C_M \Phi \omega, \quad U = E + IR$$

позволяют получить уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{U - IR}{C_E \Phi}. \quad (4.24)$$

Подставив в (4.24) выражение тока из формулы момента (4.12), получим формулу механической характеристики

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{MR}{C_E C_M \Phi^2}. \quad (4.25)$$

При увеличении момента нагрузки на валу частота вращения двигателя уменьшается, что обеспечивает устойчивость работы двигателя. При устойчивой работе двигатель способен вернуться к исходному режиму при малых возмущениях его работы, когда эти возмущения прекратятся (например, кратковременные изменения напряжения сети или момента нагрузки). Подробно вопрос устойчивости работы двигателя рассмотрен в [1], п.4.5.2.

4.3.2. Пуск двигателя

В момент включения двигатель неподвижен ($n=0$), следовательно против-ЭДС обмотки якоря $E=0$. Согласно (4.14) величина начального пускового тока

$$I_n = \frac{U}{R}. \quad (4.26)$$

Обычно сопротивление якорной цепи R незначительно, поэтому начальный пусковой ток может составить $I_n \approx (10...50)I_H$. Такое превышение тока недопустимо, так как оно может вызвать «круговой огонь» на коллекторе. Для ограничения пускового тока обычно в цепь якоря включается пусковой реостат. В начальный момент пуска реостат должен быть полностью введен. По мере разгона двигателя реостат выводят, переключая его со ступени на ступень. По окончании пуска его полностью выводят.

Сопротивление пускового реостата $R_{\text{пр}}$ выбирают из условия:

$$I_n = \frac{U}{R + R_{\text{пр}}} = (1,5...2)I_H. \quad (4.27)$$

4.3.3. Способы регулирования частоты вращения

Частоту вращения согласно (4.25) можно регулировать следующими способами :

- а) напряжением U , подводимым к электродвигателю;
- б) добавочным сопротивлением $R_{\text{д}}$, включенным в цепь якоря, тогда

$$n = \frac{U - I(R + R_{\text{д}})}{C_1 \Phi}; \quad (4.28)$$

- в) магнитным потоком Φ с помощью тока возбуждения, вводя реостат в цепь возбуждения.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения питания U осуществляется уменьшением напряжения от номинального значения, что приводит к уменьшению частоты вращения (регулировка «вниз»). Этот способ регулирования позволяет сохранить высокое значение КПД, однако при этом требуется специальный регулируемый источник питания (например, система генератор - двигатель).

Регулирование частоты вращения с помощью добавочного сопротивления R_0 в цепи якоря также является регулировкой «вниз». Механические характеристики при наличии R_0 называются искусственными. Из-за больших потерь мощности в регулировочном реостате и значительном уменьшении КПД этот способ находит ограниченное применение. Отметим, что при достаточно большой величине сопротивления R_0 и изменении направления вращения двигателя под действием внешней силы (например, спуск груза) механическая характеристика пересекает ось абсцисс, а двигатель переходит в режим электромагнитного тормоза, потребляя электрическую энергию из сети и механическую энергию с вала, развивая тормозной момент.

Регулирование частоты вращения уменьшением магнитного потока осуществляется посредством реостата в цепи возбуждения и дает увеличение частоты вращения (регулировка "вверх").

Механические характеристики для этих способов регулирования рассмотрены ниже.

Широкое применение находит импульсное регулирование частоты вращения [1].

4.3.4. Реверсирование и торможение

Изменение направления вращения якоря (реверсирование) согласно (4.24) может быть получено переключением полярности обмотки якоря, т.е. изменением полярности напряжения и тока якоря или изменением направления магнитного потока (переключение полярности обмотки возбуждения). При одновременном переключении обеих обмоток направление вращения двигателя остается неизменным.

Изменение полярности напряжения, приложенного к якорю, применяют при необходимости быстрого торможения двигателя (торможение противовключением). Для ограничения толчков тока и момента в якорную цепь вводят добавочное сопротивление. Если после остановки двигатель не отключить, то он начнет вращаться в другую сторону (реверс).

Рекуперативное торможение двигателя осуществляют путем отдачи электрической энергии в сеть. Для этого необходимо, чтобы ЭДС машины превосходила напряжение сети, этого можно достичь увеличением тока возбуждения или частоты вращения. Ток якоря и момент изменяют свое направление, машина переходит в режим генератора. Двигатель последовательного возбуждения нельзя непосредственно перевести в генераторный режим. Процесс рекуперации более просто осуществить для двигателя смешанного возбуждения.

Для двигателя независимого возбуждения применяют динамическое торможение, когда якорь отключается от сети и замыкается на нагрузочное сопротивление. Машина переходит в генераторный режим.

4.3.5. Механические характеристики

Механические характеристики - это зависимость $n = f(M_2)$ при $U = \text{const}$, $I_{\phi} = \text{const}$, $R_{\phi} = \text{const}$. Механическая характеристика, соответствующая условиям рабочей характеристики ($U = U_H$, $i_B = i_{\text{ном}}$, $R_d = 0$), называется естественной. Вид механической характеристики зависит от способа возбуждения двигателя.

Двигатель параллельного возбуждения

Серийные двигатели параллельного возбуждения снабжаются слабой обмоткой последовательного возбуждения, называемой стабилизирующей (рис.4.5,д). Число витков этой обмотки выбирается так, чтобы компенсировать размагничивающее действие поперечной реакции якоря. В таком двигателе при изменении нагрузки магнитный поток остается практически постоянным.

Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения показаны на рис.4.10. Двигатель независимого возбуждения имеет такие же характеристики.

Естественная характеристика обозначена цифрой 1. Частота вращения (4.24, 4.25) двигателя с ростом нагрузки уменьшается. Однако это изменение незначительно, так как сопротивление R якорной цепи мало. Отношение $\Delta n = \frac{n_0 - n_H}{n_H}$ определяет номинальное изменение частоты вращения двигателя при изменении его нагрузки от номинальной до нуля. Для двигателя параллельного возбуждения нормального исполнения Δn не превышает 10 %. Такая механическая характеристика называется "жесткой".

Регулирование частоты вращения двигателя возможно всеми тремя способами описанными выше.

Для двигателей средней и большой мощности широкое применение находит система «генератор-двигатель» (Г-Д), позволяющая изменять напряжение питания двигателя путем подключения к генератору постоянного тока (рис.4.11). При уменьшении напряжения механическая характеристика 2 (рис.4.10) идет ниже естественной характеристики 1.

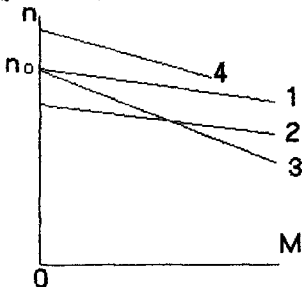


Рис.4.10

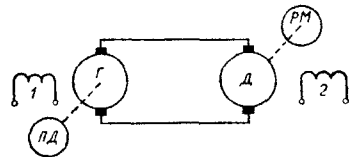


Рис 4.11

При включении добавочного сопротивления R_d в цепь якоря характеристика 3 согласно (4.25) увеличивает свой наклон.

При уменьшении тока возбуждения с помощью реостата в цепи возбуждения частота вращения двигателя возрастает (характеристика 4). Зависимость частоты вращения от тока возбуждения $n=f(I_B)$ имеет вид гиперболы. При малых значениях тока возбуждения, а тем более при обрыве цепи возбуждения частота вращения резко увеличивается, что может привести к «разносу» двигателя и механическому разрушению.

Двигатели параллельного и независимого возбуждения благодаря линейности и жесткости механических характеристик, а также возможности плавного регулирования частоты вращения в широких пределах получили распространение как в силовом электроприводе (для привода механизмов и станков), так и в схемах автоматики.

Двигатель последовательного возбуждения

В этих двигателях обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря (рис.4.5,г) и ток возбуждения равен току якоря $I_b = I_a$, что придает двигателям особые свойства. При небольших нагрузках, когда магнитная цепь машины ненасыщена ($\Phi \equiv I_a$), электромагнитный момент пропорционален квадрату тока якоря:

$$M = C_M \Phi I_a = C'_M I_a^2. \quad (4.29)$$

С увеличением нагрузки магнитная цепь машины насыщается и пропорциональность между потоком Φ и током I_a нарушается. Зависимость электромагнитного момента M от тока якоря I_a в начальной части (когда нет насыщения) имеет форму параболы, а в области больших нагрузок переходит в прямую (рис.4.12).

Зависимость частоты вращения n от тока якоря I_a (скоростная характеристика) определяется выражением $n = (U - I_a \Sigma r) / (C, \Phi)$, где

Σr – суммарное сопротивление якорной цепи и обмотки возбуждения.

В области небольших нагрузок, когда магнитная система машины ненасыщена и $\Phi \equiv I_a$ эта характеристика имеет вид гиперболы; с увеличением нагрузки растет насыщение и характеристика становится более пологой. Следует обратить внимание на недопустимость работы двигателя последовательного возбуждения в режиме холостого хода или с нагрузкой менее 25 % от номинальной, так как при этом магнитный поток слишком мал и частота вращения достигает чрезмерно больших значений, что ведет к «разносу» двигателя.

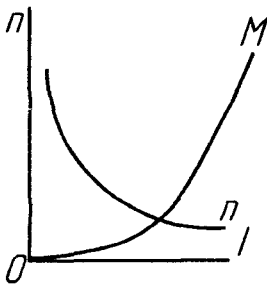


Рис.4.12

Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения $n=f(M)$ при $U=\text{const}$ имеет вид гиперболы (рис.4.15, кривая 3) аналогично скоростной характеристике $n=f(I_{\text{я}})$ (рис.4.12).

Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения возможно изменением напряжения питания U , включением добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$ в цепь якоря и изменением величины магнитного потока Φ

Первые два способа регулирования производятся также, как в двигателе параллельного возбуждения.

В транспортных установках, где на каждой ведущей оси устанавливается отдельный двигатель, регулирование частоты вращения изменением напряжения питания осуществляется путем переключения двигателей с параллельного включения в сеть на последовательное (рис.4.13).

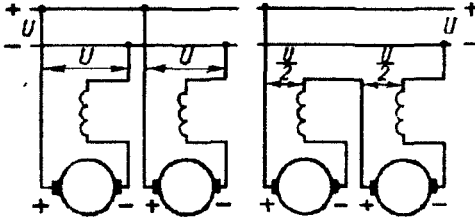


Рис 4 13

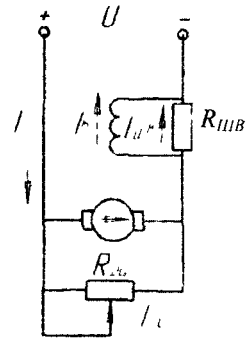


Рис 4 14

При введении добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$ в цепь якоря механическая характеристика смещается в область меньших частот вращения.

При регулировании частоты вращения изменением магнитного потока Φ возможны два случая (рис.4.14). В первом случае реостат $R_{\text{ШВ}}$ включается параллельно обмотке возбуждения, что вызывает уменьшение тока возбуждения $I_{\text{в}}=I-I_{\text{ШВ}}$ и увеличение частоты вращения. Во втором случае реостат $R_{\text{Шя}}$ включается параллельно обмотке якоря, что сопровождается увеличением тока возбуждения $I_{\text{в}}=I_{\text{я}}+I_{\text{Шя}}$ и снижением частоты вращения. Однако значительные потери в реостате $R_{\text{Шя}}$ делают этот способ неэкономичным, что ограничивает его применение.

Способность двигателей последовательного возбуждения развивать большой электромагнитный момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки, обеспечивает этим двигателям хорошие пусковые свойства - пусковой момент при сравнительно малом токе. Благодаря хорошим пусковым свойствам и мягкой механической характеристике с глубоким изменением скорости, эти двигатели широко применяются на транспорте.

Двигатель смешанного возбуждения

Двигатель имеет две обмотки возбуждения: последовательную и параллельную (рис.4.5,д). При встречном включении обмоток магнитный поток с увеличением нагрузки будет уменьшаться, что приведет к возрастанию частоты вращения (4.29) и работа двигателя будет неустойчивой, поэтому встречное включение обмоток не применяется. При согласном включении обмоток механическая характеристика 2 (рис.4.15) двигателя смешанного возбуждения более мягкая, чем характеристика 1 двигателя параллельного

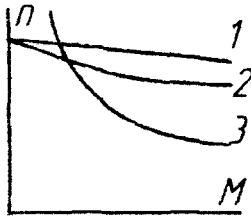


Рис.4.15

возбуждения, но более жесткая, чем характеристика 3 двигателя последовательного возбуждения. Двигатели смешанного возбуждения применяются для привода компрессоров, строгальных станков, печатных машин, прокатных станов, подъемников и т.д.

Вопросы для самопроверки

1. Как классифицируются машины постоянного тока по способу возбуждения? Изобразите электрические схемы.
2. Объясните принцип работы в режиме генератора и двигателя.
3. Напишите формулу ЭДС и формулу электромагнитного момента.
4. Каким мнемоническим правилом определяются направление ЭДС в обмотке якоря и направление электромагнитных сил и момента?
5. Изобразите внешнюю характеристику для генераторов с независимым и параллельным возбуждением.
6. Напишите уравнения напряжений для генератора и двигателя.
7. Напишите уравнения токов для машины с параллельным возбуждением, работающей в режиме генератора и в режиме двигателя.
8. Изобразите зависимости $M = f_1(I_a)$ и $n = f_2(I_a)$ для двигателя с параллельным и последовательным возбуждением.
9. Напишите формулу механической характеристики двигателя. Начертите механические характеристики двигателей с параллельным и последовательным возбуждением.
10. Перечислите способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока и укажите преимущества и недостатки этих способов
11. Начертите три механические характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением - естественную и две искусственные при включении добавочного сопротивления: а) в цепь якоря; б) в цепь возбуждения.

Заключение

Электрические машины составляют основу электроэнергетики, как в процессе производства, так и в процессе потребления электроэнергии во всех отраслях промышленности и транспорта.

Синхронные генераторы вырабатывают практически всю электроэнергию. С помощью трансформаторов электроэнергия передается на место потребления. Электродвигатель – основа электропривода рабочих машин. Асинхронные двигатели составляют основной парк всех электрических машин. Двигатели постоянного тока

- это тяговые машины транспорта.

Совершенствование электрических машин с целью увеличения технико-экономических показателей ведется как в области улучшения технологии изготовления, так и в области повышения качества магнитных и электроизоляционных материалов.

Особенно перспективным направлением является переход к новым, нетрадиционным, принципам исполнения электрических машин. Сюда относятся магнитогидродинамические, криогенные и другие типы электрических машин.

Обмотки криогенных машин изготавливаются из сверхпроводников и при низкой температуре обладают сверхпроводимостью, не имея электрических потерь, что повышает КПД машины.

Магнитогидродинамический (МГД) генератор позволяет тепловую энергию преобразовывать непосредственно в электрическую. Принцип действия основан на том, что при движении рабочего тела (электролита, жидкого металла и т.п.) в магнитном поле в рабочем теле индуцируется ЭДС и возникает ток, который с помощью специальных электродов отводится во внешнюю электрическую цепь.

МГД-двигатели применяются для перемещения электропроводных жидкостей и обычно называются МГД-насосами. Например, их можно использовать для перемещения расплавленного металла в литейном производстве.

Принятые сокращения

АД – асинхронный двигатель

ГПТ – генератор постоянного тока

ДПТ – двигатель постоянного тока

к з. – короткое замыкание

МДС – магнитодвижущая сила

МПТ – машина постоянного тока

ОВ – обмотка возбуждения

СГ – синхронный генератор

СД – синхронный двигатель

СМ – синхронная машина

Т – трансформатор

ЭДС – электродвижущая сила

х.х. – холостой ход

х.х.х.- характеристика холостого хода

Глоссарий

А

Асинхронная машина – машина переменного тока, частота вращения которой отлична от синхронной.

В

Внешняя характеристика – зависимость выходного напряжения от нагрузки.

Векторная диаграмма – совокупность векторов, изображающих синусоидальные напряжения и токи одной частоты, выходящих из одной точки.

З

«Звезда» - вид соединения трёхфазной обмотки, когда концы фаз соединяются вместе, в одну точку.

К

Клосса формула – приближенная формула для расчета механической характеристики АД.

Коммутация – процесс прохождения проводника под щеткой.

Короткозамкнутый (к.з.) ротор имеет обмотку в виде «беличьей» клетки, концы стержней такой обмотки с обоих торцов соединены коротко кольцами, поэтому обмотка не имеет выводов.

Коэффициент мощности – это $\cos\varphi$. Он определяется характером нагрузки. Например, при активной нагрузке $\cos\varphi = 1$.

Коэффициент нагрузки – отношение тока нагрузки к номинальному току.

Коэффициент трансформации равен отношению ЭДС обмоток. Эксплуатационный коэффициент трансформации определяют по отношению линейных ЭДС.

Критический момент асинхронной машины – это максимальный момент.

Коэффициент полезного действия равен отношению полезной мощности к потребляемой

Критическое скольжение асинхронной машины соответствует максимальному моменту.

Н

Напряжение к.з. соответствует напряжению, при котором в режиме к.з. ток равен номинальному значению.

Номинальные данные соответствуют номинальному режиму работы.

Номинальный режим – режим, для работы в котором изготовлено электромеханическое устройство и который соответствует паспортным данным.

М

Магнитные потери – это потери в стали магнитопровода.

Механическая характеристика – это зависимость частоты вращения ротора от нагрузки на валу (момента). Механическую характеристику АД часто представляют также как зависимость момента от скольжения.

П

Потери подразделяются на основные и добавочные. Основные потери подразделяют на постоянные и переменные. Постоянные потери – это потери в стали и механические. Переменные потери – это электрические потери в обмотках.

Р

Ротор – вращающаяся часть электрической машины.

С

Синхронная машина – машина переменного тока, частота вращения которой равна синхронной.

Синхронная частота вращения – это частота вращения магнитного поля. Она определяется частотой сети и числом полюсов машины переменного тока.

Скольжение характеризует отличие частоты вращения ротора от синхронной частоты вращения.

Статор – неподвижная часть электрической машины.

Т

Трансформатор – электромагнитный статический аппарат, который преобразует параметры переменного тока: напряжение, ток, частоту вращения, число фаз.

«Треугольник» - вид соединения трёхфазной обмотки, когда начало одной фазы соединяется с концом другой фазы.

У

Условие максимума КПД соответствует равенству постоянных и переменных потерь.

Ф

Фазный ротор АД имеет трёхфазную обмотку, концы которой соединены вместе, а начала выводятся на три контактных кольца, расположенных на валу.

Х

Холостой ход – работа без нагрузки.

Э

Электрическая машина представляет собой электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механической и электрической энергии.

Я

Якорь – ротор машины постоянного тока Якорь – статор синхронной машины

Предметный указатель

- Асинхронная машина 30
 — — режим генератора 32
 — — — двигателя 32
 — — — короткого замыкания 32
 — — — противовключения 32, 43
 — — с короткозамкнутым ротором 31
 — — с фазным ротором 31
 — двигатель двухклеточный 41
 — — глубокопазный 41
 — — короткозамкнутый 31
 — — многоскоростной 42
 — — фазный 31
- Базисные величины 53
 Беличья клетка 31
- Векторная диаграмма
 синхронной машины 51
- Генератор постоянного тока 71
 Геометрическая нейтраль 75
- Двигатель постоянного тока 74, 81
 Диаграмма Blondеля 54
 — Потье 59
 Добавочные полюсы 75
- Естественная механическая
 характеристика асинхронного двигателя 40
 — — — — постоянного тока 84
- Индуктивное сопротивление обмотки
 синхронной машины 51
 — — Потье 59
 — — рассеяния асинхронного двигателя 33
 — — синхронной машины 52
 — — трансформатора 23
- Классификация машин
 постоянного тока 76
 Коллектор 71
 Коммутация 75
 Компенсатор синхронный 61
 Коэффициент обмотки возбуждения
 синхронной машины 47
 — поперечной реакции якоря 50
 — потока возбуждения синхронной
 машины 47
 — продольной реакции якоря 50
- приведения обмотки возбуждения
 синхронной машины 53
 — — сопротивления вторичной обмотки
 асинхронной машины 34
 — — трансформации асинхронной машины 34
 — — трансформатора 25
 Кратность максимального момента
 асинхронного двигателя 39
 — пускового момента асинхронного
 двигателя 39
 — — тока асинхронного двигателя 41
 Критический угол нагрузки синхронной
 машины 64
 Критическое скольжение асинхронной
 машины 39
- Магнитодвижущая сила
 обмотки возбуждения синхронной
 машины 47
 — — — якоря синхронной машины 50
 Метод двух реакций якоря 48
 Механическая характеристика асинхронного
 двигателя 38
 — — двигателя постоянного тока 81, 84
 Момент динамический 81
 — статический 81
 Мощность асинхронной машины
 — — — электромагнитная 36
 — — синхронной машины
 синхронизирующая 66
- Напряжение короткого замыкания
 трансформатора 27
 Недовозбужденная синхронная
 машина 66
 Неявнополюсная синхронная машина 46
- Обмотка в виде беличьей клетки 31
 — — — — многоскоростная 42
 — — — — пусковая 41
 Относительные единицы 53
 Отношение короткого замыкания
 синхронной машины 56
- Параллельная работа
 синхронной машины 61
 Перевозбужденная синхронная машина 66

Перегрузочная способность асинхронного двигателя 39

Потери

— в обмотках 28

— в стали 28

— переменные 28

— постоянные 28

Потье диаграмма 59

— индуктивное сопротивление 59

— треугольник 58

Приведение вторичной обмотки асинхронной машины 35

— — — трансформатора 25

Пуск асинхронного двигателя 41

— — — двигателя постоянного тока 82

Рассеяние - см. индуктивное сопротивление рассеяния

Реактивная синхронная машина 64

Реактивный вращающий момент 64

— треугольник синхронной машины 58

Реакция якоря машины постоянного тока 75

— — — синхронной машины 48

Реверсирование асинхронного двигателя 43

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя 41

— — — двигателя постоянного тока 82

Синхронная машина 45

Синхронизирующая мощность 66

Синхронизирующий момент 66

Синхронное индуктивное сопротивление 52

Синхронный генератор 45

— двигатель 45

— компенсатор 61

Скольжение ротора асинхронной машины 32

Сопротивление короткого замыкания асинхронной машины 39

— — — трансформатора 26

Статическая перегружаемость синхронной машины 66

— устойчивость синхронной машины 66

Схема замещения асинхронной машины 35,37

— — — трансформатора 24

Теория двух реакций синхронной машины 48

Ток короткого замыкания синхронного генератора 56

— якоря синхронной машины

поперечный 49

— — — — продольный 49

Торможение двигателя асинхронного 43

— — — постоянного тока 83

Трансформатор 21

Треугольник Потье 58

Угловая характеристика активной мощности синхронной машины 63

Угол нагрузки синхронной машины 54

— — — критический 64

Условие максимума КПД 28

— статической устойчивости работы синхронной машины 66

— — — — двигателя постоянного тока 82

Формула Клосса 40

Характеристики синхронного генератора 55

Характеристики генератора постоянного тока 77

Частота вращения магнитного поля 31

Электродвижущая сила (ЭДС) обмотки трансформатора 22

— — — — якоря переменного тока 33

— — — — якоря постоянного тока 73

Эквивалентная схема - см. схема замещения

Электромагнитная мощность асинхронной машины 36

Явнополюсная синхронная машина 46

Якорь машины постоянного тока 71

— синхронной машины 45

3.3. Учебное пособие (письменные лекции)

Письменные лекции содержатся в [1].

3.4. Технические и программные средства обеспечения дисциплины

3.4.1. Описание компьютерных программ по разделам дисциплины

При выполнении расчетов лабораторных работ можно использовать стандартную программу MathCad.

3.4.2. Перечень расчетных программ

Расчетные программы для оформления лабораторных работ, выполненные в стандартной программе MathCad, приводятся в разделе 3.6. «Методические указания к выполнению лабораторных работ» (п.3.6.6. «Выполнение лабораторных работ в программе MathCad»).

3.4.3. Перечень видеоматериалов

Лабораторную работу №2 «Асинхронный двигатель» можно выполнить дистанционно, если Вы обратитесь с этой просьбой к преподавателю.

3.5. Методические указания к проведению практических занятий

Практические занятия предусматривают решение задач по разделам данной дисциплины: трансформаторы, асинхронные и синхронные машины, машины постоянного тока. Ниже приводятся задачи по этим разделам и даются решения этих задач. Также приводятся примеры решения заданий контрольной работы. Сначала попробуйте выполнить задачу самостоятельно и только потом посмотрите предлагаемое решение. Такая тренировка очень поможет Вам в дальнейшем при ответах на вопросы теста и решении экзаменационной задачи.

При затруднениях обращайтесь к опорному конспекту и учебнику [1].

Раздел 1. Трансформаторы

Задача 1.1

Трёхфазный трансформатор имеет номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1H} = 10$ кВ, номинальное напряжение вторичной обмотки $U_{2H} = 400$ В. Соединение обмоток Y/Δ . Определить коэффициент трансформации.

Решение

В паспортных данных даются значения линейных напряжений, при этом буква "л" обычно опускается.

