

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

_____ Е.И. Луковникова

«_____» декабря 2018 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Б1.Б.12

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

13.03.02 Энергоэнергетика и электротехника

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	4
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ	4
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости	5
4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам	8
4.3 Лабораторные работы.....	88
4.4 Практические занятия.....	89
4.5. Контрольные мероприятия: контрольная работа.....	89
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	91
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	92
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	92
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	93
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	93
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ практических работ	96
9.2. Методические указания по выполнению курсовой работы.....	248
10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	249
11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	249
Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....	251
Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины	257
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе	258
Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....	259

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина «Электрические машины» охватывает круг вопросов, относящихся к научно-исследовательскому и производственно-технологическому видам профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Целью изучения дисциплины является ознакомление обучающихся с основами теории и эксплуатационными характеристиками электрических машин и трансформаторов, а также формирования прочной теоретической и практической базой знаний в области электромеханического и статического преобразования энергии, принципа действия основных видов электрических машин, трансформаторов и особенностей их применения.

Задачи дисциплины

– получение фундаментальных теоретических и практических знаний в области работы электрических машин;

– ознакомление с основными процессами, протекающими в электрических машинах.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-2	способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - соответствующий физико-математический аппарат; - методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач; <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - применять физико-математический аппарат; - применять методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования; <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками использования физико-математического аппарата; - методами анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач.
ПК-1	способность участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - нормативные документы по планированию, подготовке и выполнению типовых экспериментальных исследований; <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - пользоваться методикой по подготовке и выполнению экспериментальных исследований; <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> - элементами экспериментального анализа по заданной методике
ПК-2	способность обрабатывать результаты экспериментов	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> - методику обработки результатов эксперимента; <p>уметь:</p>

		<ul style="list-style-type: none"> - пользоваться методикой по обработке данных экспериментов; - владеть: - необходимыми элементами по обработке результатов экспериментов
--	--	--

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.12 Электрические машины относится к базовой части.

Дисциплина Электрические машины базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как: Физика, Математика, Теоретические основы электротехники.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Электрические машины представляет основу для изучения дисциплин: Производство и передача электрической энергии, Электрическая часть станции и подстанций, Переходные процессы, Релейная защита.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Контрольная работа	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	2,3	4,5	288	157	52	52	53	95	кр	экзамен, зачет
Заочная	2,3	-	288	32	8	12	12	243	кр	экзамен, зачет
Заочная (ускоренное обучение)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час)	Распределение по семестрам, час	
			4	5
1	2	3	4	5
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	140	25	72	68
Лекции (Лк)	52	20	18	34
Лабораторные работы (ЛР)	52	5	18	34
Практические занятия (ПЗ)	53	-	36	17
Курсовая работа	+	-	+	-
Групповые (индивидуальные) консультации	+	+	+	+
II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)	95	-	36	59
Подготовка к ЛР	33	-	8	25
Подготовка к ПЗ	33	-	8	25
Подготовка к зачету	9	-	-	9
Подготовка к экзамену в течение семестра	10	-	10	-
Выполнение контрольной работы	10	-	10	-
III. Промежуточная аттестация экзамен зачет	36	-	36	-
	+	-	-	+
Общая трудоемкость дисциплины час	288	-	144	144
зач. ед.	8	-	4	4

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий - для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостоятельная работа обучающихся
			лекции и	Лабораторные занятия	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Электрические машины	2,5	0,5	-	-	2
1.1.	Введение. Основные физические законы электромеханического	2,5	0,5	-	-	2

	преобразования энергии.					
2.	Трансформаторы	49,5	7,5	10	18	14
2.1.	Назначения и области применения трансформаторов. Принцип действия и устройство трансформаторов	7,5	1,5	4	-	2
2.2	Основные зависимости и соотношения трансформаторов. Схема замещения трансформатора. Приведенный трансформатор.	15	2	-	9	4
2.3	Трехфазные трансформаторы. Обозначения трансформаторов. Группы соединения обмоток.	15	2	-	9	4
2.4	Параллельная работа трансформаторов. Регулирование напряжения трансформаторов	12	2	6	-	4
3.	Асинхронные машины	56	10	8	18	20
3.1	Принцип действия и устройство трехфазного асинхронного двигателя	10	2	-	4	4
3.2	Основы теории асинхронных машин.	14	2	4	4	4
3.3	Электромагнитный момент и механические характеристики асинхронного двигателя.	14	2	4	4	4
3.4	Пуск и регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей.	10	2	-	4	4
3.5	Регулирование частоты и направления вращения асинхронного двигателя	8	2	-	2	4
4.	Синхронные машины	73	17	18	8	30
4.1.	Общие сведения о синхронных машинах. Принцип действия синхронного генератора. Возбуждение синхронных машин.	15	4	3	2	6
4.2	Магнитное поле и характеристики синхронных генераторов.	20	5	5	2	8
4.3	Параллельная работа синхронного генератора с сетью. Включение синхронного генератора на параллельную работу по способу точной	19	4	5	2	8

	синхронизации. Регулирование активной и реактивной мощности синхронной машины включенной в сеть.					
4.4	Угловые и U-образные характеристики синхронного генератора.	19	4	5	2	8
5.	Машины постоянного тока	71	17	16	9	29
5.1.	Принцип действия и устройство коллекторных машин постоянного тока.	16	4	4	2	6
5.2	Генераторы постоянного тока. Генератор независимого возбуждения. Генератор параллельного возбуждения.	18	5	4	2	7
5.3	Двигатели постоянного тока. Двигатели параллельного и последовательного возбуждения.	18	4	4	2	8
5.4	Реакция якоря машины постоянного тока	19	4	4	3	8
	ИТОГО	252	52	52	53	95

- для заочной формы обучения:

№ раз- дела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоем- кость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			самостояте льная работа обучающихс я
			лекци и	Лаб ора тор ные зая тия	прати ческие занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Электрические машины	2,5	0,5	-	-	2
1.1.	Введение. Основные физические законы электромеханического преобразования энергии.	2,5	0,5	-	-	2
2.	Трансформаторы	74,5	1,5	2	4	67
2.1.	Схема замещения трансформатора. Параллельная работа трансформаторов. Регулирование напряжения трансформаторов.	74,5	1,5	2	4	67
3.	Асинхронные машины	58	2	2	4	50
3.1	Принцип действия и устройство трехфазного асинхронного двигателя. Электромагнитный момент и	58	2	2	4	50

	механические характеристики асинхронного двигателя. Пуск и регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей.					
4.	Синхронные машины	70	2	4	2	62
4.1.	Принцип действия синхронного генератора. Магнитное поле и характеристики синхронных генераторов. Параллельная работа синхронного генератора с сетью.	70	2	4	2	62
5.	Машины постоянного тока	70	2	4	2	62
5.1.	Принцип действия и устройство коллекторных машин постоянного тока. Реакция якоря машины постоянного тока	70	2	4	2	62
	ИТОГО	275	8	12	12	243

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

Раздел 1. Электрические машины

Тема 1.1. Введение. Основные физические законы электромеханического преобразования энергии.

1.1.1. Введение

Без электрической энергии нельзя представить современное промышленное и сельскохозяйственное производство, быт и в целом жизнь современного общества. Широкое применение электрической энергии, по сравнению с другими видами энергии, обусловлено возможностями ее производства, распределения и передачи на большие расстояния, управляемостью, а так же высоким КПД преобразования в другие виды энергии.

Почти вся электроэнергия вырабатывается синхронными электрическими машинами – генераторами, установленными на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях. Большая часть (60-70%) электрической энергии после распределения преобразуется в механическую также электрическими машинами – двигателями.

Самые крупные электрические машины, установленные на электростанциях имеют мощность в одной единице до 500 -1200 МВт, а самые маленькие – до нескольких милливатт (0,003 Вт). Самые быстроходные имеют чистоту вращения до 200 тыс. об/мин, а тихоходные до нескольких оборотов в сутки. КПД электрических машин достигает 98,5%.

История создания электрических машин начинается с открытия английского физика М. Фарадея 1831 г. закона электромагнитной индукции.

Первое практическое применение электрической машины было в 1833 г. Русский ученый Б.С. Якоби создал электродвигатель постоянного тока мощностью 1 кВт и применил его для привода гребного винта катера на Неве, движущегося против течения.

В 1860 -1870 были созданы первые генераторы постоянного тока, а в 1873 г. машины переменного тока.

В 1884 году братья Гопкинсоны предложили трансформатор с замкнутым сердечником.

В 1888 г. М.О. Доливо – Добровольский предложил систему трехфазного тока, а в 1889 году создал трехфазный асинхронный электродвигатель. В том же году под его руководством была создана система электропередача напряжением 15 кВ длиной 175 км. Тогда же появился синхронный генератор.

В конце XIX века идет быстрое наращивание мощностей электростанций, качественное улучшение электрооборудования, интенсификация процессов производства и передачи электроэнергии, расширение сфер использования электрической энергии. Особенно расширяются области использования электропривода на основе полупроводниковой техники и постоянных магнитов с высокими энергетическими показателями.

Машины постоянного тока используются главным образом в качестве двигателей из-за благоприятных характеристик и высокой перегрузочной способности в системах регулируемого электропривода.

Основное применение асинхронные машины нашли, как двигатели в системах нерегулируемого и регулируемого электропривода, при питании через преобразователь частоты. Применяются на ветроустановках и микро ГЭС в качестве генераторов небольшой мощности.

Синхронные генераторы сравнительно не большой мощности - от десятков до нескольких тысяч кВт – применяются в системах автономного электроснабжения.

Синхронные двигатели мощностью более 100 – 200 кВт успешно конкурируют с асинхронными двигателями при частотах вращения от 250 об/мин.

Научно – технический прогресс в электромашиностроении во многом определяет уровень развития других отраслей науки и техники.

Несмотря на большое разнообразие электрических машин их можно конструктивно свести к следующей модели (Рис. 1.1.1)

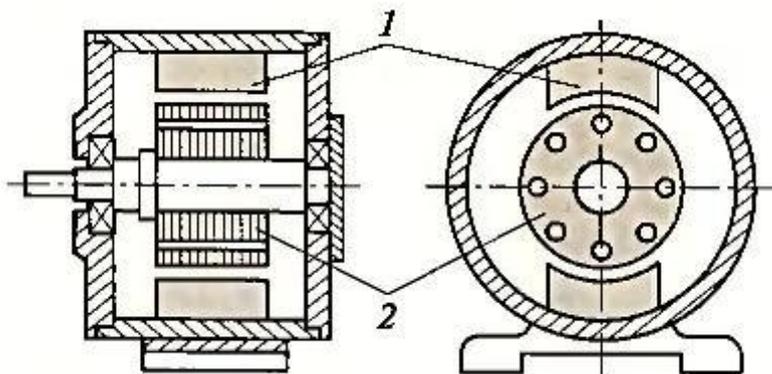


Рис. 1.1.1. Обобщенная конструкция электрической машины

Электрическая машина представляет собой электромагнитную систему, состоящую из ферромагнитного сердечника на статоре (цифра 1) и роторе (цифра 2) и нескольких обмоток образующих статор и ротор. Во вращающихся электрических машинах различные обмотки перемещаются друг относительно друга совместно с частями сердечника, на которых они размещены; в трансформаторах же сердечники и обмотки взаимно неподвижны. Неподвижный элемент электрической машины называется статором, а подвижный – ротором.

1.1.2. Основные физические законы электромеханического преобразователя энергии

В электрических машинах осуществляется преобразование электрической энергии в механическую и механической в электрическую. Поэтому электрические машины называют электромеханическими преобразователями энергии (ЭМП). Основными физическими

законами, описывающие работу ЭМП являются законы электромагнитной индукции (Фарадея-Максвелла) и электромагнитного взаимодействия (закон Ампера) и Био - Савара- Лапласа о взаимодействии проводника с током и магнитного поля.

Закон электромагнитной индукции

Любая электрическая машина представляет собой электромеханический преобразователь энергии. Она объединяет в себе электрическую и механическую системы. Связь между обеими системами в электрической машине осуществляется посредством магнитного поля (рис. 1.1.2).



Рис. 1.1.2. Электромеханическая связь в электрической машине

Взаимодействие магнитного поля с электрической и механической системами проявляется, с одной стороны, в появлении ЭДС в элементах электрической системы а, с другой стороны, в возникновении силы f_e , действующей на элементы механической системы, что и обуславливает электромеханическое преобразование энергии. Процесс такого преобразования подчиняется закону сохранения энергии: изменение энергии, поступающей в электрическую машину со стороны электрической ($dW_{эл}$) и механической ($dW_{мех}$) систем, расходуется на изменение энергии магнитного поля ($dW_{мг}$) и на покрытие потерь, сопровождающих основной процесс преобразования энергии.

Если все потери в электрической машине вынести во внешние цепи, то уравнение баланса полезного преобразования энергии будет иметь вид:

$$\pm dW_{эл} \mp dW_{мех} = dW_{мг} \quad (1.1.1)$$

Знак «+» означает, что энергия поступает в электрическую машину из внешней системы, а знак «-» – что энергия отдается электрической машиной во внешнюю систему.

Из этого уравнения следует, что процесс преобразования энергии в электрической машине сопровождается непрерывным изменением энергии магнитного поля. Причиной ее изменения является энергия, поступающая либо из электрической, либо из механической системы.

Закон электромагнитной индукции определяет процесс наведение ЭДС в проводниках, находящихся в магнитном поле. Если в переменное магнитное поле поместить проводящий контур, то в нем возникнет ЭДС. Наведенная (индуцированная) в проводнике ЭДС (e) количественно равна скорости изменения потокосцепления ψ (по Максвеллу):

$$e = - \frac{d\psi}{dt}. \quad (1.1.2)$$

Направление ЭДС определяется по правилу правой руки: если правую руку расположить так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а отогнутый большой палец направить в сторону перемещения проводника относительно поля, то четыре пальца покажут направление ЭДС. Знак «минус» в формуле для ЭДС e обусловлен инерционным характером магнитного поля: наведенная ЭДС всегда направлена так, что создаваемый ею ток препятствует изменению магнитного поля.

$$\psi = \Phi = B \cdot S = B \cdot l \cdot 2x, \quad (1.1.3)$$

где B - магнитная индукция; l - длина активной части контура; x - смещение плоскости контура относительно оси магнитного поля.

Величина потокосцепления одновиткового контура (рис. 1.1.3) определяется потоком Φ , пронизывающим площадь S , ограниченную контуром

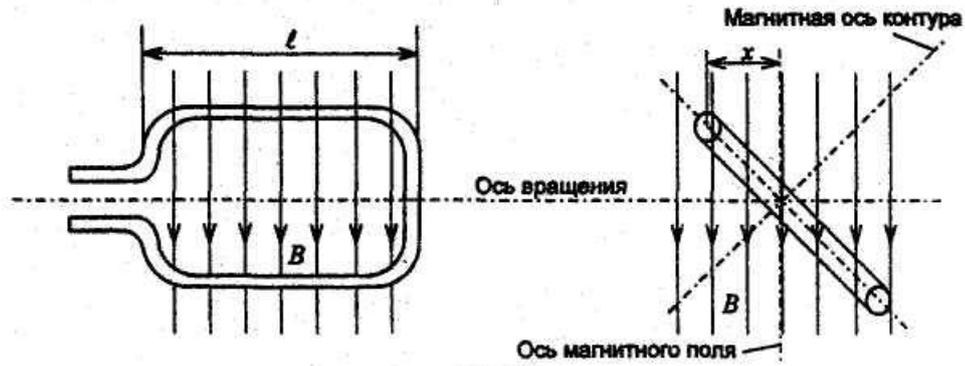


Рис 1.1.3. Вращение контура в магнитном поле

Возможны три случая изменения потокосцепления этого контура:

- контур неподвижен, поток меняется во времени;
- контур вращается, поток неизменен;
- контур вращается и поток изменяется во времени.

Поэтому потокосцепление ψ является функцией пространственной координаты x и времени t ,

$$\psi = \psi(x, t).$$

Следовательно,

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \psi}{\partial x} dx.$$

Подставляя это выражение в (1.1.2), получим

$$e = -\frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot v, \tag{1.1.4}$$

где $v = \frac{dx}{dt}$ – относительная скорость движения контура в магнитном поле.

Практические примеры закона электромагнитной индукции (рис. 1.1.4).

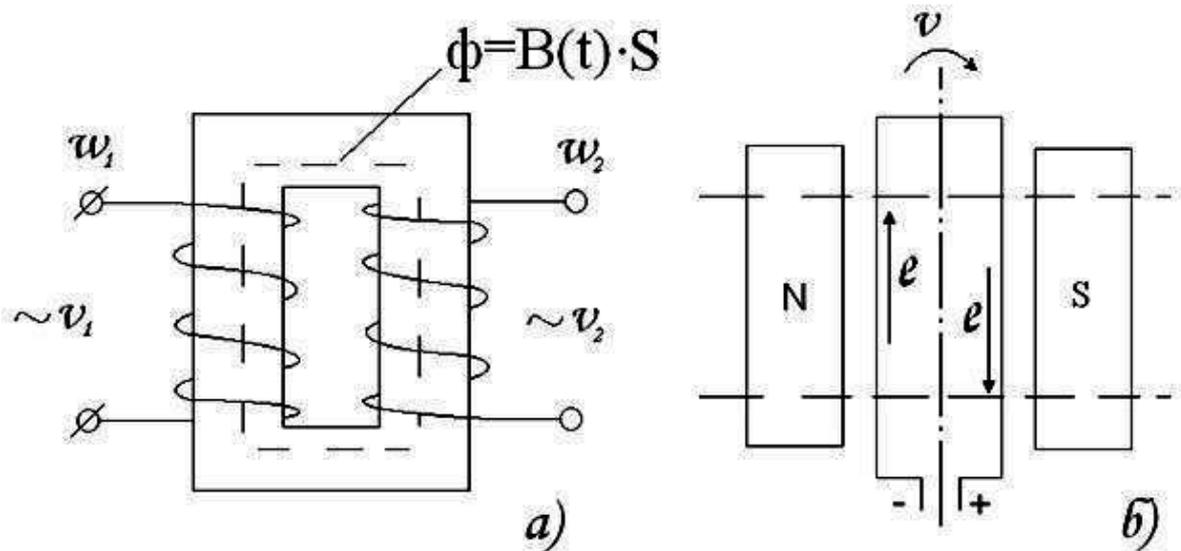


Рис 1.1.4. Практические примеры закона электрической индукции:
а)- трансформатор; б)- электрическая машина.

Для трансформатора $v = 0$

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d(W)}{dt} = W \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega t) = E_m \cdot \sin(\omega t),$$

где $E_m = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot W \cdot \Phi_m$ – амплитудное значение ЭДС, W – число витков обмотки, $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f \cdot W \cdot \Phi_m$ – действующее значение ЭДС.

Для электрических машин, когда стороны катушек находятся под разными полюсами N и S (рис. 1.1.4,б).

ЭДС катушки при $W=1$

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v,$$

где $d\Phi = B \cdot l \cdot dx = 2 \cdot B \cdot l \cdot v dt$.

Для одного проводника, движущегося в магнитном поле при взаимно перпендикулярных направлениях B , l , v закон электромагнитной индукции (формулировка Фарадея):

$$e = B \cdot l \cdot v.$$

Закон электромагнитного взаимодействия

Закон электромагнитного взаимодействия (закон Ампера) выражает связь между магнитным полем с индукцией \vec{B} , током \vec{I} в проводнике длиной dl и действующей на проводник силой $F_{эм}$

$$d\vec{F}_{эм} = I [d\vec{l} \cdot \vec{B}],$$

где $d\vec{l}$ – вектор по модулю равный dl и совпадающий по направлению с током, \vec{B} – вектор магнитной индукции.

Модуль силы Ампера вычисляется по формуле:

$$dF = I \cdot B \cdot dl \cdot \sin\alpha,$$

где α – угол между вектором магнитной индукции и направлением, вдоль которого течёт ток.

Сила dF максимальна когда элемент проводника с током расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции ($\alpha = 90^\circ, \sin\alpha = 1$):

$$dF_{max} = I \cdot B \cdot dl.$$

Направление силы определяется правилом «левой руки»: если расположить ладонь левой руки так, чтобы линии индукции магнитного поля входили во внутреннюю сторону ладони, перпендикулярно к ней, а четыре пальца направлены по току, то отставленный на 90° большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.

Магнитное поле выступает в электрической машине качестве энергоносителя, т.е. посредника подобно пару в паросиловых установках, а само значение индукции (магнитного поля) определяет эффективность преобразователя.

Для расчета магнитной цепи применяется **законы магнитной цепи**. Законы Ома и Кирхгофа для магнитной цепи имеют формальное сходство с цепью электрической. В ЭМП стальные элементы (участки) формируют и локализируют магнитный поток, проводя его через немагнитный зазор, причем на каждом из них напряженность магнитного поля H с достаточной точностью можно считать постоянной, а закон полного тока представляется в виде конечной суммы:

$$\oint H \cdot dl = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + \dots + H_4 \cdot l_4 = \Sigma I,$$

где $H_1 \cdot l_1, H_2 \cdot l_2$ – магнитодвижущие силы участков; № 1,2 и т.д.; $\Sigma I = wI = F$ – магнитодвижущая сила катушки (обмотки).

Магнитная индукция, поток и магнитное сопротивление:

$$B = \mu \cdot H; \Phi = B \cdot S = \frac{F}{\sum_{i=1}^n R_{\mu_i}}; R_{\mu_i} = \frac{l_i}{\mu_i \cdot S_i},$$

где l_i, S_i – длина средней магнитной линии участка i и площадь его поперечной сечение соответственно.

Расчет магнитных цепей ведется аналогично расчетам электрических цепей с использованием следующих формальных аналогий.