Определяем номинальные фазные напряжения обмоток. Первичная обмотка имеет соединение "звезда" (Y), поэтому фазное напряжение меньше линейного в $\sqrt{3}$ раз. В данном случае значение фазного напряжения составляет, кВ

$$U_{\phi 1H} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = 10/\sqrt{3} = 5,77.$$

Вторичная обмотка имеет соединение "треугольник" (Δ), поэтому фазное напряжение равно линейному, В.

$$U_{2\phi H} = U_{2H} = 400.$$

Коэффициент трансформации обычно вычисляют по значениям фазных напряжений, тогда

$$k = \frac{U_{\phi 1H}}{U_{\phi 2H}} = 5,77/0,4 = 14,43.$$

Обратите внимание, что оба значения напряжений необходимо задать в одинаковых единицах измерения: или в киловольтах, или вольтах.

Если определить коэффициент трансформации по линейным напряжениям, то

$$k_{л} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = 10/0,4 = 25.$$

Задача 1.2

Трёхфазный трансформатор имеет данные:
 номинальная мощность $S_H = 1000$ кВА;
 номинальное напряжение обмоток $U_{1H} = 10$ кВ, $U_{2H} = 400$ В;
 соединение обмоток Y/Δ.
 Определить токи обмоток.

Решение

В паспортных данных задается полная мощность трансформатора на вторичной обмотке $S_H = S_{2H}$.

Так как значение КПД не задано, то принимаем, что мощность первичной обмотки равна мощности вторичной обмотки S_H .

Мощность трёхфазного трансформатора определяется суммой мощностей трёх фаз

$$S_H = 3 \cdot U_{\phi H} \cdot I_{\phi H}.$$

Отсюда находим ток первичной обмотки, А

$$I_{1\phi H} = \frac{S_H}{3U_{1\phi H}} = \frac{S_H}{3U_{1H}} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1H}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 57,735.$$

При соединении в «звезду» фазный ток равен линейному, А

$$I_{1H} = 57,735.$$

Ток вторичной обмотки (соединение «треугольник»), А

$$I_{2\phi H} = \frac{S_H}{3U_{2\phi H}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{3 \cdot 400} = 833.$$

Обратите внимание, что мощность следует перевести в "Вт", так как вторичное напряжение имеет размерность "В".

Проверка: $I_{2H} = I_{1H} \cdot k = 57,735 \cdot 14,43 = 833$ А.

Фазный ток меньше линейного в $\sqrt{3}$ раз, поэтому линейный ток, А

$$I_{2H} = \sqrt{3} \cdot I_{2\phi H} = \sqrt{3} \cdot 833 = 1443.$$

Задача 1.3

Трёхфазный трансформатор имеет данные:
 номинальная мощность $S_H = 1000$ кВА;
 номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1H} = 10$ кВ;
 коэффициент мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$;
 КПД $\eta_H = 98,4$ %;
 соединение обмоток Y/Δ .
 Определить потребляемый ток.

Решение

В паспортных данных задается полная мощность трансформатора на вторичной обмотке

$$S_H = S_{2H}$$

Активная мощность нагрузки, кВт

$$P_{2H} = S_H \cdot \cos\varphi_2 = 1000 \cdot 0,8 = 800.$$

Активная мощность первичной обмотки, кВт

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta = 800 / 0,984 = 813.$$

Обратите внимание, что значение КПД в расчетных формулах необходимо задавать в относительных единицах, а не в % .

Принимаем допущение, что $\cos\varphi_1 \approx \cos\varphi_2 = 0,8$.
 Тогда потребляемая мощность, ВА

$$S_{1H} = P_{1H} / \cos\varphi_1 = 813 / 0,8 = 1016.$$

Потребляемый ток, А

$$I_{1H} = \frac{S_{1H}}{\sqrt{3}U_{1H}} = \frac{1016}{\sqrt{3} \cdot 10} = 58,67$$

Задача 1.4 (аналог задачи 1 контрольной работы)

Трехфазный силовой понижающий трансформатор имеет номинальные данные : номинальные мощность S_n и напряжение первичной обмотки U_n , процентное значение напряжения короткого замыкания u_k и тока холостого хода i_0 , потери холостого хода P_0 и короткого замыкания P_k

Номинальное напряжение вторичной обмотки $U_{2n} = 0,4 \text{ кВ}$. Коэффициент мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$; характер нагрузки активно-индуктивный.

Фазы первичной и вторичной обмоток соединены звездой.

Исходные данные :

$$S_n = 25 \text{ кВА}, \quad U_{1n} = 0,66 \text{ кВ}, \quad u_k = 4,5 \%, \quad \cos\varphi_2 = 0,8,$$

$$P_0 = 0,180 \text{ кВт}, \quad P_k = 0,56 \text{ кВт}, \quad i_0 = 4,8 \%$$

Требуется:

1. Определить коэффициент трансформации.
2. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания определить параметры схемы замещения. Изобразить схему замещения.
3. Рассчитать зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(\beta)$, где $\beta = S_n / S$.
Расчеты удобно производить, задаваясь значениями $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25$.

4. Построить зависимость процентного изменения напряжения на зажимах вторичной обмотки от характера нагрузки, т.е. $\Delta U = f(\varphi_2)$ при номинальном токе.

Расчеты удобно производить, задаваясь значениями $\varphi_2 = 0, 30, 60, 90^\circ$.

Решение

1. Коэффициент трансформации

$$K = U_{1n} / U_{2n} = 660 / 400 = 1,65.$$

2. Номинальный ток первичной обмотки трехфазного трансформатора при соединении фаз звездой, А

$$I_{1n} = I_{1\text{фн}} = S_n / (3U_{1\text{фн}}) = S_n / (\sqrt{3}U_{1n}) = 25000 / \sqrt{3} \cdot 660 = 21,87,$$

$$\text{где } U_{1\text{фн}} = U_{1n} / \sqrt{3} = 660 / \sqrt{3} = 381 \text{ В.}$$

3. Параметры схемы замещения

Активное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$r_k = P_k / 3I_{\text{фн}}^2 = 560 / 3 \cdot 21,87^2 = 0,39.$$

Полное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$z_k = u_k U_{1\text{фн}} / I_{1\text{фн}} = 0,045 \cdot 381 / 21,87 = 0,784.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{0,784^2 - 0,39^2} = 0,68.$$

Параметры обмоток, Ом

$$r_1 \cong r_2' = r_k / 2 = 0,195; \quad x_1 = x_1' = x_k / 2 = 0,34.$$

Полное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$z_M \cong U_{1\text{фн}} / (i_0 \cdot I_{1\text{н}}) = 381 / (0,048 \cdot 21,87) = 363.$$

Активное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$r_M \cong P_0 / 3 (i_0 I_{1\text{н}})^2 = 180 / 3 \cdot (0,048 \cdot 21,87)^2 = 54,45.$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$x_M = \sqrt{z_M^2 - r_M^2} = \sqrt{363^2 - 54,45^2} = 358,89.$$

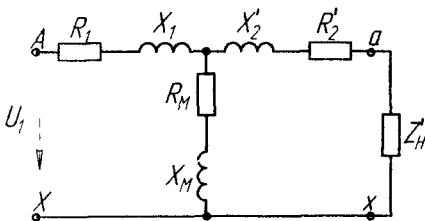


Рис.1. Схема замещения трансформатора

4. КПД трансформатора

$$\text{Расчетная формула } \eta = P_2/P_1 = \frac{\beta \cdot S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}},$$

где $P_2 = \beta S_H \cos \varphi_2$ - полезная мощность,
 $P_1 = P_2 + \Sigma P$ - потребляемая мощность,
 $\Sigma P = P_0 + \beta^2 P_{\text{кн}}$ - сумма потерь.

Расчеты зависимости КПД от нагрузки $\eta = f(\beta)$ сведены в табл 1.

Т а б л и ц а 1

Расчет зависимости $\eta = f(\beta)$, где $\beta = S/S_H$
 $\cos \varphi_2 = 0,8$; $P_0 = 0,18$ кВт

β	P_2 , кВт	$P_{\text{к}}$, кВт	ΣP , кВт	P_1 , кВт	η , %
0,25	5	0,035	0,215	5,21	95,9
0,50	10	0,14	0,320	10,32	96,9
0,75	15	0,315	0,495	15,5	96,8
1,0	20	0,56	0,74	20,07	96,4
1,25	25	0,875	1,05	26,06	96,0

5. Процентное изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки

$$\Delta U = u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2 + (u_p \cos \varphi_2 + u_a \sin \varphi_2)^2 / 200 \approx u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2,$$

где $u_a = (I_1 \cdot r_k / U_{1\text{фн}}) 100 = (21,87 \cdot 0,39 / 381) 100 = 2,2$ %.

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2} = \sqrt{4,5^2 - 2,2^2} = 3,9$$
 % .

Расчеты $\Delta U = f_2(\varphi)$ сведены в табл.2.

Т а б л и ц а 2

Изменение выходного напряжения $\Delta U = f(\varphi_2)$

φ_2	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$u_a \cos \varphi_2$	$u_p \sin \varphi_2$	ΔU , %
0	1	0	0,022	0	2,2
30	0,867	0,5	0,019	0,02	2,8
60	0,5	0,867	0,011	0,034	3,6
90	0	1	0	0,039	3,9

Раздел 2. Асинхронные двигатели

Сначала попробуйте выполнить задачу самостоятельно и только потом посмотрите предлагаемое решение. Такая тренировка очень поможет Вам в дальнейшем при ответах на вопросы теста и решении экзаменационной задачи. При затруднениях обращайтесь к опорному конспекту и учебнику [1].

Задача 2.1

В паспортных данных АД указано напряжение 380/220 В. Напряжение сети $U_{лн} = 380$ В. Выбрать необходимое соединение обмоток: "звезда" (Y) или "треугольник" (Δ).

Решение

Напряжение сети является линейным напряжением. При заданных условиях необходимо соединить фазы обмотки статора в «звезду», тогда фазное напряжение составит, В

$$U_{\text{ф1н}} = \frac{U_{лн}}{\sqrt{3}} = 380 / \sqrt{3} = 220.$$

Если соединить фазы обмотки статора в «треугольник», то фазное напряжение будет равно линейному и составит, В

$$U_{\text{ф1н}} = 380,$$

что недопустимо, так как будет превосходить паспортное значение 220 В.

Таким образом, паспортные данные напряжения 380 / 220 В означают, двигатель предназначен для работы при напряжениях сети 380 и 220 В и что фазное напряжение АД составляет 220 В. При напряжении сети 380 В обмотка статора соединяется в "звезду", а при напряжении 220 В - в "треугольник". При этом фазное напряжение в обоих случаях будет составлять 220 В.

Задача 2.2

Промышленный АД имеет номинальную частоту вращения $n = 2935$ об/мин. Определить номинальное скольжение.

Решение

Ближайшее значение синхронной частоты вращения при промышленной частоте 50 Гц составляет 3000 об/мин, что определяется формулой

$$n_1 = 60 f / p = 60 \cdot 50 / 1 = 3000 \text{ об/мин.}$$

Число полюсов данного двигателя составляет $2p=2$, т.е. это двухполюсный АД. Номинальное скольжение

$$s = (n_1 - n) / n_1 = (3000 - 2935) / 3000 = 0,022.$$

Задача 2.3

Трёхфазный АД имеет номинальные данные: напряжение 380/220 В, мощность $P_H = 15$ кВт, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,91$, КПД $\eta_H = 88 \%$. Напряжение сети $U_{1H} = 380$ В. Определить потребляемый ток.

Решение

Первичная обмотка имеет соединение "звезда" (Y), поэтому фазное напряжение меньше линейного в $\sqrt{3}$ раз и составляет, В

$$U_{\phi 1H} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = 380 / \sqrt{3} = 220.$$

Заданная в условии задачи номинальная мощность двигателя P_H является полезной механической мощностью на валу: $P_H = P_{2H}$, которая является активной мощностью. (На то, что это именно активная мощность указывает её обозначение «Р» и единица измерения – кВт. Если бы эта мощность являлась не активной, а полной мощностью, то она бы имела обозначение «S», а единицу измерения – кВА или ВА.)

Так как потребляемый ток определяется полной потребляемой электрической мощностью S_{1H} , то необходимо определить эту мощность (её единица измерения – кВА или ВА).

Сначала определим активную потребляемую электрическую мощность, кВт.

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta_H = 15 / 0,88 = 17,05.$$

Обратите внимание, что потребляемая мощность всегда больше полезной мощности из-за потерь, что учитывает значение КПД

Полная потребляемая мощность, кВА

$$S_{1H} = P_{1H} / \cos \varphi = 17,05 / 0,91 = 18,731.$$

Потребляемый ток, А

$$I_{\phi 1H} = \frac{S_{1H}}{3U_{\phi 1H}} = \frac{S_H}{\frac{3U_{1H}}{\sqrt{3}}} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1H}} = \frac{18731}{\sqrt{3} \cdot 380} = 28,5.$$

Обратите внимание, чтобы получить значение тока в амперах, значение мощности из кВА необходимо перевести в ВА, тогда в данном случае: ВА / В = А. В противном случае значение тока будет в килоамперах.

Всегда полезно проверить единицы измерения, это позволит Вам избежать ошибок в расчетах.

Задача 2.4 (аналог задачи 2 контрольной работы)

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет данные: число пар полюсов $2p$, номинальная мощность P_{2H} , линейное напряжение обмотки ротора $U_{2л}$, активные сопротивления фазы статора r_1 и ротора r_2 при 20°C , индуктивные сопротивления статора x_1 и ротора x_2 . Частота сети $f_1 = 50$ Гц, напряжение $U_1 = 380$ В.

Соединение обмоток статора и ротора "звезда". Класс нагревостойкости изоляции F, расчетная температура обмоток 115°C .

Т а б л и ц а 1

Данные асинхронного двигателя с фазным ротором

Тип двигателя	$2p$	P_{2H} кВт	U_{2H} В	r_1 Ом	r_2 Ом	x_1 Ом	x_2 Ом
4АК200М4УВ	2	22	340	0,024	0,026	0,050	0,075

Требуется:

1. Определить синхронную частоту вращения.
Определить потребляемый ток, момент и коэффициент мощности при пуске двигателя с замкнутой накоротко обмоткой ротора, т.е. без пускового реостата.
2. Определить сопротивление пускового реостата R_p при котором начальный пусковой момент имеет максимально возможное значение. Определить в этом режиме пусковой момент, ток статора и коэффициент мощности.
3. Рассчитать механические характеристики двигателя для трех значений добавочных сопротивлений в цепи ротора:
 $R_d = 0$, $R_d = R_p / 2$, $R_d = R_p$.

Решение

1. Синхронная частота вращения, об/мин

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000.$$

Активные сопротивления обмоток при 115°C , Ом

$$R_1 = r_1(235 + 115)/(235 + 20) = 0,024 \cdot 1,3725 = 0,03294;$$

$$R_2' = r_2(235 + 115)/(235 + 20) = 0,026 \cdot 1,3725 = 0,0357.$$

Полное сопротивление короткого замыкания при отсутствии пускового реостата, Ом

$$Z_K = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2} = \sqrt{R_K^2 + x_K^2} = \sqrt{0,0686^2 + 0,125^2} = 0,1426.$$

где $R_K = R_1 + R_2 = 0,03294 + 0,0357 = 0,0686$, $x_K = x_1 + x_2 = 0,50 + 0,075 = 0,125$.

Начальный пусковой ток, А

$$I_0 = \frac{U_{1\phi}}{Z_K} = \frac{220}{0,1426} = 1542,8,$$

где $U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220$ В.

Коэффициент мощности при пуске

$$\cos\varphi_{\Pi} = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{0,0686}{0,125} = 0,549.$$

Пусковой момент, Н·м

$$M_0 = \frac{pmU_{1\phi}^2 R_2}{2\pi f_1 Z_K^2} = \frac{1 \cdot 3 \cdot 220^2 \cdot 0,0357}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,1426^2} = 811,4,$$

где $m = 3$ - число фаз обмотки статора.

Критическое скольжение

$$s_K \equiv R_2' / X_K = 0,2855.$$

Максимальный момент, Н·м

$$M_K \equiv \frac{pmU_{1\phi}^2}{4\pi f_1 X_K} = \frac{1 \cdot 3 \cdot 220^2}{4\pi \cdot 50 \cdot 0,125} = 1848,7.$$

2. Сопротивление пускового реостата определяем из условия, что пусковой M_{Π} момент имеет максимально возможное значение M_K , т.е. $M_{\Pi} = M_K$, поэтому критическое скольжение

$$s_K \equiv R_2' / X_K = 1.$$

Суммарное активное сопротивление роторной цепи определяется сопротивлением обмотки ротора и сопротивлением пускового реостата

$$R_{2\Sigma} = R_2 + R_p = X_K.$$

Откуда определяем приведенное значение пускового реостата, Ом

$$R_p' = X_K - R_2' = 0,125 - 0,0357 = 0,0893.$$

Искомое сопротивление пускового реостата, Ом

$$R_p = R_p' / k^2 = 0,0893 / 1,118^2 = 0,0715,$$

где коэффициент трансформации обмоток статора и ротора

$$k = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}} = \frac{U_1}{U_{2л}} = \frac{380}{340} = 1,118.$$

Полное сопротивление короткого замыкания при наличии пускового реостата R_p , Ом

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = \sqrt{0,1579^2 + 0,125^2} = 0,2014,$$

где $R_K = R_1 + R_2' + R_p = 0,03294 + 0,0357 + 0,0898 = 0,1579$ Ом.

Начальный пусковой ток, А

$$I_{Н} = U_{1\Phi} / Z_K = 220 / 0,2014 = 1092,3.$$

Коэффициент мощности при пуске

$$\cos\varphi_K = R_K / Z_K = 0,1579 / 0,2014 = 0,784.$$

3. При добавочном сопротивлении $R_d = \frac{R_p'}{2}$ суммарное сопротивление роторной цепи, Ом

$$R_{2\Sigma} = R_2' + \frac{R_p'}{2} = 0,0357 + \frac{0,0893}{2} = 0,0803.$$

Полное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2} = \sqrt{0,1133^2 + 0,125^2} = 0,1687,$$

где $R_K = R_1 + \frac{R_p'}{2} = 0,03294 + 0,0803 = 0,1133$ Ом.

Пусковой момент, Н·м

$$M_0 = \frac{pmU_{1\phi}^2 R_2}{2\pi f_1 Z_k^2} = \frac{1 \cdot 3 \cdot 220^2 \cdot 0,0803}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,1687^2} = 1304.$$

Критическое скольжение

$$s_k \equiv R_2' / X_k = 0,0803 / 0,1687 = 0,476.$$

Расчет механической характеристики ведем по упрощенной формуле Клосса

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}.$$

Значения M_k и s_k определены ранее, причем s_k различно для каждой механической характеристики.

Необходимо отметить, что формула Клосса дает хорошие результаты расчета в рабочем диапазоне механической характеристики, однако при расчете пускового режима эта формула дает значительную погрешность, поэтому значение пускового момента принимаем по данным предыдущих расчетов.

4. Расчеты механических характеристик $M = f(s)$ для трех значений добавочных сопротивлений сведены в табл.2.

Т а б л и ц а 2

Электромагнитный момент M , Н·м

$$M_k = 1848,7 \text{ Н·м}$$

R	s									S _k
	0	0,125	0,250	0,375	0,500	0,625	0,750	0,875	1,0	
0	0	1355	1833	1782	1592	1397	1229	1090	811	0,286
$R_p / 2$	0	908	1522	1797	1846	1782	1673	1552	1304	0,476
R_p	0	455	870	1216	1479	1662	1775	1832	1849	1

Задача 2.5 (аналог лабораторной работы 2)

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором питается от трехфазной сети с линейным напряжением U_1 , частотой 50 Гц. Величины, характеризующие номинальный режим двигателя: мощность на валу $P_{2н}$, синхронная частота вращения n_1 , номинальное скольжение $s_{1н}$, коэффициент мощности $\cos\varphi_{н}$ и полезного действия $\eta_{н}$, кратности критического k_M и пускового моментов $k_{п}$, кратность пускового тока $i_{п}$ приведены в табл. 1

Соединение обмоток статора - "треугольник" (Δ).

Т а б л и ц а 1

Исходные данные для расчета

Тип двигателя	U_1 , В	$P_{2н}$, кВт	n_1 об/мин	$s_{1н}$ %	$\cos\varphi_{н}$	$\eta_{н}$ %	k_M	$k_{п}$	$i_{п}$
4А132S4УЗ	220	7,5	1500	2,9	0,86	87,5	3,0	2,2	7,5

Требуется определить:

- число пар полюсов;
- номинальную частоту вращения ротора;
- номинальный фазный ток обмотки статора;
- номинальный момент на валу;
- критическое скольжение и момент двигателя;
- пусковой момент при номинальном напряжении и снижении его значения на 10%;
- указать три характерные точки механической характеристики двигателя;
- пусковой ток;
- величину емкости блока конденсаторов, увеличивающих коэффициент мощности до 0,95 и изобразить электрическую схему двигателя с включением блока конденсаторов.

Решение

1. Число пар полюсов обмотки статора

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

2. Номинальная частота вращения ротора, об/мин

$$n_{н} = n_1(1 - s_{1н}) = 1500(1 - 0,029) = 1456,5.$$

3. Номинальное фазное напряжение, В

При соединении в Δ фазное напряжение равно линейному, В

$$U_{\phi} = U_l = 220.$$

4. Номинальный фазный ток обмотки статора, А

$$I_{\phi H} = \frac{P_{2H}}{3U_{\phi}\eta_H \cos\varphi_H} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,1.$$

5. Номинальный момент на валу, Н·м

$$M_H = \frac{P_{2H} \cdot 10^3}{\omega_H} = \frac{7500}{152,45} = 49,2.$$

где угловая частота вращения, 1/с

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1456,6}{60} = 152,45.$$

6. Критическое скольжение

$$s_{кр} = s_H (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}) = 0,029(3 + \sqrt{9 - 1}) = 0,17.$$

7. Критический момент, Н·м

$$M_{cr} = k_M M_H = 3 \cdot 49,2 = 147,6.$$

8. Пусковой момент, Н·м

При номинальном напряжении

$$M_{пн} = k_{пн} M_H = 2,2 \cdot 49,2 = 108,2;$$

при пониженном напряжении

$$M'_{пн} = M_{пн} \left(\frac{U}{U_H} \right)^2 = M_{пн} \cdot 0,9^2 = 0,81 \cdot 108,2 = 87,6.$$

9. Данные расчета механической характеристики

Параметры	Режим работы		
	Номинальный	Критический	Пусковой
s	0,029	0,17	1
M, Н·м	49,2	147,6	108,2

10. Пусковой ток, А

$$I_{п} = i_{п} I_{\phi H} = 7,5 \cdot 15,1 = 113,25.$$

11. Емкость блока конденсаторов, мкФ

$$C = \frac{P_H}{2\pi \cdot f \cdot U_1^2} (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) =$$

$$= \frac{7500}{6,28 \cdot 50 \cdot 220^2} (0,593 - 0,329) = 130,$$

где φ_1 и φ_2 - соответственно углы сдвига фаз между напряжением и током до включения и после включения блока конденсаторов, град

$$\varphi_1 = \arccos 0,86 = 30,7;$$

$$\varphi_2 = \arccos 0,95 = 18,3.$$

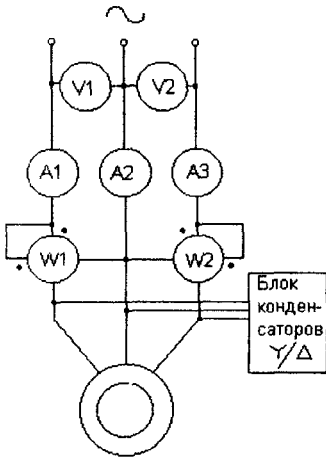


Рис.1

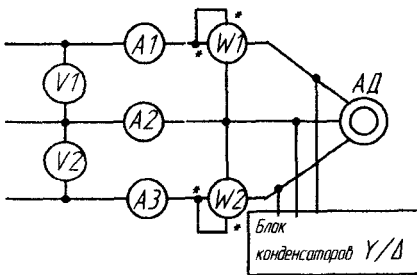


Рис. 2. Электрическая схема двигателя с блоком конденсаторов

Раздел 3. Синхронные машины

Задача 3.1

Явнополюсный синхронный генератор имеет следующие данные в относительных единицах (о.е.): номинальное напряжение $U = 1$; номинальный ток $I = 1$; номинальная ЭДС $E = 1,87$; синхронное сопротивление по продольной оси $x_d = 1,1$; синхронное сопротивление по поперечной оси $x_q = 0,75$; индуктивное сопротивление обратного следования фаз $x_2 = 0,25$; индуктивное сопротивление нулевого следования фаз $x_0 = 0,045$.

Вычислить относительное значение активной мощности в номинальном режиме, если угол нагрузки $\Theta = 20^\circ$. Определить при номинальном возбуждении в относительных единицах установившиеся токи трехфазного, двухфазного и однофазного короткого замыкания (к.з.):

Решение

1. Активная мощность в относительных единицах

$$P = \frac{E \cdot U}{x_d} \cdot \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = \frac{1,87}{1,1} 0,342 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,75} - \frac{1}{1,1} \right) 0,643 = 0,717.$$

2. Установившиеся токи при коротком замыкании в о.е.

Значение тока короткого замыкания определяется формулой

$$i_{к} = \frac{E}{Z_k},$$

где E и Z_k - ЭДС и сопротивление, соответствующее виду к. з.