Аналогии магнитной и электрических цепей:

Цепь электрическая	$Rэ, Ом$	$I, А$	$\vartheta, в$	$\frac{A}{M^2}$ J	$\frac{B}{M}$ E,	$j, \frac{Cm}{M}$
Цепь магнитная	$R\mu,$ $\frac{A}{B\bar{b}}$	$\Phi, B\bar{b}$	F, A	B, Tu	$\frac{A}{M}$ H,	$\mu, \frac{Гн}{M}$

Законы электромеханики

Электромеханика является одним из разделом физики, в котором рассматривается электромеханическое преобразование энергии. В электрических машинах осуществляется техническое применение законов электромеханического преобразования энергии.

Электромеханика является фундаментальной наукой для которой могут быть сформулированы законы. Таких законов три:

1. Первый закон. Электромеханическое преобразование энергии не может осуществляется с КПД, равным 100%

Созданы электрические машины с КПД, равным 99%, а в трансформаторах 99,8%. Такие высокие КПД являются исключительным достижением. Следует иметь в виду, что такие высокие КПД относятся к машинам большой мощности.

2. Второй закон. Все электрические машины обратимы, т.е. они могут работать как в двигательном, так и в генераторном режиме. Работа электрической машины в двух режимах является важным преимуществом электромеханических преобразователей энергии перед другими преобразователями энергии (дизели, паровые двигатели, двигатели внутреннего сгорания и др.). Одна и та же электрическая машина может работать и в двигательном, и в генераторном режиме. Например, двигатель электровоза при ускорении состава забирает энергию из сети и работает в двигательном режиме, а при торможении отдает энергию в сеть, работая в генераторном режиме.

3. Третий закон. Электромеханическое преобразование энергии осуществляется магнитными полями, неподвижными друг относительно друга.

Неподвижно друг относительно друга поля ротора и статора в электрической машине в его воздушном зазоре создают результирующее поле и электромагнитный момент, определяемый выражение $M_{ЭМ} = \frac{P_{ЭМ}}{\omega}$, где ω – угловая скорость поля, $P_{ЭМ}$ – электромагнитная мощность магнитного поля, сконцентрированная в воздушном зазоре.

Обмотки электрической машины выполняется таким образом, что при протекания по ним токов в воздушном зазоре создается вращающееся магнитное поле. При проектирование электрические машины стараются получить в воздушном зазоре круговое поле которое содержит только одну гармонику. Такое поле называется синусоидальным.

Раздел 2. Трансформаторы

Тема 2.1. Назначения и области применения трансформаторов. Принцип действия и устройство трансформаторов

2.1.1. Назначение, общие сведения о трансформаторах

Трансформатором называется статический индуктивный преобразователь, имеющий две или больше индуктивно связанных взаимно неподвижных обмоток и предназначенный

для преобразования посредством электромагнитной индукции параметров электрической энергии переменного тока (напряжения, тока, частоты, числа фаз).

Электрическая энергия переменного тока подводится к первичной обмотке трансформатора от сети с числом фаз m_1 , фазным напряжением U_1 и частотой f_1 и передается во вторичную обмотку с числом фаз m_2 , фазным напряжением U_2 и частотой f_2 посредством магнитного поля. В большинстве случаев с помощью трансформатора преобразуется только напряжение $U_2 \neq U_1$ и токи $I_2 \neq I_1$ без изменения частоты и числа фаз.

Обычно электрическое соединение между первичной и вторичной обмотками в трансформаторе отсутствует, и энергия из одной обмотки в другую передается только за счет магнитной связи между ними.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы наряду с воздушными и кабельными линиями электропередачи являются основным оборудованием систем электроснабжения. В дальнейшем под термином «трансформатор» без специальной оговорки будет подразумеваться и автотрансформатор.

Основными конструктивными элементами трансформатора являются магнитный сердечник и обмотки, наматываемые на этот сердечник. Магнитный сердечник набирается из листов электротехнической стали, изолированных между собой. Обмотки изготавливаются из медных или алюминиевых изолированных проводников.

Магнитопровод и обмотки составляют активную часть трансформатора.

У трансформаторов с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещается в стальной корпус, заливаемый трансформаторным маслом. В верхней части корпуса устанавливаются проходные изоляторы для вывода обмоток. Расширитель, связанный трубопроводом с корпусом, служит для уменьшения площади соприкосновения масла с воздухом и воспринимает колебания уровня масла при изменении температуры. Радиаторы, установленные на корпусе, увеличивают поверхность охлаждения трансформатора.

Обмотка трансформатора со стороны питания называется первичной, со стороны потребителя – вторичной.

Изменение напряжения в трансформаторе происходит в соответствии с коэффициентом его трансформации. Этот коэффициент равен отношению числа витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток или отношению напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора без нагрузки (при холостом ходе):

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

Трансформаторы изготавливаются на различные номинальные мощности: ... 1 000, 1 600, 2 500, 4 000, 6 300, 10 000 кВА... и др.

Коэффициент шкалы номинальных мощностей трансформаторов равен приблизительно значению 1,6.

Для трансформаторов и автотрансформаторов установлены буквенно-цифровые обозначения, в которых последовательно (слева направо) приводится следующая информация:

- вид устройства (А – автотрансформатор, без обозначения - трансформатор);
- число фаз (О – однофазный, Т – трехфазный);
- наличие расщепленной обмотки низшего напряжения – Р;
- условное обозначение системы охлаждения (см. ниже);
- число обмоток (Т – трёхобмоточный, без обозначения – двухобмоточный);
- наличие системы регулирования напряжения: Н – автоматическое регулирование напряжения под нагрузкой; без обозначения – регулирование напряжения при отключении от сети всех обмоток;
- исполнение (З – защищенное, Г – герметичное);
- специфическая область применения (С – для систем собственных нужд электростанций, Ж – для электрификации железных дорог);
- номинальная мощность, кВ·А;

– класс напряжения обмотки высшего напряжения, кВ.

Трансформаторы в зависимости от номинальной мощности и конструкции оснащаются следующими системами охлаждения:

С – охлаждение естественное воздушное (трансформатор сухой);

СД – охлаждение воздушное с принудительной циркуляцией воздуха (с дутьем);

Н – охлаждение жидким негорючим диэлектриком (совтолом);

НД – охлаждение жидким негорючим диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха (с дутьем);

М – охлаждение естественное масляное;

Д – охлаждение естественное масляное с принудительной циркуляцией воздуха (с дутьем);

ДЦ – принудительная циркуляция воздуха (дутье) и принудительная циркуляция масла.

В настоящее время сухие трансформаторы изготавливаются на мощности до 3 150 кВ·А и напряжения до 10 кВ. Трансформаторы с масляным охлаждением (М, Д, ДЦ) изготавливаются на весь спектр, существующих напряжений и на мощности, достигающие сотен МВ·А. Чем больше мощность трансформатора, тем интенсивнее и сложнее его система охлаждения. Усложнение системы охлаждения позволяет уменьшить массогабаритные показатели трансформаторов.

Важным параметром подключения трансформатора к электрической сети является группа и схема соединений его обмоток. Для системы трехфазного тока применяются в основном три схемы соединения обмоток:

– звезда Y;

– звезда с выведенной нейтралью Y_n ;

– треугольник Δ .

Группой соединений называется угловой сдвиг между одноименными векторами линейных напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора. Этот угловой сдвиг приводится к циферблату часов. Например, группа 12 или 0 соответствует отсутствию углового сдвига между векторами линейных напряжений, группа 11 соответствует угловому сдвигу на 30^0 между этими векторами.

Наибольшее распространение в электрических сетях получили следующие схемы и группы соединений двухобмоточных трансформаторов:

- «звезда – звезда» с выведенной нейтралью $Y/Y_n - 12$;

- «звезда – треугольник» $Y/\Delta - 11$;

- «звезда» с выведенной нейтралью – «треугольник» $Y_n/\Delta - 11$.

Для трехобмоточных трансформаторов наиболее распространенной является схема и группа $Y_n/Y/\Delta - 12, 11$. Здесь группа 12 характеризует отсутствие углового сдвига между векторами линейных напряжений обмоток Y_n и Y , а группа 11 – наличие углового сдвига на 30^0 между векторами линейных напряжений обмоток Y_n и Δ .

Автотрансформаторы отличаются от трансформаторов наличием электрической связи между двумя обмотками. Выполняются автотрансформаторы, как правило, трёхобмоточные, с электрической связью между обмотками высшего и среднего напряжений. Связь обмоток высшего и среднего напряжений с обмоткой низшего напряжения электромагнитная.

Применение автотрансформаторов оказывается экономически целесообразным в сетях 220 кВ и выше для связи двух систем близких номинальных напряжений, например 220 и 110 кВ. Электрически связанные обмотки высшего и среднего напряжения соединяются в звезду с выведенной нейтралью. Обмотки низшего напряжения соединяются в треугольник. Схема и группа соединений обмоток автотрансформаторов $Y_n/Y_n/\Delta - 12, 11$.

В энергосистемах применяют автотрансформаторы несколько более сложной конструкции – с дополнительной (третичной) обмоткой низшего напряжения (6...35 кВ), соединяемой в треугольник. Основное назначение этих обмоток состоит в компенсации гармонических составляющих напряжения, кратных трём, и уменьшении сопротивления нулевой последовательности автотрансформатора.

Обмотку низшего напряжения часто используют для электроснабжения местных потребителей или присоединения синхронных компенсаторов, а на электростанциях – для подключения генераторов.

В последнем случае автотрансформаторы работают как повышающие.

При выборе мощности автотрансформатора, решении вопроса о допустимости того или иного режима, подсчете потерь мощности и энергии в автотрансформаторе необходимо знать нагрузку каждой его обмотки, в особенности наиболее нагруженной.

Режимы, в которых мощность передается из системы высшего напряжения в систему среднего напряжения или в обратном направлении (третичная обмотка не нагружена), являются автотрансформаторными. При этих режимах передаваемая мощность автотрансформатора не должна превышать номинальную.

Если третичная обмотка нагружена (такой режим принято называть комбинированным), то токи в последовательной и общей обмотках можно представить состоящими из двух слагаемых, а именно: а) тока, соответствующего мощности, передаваемой в автотрансформаторном режиме из системы высшего напряжения в систему среднего напряжения (или в обратном направлении); б) тока, соответствующего мощности, передаваемой в трансформаторном режиме через третичную обмотку в том или ином направлении.

Слагаемые токов в последовательной и общей обмотках должны быть суммированы геометрически с учетом направления передачи мощности. Комбинированные режимы трёхобмоточных автотрансформаторов наиболее часты. Подробно данные режимы рассматриваются в курсе «Электрическая часть станций и подстанций».

2.1.2. Устройство силового трансформатора

Современный трансформатор – сложное устройство, состоящее из большого числа узлов, деталей и металлоконструкций. Основными его частями являются магнитная система (магнитопровод) и обмотки. Магнитная система служит для локализации в ней основного магнитного поля трансформатора.