Трехфазное замыкание

$$I_{K(3)} = \frac{E_K}{x_d} = \frac{1,87}{1,1} = 1,7.$$

Двухфазное замыкание

$$I_{K(2)} = \frac{E_0 \sqrt{3}}{x_d + x_2} = \frac{1,87 \sqrt{3}}{1,1 + 0,25} = 2,4.$$

Однофазное замыкание

$$I_{K(1)} = \frac{3E_0}{x_d + x_2 + x_0} = \frac{3 \cdot 1,87}{1,1 + 0,25 + 0,045} = 2,15.$$

Результаты расчетов сведены в табл.1.

Т а б л и ц а 1

Результаты расчета

Параметры	Короткое замыкание		
	трех фаз	двух фаз	одной фазы
Z_k , о.е.	1,1	1,35	1,395
E_k , о.е.	1,87	3,24	5,61
I_k , о.е.	1,7	2,4	2,15

Задача 3.2

Синхронный генератор имеет номинальную мощность 10 кВА, номинальное напряжение 380 В, синхронное индуктивное сопротивление 5 Ом. Генератор работает на чисто активную нагрузку.

Определить напряжение генератора в режиме холостого хода, если ток возбуждения в режиме холостого хода тот же, что в номинальном режиме. Сопротивлением обмотки пренебречь.

Решение

1. Ток нагрузки, А

$$I = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H} = 10000 / (1,73 \cdot 380) = 15,2.$$

2. Падение напряжения в синхронном индуктивном сопротивлении, В

$$I_H X_C = 15,2 \cdot 5 = 76.$$

3. Величина ЭДС при чисто активной нагрузке, В

$$E = \sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2 + (I_H X_C)^2} = \sqrt{220^2 + 76^2} = 233,$$

где фазное напряжение, В

$$U_\Phi = 380 / \sqrt{3} = 220.$$

4. Напряжение генератора в режиме холостого хода $U_{ХХ}$

Так как ток возбуждения остался неизменным, то выходное напряжение генератора будет равно величине ЭДС, которую имел генератор при работе под нагрузкой, следовательно, фазное напряжение, В

$$U_{ХХ} = E = 233.$$

Линейное напряжение, В

$$U = 233 \sqrt{3} = 403,5.$$

Раздел 4. Машины постоянного тока

Сначала попробуйте выполнить задачу самостоятельно и только потом посмотрите предлагаемое решение. Такая тренировка очень поможет Вам в дальнейшем при ответах на вопросы теста и решении экзаменационной задачи. При затруднениях обращайтесь к опорному конспекту и учебнику [1].

При решении задач 1...3 обратите внимание, как отличаются электрические схемы двигателя параллельного возбуждения и двигателя последовательного возбуждения.

Задача 4.1

Двигатель параллельного возбуждения имеет номинальную мощность на валу 10 кВт и частоту вращения $n_H = 955$ об/мин.

Определить пусковой момент двигателя, если пусковой ток $I_{II} = 2I_H$.

Решение

Мощность на валу двигателя является его полезной механической мощностью P_2 и определяется произведением момента нагрузки на валу M_2 и угловой частоты вращения ω :

$$P_2 = M_2 \cdot \omega.$$

Угловая частота вращения, рад/с

$$\omega_H = 2\pi n_H / 60 = 2\pi 955 / 60 = 100.$$

Номинальный момент, соответствующий номинальному току, равен, Нм

$$M_H = P_{2H} / \omega_H = 10000 / 100 = 100.$$

Обратите внимание, что при расчете значение мощности переведено из кВт в Вт, умножением на 1000.

Величина момента определяется произведением тока якоря и магнитного потока в воздушном зазоре.

Для двигателя параллельного возбуждения в данной задаче магнитный поток можно принять постоянным, а момент считать пропорциональным величине тока в первой степени. По условию задачи требуется определить пусковой момент при пусковом токе, равном $I_{II} = 2I_H$.

Следовательно, искомый пусковой момент, Нм

$$M_{II} = M_H (I_{II} / I_H) = 200.$$

Задача 4.2

Двигатель последовательного возбуждения имеет номинальную мощность на валу 10 кВт и частоту вращения $n_H = 955$ об/мин.

Определить пусковой момент двигателя, если пусковой ток $I_{II} = 2I_H$. Насыщением магнитной цепи пренебречь.

Решение

Угловая частота вращения, рад/с

$$\omega_H = 2\pi n_H / 60 = 2\pi 955 / 60 = 100.$$

Номинальный момент, соответствующий номинальному току, равен, Нм

$$M_H = P_{2H} / \omega_H = 10000 / 100 = 100.$$

Величина момента определяется произведением тока якоря и магнитного потока в воздушном зазоре.

В двигателе последовательного возбуждения ток обмотки возбуждения является током якоря, следовательно, величина магнитного потока определяется величиной тока якоря (если пренебречь насыщением магнитной цепи). Поэтому в данном случае момент можно считать пропорциональным величине тока якоря в квадрате. По условию задачи пусковой момент требуется определить при пусковом токе $I_{II} = 2I_H$.

Следовательно, искомый пусковой момент, Нм

$$M_{II} = M_H (I_{II} / I_H)^2 = 400.$$

Задача 4.3

Два двигателя одинаковой мощности работают в номинальном режиме. Один из двигателей имеет параллельное возбуждение, а другой — последовательное. Как примерно изменится потребляемый ток каждого двигателя при изменении нагрузки на валу в два раза?

Решение

Электромагнитный момент двигателя определяется моментом нагрузки на валу. Для двигателя параллельного возбуждения момент пропорционален току якоря в первой степени, поэтому величина потребляемого тока изменится в два раза (током возбуждения пренебрегаем). Для двигателя последовательного возбуждения можно принять, что момент пропорционален току якоря в квадрате (насыщением магнитной цепи пренебрегаем), поэтому величина тока изменится в $\sqrt{2}$.

Задача 4.4

Выбрать сопротивление нагрузки R_H генератора постоянного тока, так чтобы ток нагрузки не превышал 40 А при $E = 300$ В, $R_{я} = 0,5$ Ом.

Решение

Ток нагрузки определяется по формуле

$$I = E / (R_{я} + R_H).$$

Отсюда находим сопротивление нагрузки, Ом

$$R_H = (E / I) - R_{я} = (300 / 40) - 0,5 = 7.$$

Задача 4.5 (аналог задачи 3 контрольной работы)

Параметры генератора постоянного тока параллельного возбуждения приведены в табл.1. Здесь приняты обозначения : номинальная мощность генератора $P_{нг}$ и напряжение $U_{нг}$, аналогично для двигателя $P_{нд}$ и $U_{нд}$, ток возбуждения $i_{вг}$, сопротивление обмотки якоря при 15 °С $R_{я}$, частота вращения $n_{нг}$, КПД η .

При расчете пренебречь реакцией якоря и считать ток возбуждения машины постоянным.

Таблица 1

Исходные данные

$P_{нг}$, кВт	$U_{нг}$, В	$i_{вг}$, А	$n_{нг}$, об/мин	η , %	$R_{я}$, Ом	$P_{нд}$, кВт	$U_{нд}$, В
11	115	2	800	83	0,05	10	110

Требуется:

1. Определить, какую частоту вращения разовьет данная машина в качестве двигателя, считая, что КПД при номинальной нагрузке в генераторном и двигательных режимах работы равны.

2. Определить изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу (током якоря при холостом ходе пренебречь).

3. Определить, как изменится частота вращения двигателя, если подведенное к обмотке якоря напряжение уменьшится до 0,8 $U_{нд}$ при неизменном тормозном моменте, соответствующем номинальной мощности двигателя.

Решение

1. Номинальный ток машины, А:

- в режиме генератора $I_{нг} = P_{нг} / U_{нг} = 11000/115 = 95,65$;

- в режиме двигателя $I_{нд} = P_{нд} / (U_{нд}\eta) = 10000/(110 \cdot 0,83) = 109,53$.

2. Ток в обмотке якоря, А:

- в режиме генератора $I_{янд} = I_{нг} + i_{вг} = 97,65$;

- в режиме двигателя $I_{янд} = I_{нд} - i_{вд} = 107,53$,

где по условию задачи ток возбуждения остается неизменным, А

$$i_{вг} = i_{вд} = 2.$$

3. ЭДС обмотки якоря при номинальной нагрузке, В:

- в режиме генератора

$$E_{нг} = U_{нг} + I_{янг}R_{я75} + \Delta U_{щ} = 115 + 97,65 \cdot 0,062 + 2 = 123;$$

- в режиме двигателя

$$E_{нд} = U_{нд} - I_{янд}R_{я75} - \Delta U_{щ} = 110 - 107,53 \cdot 0,062 - 2 = 101,$$

где сопротивление обмотки якоря, приведенное к температуре 75 °С, Ом

$$R_{я75} = R_{я15} (235+75)/(235+15) = 0,05 \cdot 310 / 250 = 0,062.$$

Падение напряжения в переходном контакте угольно-графитных щеток принимают $\Delta U_{щ} = 2В$

4. Частоту вращения можно определить из формулы ЭДС E

$$E = c n \Phi,$$

где c - постоянный для данной машины коэффициент.

Магнитный поток Φ считаем постоянным, так как ток возбуждения по условию задачи не меняется, а реакцией якоря пренебрегаем. Таким образом, частота вращения двигателя $n_{нд}$ при номинальной нагрузке может быть найдена из соотношения

$$E_{нг} / E_{нд} = n_{нг} / n_{нд},$$

откуда номинальная частота вращения двигателя, об/мин

$$n_{нд} = n_{нг}(E_{нд} / E_{нг}) = 800 \cdot 101 / 123 = 657.$$

5. Для того, чтобы найти изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, используем уравнения ЭДС двигателя:

- при номинальной нагрузке

$$E_{нд} = U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ} = c n_{нд} \Phi;$$

- при холостом ходе, пренебрегая током якоря (по условию задачи),

$$E_{о,л} \approx U_{нд} = c n_{о,л} \Phi_0.$$

Откуда, принимая магнитный поток постоянным, получаем соотношение

$$n_{о,л} / n_{нд} = U_{нд} / E_{нд},$$

из которого определяем искомую частоту вращения двигателя при холостом ходе, об/мин

$$n_{о,л} = n_{нд} (U_{нд} / E_{нд}) = 657 \cdot 110 / 101 = 715.$$

Относительное изменение частоты вращения, %

$$\Delta = (n_{о,л} - n_{нд}) / n_{нд} 100 = (715 - 657) 100 / 657 = 9,1.$$

6. Для определения частоты вращения двигателя при пониженном напряжении, рассмотрим сначала формулу электромагнитного момента

$$M = k \Phi I_{яд},$$

где k - постоянный для данной машины коэффициент.

По условию задачи при изменении напряжения момент двигателя остается равным номинальному, и магнитный поток Φ не меняется. Отсюда следует, что ток обмотки якоря при изменении напряжения также остается постоянным, равным номинальному $I_{янд}$. Это обстоятельство позволяет записать формулы частоты вращения двигателя:

- при номинальном напряжении $U_{нд}$

$$n_{нд} = (U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ}) / c \Phi;$$

- при пониженном напряжении $0,8U_{нд}$

$$n = (0,8U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ}) / c \Phi.$$

Искомое изменение частоты вращения составляет

$$n / n_{нд} = (0,8U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ}) / (U_{нд} - I_{янд} R_{я75} - \Delta U_{щ}) = \\ = (0,8 \cdot 110 - 107,53 \cdot 0,062 - 2) / (110 - 107,53 \cdot 0,062 - 2) = 0,783.$$

3.6. Методические указания к выполнению лабораторных работ

3.6.1. Общие сведения

Лабораторную работу №2 «Асинхронный двигатель» можно выполнить дистанционно и исследовать рабочие свойства двигателя непосредственно с места Вашего нахождения, если Вы обратитесь с такой просьбой к преподавателю.


















Описание расчетно-графического выполнения лабораторных работ дается ниже, а также в [2]. При расчетах Вы можете рассмотреть примеры решения задач, приведенные в 3.5. При выполнении работы Вам потребуется выбрать измерительные приборы, перечень приборов приводится в табл.1, а также в [2].

Примеры оформления расчетно-графических работ приведены в Тетради 1. Вы можете выполнить работы в программе MathCad, примеры расчета и оформления отчетов в программе MathCad приведены в 3.6.6.

При необходимости обращайтесь к опорному конспекту и к учебнику [1].

Т а б л и ц а 1

Перечень электроизмерительных приборов

Наименование прибора	Условные обозначения	Технические данные
1 Вольтметр	 1,5 \perp	30...150 В, 24 дел.
2 Вольтметр	 1,5 \perp	50...250В, 24дел.
3 Вольтметр	 1,5 \perp	50...450 В, 40 дел.
4 Вольтметр	 1,5 \perp	0...150 В, 30 дел.
5 Вольтметр	 1,5 \perp	0...250 В, 25 дел.
6 Амперметр	 1,5 \perp	0,4...2,0А 16 дел.
7 Амперметр	 1,5 \perp	1,0...5,0А, 20 дел.
8 Амперметр	 1,5 \perp	2,0...10А, 16 дел.
9 Амперметр	 1,5 \perp	4,0...20А, 16 дел.
10 Амперметр	 1,5 \perp	0...2,0А, 20 дел.
11 Амперметр	 1,5 \perp	0...10А, 20 дел.
12 Амперметр	 1,5 \perp	0...20А, 20 дел.
13 Амперметр	 1,5 \perp	0...50А, 50 дел.
14 Ваттметр	  0,5 \perp	2,5/5/10/25А, 150В, 150 дел.
15 Ваттметр	  0,5 \perp	5/10/25/50А, 300/450В, 150 дел.

3.6.2. Лабораторная работа 1 к разделу 1 «Трансформатор»

При выполнении работы Вам потребуется выбрать измерительные приборы, перечень приборов содержится в 3.6.1, а также в [2].

Выполнение работы в программе MathCad показано в 3.6.6.

При необходимости обращайтесь к опорному конспекту и учебнику [1].

Работа 1. Исследование однофазного двухобмоточного трансформатора

1. Цель работы

Расчет внешней характеристики и КПД однофазного двухобмоточного трансформатора и оценка его свойств. Определение параметров схемы замещения. Выбор электроизмерительных приборов.

2. Основные теоретические положения

Трансформатор может работать в режимах холостого хода, опытного короткого замыкания и нагрузочном. Два первых режима позволяют определить параметры схемы замещения (рис.1), с помощью которой можно рассчитать любой режим работы трансформатора.

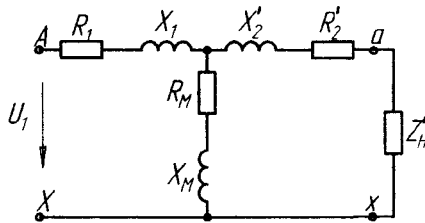


Рис. 1

Экспериментальные данные режима холостого хода позволяют вычислить коэффициент трансформации

$$k = U_{10} / U_{20};$$

активное, реактивное и полное сопротивление намагничивающего контура, эквивалентирующего магнитопровод трансформатора

$$z_m \approx U_{10} / I_{10}, \quad r_m \approx P_{10} / I_{10}^2, \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 + r_m^2};$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi_0 = P_{10} / U_{10} I_{10}.$$

Экспериментальные данные режима опытного короткого замыкания позволяют вычислить полное, активное и реактивное сопротивления короткого замыкания

$$z_k = U_{1k} / I_{1k}, \quad r_k = P_{1k} / I_{1k}^2, \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}$$

и параметры обмоток схемы замещения

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

а также коэффициент мощности

$$\cos \varphi_k = P_{1k} / U_{1k} I_{1k}.$$

По результатам расчета определяют активное и реактивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора

$$r_2 = r_2 / k_{\text{тр}}^2, \quad x_2 = x_2 / k_{\text{тр}}^2.$$

Режимы холостого хода и опытного короткого замыкания являются предельными режимами работы трансформатора. С помощью этих двух режимов могут быть определены рабочие характеристики трансформатора без включения его на нагрузку. Например, КПД трансформатора при известной номинальной мощности S_H определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_{10} + \beta^2 P_{1K}}.$$

где β - коэффициент нагрузки, равный отношению текущего значения тока в обмотке трансформатора к его номинальному значению,

$$\beta = I / I_H.$$

Изменение сопротивления нагрузки приводит к изменению величины напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Процентное изменение величины вторичного напряжения определяется выражением

$$\Delta u = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2),$$

где u_a , u_p - активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания, выраженные в процентах:

$$u_a = u_K \cos \varphi_K, \quad u_p = u_K \sin \varphi_K.$$

Величина вторичного напряжения трансформатора при изменении сопротивления нагрузки вычисляется по формуле

$$U_2 = \frac{(100 - \Delta u) U_{20}}{100}.$$

3. Схема исследования

Схема испытания однофазного двухобмоточного трансформатора представлена на рис.2. Первичная обмотка АХ трансформатора включается в сеть переменного тока с частотой 50 Гц через автотрансформатор АТ, что дает возможность широкого и плавного регулирования подводимого напряжения.

В цепи вторичной обмотки ах имеются выключатели S3 и S4, с помощью которых можно осуществить различные режимы трансформатора:

- режим холостого хода (S3 и S4 разомкнуты);
- режим короткого замыкания (S4 замкнут), S3 – разомкнут;
- режим нагрузки (S3 замкнут, S4 разомкнут).

Токи, напряжения и мощности в различных режимах работы трансформатора существенно отличаются по своим величинам, поэтому в схеме предусмотрена возможность изменения пределов измерения электрических параметров (шунтирование с помощью выключателя S2 амперметра с малым пределом измерения тока, использование многопредельных вольтметров и ваттметров).

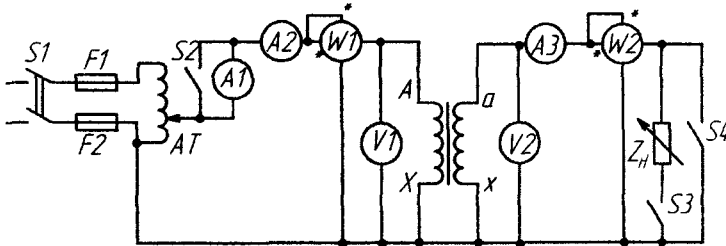


Рис. 2

4. Постановка задачи

Результаты экспериментальных исследований однофазного двухобмоточного трансформатора в режимах холостого хода и опытного короткого замыкания:

напряжение холостого хода (U_{10} , U_{20}), ток холостого хода (I_{10}) и активная мощность (P_{10}), а также напряжение короткого замыкания ($U_{1к}$) и активная мощность ($P_{1к}$) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
U_{10} , В	127	220	220	127	220	220	127	220	220	127
I_{10} , А	0,6	0,8	1,2	0,7	0,9	1,4	0,8	1,0	1,6	0,9
P_{10} , Вт	40	45	60	50	65	80	70	90	100	90
$U_{1к}$, В	10	20	30	12	24	34	12	18	28	15
$I_{1к}$, А	5,0	7,5	6	8,0	10	6	9,0	10	8	10
$P_{1к}$, Вт	45	60	80	75	90	100	75	120	140	85
U_{20} , В	80	120	150	100	170	130	90	140	160	110

По данным, приведенным в табл.1, требуется выполнить расчет внешней характеристики и КПД трансформатора от коэффициента нагрузки β при коэффициенте мощности потребителя $\cos \varphi_2 = 0,8$, характер нагрузки активно-индуктивный. Выбор варианта производится по последней цифре шифра.

5. Последовательность расчета

- Начертить схему исследования, показав на ней электроизмерительные приборы.
- Заполнить таблицу по форме 1 спецификации элементов схемы исследования.
- Изобразить схему замещения трансформатора и рассчитать её параметры.
- Задаваясь значениями β , равными 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 от номинального тока первичной обмотки, вычислить напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора, ток в ней и КПД трансформатора.
- По результатам расчета выбрать электроизмерительные приборы и составить таблицу приборов.
- Определить число делений, на которое отклоняются стрелки приборов в номинальном режиме работы трансформатора.

6. Содержание отчета

1. Цель исследований.
2. Схема исследования со спецификацией.
3. Расчет номинального режима.
4. Схема замещения трансформатора и её параметры.
5. Расчеты внешней характеристики $U_2 = f(\beta)$ и КПД $\eta = f(\beta)$.
6. Таблица технических характеристик электроизмерительных приборов.
7. Выводы по результатам расчета.

7. Оформление отчета

В Рабочей тетради 1 предлагается форма отчета по данной работе. Вы можете внести свои данные в эту форму. При расчетах необходимо подставить в формулы числовые значения величин и только после этого дать ответ.

Вы можете выполнить эту лабораторную работу в программе MathCad. Пример расчета и оформление отчета приведены в 3.6.6.

3.6.3. Лабораторная работа 2 к разделу 2 «Асинхронный двигатель»

Вы имеете возможность выполнить данную работу дистанционно непосредственно на лабораторной установке (сообщив об этом преподавателю), либо использовать расчетно-графический метод, приведенный ниже, а также в [2]. Пример выполнения расчетов приведен в 3.5 (задача 2.5).

При выполнении работы Вам потребуется выбрать измерительные приборы, перечень приборов содержится в 3.6.1, а также в [2].

Выполнение работы в программе MathCad показано в 3.6.6.

При необходимости обращайтесь к опорному конспекту и учебнику [1].

Работа 2. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

1. Цель работы

Теоретическое исследование механической характеристики и расчет емкости конденсаторов, позволяющих увеличить коэффициент мощности трехфазного асинхронного двигателя. Выбор электроизмерительных приборов.

2. Основные теоретические положения

Синхронная частота вращения n_1 , об/мин, определяется частотой питающей сети f и числом пар полюсов p двигателя

$$n_1 = 60 f / p.$$

Зависимость между n_1 и p для $f = 50$ Гц приведена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Зависимость $n_1 = f(p)$

p	1	2	3	4	5
n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750	600

Скольжение ротора при частоте вращения n

$$s = (n_1 - n) / n_1.$$

Номинальная частота вращения

$$n_H = n_1(1 - s_H).$$

Номинальная потребляемая мощность двигателя

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta.$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{1H} = P_{1H} / (\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cos \varphi_H)$$

Номинальный момент на валу

$$M_{2H} = 9550 P_{2H} / n_H .$$

Критический момент

$$M_K = k_M \cdot M_{2H},$$

где k_M - кратность максимального момента.

Пусковой момент

$$M_{П} = k_{П} \cdot M_{2H},$$

где $k_{П}$ - кратность пускового момента.

Критическое скольжение

$$s_K = s_H(k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}).$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость вращающего момента от скольжения при постоянном напряжении питания U_1 :

$$M = f(s) \text{ при } U_1 = \text{const.}$$

Иногда используют зависимость $M = f(n)$.

Частота вращения n и скольжение s связаны формулой

$$n = n_1 (1 - s).$$

Характерными точками механической характеристики являются: номинальный, критический и пусковой моменты, а также соответствующие им значения скольжения.

Для приближенных расчетов механической характеристики можно использовать приближенную формулу Клосса, Нм

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}.$$

Для повышения коэффициента мощности и компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя применяют включение конденсаторов в цепь обмотки статора. Емкость конденсатора в одной фазе вычисляется в номинальном режиме по формуле

$$C_{\phi} = I_{\text{ФК}} / (2\pi f U_{\text{ФК}}),$$

где $I_{\text{ФК}}$, $U_{\text{ФК}}$ - ток и напряжение фазы блока конденсаторов.

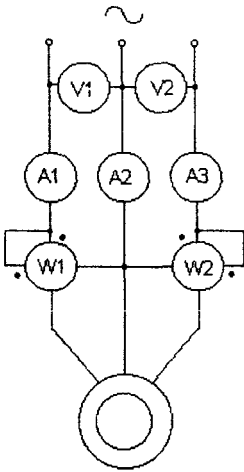


Рис. 1

Емкость блока конденсаторов

$$C = 3C_{\Phi}.$$

При соединении блока конденсаторов в "звезду"

$$I_{\Phi К} = I_{1P}, \quad U_{\Phi К} = U_{1H} \sqrt{3}.$$

При соединении блока конденсаторов в "треугольник"

$$I_{\Phi К} = I_{1P} \sqrt{3}, \quad U_{\Phi К} = U_{1H}.$$

Реактивная составляющая тока статора двигателя в номинальном режиме

$$I_{1P} = I_{1H} \sin \varphi_H.$$

Активная мощность, потребляемая двигателем, измеряется способом двух ваттметров. Показания ваттметров вычисляются по формулам

$$P_{W1} = U_1 I_1 \cos(\varphi - 30^\circ),$$

$$P_{W2} = U_1 I_1 \cos(\varphi + 30^\circ).$$

Измеренная мощность определяется алгебраической суммой показаний ваттметров

$$P_1 = P_{W1} + P_{W2}.$$

3. Схема исследования

Схема исследования трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представлена на рис.1. Обмотка статора включается в сеть переменного тока с частотой 50 Гц прямым пуском. Амперметры А1, А2, А3 измеряют ток фаз обмотки статора, вольтметры V1, V2 - линейные напряжения, ваттметры W1, W2 - активную мощность.

4. Постановка задачи

Паспортные данные асинхронного двигателя с короткозамкнутым (к.з.) ротором приведены в табл. 2, где P_{2H} - номинальная мощность двигателя, n_1 - синхронная частота вращения, η_H - номинальное значение КПД, $\cos \varphi_H$ - номинальное значение коэффициента мощности, s_H - номинальное скольжение, k_M - кратность максимального момента, k_T - кратность пускового момента. Частота сети $f = 50$ Гц, напряжение сети $U_{1H} = 380$ В, сопряжение фаз обмотки статора двигателя - «звезда».

Выбор варианта производится по последней цифре шифра.

Требуется:

- выполнить расчет и построить график механической характеристики;
- рассчитать емкость блока конденсаторов, компенсирующих потребляемую реактивную мощность двигателя. Сопряжение фаз блока конденсаторов указано в табл.2.

Паспортные данные асинхронных двигателей с к.з. ротором

Вариант	Паспортные данные асинхронных двигателей								Сопряжение фаз блока конденсаторов
	Тип двигателя	P_{2H} , кВт	n_1 , об/мин	КПД η_H , %	$\cos\varphi_H$	s_H , %	k_p	k_M	
1	4A160S2Y3	15	3000	88,0	0,91	2,1	1,4	2,2	"звезда"
2	4A160M2Y3	18,5	3000	88,5	0,92	2,1	1,4	2,2	
3	4A180S2Y3	22,0	3000	88,5	0,91	1,9	1,4	2,5	
4	4A160S4Y3	15,0	1500	88,5	0,88	2,3	1,4	2,3	
5	4A160M4Y3	18,5	1500	89,5	0,88	2,2	1,4	2,3	
6	4A180S4Y3	22,0	1500	90,0	0,90	2,0	1,4	2,3	"треугольник"
7	4A160S6Y3	11,0	1000	86,0	0,86	2,7	1,2	2,0	
8	4A160M6Y3	15,0	1000	87,5	0,87	2,6	1,2	2,0	
9	4A160M8Y3	11,0	750	87,0	0,75	2,5	1,4	2,2	
0	4A180M8Y3	15,0	750	87,0	0,82	2,6	1,2	2,0	

5. Последовательность расчета

- Начертить схему исследования, показав на ней электроизмерительные приборы, позволяющие измерить напряжение, ток и мощность двигателя.
- Заполнить таблицу спецификации элементов схемы исследования по форме 1 [2] или как в примере оформления отчета, приведенном ниже.
- Рассчитать номинальную и критическую частоту вращения двигателя, критическое скольжение.
- Определить номинальный, пусковой и критический моменты двигателя.

- Задаваясь значениями скольжения s равными 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 вычислить момент двигателя по формуле Клосса. Составить таблицу расчетов, включив данные номинального и критического режимов.
- Результаты расчета представить в виде графика механической характеристики, указав на ней номинальный, критический и пусковой режимы
- Рассчитать емкость блока конденсаторов, позволяющих компенсировать реактивную мощность двигателя.
- По результатам расчета выбрать электроизмерительные приборы из табл.1 пункта 3.6.1 и заполнить таблицу приборов.
- Определить число делений, на которое отклоняются стрелки приборов в номинальном режиме работы двигателя.

6. Содержание отчета

1. Цель исследований.
2. Схема исследования со спецификацией.
3. Расчет и график механической характеристики $M = f(s)$.
4. Расчет емкости конденсаторов.
5. Таблица технических характеристик электроизмерительных приборов.
6. Выводы по результатам расчета.
7. Список литературы, дата и подпись исполнителя.

7. Оформления отчета

Вы можете внести свои данные в форму отчета, предложенную в Тетради 1.

При расчетах необходимо подставить в формулы числовые значения величин и только после этого дать ответ. Пример расчета приведен в 3.5 (задача 2.5).

Вы можете выполнить эту работу в программе MathCad, пример расчета и оформления отчета приведен в 3.6.6.

3.6.4. Лабораторная работа 3 к разделу 4 «Машины постоянного тока»

Вы можете выполнить работу в программе MathCad, пример дан в 3.6.6.

Перечень электроизмерительных приборов приведен в 3.6.1 или в [2].

При необходимости обращайтесь к опорному конспекту и учебному пособию [1].

Работа 3. Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

1. Цель работы

Теоретическое исследование рабочих и механических характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Выбор электроизмерительных приборов.

2. Основные теоретические положения

Рабочие характеристики двигателей постоянного тока - это зависимости частоты вращения якоря n , полезного механического момента M_2 , тока якоря $I_{\text{я}}$, потребляемой электрической мощности P_1 и коэффициента полезного действия η от полезной механической мощности P_2 на валу двигателя при постоянстве напряжения U .

Частота вращения якоря, об/мин, определяется формулой

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{р\text{я}}})}{C_E \Phi},$$

где C_E - постоянный коэффициент, определяемый числом пар главных полюсов и типом обмотки якоря; Φ - основной магнитный поток машины; $I_{\text{я}}$ - ток в обмотке якоря; $R_{\text{я}}$ - сопротивление цепи якоря; $R_{\text{р\text{я}}}$ - добавочное сопротивление в цепи якоря.

Полезный механический момент, Нм, развиваемый двигателем на валу, определяется выражением

$$M_2 = 9,55 P_2 / n,$$

где P_2 - полезная мощность на валу двигателя.

Потребляемый ток

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}},$$

где $I_{\text{в}}$ - ток возбуждения.

Электрическая (потребляемая) мощность двигателя определяется произведением напряжения сети U и тока I , потребляемого от сети,

$$P_1 = UI.$$

Потери мощности классифицируются на электрические, механические и магнитные. Электрические потери зависят от тока в обмотках двигателя и определяются выражениями

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}, \quad P_{\text{в}} = U \cdot I_{\text{в}}.$$

где $I_{\text{я}}$ - значение тока в обмотке якоря.

Механические и магнитные потери не зависят от тока двигателя и поэтому являются постоянными для всех режимов работы. Величина этих потерь может быть вычислена по данным номинального режима

$$P_0 = (1 - \eta) P_{\text{ин}} - (P_{\text{я}} + P_{\text{в}}).$$

Полезная мощность определяется разностью между электрической мощностью P_1 и суммой потерь мощности в двигателе

$$P_2 = P_1 - (P_{\text{я}} + P_{\text{в}} + P_0).$$

Машинная постоянная определяется в виде

$$C_E \Phi = (U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} R_{\text{я}}) / n_{\text{н}}.$$

Частота вращения якоря двигателя при изменении момента нагрузки на валу вычисляется по формуле

$$n = n_{\text{н}} (U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / (U - I_{\text{ян}} R_{\text{я}}).$$

Механической характеристикой двигателя называют взаимосвязь частоты вращения и момента

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{M R_{\text{я}}}{C_r C_M \Phi^2},$$

где $C_M = C_E 60 / 2\pi \approx 10 C_E$.

Естественная механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения определяется при номинальных значениях напряжения на зажимах якоря и тока возбуждения

$$n = \frac{U_H}{C_1 \Phi_H} - \frac{M \cdot R_{я}}{C_1 C_M \Phi_H^2},$$

Искусственные механические характеристики :

– при пониженном напряжении U на якоре

$$n = \frac{U}{C_1 \Phi_H} - \frac{M \cdot R_{я}}{C_1 C_M \Phi_H^2};$$

– при введенном добавочном сопротивлении в цепи якоря

$$n = \frac{U_H}{C_1 \Phi_H} - \frac{M \cdot (R_{я} + R_{пЯ})}{C_1 C_M \Phi_H^2};$$

– при введении сопротивления в цепь возбуждения (ослабленный магнитный поток)

$$n = \frac{U_H}{C_1 \Phi} - \frac{M \cdot R_{я}}{C_1 C_M \Phi^2}.$$

3. Схема исследования

Схема исследования приведена на рис.1.

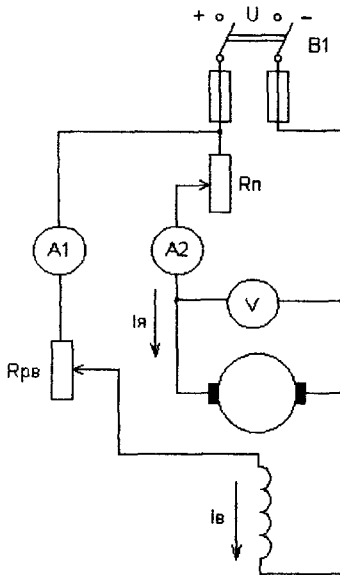


Рис.1

Для ограничения пускового тока последовательно с обмоткой якоря включают пусковой реостат $R_{пЯ}$. Сопротивление пускового реостата выбирают таким, чтобы пусковой ток не превышал $(1,5 \dots 2)I_{н}$. По мере разгона двигателя пусковой реостат плавно выводят. По окончании разгона двигателя пусковой реостат должен быть выведен полностью, так как он не рассчитан на длительное протекание тока.

Сопротивление цепи возбуждения $R_{рв}$ при пуске следует делать минимальным, чтобы ток возбуждения и магнитный поток машины были максимальными. При этом пусковой вращающий момент достигает максимального значения и двигатель быстрее разгоняется.

4. Постановка задачи

Паспортные данные двигателя постоянного тока параллельного возбуждения: номинальное напряжение на зажимах двигателя U_n , механическая (полезная) мощность P_{2n} , номинальная частота вращения якоря n_n , номинальный коэффициент полезного действия η_n , а также сопротивления цепей якоря R_a и обмотки возбуждения R_b , приведены в табл.1. Выбор варианта производится по последней цифре шифра.

Таблица 1

**Паспортные данные двигателей постоянного тока
параллельного возбуждения**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_n, В$	110	110	110	110	110	220	220	220	220	220
$P_{2n}, кВт$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
$n_n, об/мин$	1500	3000	1500	3000	1500	3000	1500	3000	1500	3000
$\eta_n, \%$	77,0	76,0	80,0	78,5	80,0	80,5	81,5	83,0	84,5	85,5
$R_a, Ом$	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6
$R_b, Ом$	120	125	130	135	140	160	175	180	185	190

5. Последовательность расчета

- Начертить схему исследования, показав на ней электроизмерительные приборы, позволяющие измерить напряжение и токи в цепях двигателя.
- Заполнить таблицу по форме 1 [2] спецификации элементов схемы исследования или аналогично примеру, приведенному в Рабочей тетради.
- Рассчитать номинальный режим работы двигателя. Вычислить электрическую мощность P_{1n} , электрические потери, механические и магнитные потери двигателя, номинальный момент M_n .
- Рассчитать и построить естественную механическую характеристику по двум точкам (холостой ход и номинальная нагрузка) и три искусственные механические характеристики для следующих случаев:

напряжение на якоре $U = 0,8U_H$;

добавочное сопротивление в цепи якоря $R_{доб} = 4R_я$;

ослабленный магнитный поток $\Phi = 0,9 \Phi_H$.

- По результатам расчета номинального режима двигателя выбрать электроизмерительные приборы из 3.6.1 или табл.1 методических указаний [2] и заполнить таблицу, приведенную в примере отчета, или по форме 2 [2].
- Определить число делений, на которое отклоняются стрелки приборов в номинальном режиме работы двигателя.

6. Содержание отчета

1. Цель исследования.
2. Схема исследования со спецификацией.
3. Расчет номинального режима работы двигателя.
4. Механические характеристики двигателя.
5. Таблица технических характеристик электроизмерительных приборов.
6. Выводы по результатам расчета.

7. Оформление отчета

Вы можете заполнить предлагаемую форму отчета в Рабочей тетради, подставив в эту форму свои данные, или выполнить отчет в программе MathCad, пример дан в 3.6.6.

3.6.5. Лабораторная работа 4 к разделу 4 «Машины постоянного тока»

При выполнении работы Вам потребуется выбрать измерительные приборы, перечень приборов содержится в 3.6.1, а также в [2].

При необходимости обращайтесь к опорному конспекту и учебнику [1].

Работа 4. Исследование двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

1. Цель работы

Теоретическое исследование рабочих и механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Выбор электроизмерительных приборов.

2. Основные теоретические положения

Основные теоретические положения для двигателей постоянного тока приведены в работе 3. Отличием двигателя последовательного возбуждения является то, что ток возбуждения I_B определяется током якоря I_A и изменяется в зависимости от момента нагрузки.

Частота вращения якоря двигателя, об/мин, определяется формулой

$$n = (U - I_A R_A) / C_e \Phi ,$$

где I_A - текущее значение тока в обмотке якоря, принимаемое при расчете равным 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 от номинального значения тока якоря.

Машинная постоянная для номинального режима определяется в виде

$$C_e \Phi_N = (U_N - I_{AN} (R_A + R_B)) / n_N .$$

На практике наибольшее применение нашли способы регулировки скорости изменением напряжения питания U и шунтированием обмотки возбуждения, как показано на рис. 1.

Частота вращения якоря в общем случае может быть определена в виде

$$n = n_N \frac{U - k_I I_{AN} (R_A + R_B)}{k_\Phi \cdot (U_N - I_{AN} (R_A + R_B))} ,$$

где $k_I = I_A / I_{AN}$ - относительное значение тока якоря,

$k_\Phi = \Phi / \Phi_N$ - относительное значение магнитного потока ,

$k_B = R_{шВ} / (R_B + R_{шВ})$ - коэффициент ослабления возбуждения,

$R_{\text{я}}$ и $R_{\text{в}}$ - сопротивления цепи якоря и обмотки возбуждения,

$R_{\text{шв}}$ - сопротивление шунтирующего реостата.

Значение $k_{\Phi} = f(I_{\text{в}} / I_{\text{вн}})$ может быть определено из табл. 2, где

$$I_{\text{в}} / I_{\text{вн}} = k_{\text{в}} k_{\text{л}}.$$

Т а б л и ц а 2

Зависимость $k_{\Phi} = f(I_{\text{в}} / I_{\text{вн}})$

$I_{\text{в}} / I_{\text{вн}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
k_{Φ}	0,05	0,45	0,73	0,88	0,95	1,0	1,03	1,06	1,08	1,09	1,1

Механическая характеристика определяется взаимосвязью скорости и момента. Величину момента можно вычислить по формуле

$$M = C_{\text{м}} \Phi_{\text{н}} I_{\text{н}} k_{\text{л}} k_{\Phi},$$

где $C_{\text{м}} = C_{\text{е}} 60 / 2\pi \approx 10 C_{\text{е}}$.

Естественная механическая характеристика двигателя определяется при номинальных значениях напряжения на зажимах якоря и отсутствии шунтирующих реостатов.

Частота вращения определяется по формуле

$$n = n_{\text{н}} \frac{U_{\text{н}} k_{\text{л}} k_{\text{л}} I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + R)}{k_{\Phi} \cdot (U_{\text{н}} - I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + R))}.$$

Отношение токов $I_{\text{в}} / I_{\text{вн}} = k_{\text{л}}$.

Искусственные механические характеристики определяются по формуле

$$n = n_{\text{н}} \frac{U - k_{\text{л}} I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + R)}{k_{\Phi} \cdot (U_{\text{н}} - I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + R))}.$$

Отношение токов:

- при пониженном напряжении U на якоре

$$I_{\text{в}} / I_{\text{вн}} = k_{\text{л}},$$

- при шунтировании обмотки возбуждения (ослабленный магнитный поток)

$$I_{\text{в}} / I_{\text{вн}} = k_{\text{в}} k_{\text{л}}.$$

3. Схема исследования

Схема исследования приведена на рис.2.

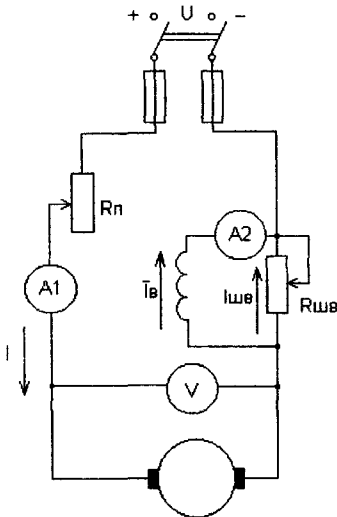


Рис.2

4. Постановка задачи

Паспортные данные двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведены в табл.3:

напряжение на зажимах двигателя U_H , механическая мощность P_{2H} , частота вращения якоря n_H , коэффициент полезного действия η_H , сопротивления цепей якоря R_A и возбуждения R_B .

Номер варианта выбирается по последней цифре шифра студента.

Требуется рассчитать механические характеристики двигателя.

Для ограничения пускового тока последовательно с обмоткой якоря включают пусковой реостат R_H . Сопротивление пускового реостата выбирают таким, чтобы пусковой ток не превышал $(1,5...2)I_H$. По мере разгона двигателя пусковой реостат плавно выводят. По окончании разгона двигателя пусковой реостат должен быть выведен полностью, так как он не рассчитан на длительное протекание тока.

Сопротивление $R_{шв}$ шунтирует обмотку возбуждения и позволяет изменять ток возбуждения и регулировать частоту вращения.

Таблица 3

**Паспортные данные двигателей постоянного тока
последовательного возбуждения**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$U_H, В$	110	110	110	110	110	220	220	220	220	220
$P_{2H}, кВт$	1,1	1,25	1,5	1,7	1,9	1,1	1,25	1,5	1,7	1,9
$n_H, об/мин$	1500	1000	1500	960	750	1500	1000	1500	960	750
$\eta_H, \%$	72,5	68,5	70,0	77,0	71,0	74,0	70,0	72,0	79,0	73,0
$R_{я}, Ом$	0,52	0,52	0,42	0,29	0,32	2,2	2,34	1,77	1,17	1,28
$R_B, Ом$	0,48	0,38	0,30	0,21	0,28	1,4	1,16	1,23	0,83	0,92

5. Последовательность расчета

- Начертить схему исследования с электроизмерительными приборами.
- Заполнить таблицу по форме 1 спецификации элементов схемы.
- По данным, приведенным в табл. 3, выполнить расчет естественной механической характеристики (напряжение на якоре $U = U_H$, без шунтирования обмотки возбуждения) и двух искусственных характеристик:
 - напряжение на якоре $U = 0,8U_H$, без шунтирования обмотки возбуждения;
 - напряжение на якоре $U = U_H$, сопротивление шунта $R_{ШВ} = R_B$, задаваясь значениями тока 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 от номинального.
- Сравнить частоту вращения двигателя при номинальном моменте для естественной механической характеристики (напряжение на якоре $U = U_H$, без шунтирования обмотки возбуждения) и двух искусственных характеристик:
 - напряжение на якоре $U = 0,8U_H$, без шунтирования обмотки возбуждения;
 - напряжение на якоре $U = U_H$, сопротивление шунта $R_{ШВ} = R_B$.
- Для номинального режима работы выбрать электроизмерительные приборы и определить числа делений, на которые отклоняются стрелки приборов.
- Заполнить таблицу по форме 2, отражающую параметры приборов.

6. Содержание отчета

1. Цель исследования.
2. Схема исследования со спецификацией.
3. Расчет номинального режима работы.
4. Рабочие характеристики двигателя.
5. Расчет частоты вращения для естественной и двух механических характеристик при номинальном моменте.
6. Таблица технических характеристик электроизмерительных приборов.
7. Выводы по результатам расчета.
8. Список литературы, дата и подпись исполнителя.

7. Оформления отчета

Вы можете заполнить предлагаемую форму отчета в Рабочей тетради 1, подставив в эту форму свои данные.

3.6.6. Выполнение лабораторных работ в программе MathCad

3.6.6.1. Работа 1. Исследование однофазного двухобмоточного трансформатора

Экспериментальные данные

	Режим работы	
	режим х.х.	режим к.з
Напряжение первичной обмотки	$U_{10} := 220 \text{ В}$	$U_{1к} := 24 \text{ В}$
Напряжение вторичной обмотки	$U_{20} := 170 \text{ В}$	$U_{2к} := 0 \text{ В}$
Ток первичной обмотки	$I_{10} := 0.9 \text{ А}$	$I_{1к} := 10 \text{ А}$
Ток вторичной обмотки	$I_{20} := 0$	$I_{2к} \text{ А}$
Активная мощность	$P_{10} := 65 \text{ Вт}$	$P_{1к} := 90 \text{ Вт}$

Номинальные данные трансформатора

Напряжение первичной обмотки	$U_{1Н} := U_{10}$	$U_{1Н} = 220 \text{ В}$
Напряжение вторичной обмотки	$U_{2Н} := U_{20}$	$U_{2Н} = 170 \text{ В}$
Ток первичной обмотки	$I_{1Н} := I_{1к}$	$I_{1Н} = 10 \text{ А}$
Мощность	$S_{1Н} := U_{1Н} \cdot I_{1Н}$	$S_{1Н} = 2200 \text{ Вт}$
Ток холостого хода	$i_0 := \frac{I_{10}}{I_{1Н}} \cdot 100$	$i_0 := 12.8 \text{ А}$
Напряжение короткого замыкания	$u_{к} := \frac{U_{1к}}{U_{10}} \cdot 100 \%$	

Расчетные формулы:

Коэффициент трансформации

$$k := \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad k = 1.29 \quad I_{2Н} := I_{1Н} \cdot k \quad I_{2Н} = 12.94 \text{ А}$$

Параметры схемы замещения:

активное, реактивное и полное сопротивления намагничивающего контура, эквивалентирующего магнитопровод трансформатора, Ом

$$z_M := \frac{U_{10}}{I_{10}} \quad z_M = 244.44 \quad r_M := \frac{P_{10}}{I_{10}^2} \quad r_M = 80.25 \quad x_M := \sqrt{z_M^2 - r_M^2} \quad x_M = 230.9$$

полное, активное и реактивное сопротивления короткого замыкания, Ом

$$z_k := \frac{U_{1k}}{I_{1k}} \quad z_k = 2.4 \quad r_k := \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2} \quad r_k = 0.9 \quad x_k := \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad x_k = 2.22$$

параметры обмоток схемы замещения, Ом

$$r_1 := \frac{r_k}{2} \quad r_1 = 0.45 \quad x_1 := \frac{x_k}{2} \quad x_1 = 1.11$$

коэффициент мощности в режиме к.з.

$$\cos\phi_k := \frac{P_{1k}}{U_{1k} \cdot I_{1k}} \quad \cos\phi_k = 0.38 \quad \sin\phi_k := \sqrt{1 - \cos\phi_k^2} \quad \sin\phi_k = 0.93$$

Напряжение к.з., %

$$u_a := u_k \cdot \cos\phi_k \quad u_a = 4.09$$

$$u_p := u_k \cdot \sin\phi_k \quad u_p = 10.11$$

Расчет внешней характеристики

$$\Delta u(\beta) := \beta \cdot (u_a \cdot \cos\phi_k + u_p \cdot \sin\phi_k)$$

$$U_2(\beta) := \frac{(100 - \Delta u(\beta)) \cdot U_{20}}{100}$$

$$I_2(\beta) := \beta \cdot I_{2H}$$

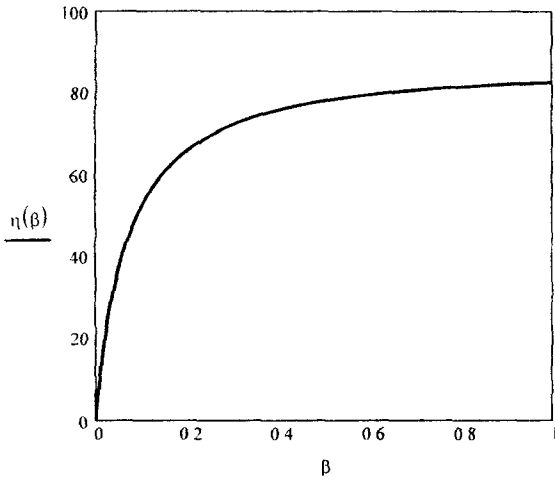
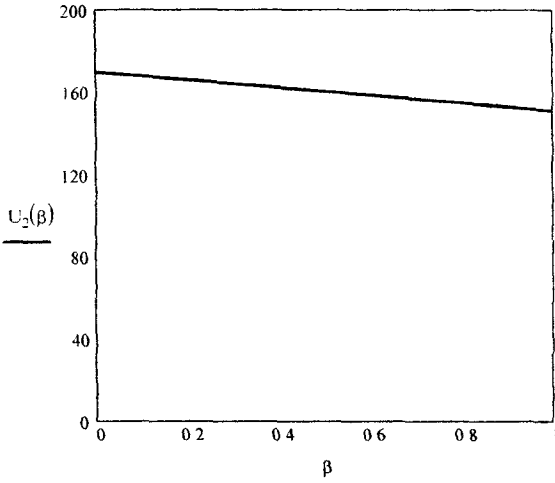
Расчет КПД

$$P_2(\beta) := I_2(\beta) \cdot U_2(\beta) \cdot \cos\phi_k$$

$$P_1(\beta) := P_2(\beta) + P_{10} + \beta \cdot P_{1k} \quad \eta(\beta) := \frac{P_2(\beta)}{P_1(\beta)} \cdot 100$$

$$\beta := 0, 0.2 \dots 1$$

$\beta =$	$I_2(\beta) =$	$P_2(\beta) =$	$P_1(\beta) =$	$\Delta u(\beta) =$	$U_2(\beta) =$	$\eta(\beta) =$
0	0	0	65	0	170	0
0.2	2 59	161.4	244.4	2.18	166.29	66.04
0.4	5.18	315.6	416.6	4.36	162.58	75.76
0.6	7.76	462.6	581.6	6.55	158.87	79.54
0.8	10.35	602.4	739.4	8.73	155.16	81.47
1	12.94	735	890	10.91	151.45	82.58



3.6.6.2. Работа 2. Исследование трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Исходные данные:

Тип двигателя 4A160S2Y3	$p := 1$
Номинальное напряжение	$U_{1H} := 380 \text{ В}$
Номинальная мощность двигателя	$P_{2H} := 15000 \text{ Вт}$
Синхронная частота вращения	$n_1 := 3000 \text{ об/мин}$
Номинальное значение КПД	$\eta_H := 0.88$
Номинальное значение коэффициента мощности	$\cos\phi_H := 0.91$
Номинальное скольжение	$s_H := 0.021$
Кратность пускового момента	$k_H := 1.4$
Кратность максимального момента	$k_M := 2.2$
Частота сети	$f := 50 \text{ Гц}$
Сопряжение фаз обмотки статора двигателя	"звезда"
Сопряжение фаз блока конденсаторов	"треугольник"

Решение

Номинальная частота вращения , об/мин

$$n_H := n_1 \cdot (1 - s_H) \quad n_H = 2937$$

Номинальная активная потребляемая мощность двигателя, Вт

$$P_{1H} := \frac{P_{2H}}{\eta_H} \quad P_{1H} = 17045.455$$

Номинальная полная потребляемая мощность двигателя, ВА

$$S_{1H} := \frac{P_{1H}}{\eta_H \cdot \cos\phi_H} \quad S_{1H} = 18731.269$$

Номинальный ток двигателя, А

$$I_{1H} := \frac{S_{1H}}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}} \quad I_{1H} = 28.459$$

Номинальный момент на валу, Нм

$$M_{2H} := \frac{9.55 \cdot P_{2H}}{n_H} \quad M_{2H} = 48.774$$

Критический момент на валу, Нм

$$M_k := k_M \cdot M_{2H} \quad M_k = 107.303$$

Пусковой момент на валу, Нм

$$M_{п} := k_{п} \cdot M_{2H} \quad M_{п} = 68.284$$

Критическое скольжение

$$s_k := s_H \left(k_M + \sqrt{k_M^2 - 1} \right) \quad s_k = 0.087$$

Частота вращения при скольжении s, об/мин

$$n := n_1 \cdot (1 - s_k) \quad n = 2737.946$$

Расчет механической характеристики производится по формуле

$$M(s) := \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \quad s := 0, 0.01 \dots 1$$

Результаты расчета

$$M(0) := 0$$

$$M(s_H) = 48.774$$

$$M(s_k) = 107.303$$

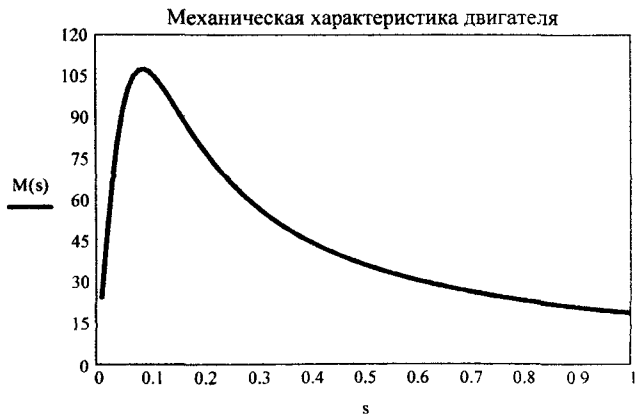
$$M(0.2) = 78.716$$

$$M(0.4) = 44.732$$

$$M(0.6) = 30.595$$

$$M(0.8) = 23.157$$

$$M(1.0) = 18.604$$



Расчет емкости конденсаторов

Реактивная составляющая тока статора двигателя в номинальном режиме, А

$$\cos\phi_H = 0.91 \quad \phi_H := \arccos(0.91) \quad \phi_H = 24.495 \text{ deg} \quad \sin(\phi_H) = 0.415$$

$$I_{IP} := I_{IH} \cdot \sin(\phi_H) \quad I_{IP} = 11.799$$

Сопряжение фаз блока конденсаторов

"звезда"

$$I_{\Phi K} := I_{IP} \quad I_{\Phi K} = 11.799 \quad U_{\Phi K} := \frac{U_{IH}}{\sqrt{3}} \quad U_{\Phi K} = 219.393$$

"треугольник"

$$I_{\Phi K} := \frac{I_{IP}}{\sqrt{3}} \quad I_{\Phi K} = 6.812 \quad U_{\Phi K} := U_{IH} \quad U_{\Phi K} = 380$$

Емкость конденсатора в одной фазе в номинальном режиме, мкФ

$$C_{\Phi} := \frac{I_{\Phi K} \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{\Phi K}} \quad C_{\Phi} = 57.065$$

Емкость блока конденсаторов, мкФ

$$C := 3 \cdot C_{\Phi} \quad C = 171.194$$

3.6.6.3. Работа 3. Исследование двигателя постоянного параллельного возбуждения

Исходные данные:

Номинальное напряжение $U_H := 110 \text{ В}$ Механическая (полезная)
мощность $P_{2H} := 1400 \text{ Вт}$ Номинальная частота
вращения якоря $n_H := 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ Номинальный коэффициент
полезного действия $\eta_H := 0.80$

Сопротивление цепи якоря

 $R_{\text{я}} := 0.8 \text{ Ом}$ Сопротивление обмотки
возбуждения $R_{\text{в}} := 130 \text{ Ом}$ Решение

1. Расчет номинального режима двигателя

Потребляемая мощность, Вт

$$P_{1H} := \frac{P_{2H}}{\eta_H} \quad P_{1H} = 1750$$

Потребляемый ток, А

$$I_H := \frac{P_{1H}}{U_H} \quad I_H = 15.909$$

Ток возбуждения, А

$$I_{\text{вН}} := \frac{U_H}{R_{\text{в}}} \quad I_{\text{вН}} = 0.846$$

Ток якоря, А

$$I_{\text{ян}} := I_H - I_{\text{вН}} \quad I_{\text{ян}} = 15.063$$

Электрические потери в обмотке возбуждения, Вт

$$P_{\text{вН}} := U_H \cdot I_{\text{вН}} \quad P_{\text{вН}} = 93.077$$

Электрические потери в обмотке якоря, Вт

$$P_{\text{ян}} := I_{\text{ян}}^2 \cdot R_{\text{я}} \quad P_{\text{ян}} = 181.514$$

Суммарные потери двигателя, Вт

$$\Delta P_{\text{H}} := P_{1\text{H}} - P_{2\text{H}} \quad \Delta P_{\text{H}} = 350$$

Механические и магнитные потери, Вт

$$P_{0\text{H}} := \Delta P_{\text{H}} - P_{\text{ВН}} - P_{\text{ян}} \quad P_{0\text{H}} = 75.409$$

Полезный механический момент, Нм

$$M_{2\text{H}} := 9.55 \cdot \frac{P_{2\text{H}}}{n_{\text{H}}} \quad M_{2\text{H}} = 8.913$$

2. Расчет механических характеристик

$$C\Phi := \frac{U_{\text{H}} - I_{\text{ян}} \cdot R_{\text{я}}}{n_{\text{H}}} \quad C\Phi = 0.065$$

Частота вращения при х.х., об/мин

$$n_0 := \frac{U_{\text{H}}}{C\Phi} \quad n_0 = 1684.539$$

Естественная механическая характеристика

(характеристика 1)

$$n := \frac{U_{\text{H}}}{C\Phi} - \frac{M_{2\text{H}} \cdot R_{\text{я}}}{(C\Phi)^2 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi}} \quad n = 1509.419$$

Искусственные механические характеристики:
при пониженном напряжении на якоре

$U := 0.8 \cdot U_{\text{H}}$ (характеристика 2)

$$n := \frac{U}{C\Phi} - \frac{M_{2\text{H}} \cdot R_{\text{я}}}{(C\Phi)^2 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi}} \quad n = 1172.511$$

$$\text{х х } n_{0\text{H}U} := \frac{U}{C\Phi} \quad n_{0\text{H}U} = 1347.631$$

при введенном сопротивлении в цепи якоря $R_{\text{ря}} := 4 \cdot R_{\text{я}}$ $R_{\text{ря}} = 3.2$ (характеристика 3)

$$n := \frac{U_{\text{H}}}{C\Phi} - \frac{M_{2\text{H}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{ря}})}{(C\Phi)^2 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi}} \quad n = 808.939$$

при введении сопротивления в цепь возбуждения
(ослабленный магнитный поток $\Phi = 0.9\Phi_{\text{H}}$)

(характеристика 4)

$$n := \frac{U_H}{C\Phi \cdot 0.9} - \frac{M_{2H} \cdot R_{\text{я}}}{(C\Phi)^2 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot 0.81} \quad 1655.513$$

$$\text{x x. } n_{09\Phi} := \frac{U_H}{C\Phi \cdot 0.9} \quad n_{09\Phi} = 1871.71$$

Построение графиков

$$M_{2H} := 0, M_{2H} .. M_{2H}$$

характеристика 1

(характеристика 3)

$$n_e(M_{2H}) := \frac{U_H}{C\Phi} - \frac{M_{2H} \cdot R_{\text{я}}}{(C\Phi)^2 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi}}$$

$$n_e(M_{2H}) = \begin{array}{|c|} \hline 1684.539 \\ \hline 1509.419 \\ \hline \end{array}$$

$$n_1(M_{2H}) := \frac{U_H}{C\Phi} - \frac{M_{2H} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{р\text{я}}})}{(C\Phi)^2 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi}}$$

$$n_1(M_{2H}) = \begin{array}{|c|} \hline 1684.539 \\ \hline 808.939 \\ \hline \end{array}$$

характеристика 2

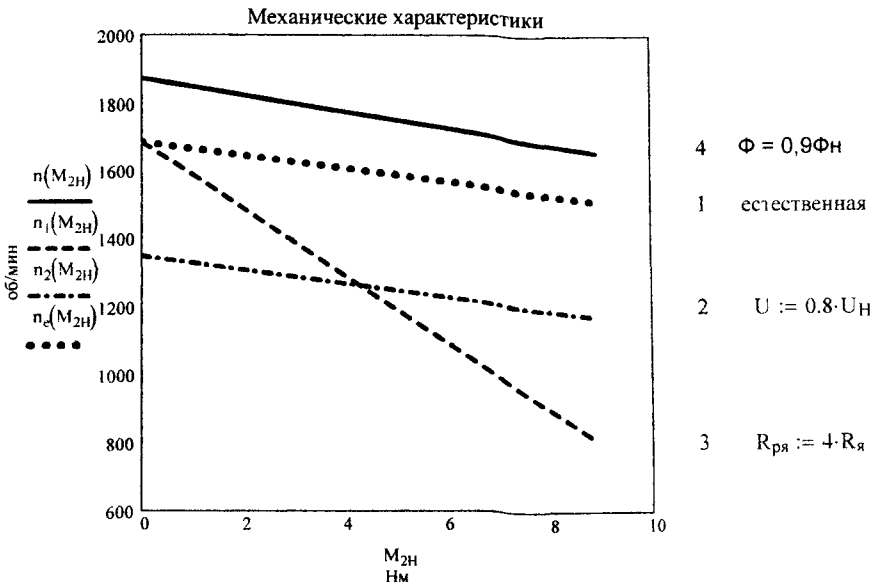
(характеристика 4)

$$n_2(M_{2H}) := \frac{U}{C\Phi} - \frac{M_{2H} \cdot R_{\text{я}}}{(C\Phi)^2 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi}}$$

$$n_2(M_{2H}) = \begin{array}{|c|} \hline 1347.631 \\ \hline 1172.511 \\ \hline \end{array}$$

$$n(M_{2H}) := \frac{U_H}{C\Phi \cdot 0.9} - \frac{M_{2H} \cdot R_{\text{я}}}{(C\Phi)^2 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot 0.81}$$

$$n(M_{2H}) = \begin{array}{|c|} \hline 1871.71 \\ \hline 1655.513 \\ \hline \end{array}$$



4. Блок контроля освоения дисциплины

4.1. Задание на контрольную работу и методические указания к ее выполнению

4.1.1. Задание на контрольную работу

Контрольная работа предусматривает решение трех задач. Исходные данные к задачам содержат 20 вариантов. Номер варианта определяется суммой двух последних цифр шифра студента.

При затруднениях в ответах обращайтесь к практикуму (п.3.5), где приведены примеры решения аналогичных задач, а также к опорному конспекту и учебнику [1]. В Рабочей тетради 2 приведена форма выполнения контрольной работы, куда Вы можете подставить свои числовые данные.

Задача 1

Трехфазный силовой понижающий трансформатор имеет номинальные данные, приведенные в табл.1: мощность S_n и напряжение первичной обмотки U_n , процентное значение напряжения короткого замыкания u_k и тока холостого хода i_0 , потери холостого хода P_0 и короткого замыкания P_k . Для всех вариантов номинальное напряжение вторичной обмотки $U_{2n} = 0,4\text{кВ}$. Фазы первичной и вторичной обмоток соединены звездой.

Требуется:

1. Определить коэффициент трансформации.
2. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания определить параметры схемы замещения и изобразить схему.
3. Рассчитать зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(\beta)$, где коэффициент нагрузки $\beta = S / S_n$. Расчеты удобно производить, задаваясь значениями $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25$.
Коэффициент мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$. Характер нагрузки активно-индуктивный.
4. Рассчитать зависимость процентного изменения напряжения на зажимах вторичной обмотки от характера нагрузки, т.е. $\Delta U = f(\varphi)$ при номинальном токе.
Расчеты удобно производить, задаваясь значениями $\varphi = 0, 30, 60, 90^\circ$.

Таблица 1

Номинальные данные трансформаторов

Вариант	Тип трансформатора	S_H , кВА	U_{1H} , кВ	u_k , %	P_0 , кВт	P_k , кВт	i_0 , %
1	ТС3-10/0,66	10	0,66	4,5	0,09	0,28	7,0
2	ТС3-16/0,66	16	0,66	4,5	0,125	0,40	5,8
3	ТС3-25/0,66	25	0,66	4,5	0,180	0,56	4,8
4	ТС3-40/0,66	40	0,66	4,5	0,250	0,80	4,0
5	ТС3-63/0,66	63	0,66	4,5	0,355	1,09	3,3
6	ТС3-100/0,66	100	0,66	4,5	0,50	1,50	2,7
7	ТС3-160/0,66	160	0,66	4,5	0,71	2,06	2,3
8	ТС3-160/10	160	10	5,5	0,70	2,7	4,0
9	ТС3-250/10	250	10	5,5	1,0	3,8	3,5
10	ТС3-400/10	400	10	5,5	1,3	5,4	3,0
11	ТС3-630/10	630	10	5,5	2,0	7,3	1,5
12	ТС3-1000/10	1000	10	5,5	3,0	11,2	1,5
13	ТС3-1600/10	1600	10	5,5	4,2	16,0	1,5
14	ТС3-250/15	250	15	8,0	1,1	4,44	4,0
15	ТС3-400/15	400	15	8,0	1,4	8,0	3,5
16	ТС3-630/15	630	15	8,0	2,3	8,7	2,0
17	ТС3-1000/15	1000	15	8,0	3,2	12,0	2,0
18	ТС3-1600/15	1600	15	8,0	4,3	18,0	2,0
19	ТС3С-630/15	630	15	8,0	2,0	8,5	2,0
20	ТС3С-1000/15	1000	15	8,0	3,0	12,0	2,0

Задача 2

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие данные, приведенные в табл.2:

число полюсов $2p$, номинальная мощность P_{2H} , линейное напряжение обмотки ротора $U_{2л}$, активные сопротивления фазы статора r_1 и ротора r'_2 при 20°C , индуктивные сопротивления фазы статора x_1 и ротора x'_2 .

Частота сети $f_1 = 50$ Гц. Напряжение сети $U_1 = 380$ В.

Соединение обмоток статора и ротора "звезда".

Класс нагревостойкости изоляции F ,
расчетная температура обмоток 115°C .

Требуется:

1. Определить потребляемый ток, момент и коэффициент мощности при пуске двигателя с замкнутой накоротко обмоткой ротора, т.е. без пускового реостата. Определить синхронную частоту вращения.
2. Определить сопротивление пускового реостата R_p , при котором начальный пусковой момент имеет максимально возможное значение. Определить в этом режиме пусковой момент, ток статора и коэффициент мощности.
3. Рассчитать механические характеристики двигателя для трех значений добавочных сопротивлений в цепи ротора:
 $R_d = 0$, $R_d = R_p / 2$, $R_d = R_p$.

Таблица 2

Данные асинхронных двигателей с фазным ротором

Ва- ри- ант	Тип двигателя	2р	$P_{2н}$, кВт	$U_{2л}$, В	r_2 , Ом	r_1 , Ом	x_1 , Ом	x_2 , Ом
1	4АК160S4У3	4	11,0	305	0,2700	0,2320	0,668	0,544
2	4АК160М4У3	4	14,0	300	0,1880	0,1470	0,479	0,513
3	4АК180М4У3	4	18,5	295	0,0989	0,1060	0,258	0,233
4	4АК200М4У3	4	22,0	340	0,0900	0,0734	0,258	0,310
5	4АК200L4У3	4	30,0	350	0,0743	0,0634	0,217	0,281
6	4АК225М4У3	4	37,0	160	0,0534	0,0102	0,187	0,0376
7	4АК250SA4У3	4	45,0	230	0,0391	0,0111	0,173	0,0758
8	4АК250SB4У3	4	55,0	200	0,0277	0,0120	0,129	0,0426
9	4АК250М4У3	4	71,0	150	0,0193	0,0128	0,085	0,0446
10	4АК160S6У3	6	7,5	300	0,4810	0,3530	0,972	0,920
11	4АК160М6У3	6	10,0	310	0,2900	0,2590	0,662	0,807
12	4АК180М6У3	6	13,0	325	0,1940	0,2110	0,496	0,614
13	4АК200М6У3	6	18,5	360	0,1410	0,1470	0,336	0,391
14	4АК200L6У3	6	22,0	330	0,1210	0,1010	0,307	0,311
15	4АК225М6У3	6	30,0	140	0,0942	0,0120	0,267	0,0572
16	4АК160S8У3	8	5,5	300	0,6520	0,7320	1,650	1,612
17	4АК160М8У3	8	7,1	290	0,4560	0,4030	1,290	1,420
18	4АК180М8У3	8	11,0	270	0,2430	0,1670	0,700	0,685
19	4АК200М8У3	8	15,0	360	0,1940	0,2030	0,472	0,631
20	4АК225М8У3	8	22,0	102	0,1400	0,0118	0,471	0,0441

Задача 3

Параметры генератора постоянного тока параллельного возбуждения приведены в табл.3. Здесь приняты обозначения : номинальная мощность $P_{н}$ и напряжение $U_{нг}$, ток возбуждения $i_{вг}$, сопротивление обмотки якоря при 15°C $R_{я}$, частота вращения $n_{нг}$, КПД η .

При расчете пренебречь реакцией якоря и считать ток возбуждения машины постоянным.

Требуется:

1. Определить , какую частоту вращения разовьет данная машина в качестве двигателя, считая, что КПД при номинальной нагрузке в генераторном и двигательных режимах работы равны . Напряжение на зажимах двигателя и его номинальную мощность выбрать по табл.4.3.
2. Определить изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу (током якоря при холостом ходе пренебречь).
3. Определить, как изменится частота вращения двигателя, если подведенное к обмотке якоря напряжение уменьшится до $0,8 U_{нл}$ при неизменном тормозном моменте, соответствующем номинальной мощности двигателя.

Данные машин постоянного тока

Вариант	$P_{нг},$ кВт	$U_{кг},$ В	$i_{ег},$ А	$П_{нг},$ об/мин	$\eta,$ %	$R_{я},$ Ом	$P_{нд},$ кВт	$U_{нд},$ В
1	215	230	9,0	630	92,0	0,074	195	220
2	115	470	4,0	850	91,5	0,0715	107	440
3	27	115	5,0	1150	86,0	0,02	25	110
4	19	230	2,0	1500	84,5	0,16	17	220
5	14	230	1,6	1500	86,5	0,21	12	220
6	11	230	1,2	1500	84,0	0,31	9	220
7	8	230	2,0	3000	83,5	0,44	6	220
8	6	230	1,0	1500	82,5	0,62	5,5	220
9	4,5	115	1,6	3000	80,0	0,23	4	110
10	3,2	115	1,4	2860	78,5	0,34	3	110
11	2,2	115	0,43	2000	82	0,41	2,04	110
12	1,35	115	0,43	1450	81	0,84	1,25	110
13	0,85	115	0,33	2000	68	1,62	0,79	110
14	1,35	230	0,23	1450	70	3,44	1,25	220
15	0,85	230	0,22	2930	68	6,64	0,79	220
16	1,00	115	0,25	2300	74	3,31	0,93	110
17	0,67	115	0,25	2800	74	2,34	0,62	110
18	1,00	230	0,15	2930	74	4,87	0,93	220
19	0,67	230	0,18	2300	68	10,50	0,62	220
20	0,37	230	0,18	1450	68	15,50	0,34	220

4.2. Текущий контроль

Тест по каждому разделу дисциплины содержит 10 вопросов. Каждый правильный ответ оценивается в один балл. Повторно тест не дается. Время ответа ограничено. Ниже приводятся вопросы для подготовки к тестированию, кроме того, рекомендуется рассмотреть вопросы, приведенные в 3.2.

Раздел 1. Трансформаторы

- 1.1. Как определяется коэффициент трансформации?
- 1.2. Какие виды потерь определяются из опыта х.х. и какие - из опыта к.з.?
- 1.3. Какие параметры схемы замещения трансформатора определяются из опыта холостого хода и какие - из опыта короткого замыкания ?
- 1.4. Как формулируется условие максимума КПД ?
- 1.5. Какое напряжение называется напряжением короткого замыкания ?

Раздел 2. Асинхронные двигатели

- 2.1. Как определить синхронную частоту вращения машины переменного тока? Напишите формулу.
- 2.2. Какую максимальную частоту вращения асинхронного двигателя (АД) можно получить при питании от сети с частотой 50 Гц ?
- 2.3. Как зависит величина электромагнитного момента АД от напряжения сети?
- 2.4. Как зависит величина максимального электромагнитного момента АД от активного сопротивления роторной цепи ?
- 2.5. Чем определяется величина критического скольжения ?

Раздел 3. Синхронные машины

- 3.1. В чем заключается сущность теории двух реакций ?
- 3.2. Как зависит реакция якоря от характера нагрузки ?
- 3.3. Как влияет характер нагрузки на вид внешней характеристики ?
- 3.4. Как влияет характер нагрузки на вид регулировочной характеристики ?
- 3.5. Как зависит момент синхронного двигателя от напряжения сети ?

Раздел 4. Машины постоянного тока

- 4.1. Напишите уравнение напряжений генератора постоянного тока.
- 4.2. Напишите уравнение напряжений двигателя постоянного тока.
- 4.3. Напишите уравнение токов генератора с параллельным возбуждением.
- 4.4. Напишите уравнение токов двигателя с параллельным возбуждением.
- 4.5. Напишите формулу механической характеристики двигателя постоянного тока. Рассмотрите способы регулирования частоты вращения.

4.3. Итоговый контроль

В качестве итогового контроля учебным планом предусмотрен экзамен. Экзамен предполагает решение трёх задач: по разделам 1, 2, 4. Каждая правильно решенная задача оценивается в 20 баллов, при недочетах балл снижается. Максимальное количество баллов составляет $20 \cdot 3 = 60$.

При желании повысить полученный балл Вы можете попросить дополнительную задачу. При этом ранее полученный балл в любом случае не будет уменьшен, даже если Вы не сможете решить дополнительную задачу. Повторные задачи в этом случае не даются. Также Вы можете попросить задачу по разделу 3.

Если Вы не сумели совсем решить первоначально полученную задачу, Вы получите другую задачу. Первая повторно полученная задача оценивается также в 20 баллов, каждая последующая задача оценивается на 5 баллов ниже.

Время решения задачи ограничено и составляет 1 час.

Примеры решения задач приводятся в разделе 3.5, при затруднении также обращайтесь к лабораторным работам раздела 3.6, опорному конспекту 3.2, учебному пособию [1] и другим учебникам.

Ниже приводятся типовые задачи, аналогичные экзаменационным.

Раздел 1. Трансформаторы

1. Определить активную и реактивную составляющие тока холостого хода однофазного трансформатора, если показания приборов равны: вольтметра - 10 кВ, амперметра - 1 А, ваттметра - 2000 Вт.
2. Однофазный трансформатор имеет: напряжение первичной обмотки 380 В, ток 5 А, КПД 90 %. К его вторичной обмотке подсоединена осветительная сеть, рассчитанная на напряжение 127 В. Определить ток нагрузки.
3. Однофазный трансформатор имеет номинальные напряжения на первичной и вторичной обмотках соответственно 6000 В и 400 В. Определить токи обмоток, если нагрузка трансформатора потребляет мощность 25 кВт при $\cos\varphi = 0,9$.
4. Определить напряжение на выходе трехфазного трансформатора, если первичное напряжение составляет 6 кВ, числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно равны 3000 и 200. Первичная обмотка соединена в "звезду", вторичная - в "треугольник".
5. Трехфазный трансформатор напряжением 10/0,4 кВ, номинальной мощностью $S_n = 20$ кВА имеет КПД 96 %, коэффициент мощности $\cos\varphi = 1$, напряжение короткого замыкания $u_k = 5$ %, потери короткого замыкания $P_k = 600$ Вт. Соединение обмоток "звезда/треугольник". Определить фазные напряжения, коэффициент трансформации; токи, потери холостого хода.