Обмотка – совокупность витков из проводников, в которых суммируются наведенные в них ЭДС для получения высшего, среднего или низшего напряжений (ВН, СН или НН) трансформатора. Электротехническая сталь и медь (алюминий), из которых изготовлены магнитная система и обмотки с отводами, называют активными материалами.

Магнитная система в собранном виде с соединяющими ее деталями и ярмовыми балками образует остов трансформатора, который вместе с обмотками, отводами, элементами переключающего устройства и деталями для их механического крепления называют активной частью трансформатора.

Отводы служат для соединения обмоток с вводами и переключающим устройством, а переключающее устройство – для регулирования напряжения трансформатора. Активную часть воздушного трансформатора иногда закрывают кожухом (защищенное исполнение), который обеспечивает свободный доступ охлаждающего воздуха, защищая одновременно активную часть от попадания посторонних предметов.

Активную часть масляного трансформатора помещают в бак, заполняемый трансформаторным маслом или другим жидким диэлектриком, являющимся основной изолирующей средой и теплоносителем в системе охлаждения.

Бак состоит из дна, стенки, крышки. Бак со съёмной крышкой называют баком с верхним разъемом (обычно дно бака приварено к стенке); с разъемом вблизи дна (для отделения и подъема верхней части) – колокольным (обычно крышка приварена к стенке); с уплотнениями, исключаящими сообщение между внутренним объемом и окружающим атмосферным воздухом – герметичным.

На стенках бака размещают охладители, приводной механизм, иногда контакторы переключающего устройства, а также термосифонный фильтр, коробки контактных соединений для приборов контроля и сигнализации. Крышку бака используют для установки вводов, расширителя и предохранительной трубы.

Вводы служат для присоединения обмоток трансформатора к сети, расширитель – для компенсации колебаний уровня масла в баке при изменениях нагрузки и температуры окружающей среды. Расширитель всегда размещают выше уровня крышки.

Для защиты масла в расширителе от увлажнения используют воздухоосушитель, представляющий собой сосуд (заполненный силикагелем), который сообщается с одной стороны с атмосферным воздухом, а с другой – с воздухом, заполняющим внутренний объем расширителя над «зеркалом» масла.

Для наблюдения за уровнем масла в расширителе применяют маслоуказатели либо со стеклянной трубкой или пластиной, либо стрелочный. В трубопровод расширителя помещают газовое реле, реагирующее на выделение газа при повреждении в активной части трансформатора.

Предохранительная труба (иногда называемая выхлопной) – защитное устройство, предупреждающее повреждение бака при внезапном повышении внутреннего давления и представляющее собой стальной цилиндр, один конец которого сообщается с баком, а другой закрыт стеклянным диском.

В крышке устанавливают гильзы для датчиков термосигнализаторов, измеряющих температуру верхних слоев масла трансформатора. Термосигнализатор имеет электроконтактное устройство, которое включается при заранее заданной температуре. Контакты термосигнализатора включают сигнальную или иную цепь, предупреждая обслуживающий персонал о недопустимом повышении температуры масла в трансформаторе.

2.1.3. Принцип действия трансформатора

Принцип действия трансформатора основан на физическом явлении электромагнитной индукции.

Если на замкнутом стальном сердечнике разместить две электрически не связанные между собой обмотки (рис. 2.1.1) и одну из них присоединить к сети переменного тока с напряжением U_1 , то при прохождении переменного тока I_1 по первичной обмотке в стальном сердечнике возникает переменный магнитный поток Φ .

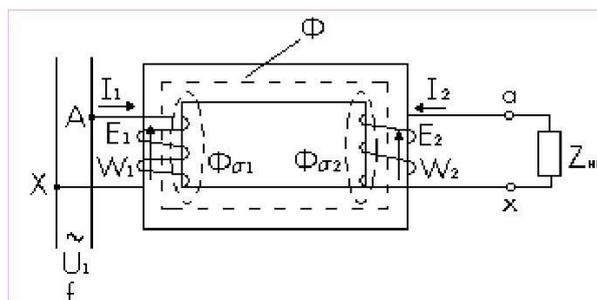


Рис. 2.1.1. Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора

Переменное магнитное поле Φ наводит в обеих обмотках ЭДС (E_1 и E_2). Если вторичную обмотку включить на нагрузку ($Z_{н.г}$), то возникает ток I_2 . Основной магнитный поток Φ создается суммарным действием токов I_1 и I_2 (рис.2.1.2).

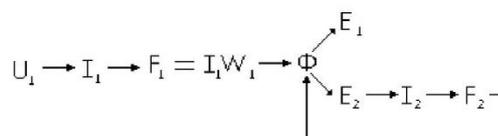


Рис. 2.1.2. Принцип создания магнитного потока в трансформаторе

Тема 2.2. Основные зависимости и соотношения трансформаторов. Схема замещения трансформатора. Приведенный трансформатор

2.2.1. Основные уравнения

ЭДС обмоток

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

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.2.1)$$

Примем, что $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, где ω – круговая частота $\omega = 2\pi f$; f – частота питающей сети.

Тогда

$$e = -W\omega\Phi_m \cos \omega t = -W\omega\Phi_m \sin(90^\circ - \omega t) = W\omega\Phi_m \sin(90^\circ - \omega t). \quad (2.2.2)$$

Амплитуда ЭДС

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

Действующее значение ЭДС

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi\Phi_m W \approx 4,44f\Phi_m W. \quad (2.2.3)$$

Индекс « m » у потока Φ обычно опускают.

По фазе ЭДС E отстает от потока Φ на 90° , что следует из сравнения формул (2.2.1) и (2.2.2).

На векторной диаграмме (рис. 2.2.1) показано расположение векторов E и Φ . Согласно (2.2.3) ЭДС первичной и вторичной обмотки имеют

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi_1;$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_2.$$

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (2.2.4)$$

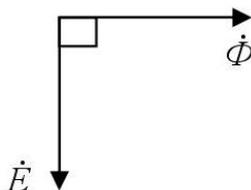


Рис. 2.2.1. Векторная диаграмма

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

Соотношение линейных и фазных напряжений и токов:

для Y: $U_{л} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}$, $I_{л} = I_{\phi}$;

для Δ : $U_{л} = U_{\phi}$, $I_{л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$.

Полная мощность:

однофазного трансформатора $S = U \cdot I$

трехфазного трансформатора $S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л}$.

Активная мощность нагрузки $P = S \cdot \cos\varphi$,

реактивная мощность $Q = S \cdot \sin\varphi$,

где φ – угол нагрузки.

Уравнения напряжений

Магнитный поток трансформатора 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 сцепляющихся только со своей обмоткой. Основным 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).

Потокосцепление рассеяния

$$\Psi_{\sigma} = Li,$$

где $i = I_m \sin\omega t$; L – коэффициент самоиндукции обмотки.

ЭДС рассеяния

$$e_{\sigma} = \frac{d\Psi_{\sigma}}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -\omega LI_m \cos\omega t = \omega LI_m \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Действующее значение ЭДС в комплексном виде

$$\dot{E}_{\sigma} = -jx\dot{I} = -j\omega L\dot{I}, \quad (2.2.5)$$

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

Наличие $(-j)$ в формуле (2.2.5) означает, что вектор ЭДС E стает по фазе от вектора тока I на 90° .

Согласно (2.2.5) можно записать

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -jx_1\dot{I}_1, \quad \dot{E}_{\sigma 2} = -jx_2\dot{I}_2. \quad (2.2.6)$$

Применим закон Кирхгофа к первичной и вторичной обмоткам:

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

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

С учетом (2.2.6) можно записать

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + r_1\dot{I}_1 + jx_1\dot{I}_1, \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - r_2\dot{I}_2 - jx_2\dot{I}_2, \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

где r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток.

Полные сопротивления обмоток

$$z_1 = r_1 + jx_1; \quad z_2 = r_2 + jx_2.$$

тогда

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

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - z_2 \dot{I}_2.$$

Уравнения токов

Рассмотрим уравнение напряжения

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

Величина $z_1 \dot{I}_1$ для трансформаторов средней мощности составляет 5...10 % U_1 , поэтому можно принять, что $U_1 \approx E_1 = 4.44f\Phi W_1$. Так как напряжение сети $U_1 = \text{const}$, то отсюда следует, что поток, определяемый напряжением сети, $\Phi = \text{const}$. Следовательно для всех режимов работы постоянна МДС, создающая этот поток.

МДС при нагрузке

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

МДС при холостом ходе (х.х.)

$$F = \dot{I}_{10} W_1,$$

где \dot{I}_{10} – ток х.х., $\dot{I}_2 = 0$.

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 $k = W_1/W_2$, получим уравнение токов

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{1}{k} = \dot{I}_{10}. \quad (2.2.8)$$

2.2.2. Схема замещения. Приведенный трансформатор

Уравнения напряжений (2.2.7) и токов (2.2.8) позволяют определить все режимы работы трансформатора. Однако неудобство этих расчетов заключается в значительном отличии параметров, и следовательно, токов и напряжений первичной и вторичной обмоток, что затрудняет построение векторной диаграммы и т. д. Кроме того, в данном случае между обмотками существует не только электрическая, но и магнитная связь.

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 обозначены со штрихами. Схема замещения имеет вид, показанный на рис. 2.2.2. Схема замещения относится к одной фазе трансформатора. Параметры обмоток z_1 и z_2' на схеме замещения выносят отдельно.

Активное сопротивление r_m определяется потерями в стали

$$P_{\text{ст}} = m_1 I_0^2 r_m,$$

где m_1 – число фаз трансформатора.

Индуктивное сопротивление x_m отражает взаимоиндукцию обмоток.

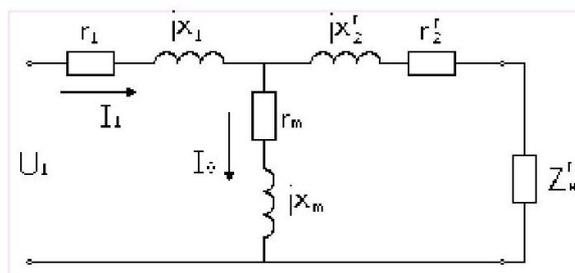


Рис. 2.2.2. Т-образная схема замещения трансформатора

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

$$E'_2 = E_2 \frac{W_1}{W_2} = kE_2,$$

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{k} \text{ (из равенства } E_2 I_2 = E'_2 I'_2 \text{)}$$

$$r'_2 = r_2 k^2 \text{ (из равенства } I_2^2 r_2 = I'^2_2 r'_2 \text{)}.$$

Аналогично

$$x'_2 = x_2 k^2,$$

Уравнения напряжений и токов для схемы замещения (рис. 2.2.4) согласно уравнения (2.2.7) и (2.2.8) примут вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1, \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 - j \dot{I}'_2 x'_2, \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 &= \dot{I}_{10} \end{aligned} \quad (2.2.9)$$

Тема 2.3. Трехфазные трансформаторы. Обозначения трансформаторов. Группы соединения обмоток

Лекция проводится в форме дискуссии

2.3.1. Схемы и группы соединения обмоток трансформатора

Схемы соединений обмоток трансформатора

Знание схем и групп соединений необходимо при эксплуатации трансформаторов.