6. Трехфазный трансформатор имеет номинальные данные: $S_H=63$ кВА, $U_{1H}/U_{2H}=10/0,4$ кВ. При нагрузке имеет вторичное напряжение $U_2=393$ В при $\cos\varphi_2=0,8$. Мощность, потребляемая трансформатором в режиме к.з. $P_{1к}=1,28$ кВт, соединение обмоток $Y/Y - 0$. Определите реактивную составляющую напряжения короткого замыкания.
7. Трансформатор подключен к сети с напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Сечение сердечника равно 50 см^2 , амплитуда магнитной индукции 1 Т, число витков вторичной обмотки 50. Определить коэффициент трансформации.
8. Трехфазный трансформатор номинальной мощностью $S_H = 180$ кВА, номинальным напряжением $U_{1H} = 6/0,4$ кВ загружен на полную мощность потребителем с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 1$. Потери холостого хода $P_{ХХ} = 1$ кВт и короткого замыкания $P_{КЗ} = 4$ кВт. Определить КПД трансформатора в номинальном режиме и его максимальное значение.
9. К катушке с замкнутым стальным сердечником приложено напряжение $u = 4,5\sin(314t)$ В. Площадь поперечного сечения сердечника $S=9 \text{ см}^2$. Определить число витков катушки, если между концами измерительной обмотки из 10 витков, намотанной на том же сердечнике, наводится ЭДС 2 В. Найти также значение индукции в сердечнике.
10. Трехфазный трансформатор напряжением 10000/400 В, номинальной мощностью $S_H= 20$ кВА имеет КПД 95 %, коэффициент мощности $\cos\varphi=1$, напряжение короткого замыкания $u_k = 5$ %, мощность потерь при коротком замыкании $P_k = 600$ Вт. Соединение обмоток "звезда/звезда". Определить активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания.
11. Трехфазный трансформатор напряжением 10000/400 В, номинальной мощностью $S_H = 20$ кВА имеет КПД 95 %, коэффициент мощности $\cos\varphi = 1$, напряжение короткого замыкания $u_k = 5$ %, мощность потерь при коротком замыкании $P_k = 600$ Вт. Соединение обмоток "звезда/треугольник". Определить изменение напряжения при номинальной нагрузке.
12. Трехфазный трансформатор напряжением 6600/220 В, мощностью 60 кВт имеет КПД 90 %, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,8$. Определить фазный коэффициент трансформации, фазные и линейные токи обмоток. Соединение обмоток «звезда / треугольник».
13. Трехфазный трансформатор напряжением 6000/400 В, номинальной мощностью $S_H = 10$ кВА имеет КПД 95 %, коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$. Изменение напряжения $u = 3,5$ %, напряжение короткого замыкания $u_k = 5$ %. Соединение обмоток "звезда/звезда". Определить: фазные напряжения при

холостом ходе; коэффициент трансформации; первичный и вторичный токи; потери холостого хода.

14. Трехфазный трансформатор напряжением 6000/400 В, номинальной мощностью $S_n = 10$ кВА имеет КПД 95 %, коэффициент мощности $\cos\varphi = 1$. Изменение напряжения $u = 3,5$ %, напряжение короткого замыкания $u_k = 5$ %. Соединение обмоток "звезда/треугольник".

Определить активные и реактивные сопротивления обмоток.

15. Изменение вторичного напряжения однофазного трансформатора при номинальной активной нагрузке составляет $\Delta u = 2\%$. Определить электрические потери в трансформаторе, если его номинальная мощность $S_n = 100$ кВА, номинальное напряжение $U_n = 500$ В.

16. Однофазный трансформатор с номинальным напряжением первичной обмотки $U_{1n} = 6$ кВ на частоту $f_{1n} = 50$ Гц ошибочно включили в сеть с частотой $f_{1n} = 60$ Гц, но с тем же номинальным напряжением. Как изменится полная потребляемая мощность в режиме холостого хода?

17. Ток в катушке со стальным сердечником при постоянном напряжении $U = 2$ В на ее зажимах был равен 2 А. В этой же катушке при синусоидальном напряжении, действующее значение которого 30 В и частота 50 Гц, ток был равен 5 А и активная мощность на входе в катушку 75 Вт. Определить потери мощности в сердечнике, а также параметры схемы замещения.

18. В паспорте на однофазный трансформатор указаны следующие данные: номинальная мощность $S_n = 10\,000$ кВА, потери короткозамкнутого замыкания $P_{1к} = 100$ кВт, напряжение короткого замыкания $u_k = 5,1\%$. Определить изменение напряжения при половинной нагрузке и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$.

19. Трехфазный трансформатор имеет первичное напряжение 660 В. К его вторичной обмотке подсоединена осветительная сеть, рассчитанная на напряжение 220 В. Определить ток нагрузки, если ток в первичной обмотке 10 А, а КПД 95 % .

20. Трехфазный трансформатор имеет первичное напряжение 660 В. К его вторичной обмотке подсоединена осветительная сеть, рассчитанная на напряжение 220 В. Определить потребляемый ток нагрузки, если ток нагрузки составляет 10 А, а КПД 95 % .

Раздел 2. Асинхронные двигатели

1. Трехфазный АД с короткозамкнутым ротором имеет соединение обмоток статора в треугольник. Напряжение сети 220 В. Двигатель работает при моменте нагрузки на валу $M = 30$ Нм и имеет скольжение 0,03. Определить скольжение ротора двигателя, если обмотку статора переключить на звезду при сохранении той же величины момента на валу.

Примечание. Графический способ дает весьма наглядное решение задачи.

2. Трехфазный АД с напряжением $U_1=220$ В имеет число пазов статора $Z_1=12$, число витков $W_1=72$, диаметр провода $d_1=1,25$ мм. Как надо изменить число витков в фазе W_1 , чтобы при тех же номинальных данных двигатель мог работать от напряжения сети $U_1=380$ В? Как следует изменить при этом диаметр провода d_1 ? Укажите его приблизительное значение.

3. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет четыре полюса. Путем переключения обмотки статора число полюсов двигателя можно увеличить вдвое. Как изменится (приблизительно) частота вращения, потребляемый ток и мощность при том же моменте нагрузки ?

4. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет четыре полюса. Путем переключения обмоток статора число полюсов двигателя можно увеличить вдвое. Как изменится (приблизительно) частота вращения, потребляемый ток и момент при той же мощности ?

5. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет частоту вращения 1350 об/мин, ток 20 А, кратность пускового момента 2,5. Определить кратность пускового тока, пренебрегая током холостого хода.

6. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет номинальные данные: полезная мощность 5 кВт; напряжение 220/380 В; коэффициент мощности 0,7; КПД 75 %. Соединение обмоток "звезда".

Определить активное сопротивление фазы обмотки статора. Механическими потерями и потерями в стали пренебречь. Принять, что электрические потери в обмотках статора и ротора равны.

7. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие данные: потребляемая мощность 6,5 кВт, напряжение 220/380 В, частота вращения 940 об/мин, коэффициент мощности 0,7. Частота сети 50 Гц. Сопротивление фазы обмотки статора 1,2 Ом. Соединение обмотки "звезда".

Определить полезную мощность. Током холостого хода, механическими потерями и потерями в стали пренебречь. Принять, что электрические потери в обмотках статора и ротора равны.

8. Асинхронный двигатель подключен к сети напряжением 220 В и имеет следующие данные: потребляемый ток 10,8 А, коэффициент мощности 0,9, частота вращения ротора 1430 об/мин, момент на валу 19,5 Нм. Определить КПД.

9. Асинхронный двигатель подключен к сети напряжением 220 В и имеет следующие данные: потребляемый ток 10,8 А, КПД 0,9, частота вращения ротора 1430 об/мин, момент на валу 19,5 Нм. Определить коэффициент мощности двигателя по отношению к первичной сети.

10. АД имеет следующие паспортные данные: напряжение 220/380, ток 14/8 А, коэффициент полезного действия 85,5 %, коэффициент мощности 0,93.

Проверьте согласуются ли между собой эти данные, определив полезную мощность двигателя для схем "звезда" и "треугольник".

11. По состоянию питающего устройства для уменьшения пускового тока двигатель следует пускать от пониженного напряжения. Однако при этом пусковой момент не должен снизиться больше, чем на 50 % от пускового момента при прямом пуске. Определите допустимое уменьшение напряжения.

12. Трехфазный АД имеет по паспорту пусковой ток 70 А. По состоянию питающего устройства ток не должен превышать 40 А, при этом пусковой момент не должен снизиться больше, чем на 50% от пускового момента при прямом пуске. Определите, совместимы ли эти требования при пуске двигателя от пониженного напряжения.

13. Трехфазный двухполюсный АД, тип 4АА50А2У3 имеет следующие номинальные данные: напряжение 220/380 В, полезная мощность $P_{2н} = 90$ Вт, КПД $\eta = 60$ %, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,70$, номинальное скольжение $s_n = 8,6$ %, критическое скольжение $s_k = 50$ %. Определить потребляемый ток и рабочий диапазон частоты вращения.

14. АД с фазным ротором имеет данные: номинальная частота вращения 2970 об/мин, приведенное активное сопротивление фазы ротора 0,03 Ом. Частота сети 50 Гц. Необходимо уменьшить частоту вращения до 2400 об/мин. Определить величину добавочного сопротивления регулировочного реостата, которое необходимо ввести в фазу обмотки ротора. Принять, что регулирование частоты вращения производится при постоянной мощности, током холостого хода можно пренебречь.

Примечание. Обратите внимание на схему замещения и требование постоянства мощности.

15. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет соединение обмоток статора в "треугольник". Напряжение сети 220 В. Мощность на валу 3 кВт, КПД 90 %, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,86$. Определить линейный и фазный ток двигателя.

16. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет соединение обмоток статора в "треугольник" и работает в номинальном режиме. Как изменится величина потребляемого тока, если обмотку статора переключить на "звезду" при сохранении той же величины момента на валу. Изменением скольжения пренебречь.

17. АД имеет следующие данные неподвижного ротора: ЭДС 140 В, активное сопротивление 0,2 Ом, индуктивное сопротивление 1 Ом. Номинальная частота вращения 1450 об/мин. Определить фазный ток ротора АД в номинальном и пусковом режимах.

18. Трехфазный двухполюсный асинхронный двигатель имеет данные: потребляемая мощность $P_1 = 19,1$ кВт, скольжение $s=3,3$ %, КПД 83 %. Потери в обмотке статора и стали статора составляют 1,74 кВт. Определить потери в обмотке ротора, механические потери и момент на валу.

19. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет кратность пускового момента 1,2. Возможен ли пуск двигателя с номинальной нагрузкой при понижении напряжения сети на 10% ? Определите, на сколько допустимо уменьшение напряжения и как при этом изменится пусковой ток.

20. При испытании трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором были получены опытные данные, приведенные в таблице.

Режим работы	Номинальный	Холостой ход	Короткое замыкание
Напряжение, В	380	380	90
Ток, А	20	7,5	20
Потребляемая мощность, Вт	11400	460	940
Частота вращения, об/мин	1450	1490	0

Определить КПД, скольжение и коэффициент мощности при номинальном режиме и при холостом ходе.

Раздел 3. Синхронные машины

1. Двухполюсный трехфазный синхронный двигатель приводит во вращение механизм, создающий тормозной момент 1000 Н·м. Частота питающей сети 50 Гц, напряжение сети $U=3$ кВ, полная потребляемая мощность двигателя 390 кВА. Определить потребляемый ток и коэффициент мощности, если КПД двигателя в этом режиме составляет 90 %.

2. Трехфазный неявнополюсный синхронный двигатель с $2p=4$ имеет схему сопряжения фаз обмотки статора «звезда», $U_1=380/220$ В, частоту $f_1=50$ Гц. Синхронное индуктивное сопротивление $x_c=1,2$ Ом. Двигатель недо возбужден и развивает момент 294 Нм, потребляя из сети мощность 85 кВА при КПД 90%. Пренебрегая насыщением и активным сопротивлением обмотки статора, определить коэффициент мощности, угол нагрузки, максимальный момент.

3. ЭДС явнополюсного трехфазного перевозбужденного синхронного генератора равна 713 В. Работая на активно-индуктивную нагрузку, он нагружен током 100 А. Фазовый угол между током и ЭДС $\Psi=60^\circ$. Пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора, определить напряжение на зажимах генератора, если синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям соответственно равны $x_d=3$ Ом, $x_q=1,6$ Ом.

4. Два одинаковых трехфазных синхронных генератора, работая параллельно на сеть напряжением $U=400$ В, отдают каждый мощность 6,9 кВА. При активно-индуктивном характере нагрузки $\cos\varphi_1=0,6$, а $\cos\varphi_{II}=0,9$. Сопряжение фаз обмоток статора - "звезда", а синхронные индуктивные сопротивления $x_{cI}=x_{cII}=x_c=10$ Ом. Считая магнитные цепи генераторов ненасыщенными, определить ток возбуждения второго генератора, если ток возбуждения первого генератора $I_{2I}=5$ А.

5. Два одинаковых трехфазных синхронных генератора подключены к общим шинам напряжением $U=10,5$ кВ. Схема сопряжения фаз обмотки статора - «звезда». Определить общую полезную мощность на шинах и полный ток нагрузки, если генераторы имеют следующие данные: $I_1=300$ А, $\cos\varphi_1=0,9$, $I_{II}=200$ А, $\cos\varphi_{II}=0,865$. Нагрузка - активно-индуктивная.

6. Шестиполюсный трехфазный синхронный генератор имеет следующие данные: $S_H=63$ кВА, $U_{нл}=400$ В, $\cos\varphi=0,7$, $x_s=0,38$ Ом, $x_d=3,8$ Ом. Определить ЭДС, развиваемую генератором и угол нагрузки при условии, что генератор перевозбужден.

7. Трехфазный явнополюсный синхронный двигатель имеет следующие данные: $P_2 = 400$ кВт, $U_1 = 6,6$ кВ, $\cos\varphi = 0,8$, сопряжение фаз обмотки статора "звезда". Работая в этом режиме, машина осталась без возбуждения. Какую мощность будет развивать двигатель, какой при этом будет потреблять ток из сети, если $x_d = 104$ Ом, $x_q = 61$ Ом?

8. Определить с помощью диаграммы Потье на сколько изменится выходное фазное напряжение синхронного генератора при сбросе номинальной нагрузки. Исходные данные в относительных единицах: индуктивное сопротивление рассеяния $X_s = 0,15$, приведенная МДС реакции якоря $F_a = 0,6$. Нагрузка чисто активная. При расчетах использовать нормальную характеристику холостого хода, приведенную ниже:

U, о.е.	0,58	1,0	1,21	1,33	1,44
F _в , о.е.	0,50	1,0	1,50	2,00	2,50

9. Определить с помощью диаграммы Потье на сколько изменится выходное напряжение синхронного генератора при сбросе номинальной нагрузки. Исходные данные в относительных единицах: индуктивное сопротивление рассеяния $X_s = 0,15$, приведенная МДС реакции якоря $F_a = 0,6$. Нагрузка активно-индуктивная $\cos\varphi = 0,8$. При расчетах использовать нормальную характеристику холостого хода:

U, о.е.	0,58	1,0	1,21	1,33	1,44
F _в , о.е.	0,50	1,0	1,50	2,00	2,50

10. Определить с помощью диаграммы Потье на сколько изменится выходное напряжение синхронного генератора при сбросе номинальной нагрузки. Исходные данные в относительных единицах: индуктивное сопротивление рассеяния $X_s = 0,15$, приведенная МДС реакции якоря $F_a = 0,6$. Нагрузка активно-емкостная $\cos\varphi = 0,8$. При расчетах использовать нормальную характеристику холостого хода:

U, о.е.	0,58	1,0	1,21	1,33	1,44
F _в , о.е.	0,50	1,0	1,50	2,00	2,50

Раздел 4. Машины постоянного тока

1. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения питает нагрузку сопротивлением 5 Ом, напряжение на нагрузке 110В, сопротивление цепи якоря 0,1 Ом, ток обмотки возбуждения 2А. Падение напряжения в щеточном контакте 2В. Определить ток якоря, полезную и потребляемую мощность и КПД, пренебрегая постоянными потерями.
2. Определить сопротивление пускового реостата двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, чтобы ток якоря при пуске не превышал значения $2I_{н}$. Напряжение сети 200 В. Сопротивление цепи якоря и возбуждения 0,5 Ом. Потребляемая мощность 4 кВт.
3. Определить сопротивление цепи возбуждения двигателя параллельного возбуждения, если мощность на валу равна 10 кВт, напряжение сети 250 В, КПД двигателя 80 %, а мощность потерь в цепи возбуждения составляет 4 % от потребляемой мощности двигателя.
4. Двигатель параллельного возбуждения потребляет от сети мощность 6 кВт. Напряжение сети 110 В. Сопротивление цепи якоря 0,2 Ом, цепи возбуждения 50 Ом. Определить ток якоря; ток, потребляемый из сети и падение напряжения в якорной цепи.
5. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения имеет данные: напряжение $U = 220$ В, ток $I = 50$ А, номинальный момент 240 Н·м, частота вращения $n = 500$ об/мин. Определить, как изменится частота вращения при уменьшении момента вдвое, если сопротивление цепи якоря и возбуждения равно 0,1 Ом. Считать магнитную цепь ненасыщенной.
6. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: $U = 220$ В, $I = 80$ А, $R_2 = 0,1$ Ом, $n = 1000$ об/мин. Определить частоту вращения в случае понижения напряжения до 180 В, если момент нагрузки и ток возбуждения остаются неизменными.
7. Два генератора постоянного тока независимого возбуждения работают на общую нагрузку $P = 25$ кВт. Определить напряжение на шинах и ток каждого генератора, если $E_1 = 120$ В, $r_{я1} = 0,05$ Ом, $E_2 = 115$ В, $r_{я2} = 0,1$ Ом.
8. Два генератора постоянного тока параллельного возбуждения при параллельной работе нагружены общим током 400 А и развивают ЭДС $E_1 = 230$ В, $E_2 = 225$ В. Определить напряжение на шинах и ток каждого генератора, если сопротивления цепи якоря и возбуждения каждого генератора составляют соответственно $r_2 = 0,02$ Ом, $r_1 = 25$ Ом. Реакцией якоря пренебречь.

9. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет данные: $P_{2H} = 95$ кВт, $U_{1H} = 220$ В, $I_H = 470$ А, $r_{я} = 0,05$ Ом, $I_1 = 4$ А, $n_H = 500$ об/мин. Определить электрические потери; постоянные потери, независимые от нагрузки; КПД; ток двигателя в режиме холостого хода.

10. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения имеет данные: $P_{1H} = 140$ кВт, $U_H = 220$ В, $n_H = 500$ об/мин, $r_2 = 0,1$ Ом. Как изменяется полезная мощность и КПД при снижении напряжения на 20%? Момент нагрузки постоянный и равен 2400 Н·м. Насыщением магнитной цепи пренебречь

11. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет данные: $U = 220$ В, $I_H = 240$ А, $r_{я} = 0,05$ Ом, $I_B = 3$ А, $n_H = 1500$ об/мин и используется в качестве генератора с напряжением $U_G = 230$ В. Определить частоту вращения генератора при условии неизменности тока возбуждения и тока якоря?

12. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения нагружен номинальным моментом 240 Н·м и при питании от сети $U = 220$ В имеет потребляемый ток $I = 50$ А, развивая частоту вращения $n = 500$ об/мин.

Определить, как изменится частота вращения при уменьшении момента вдвое, если сопротивление цепи якоря и возбуждения равно 0,1 Ом. Считать магнитную цепь ненасыщенной.

13. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: мощность $P_H = 42$ кВт, напряжение $U_H = 220$ В, потребляемый ток $I_H = 204$ А, ток возбуждения $I_{BH} = 4$ А, сопротивление якорной цепи $r_{я} = 0,05$ Ом, частота вращения $n_H = 1000$ об/мин. Определить частоту вращения машины в режиме генератора при напряжении 230 В и номинальном токе якоря.

14. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: $U_H = 220$ В, $P_H = 5$ кВт, $I_H = 30$ А, $r_{я} = 0,5$ Ом, $n_H = 955$ об/мин. Определить частоту вращения двигателя в режиме холостого хода и при номинальном моменте. Регулирование частоты вращения производилось изменением тока возбуждения с номинального значения I_{BH} до $0,5 I_{BH}$. Насыщением магнитной цепи пренебречь.

15. Двигатель постоянного тока имеет сопротивление обмотки якоря $r_{я} = 0,1 r_b$, где базисное сопротивление $r_b = U_H / I_H$. Требуется определить:

- 1) во сколько раз частота вращения в номинальном режиме меньше частоты вращения в режиме холостого хода (током холостого хода пренебречь);
- 2) как изменится частота вращения по сравнению с номинальным режимом при сохранении номинального момента при введении добавочного сопротивления:
 - а) в цепь якоря – величина добавочного сопротивления равна сопротивлению обмотки якоря;

б) в цепь обмотки возбуждения – величина добавочного сопротивления равна сопротивлению обмотки возбуждения (насыщением магнитной цепи пренебречь).

Внимание: при расчетах п. 2б обратите внимание на условие постоянства момента.

16. Генератор постоянного тока с независимым возбуждением должен использоваться в системе Г-Д для регулирования частоты вращения двигателя независимого возбуждения. Двигатель имеет следующие номинальные данные: мощность 1 кВт, напряжение 220 В, частота вращения 3000 об/мин, ток якоря 5,6 А, КПД 77 %. Сопротивления обмоток якоря двигателя и генератора 2 Ом. Определить необходимую мощность и частоту вращения генератора. Принять выходное напряжение генератора 230 В, КПД 80 %. Определить пределы регулирования частоты вращения двигателя в режиме холостого хода и при нагрузке номинальным моментом. Для этого необходимо определить минимальную величину ЭДС генератора, необходимую для вращения двигателя в режиме холостого хода, пусковой ток 1,5 номинального тока.

17. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения имеет данные: напряжение 110 В, ток 24 А, частота вращения 1500 об/мин, момент нагрузки 14 Нм. Общее сопротивление обмоток 0,35 Ом. Определить полезную, электромагнитную, потребляемую мощности; переменные и постоянные потери мощности. Как изменятся при постоянном моменте нагрузки потребляемый ток, магнитный поток, частота вращения, потребляемая мощность и КПД при уменьшении напряжения до 90 В ?

18. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальные данные: номинальная мощность 1 кВт, напряжение 110 В, частота вращения 1500 об/мин, КПД 76 %. Сопротивление обмотки якоря 0,88 Ом, обмотки возбуждения 166 Ом. Определить номинальный момент нагрузки, потребляемые мощность и ток, ток холостого хода, пусковой ток и сопротивление пускового реостата при условии, что пусковой ток равен 2,5 номинального тока.

19. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет напряжение 220 В, мощность 120 кВт, частоту вращения 1440 об/мин. Если машину эксплуатировать как двигатель, то при том же напряжении он потребляет мощность 60 кВт. Определить частоту вращения в режиме двигателя

20. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет данные: $U = 220$ В, $I = 15$ А, $r_2 = 1,5$ Ом, $r_1 = 370$ Ом, $\Phi = 0,48 \cdot 10^{-2}$ Вб, $N = 1220$, $2p = 4$, $2a = 2$. Определить ЭДС, частоту вращения и момент.

5. РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

Северо-Западный государственный заочный технический университет

Кафедра электротехники и электромеханики

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

для выполнения
лабораторных и контрольных работ

Дисциплина

Электрические машины

Специальности:

210106.65 – промышленная электроника

220301.65 – автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении

Курс 4

Преподаватель Е.П. Брандина, проф.

Санкт-Петербург
2007

5.1. Тетрадь 1

Северо-Западный государственный заочный технический университет

Кафедра электротехники и электромеханики

О Т Ч Е Т

по выполнению лабораторных работ

Дисциплина

Электрические машины

Студент

Шифр

Специальность

Форма обучения

Курс 4

Преподаватель Е.П. Брандина, проф.

Зачтено

Дата

Санкт-Петербург
2007

Работа 1. Исследование однофазного двухобмоточного трансформатора

1. Цель работы

Расчет внешней характеристики и КПД однофазного двухобмоточного трансформатора и оценка его свойств. Определение параметров схемы замещения. Выбор электроизмерительных приборов.