В трехфазных трансформаторах начала обмоток высшего напряжения обозначаются A, B, C , а концы X, Y, Z . Начала обмоток низшего напряжения – a, b, c , а концы – x, y, z . Нулевые точки – O и o . Если есть третья обмотка среднего напряжения, используются обозначения A_m, B_m, C_m и X_m, Y_m, Z_m . Обмотки трехфазных трансформаторов могут соединяться по схеме "звезда" (рис. 2.3.1. а, б; условное обозначение $Y(Y)$) либо по схеме "треугольник" (рис. 2.3.1. г; условное обозначение $\Delta(D)$). При соединении обмоток в звезду линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного; $U_L = \sqrt{3}U_\phi$, а линейный ток равен фазному: $I_L = I_\phi$. При соединении в треугольник $U_L = U_\phi$ и $I_L = \sqrt{3}I_\phi$. Схемы соединения обмоток трансформатора обозначаются в виде дроби Y/Y (Y/Y), Y/Δ (Y/D) и т.д.

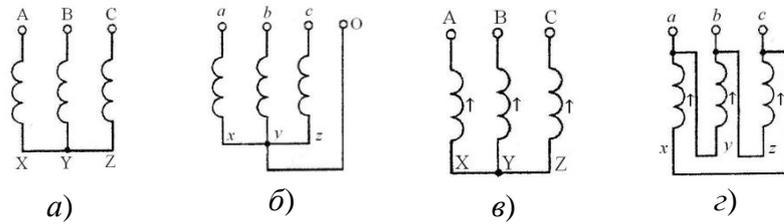


Рис. 2.3.1. Схема соединений обмоток в звезду (а, в). в звезду с выведенной нулевой точкой (б), в треугольник (г)

Иногда в специальных трансформаторах применяется также соединение обмоток по схеме "зигзаг", (рис. 2.3.2 а, обозначение Z). В этой схеме каждая фаза обмотки состоит из двух частей, в общем случае не равные, размещенных на разных стержнях и соединенных между собой последовательно и встречно. При встречном включении ЭДС фазы увеличивается в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с согласным их включением и во столько же раз будет больше ЭДС каждой части (рис. 2.3.2, б).

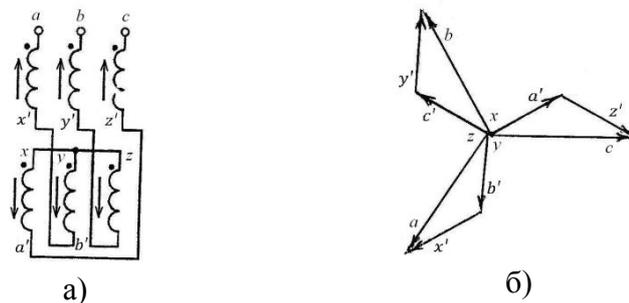


Рис. 2.3.2. Схема соединения обмотки в зигзаг (а), векторная диаграмма для соединения «зигзаг» (б)

Группы соединений обмоток трансформатора

Группа соединений обмоток трансформатора характеризует взаимную ориентацию напряжений первичной и вторичной обмоток. Изменение взаимной ориентации этих напряжений осуществляется соответствующей перемаркировкой начал и концов обмоток. Стандартные обозначения начал и концов обмоток высокого и низкого напряжения показаны на рис. 2.3.1.

Рассмотрим вначале влияние маркировки на фазу вторичного напряжения по отношению к первичному на примере однофазного трансформатора (рис. 2.3.3, а).

Обе обмотки расположены на одном стержне и имеют одинаковое направление намотки. Будем считать верхние клеммы началами, а нижние - концами обмоток. Тогда ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 будут совпадать по фазе и соответственно будут совпадать напряжение сети \dot{U}_1 и напряжение на нагрузке \dot{U}_2 (рис. 2.3.3, а). Если теперь во вторичной обмотке принять обратную маркировку зажимов (рис. 2.3.3, б), то по отношению к нагрузке ЭДС \dot{E}_2 меняет фазу на 180° . Следовательно, и фаза напряжения \dot{U}_2 меняется на 180° .

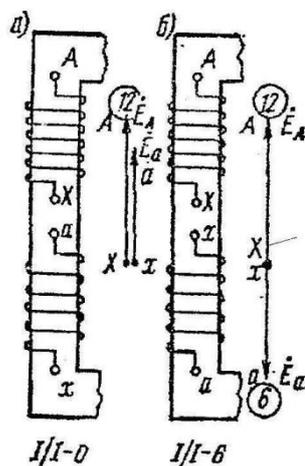


Рис. 2.3.3. Группы соединения однофазного трансформатора:
I/I – 0 (а), I/I – 6 (б)

Таким образом, в однофазных трансформаторах возможны две группы соединений, соответствующих углам сдвига 0 и 180° . На практике для удобства обозначения групп используют циферблат часов. Напряжение первичной обмотки \dot{U}_1 изображают минутной

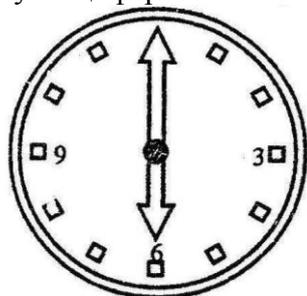


Рис. 2.3.4. Циферблат часов

стрелкой, установленной постоянно на цифре 12, а часовая стрелка занимает различные положения в зависимости от угла сдвига между \dot{U}_1 и \dot{U}_2 . Сдвиг 0° соответствует группе 0, а сдвиг 180° - группе 6 (рис. 2.3.4). Для краткости используют следующие обозначения групп: I/I – 0 и I/I – 6.

В трехфазных трансформаторах можно получить 12 различных групп соединений обмоток. Рассмотрим несколько примеров. Пусть обмотки трансформатора соединены по схеме Y/Y (рис. 2.3.4).

Обмотки, расположенные на одном стержне, будем располагать одну под другой. Зажимы A и a соединим для совмещения потенциальных диаграмм. Зададим положение векторов напряжений первичной обмотки треугольником ABC . Положение векторов напряжений вторичной обмотки будет зависеть от маркировки зажимов. Для маркировки на рис. 2.3.5, а ЭДС соответствующих фаз первичной и вторичной обмоток совпадают, поэтому будут совпадать линейные и фазные напряжения первичной и вторичной обмоток (рис. 2.3.5, б). Схема имеет группу Y/Y – 0.

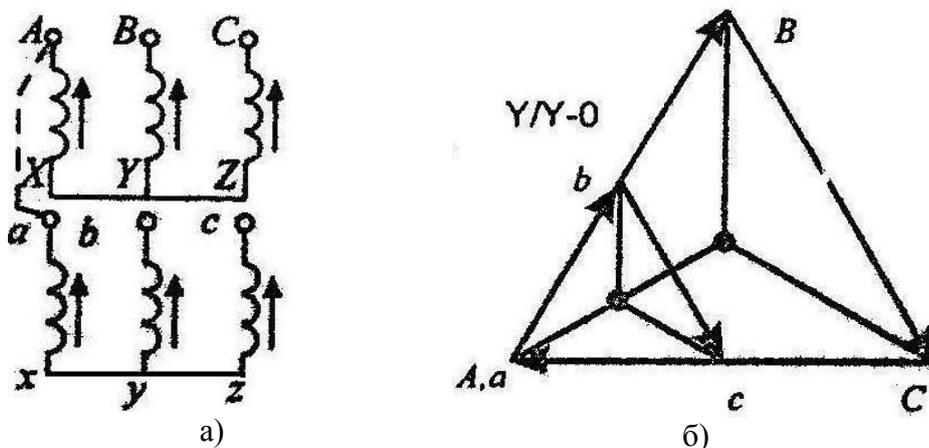


Рис. 2.3.5. Схема соединения и векторная диаграмма для группы Y/Y – 0

Изменим маркировку зажимов вторичной обмотки на противоположную (рис. 2.3.6, а). При перемаркировке концов и начал вторичной обмотки фаза ЭДС меняется на 180° . Следовательно, номер группы меняется на 6. Данная схема имеет группу $Y/Y - 6$.

На рис. 2.3.7 представлена схема, в которой по сравнению со схемой рис. 2.3.5 выполнена круговая перемаркировка зажимов вторичной обмотки ($a \rightarrow b, b \rightarrow c, c \rightarrow a$). При этом фазы соответствующих ЭДС вторичной обмотки сдвигаются на 120° и, следовательно, номер группы меняется на 4.

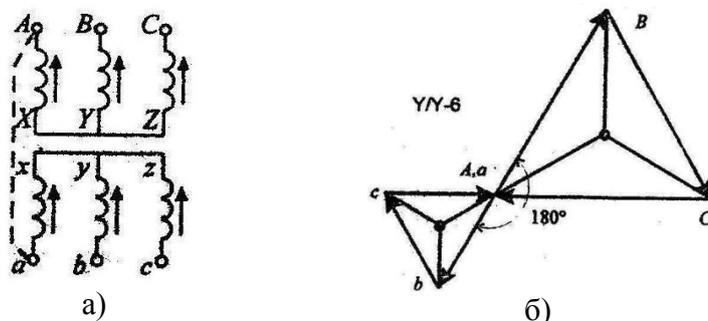


Рис.2.3.6 Схема соединения и векторная диаграмма для группы $Y/Y - 6$

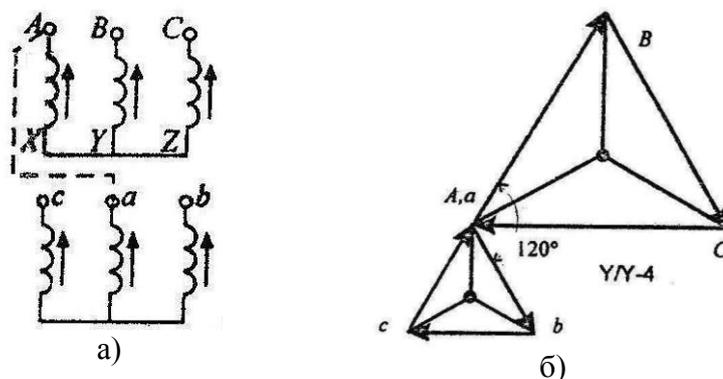


Рис.2.3.7. Схема соединения и векторная диаграмма для группы $Y/Y - 4$

Схемы соединений Y/Y позволяют получить четные номера групп, при соединении обмоток по схеме Y/Δ номера групп получаются нечетными. В качестве примера рассмотрим схему, представленную на рис.2.3.8. В этой схеме фазные ЭДС вторичной обмотки совпадают с линейными, поэтому треугольник abc поворачивается на 30° против часовой стрелки по отношению к треугольнику ABC . Но так как угол между линейными напряжениями первичной и вторичной обмоток отсчитывается по часовой стрелке, то группа будет иметь номер 11.

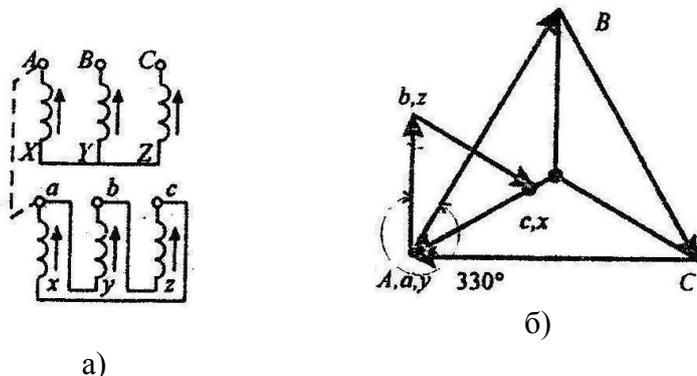


Рис.2.3.8. Схема соединения и векторная диаграмма для группы $Y/\Delta - 11$

Из двенадцати возможных групп соединений обмоток трехфазных трансформаторов стандартизованы две: $Y/Y - 0$ и $Y/\Delta - 11$. Они, как правило, и применяются на практике.

2.3.2. Проверка маркировки обмоток трансформатора

Одним из факторов, определяющих группу соединения трансформатора, является маркировка обмоток, то есть условные обозначения начал и концов. Правильные обозначения обмоток значительно облегчают выполнение схем соединения трансформаторов.

По условиям техники безопасности маркировку обмоток трансформаторов высокого напряжения нужно проверять при значительно пониженном напряжении. По предлагаемому ниже способу сначала проверяют маркировку обмотки высшего напряжения (рис. 2.3.9). Обмотку высшего напряжения, соединенную в звезду, подключают фазой ВУ к однофазному источнику переменного тока при пониженном напряжении и измеряют напряжения и ЭДС $U_{ВУ}, E_{АХ}, E_{СЗ}, U_{АВ}, U_{ВС}$.

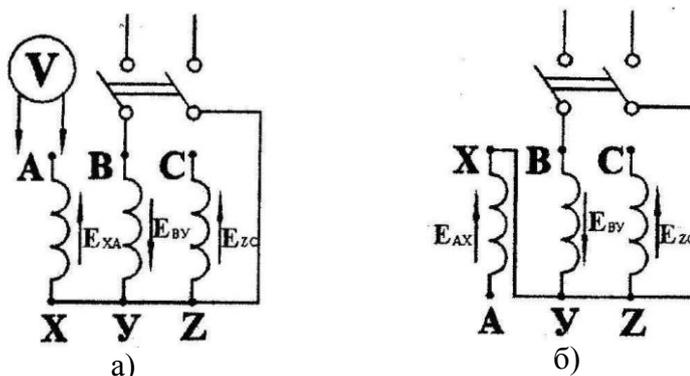


Рис. 2.3.9. Схема проверки обозначений зажимов обмотки высшего напряжения трансформатора:

а - правильная маркировка; б - неправильная маркировка

В этом случае в крайних стержнях магнитный поток равен половине потока среднего стержня, следовательно, ЭДС, индуцированная в фазах АХ и СЗ, численно равна половине ЭДС фазы среднего стержня или половине напряжения $U_{ВУ}$, так как $U_{ВУ} \approx E_{ВУ}$. При правильной маркировке обмоток показания вольтметра, включенного между зажимами А и В или В и С, будут определяться суммой ЭДС, индуцированных в обмотках средней ($E_{ВУ}$) и крайней ($E_{АХ}$ или $E_{СЗ}$) фаз. Численно напряжение $U_{АВ} = U_{ВС} = 1,5 U_{ВУ}$ (рис. 2.3.9, а).

Если маркировка обмоток неправильна, показания вольтметра, включенного на зажимы А и В или В и С, будут определяться разностью тех же ЭДС, например по (рис. 2.3.9, б) $U_{АВ} = 0,5 U_{ВУ}$.

Маркировку обмоток низшего напряжения проверяют последовательно для каждой фазы по схеме, изображенной на рис. 2.3.10.

Фазу обмотки высшего напряжения при электрическом соединении ее начала с началом обмотки этой же фазы низшей стороны подключают к источнику переменного тока и измеряют напряжения и ЭДС: $U_{АХ}, U_{Хх}, E_{ах}$ и т.д.

При правильном обозначении зажимов обмотки низшего напряжения показания вольтметра, включенного, например, между зажимами Х и х, будут определяться разностью ЭДС, индуцируемых в обмотках АХ и ах, т.е. $U_{Хх} = E_{АХ} - E_{ах}$ и т.п.

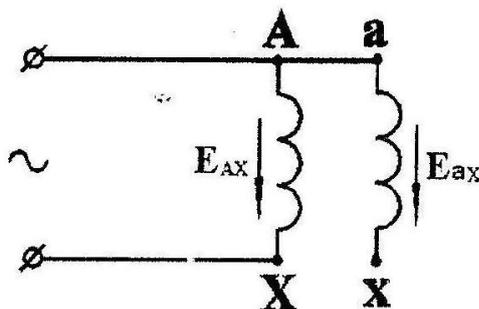


Рис. 2.3.10 Схема проверки обозначений зажимов обмотки низшего напряжения трансформатора

Когда обозначения зажимов обмотки низшего напряжения обратны обозначениям, представленным в предыдущем случае, показания вольтметра будут определяться суммой ЭДС, индуктируемых в обмотках.

Тема 2.4. Параллельная работа трансформаторов. Регулирование напряжения трансформаторов.

Лекция проводится в форме дискуссии

Параллельная работа подразумевает обязательные и, несомненно, важные условия параллельной работы трансформаторов, всего существует 5 условий.

Самое важное условие параллельной работы – сфазированность трансформаторов, в противном случае произойдет короткое замыкание. Фазировка выполняется при помощи цепей вторичного напряжения. Фазировка трансформатора обуславливает согласование фаз всех рабочих элементов электрической цепи со стороны высокого и низкого напряжения.

Напряжения на первичных и вторичных обмотках обоих трансформаторов должны иметь равное значение. Напряжение трансформаторов должно соответствовать классу изоляции. Из этого следует, что коэффициенты трансформации ($K_{тр}$) также должны быть равными, их различие не должно быть выше $\pm 0.5\%$. разница $K_{тр}$ или даже несовпадение состояния РПН или ПБВ соответствующего положения отпаяк, способствует возникновению результирующего напряжения, которое появляется во вторичной обмотке.

Напряжения короткого замыкания обоих трансформаторов должны быть также равны, это требование вытекает из того, что чем выше напряжение к. з. тем выше значение сопротивления обмотки, а значит, трансформатор с малым значением напряжения ($U_{к.з.}$) будет работать с постоянным перегрузом из-за потребления высокой нагрузки, максимальная разница в отношении $U_{к.з.}$ не должна превышать 10%.

Группы соединений обмоток должны соответствовать друг другу и быть одинаковыми. Разные группы соединений влекут сдвиг фазы, что способствует возникновению уравнивающих токов.

Мощность обоих трансформаторов не должна быть различной более чем в 3 раза, если это условие не выдержано трансформатор с меньшей мощностью будет перегружен.

Соблюдая условия включения трансформаторов на параллельную работу, достигается надежность и безопасность работы электроустановки.

2.4.1. Фазировка обмоток

Под фазировкой подразумевается согласование соединяемых фаз. Сфазированные между собой обмотки правильно соединяются в звезду и треугольники.

Но фазировкой самих обмоток не исчерпываются задачи, стоящие при включении в сеть электрооборудования, так как правильно сфазированный аппарат или электрическую машину нужно еще сфазировать с сетью, к которой он или она присоединяется. Задача состоит в том, чтобы не только исключить короткие замыкания при соединении двух источников тока, но и не допустить между ними уравнивающих токов, а в отношении электродвигателей – обеспечить необходимое направление вращения.

Рассмотрим два типичных случая присоединения трансформаторов Т1, Т2 к сети. Трансформаторы имеют равные вторичные напряжения, одинаковые группы соединения и, значит, могут работать параллельно, но еще не сфазированы. Задача состоит в том, чтобы их сфазировать, т.е. выводы a_1 , b_1 и c_1 трансформатора Т1 присоединить соответственно к шинам a , b и c .

На рис. 2.4.1 выводы a_1 , b_1 и c_1 обозначены. Но при фазировке неизвестно, в каком порядке они подходят к шинам. Поэтому, прежде чем присоединить трансформатор Т1 к шинам, необходимо произвести соответствующие измерения, например с помощью вольтметра.

На рис. 2.4.1 вольтметр V включается поочередно между каждым выводом трансформатора a_1, b_1, c_1 и шинами a, b, c . Между разными фазами $a_1 - b; a_1 - c; b_1 - a; b_1 - c; c_1 - a; c_1 - b$ вольтметр показывает напряжение. Между одинаковыми фазами $a_1 - a; b_1 - b; c_1 - c$ напряжения нет, что свидетельствует о том, что они сфазированы.

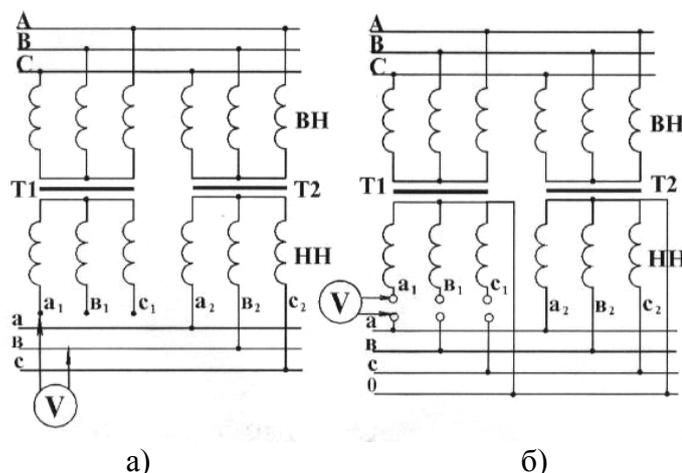


Рис. 2.4.1. Принципиальные схемы фазировки трансформаторов с изолированной (а) и заземленной (б) нейтралью

2.4.2. Регулирование напряжения трансформаторов

Для нормальной работы потребителей необходимо поддерживать определенный уровень напряжения на шинах подстанции. В электрических сетях предусматриваются различные способы регулирования напряжения, одним из которых является изменение коэффициента трансформации трансформаторов.

Обмотки трансформаторов снабжаются дополнительными ответвлениями, с помощью которых можно изменять коэффициент трансформации, что дает возможность поддерживать на шинах НН (СН) подстанций напряжение, близкое к номинальному, когда первичное напряжение отклоняется по тем или иным причинам от номинального. Переключение ответвлений может происходить без возбуждения (ПБВ), т. е. после отключения всех обмоток от сети, или под нагрузкой (РПН).

Устройствами ПБВ снабжаются почти все трансформаторы небольшой мощности. Они позволяют регулировать напряжение ступенями относительно номинального на $\pm 5\%$. С помощью ручных трехфазных и однофазных переключателей.