2. Схема исследования и спецификация

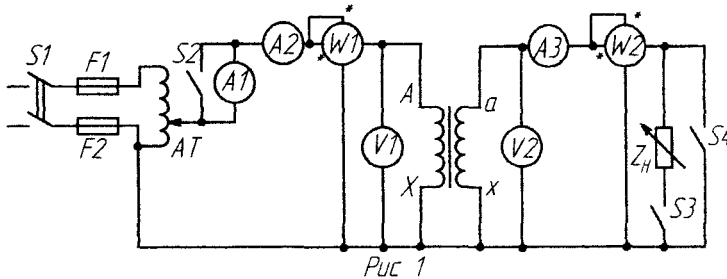


Таблица 1

Спецификация схемы исследования

Наименование элемента	Графическое обозначение	Назначение элемента
1. Лабораторный автотрансформатор		Изменение величины первичного напряжения
2. Однофазный двухобмоточный трансформатор		Объект исследования
3. Выключатель		S1–включение в сеть S2–шунтирование амперметра A1 S3– режимы холостого хода или нагрузки S4– режим короткого замыкания
4. Нагрузка		Потребитель
5. Амперметр		Измерение тока: A1–ток первичной обмотки (холостого хода) A2– ток первичной обмотки A3– ток вторичной обмотки
6. Вольтметр		Измерение напряжения: V1– первичной обмотки V2– вторичной обмотки
7. Ваттметр		Измерение активной мощности: W1– первичной обмотки W2– вторичной обмотки

3. Исходные данные

В результате экспериментального исследования однофазного двухобмоточного трансформатора в режимах холостого хода (х.х.) и опытного короткого замыкания (к.з.) получены данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные

Параметры	Режим работы	
	режим х.х.	режим к.з.
Напряжение первичной обмотки, В	$U_{10} =$	$U_{1k} =$
Напряжение вторичной обмотки, В	$U_{20} =$	$U_{2k} =$
Ток первичной обмотки, А	$I_{10} =$	$I_{1k} =$
Ток вторичной обмотки, А	$I_{20} =$	$I_{2k} =$
Активная мощность, Вт	$P_{10} =$	$P_{1k} =$

4. Выполнение расчетно-графической работы

4.1. Номинальные данные трансформатора

Напряжение первичной обмотки $U_{1H} = U_{10} =$

Напряжение вторичной обмотки $U_{2H} = U_{20} =$

Коэффициент трансформации $k = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} =$

Ток первичной обмотки $I_{1H} = I_{1k} =$

Мощность $S_H = U_{2H} \cdot I_{2H} \approx U_{1H} \cdot I_{1H} =$

Ток вторичной обмотки $I_{2H} = I_{2k} =$

Ток холостого хода $i_0 = \frac{I_{10}}{I_{1H}} \cdot 100 =$

Напряжение короткого замыкания $u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1H}} \cdot 100 =$

4.2. Параметры схемы замещения

Схема замещения представлена на рис.2.

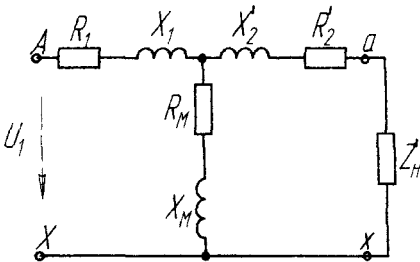


Рис. 2

Параметры схемы замещения

Активное, реактивное и полное сопротивления намагничивающего контура, эквивалентирующего магнитопровод трансформатора, Ом

$$z_M \approx \frac{U_{10}}{I_{10}} =$$

$$r_M = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} =$$

$$x_M = \sqrt{z_M^2 - r_M^2} =$$

Активное, реактивное и полное сопротивления короткого замыкания, Ом

$$z_k \approx \frac{U_{1k}}{I_{1k}} =$$

$$r_k = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2} =$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} =$$

Параметры обмоток схемы замещения, Ом

$$r_1 = r_2' = r_k / 2 =$$

$$x_1 = x_2' = x_k / 2 =$$

4.3. Внешняя характеристика $U_2 = f(\beta)$

Коэффициент мощности в режиме к.з. $\cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{U_{1k} I_{1k}} =$

Коэффициент нагрузки $\beta = I_2 / I_{2н}$,

где I_2 – ток вторичной обмотки.

Активная u_a и реактивная u_p составляющие напряжения к.з., %

$$u_a = u_k \cos \varphi_k =$$

$$u_p = u_k \sin \varphi_k =$$

Процентное изменение величины вторичного напряжения вычисляется по формуле, %

$$\Delta u = \beta(u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2).$$

Величина вторичного напряжения трансформатора определяется в виде, В

$$U_2 = \frac{(100 - \Delta u) U_{20}}{100}.$$

Результаты расчета внешней характеристики представлены в табл. 3.

4.4. Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора $\eta = f(\beta)$

Расчет производится по формулам:

полезная мощность трансформатора $P_2 = I_2 \cos \varphi_2$,

потребляемая мощность трансформатора $P_1 = P_2 + P_{10} + \beta^2 P_{1k}$,

КПД трансформатора $\eta = \frac{P_2}{P_1} 100$.

4.5 Результаты расчета

Результаты расчета внешней характеристики и КПД трансформатора представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Результаты расчета

β	$I_2, \text{А}$	$P_2, \text{Вт}$	$P_1, \text{Вт}$	$\Delta u, \%$	$U_2, \text{В}$	$\eta, \%$
0						
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						
1,0						

4.6. Выбор электроизмерительных приборов

Таблица 4

Параметры электроизмерительных приборов

Обозначение прибора на рис. 1	Пределы измерения	Число делений	Цена деления
V1			
V2			
A1			
A2			
A3			
W1			
W2			

Показания приборов в номинальном режиме

$$\begin{aligned}
 V1 &= \quad B; & A1 &= 0 & W1 &= \quad Bг; \\
 V2 &= \quad B; & A2 &= \quad A; & W2 &= \quad Bг; \\
 & & A3 &= \quad A.
 \end{aligned}$$

5. Выводы

В результате проделанной работы были рассчитаны наиболее важные для потребителя характеристики: зависимость от нагрузки выходного напряжения

$$U_2 = f(\beta) \text{ (внешняя характеристика) и КПД } \eta = f(\beta).$$

По результатам расчета можно сделать выводы:

– при активно-индуктивной нагрузке выходное напряжение уменьшается, падение напряжения при номинальной нагрузке составляет В;

– КПД трансформатора имеет слабо выраженный максимум. Условием максимума КПД является равенство постоянных и переменных потерь.

Значение КПД в номинальном режиме составляет $\eta = \dots$.

6. Литература : [2] .

Работа 2. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

1. Цель работы

Теоретическое исследование механической характеристики и расчет емкости конденсаторов, позволяющих увеличить коэффициент мощности трехфазного асинхронного двигателя. Выбор электроизмерительных приборов.

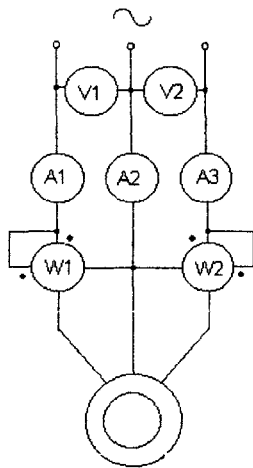


Рис. 1

2. Схема исследования и спецификация

Схема исследования приведена на рис. 1. Активная мощность, потребляемая двигателем, измеряется способом двух ваттметров.

Показания ваттметров вычисляются по формулам $P_{W1} = U_l I_l \cos(\varphi - 30^\circ)$, $P_{W2} = U_l I_l \cos(\varphi + 30^\circ)$. Измеренная мощность определяется алгебраической суммой показаний ваттметров

$$P_l = P_{W1} + P_{W2}$$

Т а б л и ц а 1

Спецификация схемы исследования

Наименование элемента	Графическое обозначение	Назначение в цепи
1 Амперметр		Измерение тока в фазе обмотки статора
2 Вольтметр		Измерение линейного напряжения сети
3 Ваттметр		Измерение активной мощности

3. Исходные данные

Исходными данными являются паспортные данные асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

Тип двигателя

Номинальное напряжение $U_{1H} = 380$ В,

Номинальная мощность двигателя $P_{2H} =$ Вт,

Синхронная частота вращения $n_1 =$ об/мин.

Номинальное значение КПД $\eta_H =$ %,

Номинальное значение коэффициента мощности $\cos\varphi_H =$

Номинальное скольжение $s_H =$

Кратность пускового момента $k_{п1} =$

Кратность максимального момента $k_M =$

Частота сети $f = 50$ Гц,

Сопряжение фаз обмотки статора двигателя - "звезда".

Сопряжение фаз блока конденсаторов -

4. Выполнение расчетно-графической работы

4.1. Расчет механической характеристики

Номинальная частота вращения, об/мин

$$n_H = n_1(1 - s_H) =$$

Номинальная активная потребляемая мощность двигателя, кВт

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta_H =$$

Номинальная полная потребляемая мощность двигателя, кВА

$$S_{1H} = P_{2H} / (\eta_H \cos\varphi_H) =$$

Номинальный ток двигателя, А

$$I_{1H} = S_{1H} 1000 / (\sqrt{3} U_{1H}) =$$

Номинальный момент на валу, Нм

$$M_{2H} = 9550 P_{2H} / n_H =$$

Критический момент, Нм

$$M_K = \kappa_M M_{2H} =$$

Пусковой момент, Нм

$$M_{II} = \kappa_{II} M_{2H} =$$

Критическое скольжение

$$s_K = s_H (\kappa_M + \sqrt{\kappa_M^2 - 1}) =$$

Частота вращения при скольжении s определяется по формуле

$$n = n_1 (1 - s).$$

Расчет механической характеристики $M = f(s)$ производится по формуле Клосса

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s_K + s}{s} + \frac{s}{s_K}}.$$

Характерными точками механической характеристики являются номинальный, критический и пусковой моменты, а также соответствующие им значения скольжения.

Результаты расчета механической характеристики с учетом номинального и критического режимов приводятся в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Механическая характеристика

s	$s_{II} =$			0,4	0,6	0,8	1,0
M, Н·м							

График механической характеристики

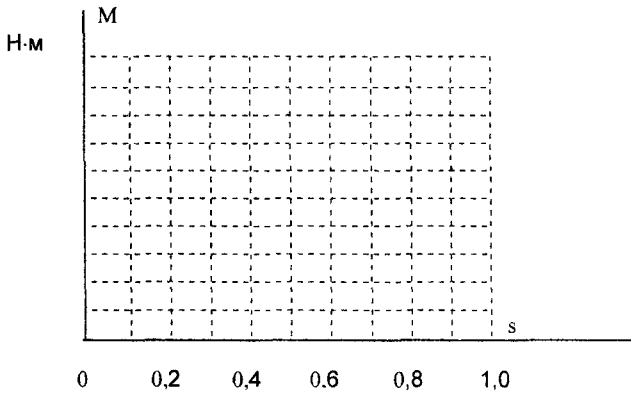


Рис. 2

График механической характеристики $M=f(s)$ построен на рис. 2. На графике показаны номинальный, критический и пусковой режимы.

4.2. Расчет емкости конденсаторов

Реактивная составляющая тока статора двигателя в номинальном режиме, А
 $I_{1P} = I_{1H} \sin\phi_H =$

Ток и напряжение фазы блока конденсаторов $I_{\Phi K}$, $U_{\Phi K}$ зависят от сопряжения фаз:

Сопряжение фаз блока конденсаторов	
"звезда"	"треугольник"
$I_{\Phi K} = I_{1P} =$ $U_{\Phi K} = U_{1H} / \sqrt{3} =$	$I_{\Phi K} = I_{1P} / \sqrt{3} =$ $U_{\Phi K} = U_{1H} =$

Емкость конденсатора в одной фазе в номинальном режиме, Ф

$$C_{\Phi} = I_{\Phi K} / (2\pi f U_{\Phi K}) =$$

Емкость блока конденсаторов, Ф

$$C = 3C_{\Phi} =$$

4.3 Выбор электроизмерительных приборов

По результатам расчета для схемы (рис.1) выбираем электроизмерительные приборы, используя данные 3.6.1 или [2].

Активная мощность, потребляемая двигателем, измеряется способом двух ваттметров. Показания ваттметров в номинальном режиме, Вт

$$P_{W1} = U_{1H} I_{1H} \cos(\varphi_H - 30^\circ) =$$

$$P_{W2} = U_{1H} I_{1H} \cos(\varphi_H + 30^\circ) =$$

Определение цены деления приборов

$$C_i =$$

$$C_u =$$

$$C_w =$$

Т а б л и ц а 3

Параметры электроизмерительных приборов

Наименование прибора	Шт	Система прибора	Положение	Род тока	Класс точности	Предел измерений	Число делений	Цена деления	Макс. абс. погрность
Вольтметр	2	эл.магн.	⊥	~	1,5	50...450	40	10	6,75 В
Амперметр	3	эл.магн.	⊥	~					
Ваттметр	2	эл.дин.	Π	~					

Число делений, на которое отклонится стрелка прибора, определяется как частное деления показания прибора и цены деления его шкалы.

В табл.4 приведены значения показаний приборов в номинальном режиме работы двигателя.

Т а б л и ц а 4

Показания приборов в номинальном режиме

V1 и V2		A1, A2, A3		W2		W1	
В	дел	А	дел	Вт	дел	Вт	дел
380	9,5						

5. Выводы

Основные результаты исследования приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Результаты исследования

Параметр	Режим работы		
	номинальный	критический	пусковой
M , Н·м			
s			
n , об /мин			

Номинальный потребляемый ток двигателя $I_{H} =$

Необходимая емкость конденсаторов для компенсации потребляемой реактивной мощности двигателя составляет $C =$ мкФ

6. Литература : [2] .

Работа 3. Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

1. Цель работы

Теоретическое исследование рабочих и механических характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Выбор электроизмерительных приборов.

2. Схема исследования и спецификация

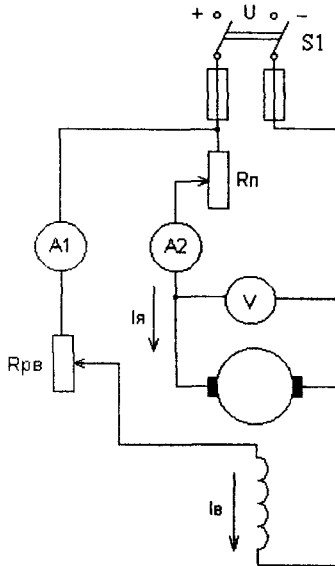


Рис 1

Таблица 1

Спецификация схемы исследования

Наименование элемента	Графическое обозначение	Назначение в схеме
1 Выключатель		S - включение в сеть
2 Амперметр		A1- измерение тока возбуждения
3 Амперметр		A2- измерение тока якоря
4 Вольтметр		V1- измерение напряжения сети
5 Вольтметр		V2 - измерение напряжения якоря

3. Исходные данные

Исходными данными являются паспортные данные двигателя постоянного параллельного возбуждения:

Номинальное напряжение на зажимах двигателя $U_H =$

Механическая (полезная) мощность $P_{2H} =$

Номинальная частота вращения якоря $n_H =$

Номинальный коэффициент полезного действия $\eta_H =$

Сопротивление цепи якоря $R_{Я} =$

Сопротивление обмотки возбуждения $R_B =$

4. Выполнение расчетно-графической работы

4.1. Расчет номинального режима работы двигателя

Потребляемая мощность, Вт

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta_H =$$

Потребляемый ток, А

$$I_H = P_{1H} / U_H =$$

Ток возбуждения, А

$$I_{BH} = U_H / R_B =$$

Ток якоря, А

$$I_{ЯH} = I_H - I_{BH} =$$

Электрические потери в обмотке возбуждения, Вт

$$P_{BH} = U_H I_{BH} =$$

Электрические потери в обмотке якоря, Вт

$$P_{ЯH} = I_{ЯH}^2 R_{Я} =$$

Суммарные потери двигателя, Вт

$$\Delta p_n = P_{1H} - P_{2H} =$$

Механические и магнитные потери, Вт

$$P_{0H} = \Delta p_n - P_{вн} - P_{яH} =$$

Полезный механический момент на валу, Нм

$$M_{2H} = 9,55 P_{2H} / n_H =$$

4.2. Расчет механических характеристик

Расчет частоты вращения якоря, об/мин, производим по формуле

$$n = \frac{U - I_{я}(R_{я} + R_{рЯ})}{C_E \Phi},$$

где C_E - постоянный коэффициент, определяемый числом пар главных полюсов и типом обмотки якоря; Φ - основной магнитный поток машины; $R_{я}$ - сопротивление цепи якоря; $I_{я}$ - ток в якоря.

Машинная постоянная в номинальном режиме

$$C_E \Phi = (U_H - I_{яH} R_{я}) / n_H =$$

Частота вращения якоря двигателя, об/мин, при изменении момента нагрузки на валу вычисляется по формуле

$$n = n_H (U - I_{я} R_{я}) / (U - I_{яH} R_{я}),$$

где $I_{я}$ - текущее значение тока в обмотке якоря.

Механической характеристикой двигателя называют взаимосвязь частоты вращения и момента

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{M \cdot R_{я}}{C_E C_M \Phi^2}, \text{ об/мин}$$

где $C_M = C_E / 2\pi \approx 10 C_E$.

Естественная механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения, об/мин, определяется при номинальных значениях напряжения на зажимах якоря и тока возбуждения

$$n = \frac{U_H}{C_E \Phi_H} - \frac{M \cdot R_{я}}{C_E C_M \Phi_H^2}.$$

Искусственные механические характеристики определяем по двум точкам для моментов 0 и M_H :

- при пониженном напряжении на якоря $U = 0,8 U_H$

$$n = \frac{0.8U_H}{C_F \Phi_H} - \frac{M \cdot R_{\text{я}}}{C_F C_M \Phi_H^2}, \quad \text{при } M=0 \quad n =$$

при $M_H =$ $n =$

- при введенном добавочном сопротивлении в цепи якоря $R_{\text{ря}} = 4R_{\text{я}}$

$$n = \frac{U_H}{C_E \Phi_H} - \frac{M \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{ря}})}{C_E C_M \Phi_H^2},$$

при $M=0 \quad n =$

при $M_H =$ $n =$

- при введении сопротивления в цепь возбуждения (ослабленный магнитный поток $\Phi = 0,9\Phi_H$)

$$n = \frac{U_H}{C_F \Phi} - \frac{M \cdot R_{\text{я}}}{C_E C_M \Phi^2},$$

при $M=0 \quad n =$

при $M_H =$ $n =$

Результаты расчета приведены в табл.2 и на рис.2.

Т а б л и ц а 2

Механические характеристики

Момент, Нм	Частота вращения n , об/мин			
	$U = U_H,$ $\Phi = \Phi_H,$ $R_{\text{ря}} = 0$	$U = 0,8U_H,$ $\Phi = \Phi_H,$ $R_{\text{ря}} = 0$	$U = U_H,$ $\Phi = \Phi_H,$ $R_{\text{ря}} = 4R_{\text{я}}$	$U = U_H,$ $\Phi = 0,9\Phi_H,$ $R_{\text{ря}} = 0$
0				
$M_H =$				

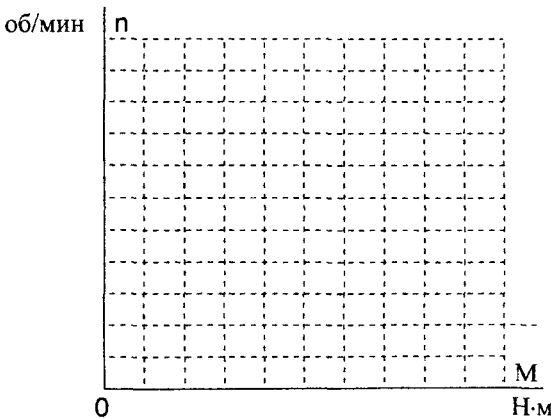


Рис.2

5. Выводы

По результатам исследования определены основные параметры двигателя в номинальном режиме:

потребляемый ток двигателя $I_H =$

ток якоря $I_{ЯH} =$

ток возбуждения $I_{ВH} =$

номинальный момент $M_H =$

частота вращения в режиме холостого хода $n_{0H} =$

Отношение частоты вращения к номинальной частоте для искусственных характеристик при номинальном моменте приведено в табл.5.

Т а б л и ц а 5

Анализ искусственных механических характеристик

Условия расчета	$U = 0,8U_H$ $\Phi = \Phi_H$ $R_{рЯ} = 0$	$U = U_H$ $\Phi = \Phi_H$ $R_{рЯ} = 4R_{Я}$	$U = U_H$ $\Phi = 0,9\Phi_H$ $R_{рЯ} = 0$
n/ n _H			

6. Литература : [2].

Работа 4. Исследование двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

1. Цель работы

Теоретическое исследование рабочих и механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Выбор электроизмерительных приборов.

2 Схема исследования и спецификация

Схема исследования приведена на рис.1.

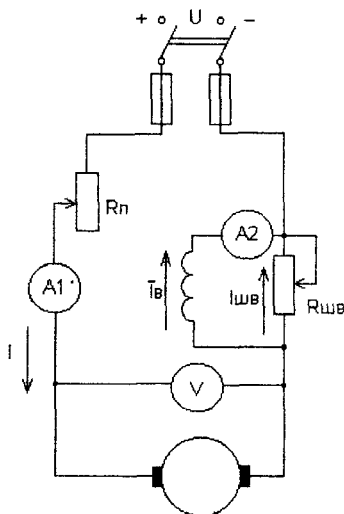


Рис.1

Таблица 1

Спецификация схемы исследования

Наименование элемента	Графическое обозначение	Назначение в схеме
1 Выключатель		S - включение в сеть
2. Амперметр		A1- измерение тока якоря
3. Амперметр		A2- измерение тока возбуждения
4. Вольтметр		V1- измерение напряжения якоря

3 Исходные данные

Исходными данными являются паспортные данные двигателя постоянного тока последовательного возбуждения:

номинальное напряжение на зажимах двигателя $U_H =$

механическая (полезная) мощность $P_{2H} =$

номинальная частота вращения якоря $n_H =$

номинальный коэффициент полезного действия $\eta_H =$

сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} =$

сопротивление обмотки возбуждения $R_B =$

4. Выполнение расчетно-графической работы

4.1. Номинальный режим работы двигателя

Номинальная потребляемая мощность двигателя, Вт

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta_H =$$

Номинальный ток, А

$$I_H = P_{1H} / U_H =$$

Машинная постоянная

$$C_E \Phi_H = (U_H - I_{\text{яH}}(R_{\text{я}} + R_B)) / n_H =$$

4.2. Расчетные формулы для механических характеристик

Частота вращения якоря в общем случае может быть определена в виде

$$n = n_H \frac{U - k_I I_{\text{яH}}(R_{\text{я}} + R_B)}{k_{\Phi} \cdot (U_H - I_{\text{яH}}(R_{\text{я}} + R_B))}, \text{ об/мин,}$$

где $k_I = I_{\text{я}} / I_{\text{яH}}$ - относительное значение тока якоря,

$k_{\Phi} = \Phi / \Phi_H$ - относительное значение магнитного потока,

$k_B = R_{\text{шВ}} / (R_B + R_{\text{шВ}})$ - коэффициент ослабления возбуждения,

$R_{\text{я}}$ и R_B - сопротивления цепи якоря и обмотки возбуждения,

$R_{\text{шВ}}$ - сопротивление шунтирующего реостата.

Значение $k_{\Phi} = f(I_B / I_{\text{BH}})$ может быть определено из табл. 2, где

$$I_B / I_{\text{BH}} = k_B k_I.$$

Таблица 2

Зависимость $k_{\Phi} = f(I_B / I_{BH})$

I_B / I_{BH}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
k_{Φ}	0,05	0,45	0,73	0,88	0,95	1	1,03	1,06	1,08	1,09	1,1

Механическая характеристика определяется взаимосвязью скорости и момента. Величина момента вычисляется по формуле, Нм

$$M = C_M \Phi_H I_H k_I k_{\Phi},$$

где $C_M = C_E \cdot 60 / 2\pi \approx 10 C_E$.

4.3. Естественная механическая характеристика

Естественная механическая характеристика двигателя определяется при номинальных значениях напряжения на зажимах якоря и отсутствии шунтирующих реостатов.

Частота вращения определяется по формуле, об/мин

$$n = n_H \cdot \frac{U_H - k_I \cdot I_{яH} (R_{я} + R_{в})}{k_{\Phi} \cdot (U_H - I_{яH} (R_{я} + R_{в}))}$$

Отношение токов $I_B / I_{BH} = k_I$.

Результаты расчета приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты расчета

Параметры	k_I				
	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
$I_{я}$, А					
k_{Φ}					
n , об/мин					
M , Нм					

4. Искусственная механическая характеристика при пониженном напряжении на якоре $U = 0,8 U_H =$

асчетная формула для частоты вращения

$$n = n_H \frac{U - k_I I_{яH} (R_я + R_B)}{k_\Phi \cdot (U_H - I_{яH} (R_я + R_B))}$$

Отношение токов $I_B / I_{BH} = \kappa_I$.

Результаты расчета приведены в табл.4.

Таблица 4

Результаты расчета

Параметры	κ_I				
	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
$I_я, A$					
κ_Φ					
$n, \text{об/мин}$					
$M, \text{Нм}$					

4.5. Искусственная механическая характеристика при шунтировании обмотки возбуждения (ослабленный магнитный поток), сопротивление шунта $R_{ШВ} = R_B$

Расчетная формула для частоты вращения

$$n = n_H \frac{U - k_I \cdot I_{яH} (R_я + R_B)}{k_\Phi \cdot (U_H - I_{яH} (R_я + R_B))}$$

Отношение токов $I_B / I_{BH} = \kappa_B \kappa_I$, где $\kappa_B = 0,5$.

Результаты расчета приведены в табл.5.

Таблица 5

Результаты расчета

Параметры	κ_I				
	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
$I_я, A$					
κ_Φ					
$n, \text{об/мин}$					
$M, \text{Нм}$					

5. Выводы

По результатам исследования определены основные параметры двигателя в номинальном режиме:
 потребляемый ток двигателя $I_H =$
 номинальный момент $M_H =$

Отношение частоты вращения к номинальной частоте при номинальном моменте для искусственных характеристик приведено в табл.8.

Т а б л и ц а 8

Анализ искусственных механических характеристик при номинальном моменте нагрузки

Условия расчета	$U = 0,8 U_H,$ $\Phi = \Phi_H,$	$U = U_H,$ $R_{ш} = R_B$
n / n_H		

6. Литература: [2].

5.2. Тетрадь 2

Северо-Западный государственный заочный технический университет

Кафедра электротехники и электромеханики

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Дисциплина

Электрические машины

Студент

Шифр

Специальность

Форма обучения

Курс 4

Преподаватель Е.П. Брандина, проф.

Зачтено

Дата

Санкт-Петербург
2007

1. Задача 1

1.1. Задание

Трехфазный силовой понижающий трансформатор имеет номинальные данные, приведенные в табл.1 : мощность S_n и напряжение первичной обмотки U_n , процентное значение напряжения короткого замыкания u_k и тока холостого хода i_0 , потери холостого хода P_0 и короткого замыкания P_k .

Номер варианта определяется суммой двух последних цифр шифра студента.

Для всех вариантов номинальное напряжение вторичной обмотки $U_{2n} = 0,4$ кВ.

Коэффициент мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$. Характер нагрузки активно-индуктивный. Фазы первичной и вторичной обмоток соединены "звездой".

Требуется:

1. Определить коэффициент трансформации.
2. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания определить параметры схемы замещения и изобразить схему.
3. Рассчитать зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(\beta)$, где коэффициент нагрузки $\beta = S / S_n$. Расчеты удобно производить, задаваясь значениями $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25$.
4. Рассчитать зависимость процентного изменения напряжения на зажимах вторичной обмотки от нагрузки $\Delta U = f(\beta)$. Построить график.

Номинальные данные трансформаторов

Таблица 1

Вариант	Тип трансформатора	S_H , кВА	U_{1H} , кВ	u_k , %	P_0 , кВт	P_k , кВт	i_0 , %
1	ТС3-10/0,66	10	0,66	4,5	0,09	0,28	7,0
2	ТС3-16/0,66	16	0,66	4,5	0,125	0,40	5,8
3	ТС3-25/0,66	25	0,66	4,5	0,180	0,56	4,8
4	ТС3-40/0,66	40	0,66	4,5	0,250	0,80	4,0
5	ТС3-63/0,66	63	0,66	4,5	0,355	1,09	3,3
6	ТС3-100/0,66	100	0,66	4,5	0,50	1,50	2,7
7	ТС3-160/0,66	160	0,66	4,5	0,71	2,06	2,3
8	ТС3-160/10	160	10	5,5	0,70	2,7	4,0
9	ТС3-250/10	250	10	5,5	1,0	3,8	3,5
10	ТС3-400/10	400	10	5,5	1,3	5,4	3,0
11	ТС3-630/10	630	10	5,5	2,0	7,3	1,5
12	ТС3-1000/10	1000	10	5,5	3,0	11,2	1,5
13	ТС3-1600/10	1600	10	5,5	4,2	16,0	1,5
14	ТС3-250/15	250	15	8,0	1,1	4,44	4,0
15	ТС3-400/15	400	15	8,0	1,4	8,0	3,5
16	ТС3-630/15	630	15	8,0	2,3	8,7	2,0
17	ТС3-1000/15	1000	15	8,0	3,2	12,0	2,0
18	ТС3-1600/15	1600	15	8,0	4,3	18,0	2,0
19	ТС3С-630/15	630	15	8,0	2,0	8,5	2,0
20	ТС3С-1000/15	1000	15	8,0	3,0	12,0	2,0

1.2. Исходные данные

Трехфазный силовой понижающий трансформатор имеет следующие данные.

Тип трансформатора

Соединение обмоток $Y / Y - 0$.

Номинальные данные:

$$S_n = \quad \text{кВА}, \quad U_{1n} = \quad \text{кВ}, \quad U_{2n} = 0,4 \text{ кВ}, \quad u_k = \quad \%,$$

$$P_o = \quad \text{кВт}, \quad P_k = \quad \text{кВт}, \quad i_o = \quad \%, \quad \cos \varphi_2 = 0,8$$

Характер нагрузки активно-индуктивный.

1.3. Решение задачи 1

1. Коэффициент трансформации

$$K = U_{1n} / U_{2n} =$$

2. Фазное напряжение трехфазного трансформатора при соединении фаз обмотки "звездой", В

$$U_{1\text{фн}} = U_{1n} / \sqrt{3} =$$

3. Номинальный ток первичной обмотки, А

$$I_{1n} = I_{1\text{фн}} = S_n / (3U_{1\text{фн}}) = S_n / (\sqrt{3} U_{1n}) =$$

4. Схема замещения трансформатора

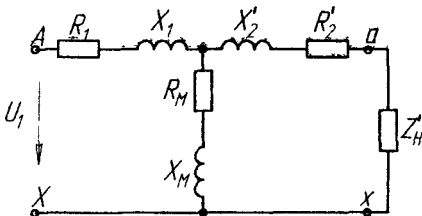


Рис.1. Схема замещения

5. Параметры схемы замещения

Активное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$r_k = P_k / 3 \cdot I_{1\Phi n}^2 =$$

Полное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$z_k = u_k \cdot U_{1\Phi n} / I_{1\Phi n} =$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} =$$

Параметры обмоток, Ом

$$r_1 \cong r_2' = r_k / 2 =$$

Полное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$z_m \cong U_{1\Phi n} / (i_0 \cdot I_{1n}) =$$

Активное сопротивление намагничивающего контура

$$r_m \cong P_0 / 3 (i_0 \cdot I_{1n})^2 =$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} =$$

6. КПД трансформатора

Расчетная формула КПД

$$\eta = P_2 / P_1.$$

где $P_2 = \beta S_n \cos \varphi_2$ - полезная мощность ,

$P_1 = P_2 + \Sigma P$ - потребляемая мощность,

$\Sigma P = P_0 + \beta^2 P_k$ - сумма потерь.

Расчеты $\eta = f(\beta)$ сведены в табл.2.

Расчет КПД η

$\cos \varphi_2 = 0,8$; характер нагрузки активно-индуктивный

β	P_2 , кВт	ΣP , кВт	P_1 , кВт	η , %
0,25				
0,50				
0,75				
1,00				
1,25				

7. Процентное изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки от нагрузки $\Delta U = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$

Расчетная формула

$$\Delta U = u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2 + (u_p \cos \varphi_2 + u_a \sin \varphi_2)^2 / 200 \approx u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2,$$

где активная составляющая

$$u_a = (I_1 \cdot r_k / U_{1\text{фн}}) 100\% =$$

реактивная составляющая

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2} =$$

Расчеты $\Delta U = f(\beta)$ сведены в табл.3.

Таблица 3

Изменение выходного напряжения ΔU

$\cos \varphi_2 = 0,8$; характер нагрузки активно-индуктивный

β	$u_a \cos \varphi_2$	$u_p \sin \varphi_2$	$\Delta U, \%$
0,25			
0,50			
0,75			
1,00			
1,25			

График зависимости ΔU дан на рис.2.

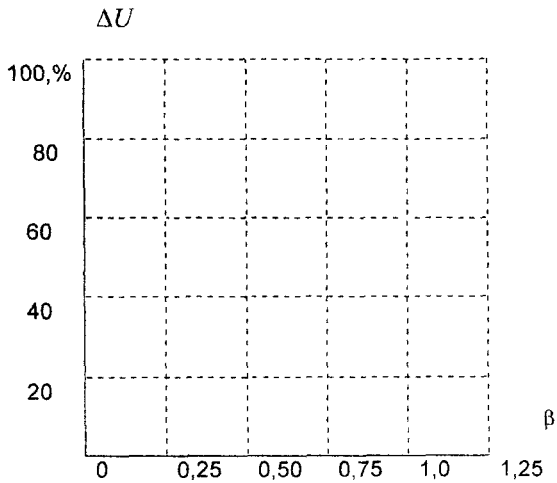


Рис.2. Зависимость $\Delta U = f(\beta)$

Выводы:

2. Задача 2

2.1. Задание

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие данные, приведенные в табл. 1:

число полюсов $2p$, номинальная мощность $P_{2н}$, линейное напряжение обмотки ротора $U_{2л}$, активные сопротивления фазы статора r_1 и ротора r'_2 при 20°C , индуктивные сопротивления фазы статора x_1 и ротора x'_2 .

Частота сети $f_1 = 50$ Гц. Напряжение сети $U_1 = 380$ В.

Соединение обмоток статора и ротора "звезда".

Класс нагревостойкости изоляции – F.

Расчетная температура обмоток 115°C .

Номер варианта определяется суммой двух последних цифр шифра студента.

Требуется:

1. Определить синхронную частоту вращения.
2. Определить потребляемый ток, момент и коэффициент мощности при пуске двигателя с замкнутой накоротко обмоткой ротора, т.е. без пускового реостата.
3. Определить сопротивление пускового реостата R_p , при котором начальный пусковой момент имеет максимально возможное значение. Определить в этом режиме пусковой момент, ток статора и коэффициент мощности.
4. Рассчитать механические характеристики двигателя для трех значений добавочных сопротивлений в цепи ротора:
 $R_d = 0$, $R_d = R_p / 2$, $R_d = R_p$.

Таблица 1

Данные асинхронных двигателей с фазным ротором

Вариант	Тип двигателя	2р	$P_{2н}$ кВт	U_{21} В	r_2 Ом	r_1 Ом	x_1 Ом	x_2 Ом
1	4AK160S4Y3	4	11,0	305	0,2700	0,2320	0,668	0,544
2	4AK160M4Y3	4	14,0	300	0,1880	0,1470	0,479	0,513
3	4AK180M4Y3	4	18,5	295	0,0989	0,1060	0,258	0,233
4	4AK200M4Y3	4	22,0	340	0,0900	0,0734	0,258	0,310
5	4AK200L4Y3	4	30,0	350	0,0743	0,0634	0,217	0,281
6	4AK225M4Y3	4	37,0	160	0,0534	0,0102	0,187	0,0376
7	4AK250SA4Y3	4	45,0	230	0,0391	0,0111	0,173	0,0758
8	4AK250SB4Y3	4	55,0	200	0,0277	0,0120	0,129	0,0426
9	4AK250M4Y3	4	71,0	150	0,0193	0,0128	0,085	0,0446
10	4AK160S6Y3	6	7,5	300	0,4810	0,3530	0,972	0,920
11	4AK160M6Y3	6	10,0	310	0,2900	0,2590	0,662	0,807
12	4AK180M6Y3	6	13,0	325	0,1940	0,2110	0,496	0,614
13	4AK200M6Y3	6	18,5	360	0,1410	0,1470	0,336	0,391
14	4AK200L6Y3	6	22,0	330	0,1210	0,1010	0,307	0,311
15	4AK225M6Y3	6	30,0	140	0,0942	0,0120	0,267	0,0572
16	4AK160S8Y3	8	5,5	300	0,6520	0,7320	1,650	1,612
17	4AK160M8Y3	8	7,1	290	0,4560	0,4030	1,290	1,420
18	4AK180M8Y3	8	11,0	270	0,2430	0,1670	0,700	0,685
19	4AK200M8Y3	8	15,0	360	0,1940	0,2030	0,472	0,631
20	4AK225M8Y3	8	22,0	102	0,1400	0,0118	0,471	0,0441

2.2. Исходные данные

Тип двигателя

$$2p = \quad , \quad P_{2н} = \quad \text{кВт}, \quad U_{2,1} = \quad \text{В},$$

$$r_1 = \quad \text{Ом}, \quad r_2' = \quad \text{Ом} , \quad x_1 = \quad \text{Ом} , \quad x_2' = \quad \text{Ом}$$

2.3. Решение задачи 2

1. Синхронная частота вращения, об/мин

$$n_1 = 60 f_1 / p =$$

2. Фазное напряжение обмотки статора при соединении фаз обмотки "звездой", В

$$U_{1\phi} = U_1 / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220.$$

3. Коэффициент трансформации обмоток статора и ротора

$$k = U_{1\phi} / U_{2\phi} = U_1 / U_{2,1} =$$

4. Активные сопротивления обмоток при 115°С, Ом

$$R_1 = r_1 (235+115) / (235+20) =$$

$$R_2' = r_2' (235+115) / (235+20) =$$

5. Расчет параметров при отсутствии пускового реостата (естественная механическая характеристика)

Полное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$Z_k = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} ,$$

$$\text{где } R_k = R_1 + R_2' =$$

$$X_k = x_1 + x_2' =$$

Начальный пусковой ток, А

$$I_n = U_{1\phi} / Z_k =$$

Коэффициент мощности при пуске

$$\cos \varphi = R_k / Z_k =$$

Пусковой момент, Нм

$$M_n = p m U_{1\Phi}^2 R_2 / (2\pi f_l Z_k^2) =$$

где $m=3$ - число фаз обмотки статора.

Критическое скольжение

$$s_k \cong R_2 / X_k =$$

Максимальный момент, Нм

$$M_k \cong pm U_{1\Phi}^2 / (4 \pi f_l X_k) =$$

6. Расчет параметров для режима работы, при котором пусковой момент имеет максимальное значение

Сопротивление пускового реостата определяем из условия, что пусковой момент M_n имеет максимально возможное значение M_k ($M_n = M_k$), поэтому критическое скольжение

$$s_k \cong R_{2\Sigma} / X_k = 1.$$

Суммарное активное сопротивление роторной цепи определяется сопротивлением обмотки ротора и сопротивлением пускового реостата

$$R_{2\Sigma} = R_2 + R_p = X_k.$$

Откуда определяем приведенное значение активного сопротивления роторной цепи, Ом

$$R'_p = X_k - R_2 =$$

Искомое сопротивление пускового реостата, Ом

$$R_p = R'_p / k^2 =$$

Полное сопротивление короткого замыкания при наличии пускового реостата R_p , Ом

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} =$$

$$\text{где } R_k = R_1 + R_2 + R_p =$$

Начальный пусковой ток, А

$$I_n = U_{1\phi} / Z_k =$$

Коэффициент мощности при пуске

$$\cos \varphi_k = R_k / Z_k =$$

7. Расчет параметров при добавочном сопротивлении $R_d = R_p / 2$

При добавочном сопротивлении $R_d = R_p / 2$ суммарное сопротивление роторной цепи, Ом

$$R_{2\Sigma} = R_2 + R_p / 2 =$$

Полное сопротивление короткого замыкания при $R_d = R_p / 2$, Ом

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} =$$

$$\text{где } R_k = R_1 + R_2 + R_p / 2 =$$

Пусковой момент, Нм

$$M_n = p m U_{1\phi}^2 R_{2\Sigma} / (2\pi f_1 Z_k^2) =$$

Критическое скольжение

$$s_k \cong R_{2\Sigma} / Z_k =$$

8. Расчет механических характеристик

Расчет механических характеристик ведем по упрощенной формуле Клосса

$$M = 2M_k / (s_k/s + s/s_k).$$

Значения M_k и s_k определены ранее, причем s_k различно для каждой механической характеристики.

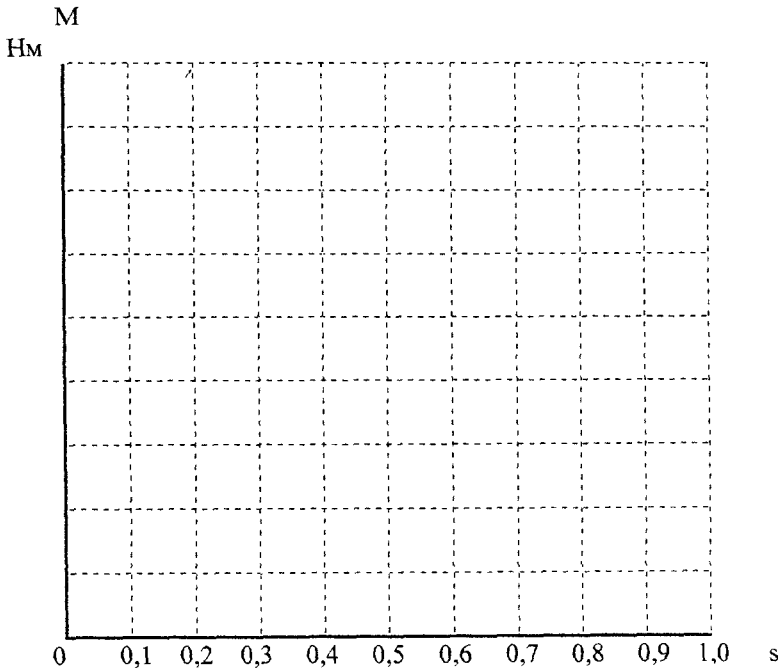
Расчеты механических характеристик $M = f(s)$ для трех значений добавочных сопротивлений R_d сведены в табл.2.

Следует отметить, что приближенная формула Клосса дает значительную погрешность при больших значениях скольжения, поэтому пусковой момент при скольжении $s=1$ в табл.2 принимается по предыдущему расчету.

Электромагнитный момент M , Нм

$$M_K =$$

R	s							
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0
0	0							
$R_p/2$	0							
R_p	0							

Рис. 1. Механические характеристики $M = f(s)$ **Выводы:**

3. Задача 3

3.1. Задание

Параметры генератора постоянного тока параллельного возбуждения приведены в табл. 1. Здесь приняты обозначения: номинальная мощность $P_{нг}$ и напряжение $U_{нг}$, ток возбуждения $i_{вг}$, сопротивление обмотки якоря при 15°C $R_{я}$, частота вращения $n_{нг}$, КПД η .

При расчете пренебречь реакцией якоря и считать ток возбуждения машины постоянным.

Исходные данные к задаче содержат 20 вариантов. Номер варианта определяется суммой двух последних цифр шифра студента.

Требуется:

1. Определить, какую частоту вращения разовьет данная машина в качестве двигателя, считая, что КПД при номинальной нагрузке в генераторном и двигательных режимах работы равны. Напряжение на зажимах двигателя и его номинальную мощность выбрать по табл. 1.
2. Определить изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу (током якоря при холостом ходе пренебречь).
3. Определить, как изменится частота вращения двигателя, если подведенное к обмотке якоря напряжение уменьшится до $0,8 U_{нд}$ при неизменном тормозном моменте, соответствующем номинальной мощности двигателя.

Таблица 1

Данные машин постоянного тока

Вариант	$P_{нг}$, кВт	$U_{нг}$, В	$i_{вг}$, А	$n_{нг}$, об/мин	η , %	$R_{я}$, Ом	$P_{нд}$, кВт	$U_{нд}$, В
1	215	230	9,0	630	0,920	0,074	195	220
2	115	470	4,0	850	0,915	0,0715	107	440
3	27	115	5,0	1150	0,860	0,02	25	110
4	19	230	2,0	1500	0,845	0,16	17	220
5	14	230	1,6	1500	0,865	0,21	12	220
6	11	230	1,2	1500	0,840	0,31	9	220
7	8	230	2,0	3000	0,835	0,44	6	220
8	6	230	1,0	1500	0,825	0,62	5,5	220
9	4,5	115	1,6	3000	0,800	0,23	4	110
10	3,2	115	1,4	2860	0,785	0,34	3	110
11	2,2	115	0,43	2000	0,820	0,41	2,04	110
12	1,35	115	0,43	1450	0,810	0,84	1,25	110
13	0,85	115	0,33	2000	0,680	1,62	0,79	110
14	1,35	230	0,23	1450	0,700	3,44	1,25	220
15	0,85	230	0,22	2930	0,680	6,64	0,79	220
16	1,00	115	0,25	2300	0,740	3,31	0,93	110
17	0,67	115	0,25	2800	0,740	2,34	0,62	110
18	1,00	230	0,15	2930	0,740	4,87	0,93	220
19	0,67	230	0,18	2300	0,680	10,50	0,62	220
20	0,37	230	0,18	1450	0,680	15,50	0,34	220

3.2. Исходные данные

Заданы параметры генератора постоянного тока параллельного возбуждения : номинальная мощность $P_{нг}$ и напряжение $U_{нг}$, ток возбуждения $i_{вг}$, сопротивление обмотки якоря при 15 °С $R_{я}$, частота вращения $n_{нг}$, КПД η .

При расчете пренебречь реакцией якоря и считать ток возбуждения машины постоянным.

Вариант	$P_{нг}$, кВт	$U_{нг}$, В	$i_{нг}$, А	$n_{нг}$, об/мин	η , %	$R_{я}$, Ом	$P_{нд}$, кВт	$U_{нд}$, В

3.3. Решение задачи 3

1. Номинальный ток машины, А

- в режиме генератора

$$I_{нг} = P_{нг} / U_{нг} =$$

- в режиме двигателя

$$I_{нд} = P_{нд} / (U_{нд}\eta) =$$

2. Ток в обмотке якоря, А

- в режиме генератора

$$I_{я\ нд} = I_{нг} + i_{вг} =$$

- в режиме двигателя

$$I_{я\ нд} = I_{нд} - i_{вд} =$$

По условию задачи ток возбуждения остается неизменным

$$i_{вг} = i_{вд}$$

3. Сопротивление обмотки якоря, приведенное к температуре 75°С, Ом

$$R_{я\ 75^\circ} = R_{я\ 15^\circ} (235+75) / (235+15) =$$

4. ЭДС обмотки якоря при номинальной нагрузке, В

- в режиме генератора

$$E_{нг} = U_{нг} + I_{я\ нг} R_{я\ 75^\circ} + \Delta U_{щ} =$$

- в режиме двигателя

$$E_{нд} = U_{нд} - I_{я\ нд} R_{я\ 75^\circ} - \Delta U_{щ} =$$

Падение напряжения в переходном контакте для угольно-графитных щеток принимают

$$\Delta U_{щ} = 2В.$$

5. Частота вращения в режиме двигателя при номинальной нагрузке

Частоту вращения можно определить из формулы ЭДС

$$E = c n \Phi,$$

где c - постоянный для данной машины коэффициент.

Магнитный поток Φ считаем постоянным, так как ток возбуждения по условию задачи не меняется, а реакцией якоря пренебрегаем.

Таким образом, частота вращения двигателя $n_{нд}$ при номинальной нагрузке может быть найдена из соотношения

$$E_{нг} / E_{нд} = n_{нг} / n_{нд},$$

откуда

$$n_{нд} = n_{нг} (E_{нд} / E_{нг}) =$$

6. Изменение частоты вращения двигателя

Для того, чтобы найти изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, используем уравнения ЭДС двигателя:

при номинальной нагрузке

$$E_{нд} = U_{нд} - I_{я\ нд} R_{я\ 75^\circ} - \Delta U_{щ} = c n_{нд} \Phi$$

при холостом ходе, пренебрегая током якоря (по условию задачи),

$$E_{од} \approx U_{нд} = c n_{од} \Phi_0$$

Откуда, принимая магнитный поток постоянным, получаем соотношение

$$n_{од} / n_{нд} = U_{нд} / E_{нд},$$

из которого определяем искомую частоту вращения двигателя при холостом ходе

$$n_{од} = n_{нд} (U_{нд} / E_{нд}) =$$

Относительное изменение частоты вращения

$$\Delta = (n_{од} - n_{нд}) / n_{нд} 100\% =$$

7. Частота вращения двигателя при пониженном напряжении

Для определения частоты вращения двигателя при пониженном напряжении, рассмотрим сначала формулу электромагнитного момента

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_{я\delta}$$

где k - постоянный для данной машины коэффициент.

По условию задачи при изменении напряжения момент двигателя остается равным номинальному, и магнитный поток Φ не меняется. Отсюда следует, что ток обмотки якоря при изменении напряжения также остается постоянным, равным номинальному току $I_{я\delta}$.

Эти обстоятельства позволяют записать формулы частоты вращения двигателя:

- при номинальном напряжении $U_{нд}$

$$n_{нд} = (U_{нд} - I_{я\delta} R_{я\delta} - \Delta U_{ш}) / c\Phi;$$

- при пониженном напряжении $0,8U_{нд}$

$$n = (0,8U_{нд} - I_{я\delta} R_{я\delta} - \Delta U_{ш}) / c\Phi$$

Искомое изменение частоты вращения

$$n / n_{нд} = (0,8U_{нд} - I_{я\delta} R_{я\delta} - \Delta U_{ш}) / (U_{нд} - I_{я\delta} R_{я\delta} - \Delta U_{ш}) =$$

Выводы:

С о д е р ж а н и е

1. Информация о дисциплине

1.1. Предисловие	3
1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы	4

2. Рабочие учебные материалы

2.1. Рабочая программа	5
2.2. Тематический план дисциплины	9
2.3. Структурно-логическая схема дисциплины	14
2.4. Временной график изучения	12
2.5. Практический блок	16
2.6. Рейтинговая система оценки знаний при использовании ДОТ	18

3. Информационные ресурсы дисциплины

3.1. Библиографический список	19
3.2. Опорный конспект	20
Раздел 1. Трансформаторы	21
Раздел 2. Асинхронные двигатели	30
Раздел 3. Синхронные машины	45
Раздел 4. Машины постоянного тока	70
3.3. Учебное пособие (письменные лекции)	94
3.4. Технические и программные средства обеспечения дисциплины	94
3.5. Методические указания к проведению практических занятий	95
3.6. Методические указания к выполнению лабораторных работ	117

4. Блок контроля освоения дисциплины

4.1. Задания на контрольную работу и методические указания к её выполнению	145
4.2. Текущий контроль	150
4.3. Итоговой контроль	151

5. Рабочая тетрадь

5.1. Тетрадь 1	163
5.2. Тетрадь 2	187