Устройство ПБВ не позволяет регулировать напряжение в течение суток, так как это потребовало бы частого отключения трансформатора, для переключения ответвлений, что по условиям эксплуатации недопустимо. Обычно ПБВ используется только для сезонного регулирования напряжения.

Регулирование под нагрузкой позволяет переключать ответвления обмотки трансформатора без разрыва цепи. Устройство РПН предусматривает регулирование напряжения в различных пределах трансформаторов (от ± 10 до $\pm 16\%$ ступенями приблизительно по $1,5\%$).

Регулировочные ступени выполняются на стороне ВН, так как меньший по значению ток позволяет облегчить переключающее устройство. Для расширения диапазона регулирования без увеличения числа ответвлений применяют ступени грубой и тонкой регулировки (рис. 2.4.2, а).

Регулирование напряжения в автотрансформаторах имеет некоторую особенность. Если ответвления выполнить в нейтральной точке (рис. 2.4.2, б), то это позволит облегчить изоляцию переключающего устройства и рассчитать его на меньший ток, так как в общей обмотке автотрансформатора проходит разность токов. Такое регулирование называется связанным, т. е. при переключении ответвлений одновременно меняется число витков в

обмотках ВН и СН, что приводит к резким изменениям индукции в сердечнике и колебаниям напряжения на обмотке НН.

Независимое регулирование в автотрансформаторе можно осуществить с помощью регулировочной обмотки на линейном конце среднего напряжения (рис. 2.4.2, в). В этом случае переключающее устройство должно быть рассчитано на полный номинальный ток, а изоляция его – на полное напряжение средней обмотки.

Устройство переключателя РПН приводится в действие дистанционно со щита управления и автоматически.

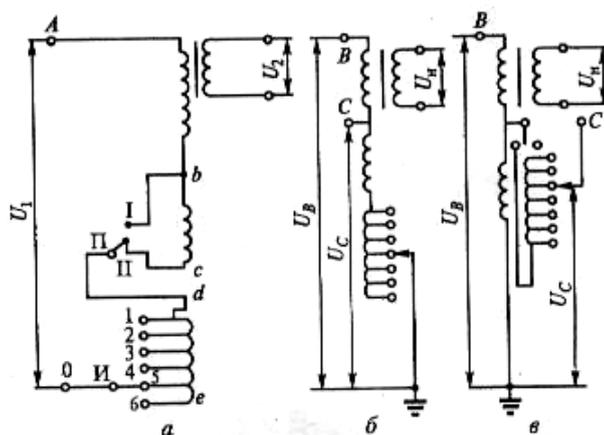


Рис. 2.4.2. Схемы РПН трансформаторов:

а – включения регулировочных ступеней; б – регулирования напряжения в автотрансформаторе (показана одна фаза); ответвления в нейтрали (без реверса); в – ответвления на линейном конце обмотки СН (с реверсом); Ab – основная обмотка; bc – ступень грубой регулировки; de – ступени плавной регулировки; П – переключатель; И – избиратель

Раздел 3. Асинхронные машины

Тема 3.1. Принцип действия и устройство трехфазного асинхронного двигателя. Лекция проводится в форме дискуссии.

3.1.1. Устройство асинхронного двигателя

Асинхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы и могут работать в качестве, как двигателя, так и генератора. Как правило, асинхронные машины используются в качестве двигателей (асинхронные двигатели – АД).

Конструктивное устройство асинхронной машины показано на рис. 3.1.1.

Неподвижная часть машины называется статором, подвижная – ротором. Сердечники статора и ротора асинхронных машин собираются (шихтуются) из отдельных листов электротехнической стали (рис. 3.1.2).

На внутренней поверхности статора и на внешней поверхности ротора имеются пазы, в которых размещаются проводники обмоток. Обмотка статора выполняется трехфазной. Подсоединяется к сети трехфазного тока и называется первичной обмоткой.

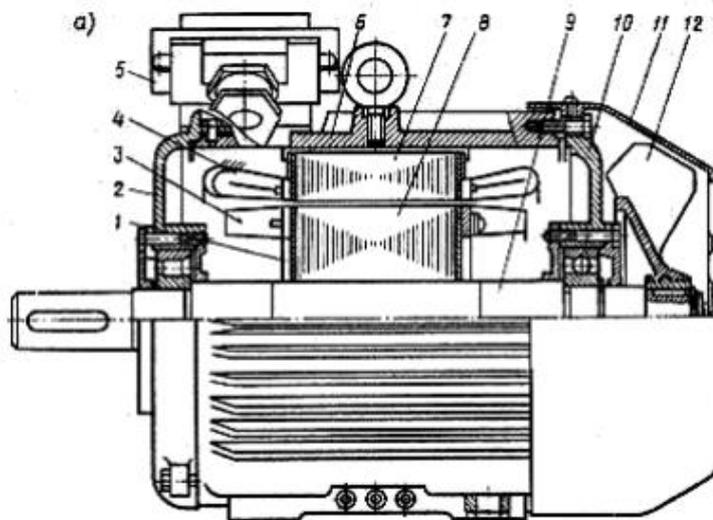


Рис. 3.1.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором:

1 – короткозамыкающие кольца обмотки ротора; 2, 10 – подшипниковые щиты; 3 – вентиляционные лопатки; 4 – обмотка статора; 5 – коробка выводов; 6 – корпус (станина); 7 – сердечник статора; 8 – сердечник ротора; 9 – вал; 11 – кожух вентилятора; 12 – вентилятор

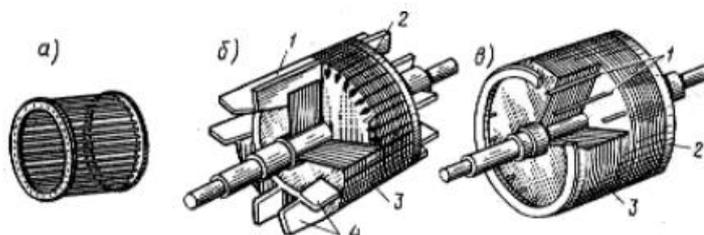


Рис. 3.1.2. Конструкция короткозамкнутого ротора:

1 – сердечник ротора; 2 – стержни беличьей клетки; 3 – вентиляционные лопасти; 4 – короткозамыкающие кольца

К конструктивным частям статора относятся: станина, в которую устанавливается магнитопровод, и подшипниковые щиты, служащие для поддержания вала.

Воздушный зазор между статором и ротором в асинхронных машинах выполняется минимально возможным по условиям производства и надежности работы. В машинах мощностью в несколько киловатт величина зазора составляет около 0,5 мм, с ростом мощности и габаритов машины величина зазора увеличивается.

Обмотка ротора может быть выполнена трехфазной аналогично обмотке статора. Концы фаз такой обмотки ротора соединяются обычно 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, что и статорная.

Другая разновидность обмотки ротора – обмотка в виде беличьей клетки (рис. 3.1.2). Концы стержней такой обмотки с обоих торцов соединены накоротко кольцами, поэтому она не имеет выводов и называется машиной с короткозамкнутым (КЗ) ротором. В машинах мощностью до 100 кВт обмотка ротора выполняется путем заливки алюминием. В более крупных машинах применяется медная сварная обмотка. Отсутствие скользящего контакта на роторе обеспечивает высокую надежность работы такого двигателя, а простота технологии изготовления – дешевизну. По этим причинам асинхронные двигатели с КЗ ротором находят широкое применение и составляют основной парк электрических машин.

Асинхронные машины получили наиболее широкое применение в современных электрических установках, составляющих основу современного электропривода. Области

применения асинхронных двигателей весьма широкие – от привода устройств автоматики и бытовых электроприборов до привода крупного горного оборудования (экскаваторов, дробилок, шахтных мельниц и т. п.).

3.1.2. Принцип действия

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

$$n_1 = 60f_1/p \quad (3.1.1)$$

где p – число пар полюсов обмотки статора.

Частота вращения магнитного поля n_1 называется синхронной.

Соотношение между p и n_1 для $f_1 = 50$ Гц приведено в табл. 3.1.1.

Таблица 3.1.1

Зависимость числа пар полюсов от оборотов двигателя

p	1	2	3	4	5	6
n_1 , об/мин	3 000	1 500	1 000	750	600	500

Вращающийся магнитный поток Φ_1 индуцирует ЭДС в обмотке 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 той же 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 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.

3.1.3. Скольжение

Отличие частоты вращения ротора n и магнитного поля n_1 определяется скольжением

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3.1.2)$$

Скольжение может выражаться в относительных единицах или процентах.

Частоты вращения

$$n = n_1(1 - s). \quad (3.1.3)$$

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

Генератор	Двигатель	Электродинамический тормоз
$n > n_1$ $-(x) < s < 0$	$0 < n < n_1$ $0 < s < 1$	$n < 0$ $1 < s < (x)$

$n = n_1$
 $s = 0$
(режим идеального х.х)

$n = 0$
 $s = 0$
(режим КЗ)

Для двигательного режима работы $0 < n < n_1$ и скольжение $0 < s \leq 1$.
В начальный момент пуска АД $n = 0$ (режим КЗ) 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 ее работы. Называется он режимом идеального холостого хода.

У АД общего назначения в номинальном режиме (т. е. в режиме, для которого машина предназначена) номинальное скольжение $s_n = 0,015 \dots 0,06$ (или $1,5 \dots 6 \%$).

Тема 3.2. Основы теории асинхронных машин

Лекция проводится в форме дискуссии

3.2.1. Основы теории трехфазного асинхронного двигателя

Физические процессы, происходящие в асинхронной машине, аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе (ТР). Отличие заключается лишь в особенностях их конструкции. В частности, наличие воздушного зазора между ротором и статором асинхронной машины приводит к значительному увеличению тока холостого хода I_0 . Для АД средней мощности ток I_0 составляет около 25–30 % от номинального тока.

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 этих ЭДС можно записать в виде

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi W_1 k_{o61}; \quad (3.2.1)$$

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \Phi W_2 k_{o62}; \quad (3.2.2)$$

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

Наличие обмоточных коэффициентов k_{o61}, k_{o62} обмоток статора и ротора учитывает особенности конструкции обмоток электрических машин. Обычно величина $k_{o6} \approx 0,9 \dots 0,97$.

Эффективные числа витков обмоток статора и ротора

$$W_{1\text{эф}} = W_2 k_{o61};$$

$$W_{2\text{эф}} = W_2 k_{o62}$$

ЭДС взаимной индукции обмотки вращающегося ротора (3.2.2), с учетом формулы (3.1.1) для частоты f_2 , можно представить в виде

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \Phi W_2 k_{o62} = 4,44 s f_1 \Phi W_2 k_{o62} = s E_2, \quad (3.2.3)$$

где $E_2 = 4,44 f_1 \Phi W_2 k_{o62}$ – ЭДС неподвижного ротора

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

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1,$$

$$\dot{E}_{\sigma 2S} = -j\dot{I}_2 x_{2S}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки вращающегося ротора

$$x_{2S} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s x_2, \quad (3.2.4)$$

где L_2 – коэффициент самоиндукции обмотки ротора; $x_2 = 2\pi f_2 L_2$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки неподвижного ротора. Активное сопротивление r_2 обмотки ротора, пренебрегая эффектом вытеснения тока, можно принять постоянным. Полное сопротивление обмотки вращающегося ротора

$$Z_{2S} = r_2 + jx_{2S} = r_2 + jsx_2.$$

Уравнение напряжения обмотки вращающегося ротора

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

В преобразованном виде с учетом (3.2.3) и (3.2.4) это уравнение может быть записано в виде

$$s\dot{E}_2 = \dot{I}_2 r_2 + js\dot{I}_2 x_2$$

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 $f_2 = f_1$,

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} + j\dot{I}_2 x_2. \quad (3.2.5)$$

Осуществление такого формального преобразования позволяет заменить реальный вращающийся ротор фиктивным неподвижным ротором, у которого активное сопротивление обмотки меняется в зависимости от скольжения, а 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 совмещенных для статорной и роторной цепей схем замещения и векторных диаграмм. 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

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

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

Тогда

$$k_1 = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 W_{1\text{эф}}}{m_2 W_{2\text{эф}}}.$$

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):

$$E_2' = k_e E_2 = E_1;$$

$$r_2' = k_e k_1 k_2;$$

$$I_2' = \frac{I_2}{k_1};$$

$$x_2' = k_e k_1 k_2;$$

$$z_2' = \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2}.$$

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)

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

где \dot{U}_1 ; \dot{I}_1 ; r_1 – напряжение, ток и активное сопротивление фазы статорной обмотки. После преобразования уравнение примет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1. \quad (3.2.6)$$

Для фазы приведенной обмотки ротора ранее было получено соотношение (3.2.5)

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

Уравнение токов (аналогично ТР)

$$\dot{I}_m = \dot{I}_1 + \dot{I}_2', \quad (3.2.7)$$

где \dot{I}_m – ток намагничивания.

Уравнениям (3.2.5)–(3.2.7) соответствует схема замещения (рис. 3.1.3).

Индуктивное сопротивление x_m намагничивающего контура отражает сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора. Сопротивление r_m намагничивающего контура введено в схему замещения искусственно для учета магнитных потерь мощности $p_{ст}$ (потерь в стали).

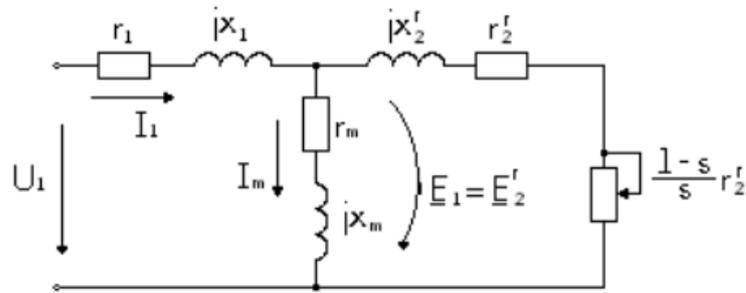


Рис. 3.1.3 Т-образная схема замещения

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

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

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:

$$p_{эл2} = m_1 I_2'^2 r'_2. \quad (3.2.8)$$

Умножив второе слагаемое $\frac{r'_2(1-s)}{s}$ на $I_2'^2$, получим полную механическую мощность $P_{мех}$. Полное входное сопротивление схемы замещения (пренебрегая r_m)

$$Z = r_1 + jx_1 + \frac{jx_m \left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right)}{\frac{r'_2}{s} + jx'_2 + jx_m}.$$

Г-образная схема замещения

Недостатком Т-образной схемы (рис. 3.1.3) является то, что при изменении нагрузки, а следовательно, и тока I_1 изменяется падение напряжения на сопротивлениях r_1 и x_1 и величина ЭДС $E_1 = E'_2$, что в ряде случаев затрудняет расчет. Поэтому иногда вместо Т-образной используют Г-образную схему замещения (рис. 3.1.4), в которой намагничивающий контур вынесен на первичные зажимы и ток в нем не зависит от нагрузки.

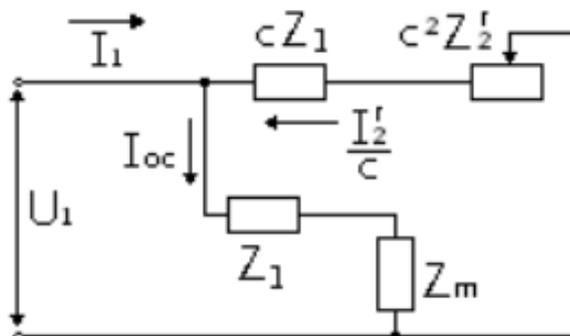


Рис. 3.1.4 Г-образная схема замещения

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 $c = 1,02 \dots 1,06$. Для приближенных расчетов принимают $c = 1$. На схеме замещения (рис. 3.1.4) $I_{0,c}$ – ток обмотки статора в режиме идеального холостого хода при $s=0$.

Полные сопротивления

$$Z_1 = r_1 + jX_1; \quad Z_2' = \frac{r_2'}{s} + jX_2'; \quad Z_m = r_m + jX_m.$$

Определим ток обмотки ротора из Г-образной схемы замещения

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{cr_2'}{s}) + (x_1 + cx_2')^2}}. \quad (3.2.9)$$

3.2.2. Энергетическая диаграмма

Преобразование активной мощности P_1 , подводимой к статору двигателя, представлена в виде энергетической диаграммы (рис. 3.1.5).

На диаграмме приняты следующие обозначения потерь мощности:

$\Delta P_{ст1}$ – магнитные потери (потери в стали) в магнитопроводе статора (в магнитопроводе ротора они пренебрежимо малы вследствие малости частоты f_2);

$\Delta P_{эл1}$ – электрические потери в обмотке статора;

$\Delta P_{эл2}$ – электрические потери в обмотке ротора;

$\Delta P_{мех}$ – механические потери на трение вращающегося ротора о воздух и в подшипниках;

ΔP_d – добавочные потери;

P_2 – полезная мощность АД.

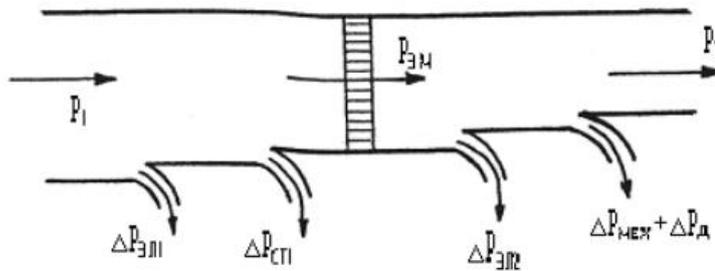


Рис. 3.1.5. Энергетическая диаграмма

Электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор от статора к ротору, согласно схеме замещения (рис. 3.1.5), выделяется на сопротивление $\frac{r_2'}{s}$

$$P_{эм} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}. \quad (3.2.10)$$

С учетом формулы (3.2.8) потерь в обмотке ротора электромагнитную мощность (3.2.10) можно представить в виде

$$P_{эм} = \frac{P_{эл2}}{s}. \quad (3.2.11)$$

С другой стороны,

$$P_{эм} = \omega_1 M, \quad (3.2.12)$$

где M – электромагнитный момент, развиваемый двигателем.

Угловая частота вращения

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (3.2.13)$$

Приравнявая (3.2.10) и (3.2.12), с учетом (3.2.13) получим формулу электромагнитного момента

$$M = \frac{m_1 \cdot p \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1}. \quad (3.2.14)$$

Полезная мощность двигателя

$$P_2 = \omega M_2, \quad (3.2.15)$$

где M_2 – полезный момент на валу.

Угловая частота вращения ротора

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 0,105 n.$$

Тогда

$$P_2 = 0,105 n M_2. \quad (3.2.16)$$

КПД

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

Для АД средней мощности ориентировочно $\eta \approx 70...90\%$. КПД АД значительно ниже, чем у трансформаторов той же мощности, вследствие наличия механических потерь и большого значения намагничивающего тока, что ведет к увеличению потерь в обмотках.

Тема 3.3. Электромагнитный момент и механические характеристики асинхронного двигателя

3.3.1. Электромагнитный момент

Вращающий электромагнитный момент АД создается в результате взаимодействия результирующего магнитного поля с током обмотки ротора. Получим его аналитическое выражение. Подставим в формулу (3.2.14) электромагнитного момента формулу тока ротора (3.2.9) из Г-образной схемы замещения. Тогда электромагнитный момент можно представить в виде

$$M = \frac{m_1 \cdot p}{2\pi n} \cdot \frac{U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{cr_2'}{s}\right) + (x_1 + cx_2')^2}. \quad (3.3.1)$$

Следует обратить особое внимание на то, 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.

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

Момент двигателя уменьшится примерно на 20 %:
 $M = 0,9^2 \cdot M_H = 0,81 \cdot M_H$.

График механической характеристики $M = f(s)$ для двигательного режима работы, соответственно формуле (3.3.1), представлен на рис. 3.3.1, а. В других координатах механическая характеристика $n = f(M)$ показана на рис. 3.3.1, б.

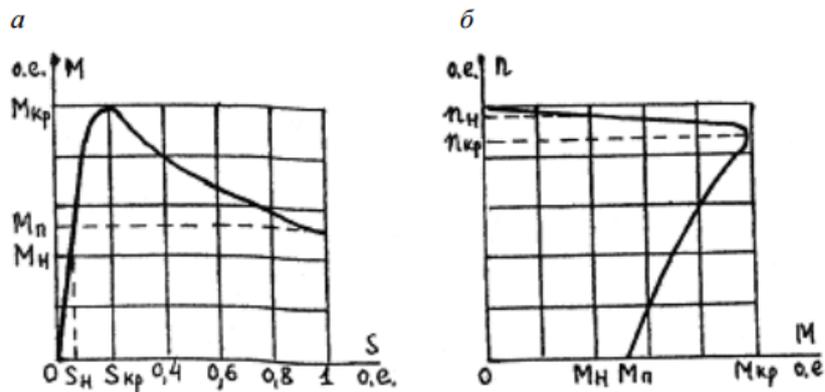


Рис. 3.3.1. Механические характеристики АД

Режим пуска на графике механической характеристики соответствует значению $n = 0$ или $s = 1$, когда АД развивает начальный пусковой момент M_n . Формулу пускового момента можно получить из (3.3.1) при $s = 1$

$$M_n = \frac{m_1 p}{2\pi f_2} \cdot \frac{U_1^2 \cdot r_2'}{(r_k)^2 + (x_k)^2} \quad (3.3.2)$$

где $r_k = r_1 + r_2'$; $x_k = x_1 + x_2'$.

В среднем кратность пускового момента

$$K_B = \frac{M_n}{M_H} = 1 \dots 2.$$

Критическое скольжение s_m (его также иногда обозначают $s_{кр}$) соответствует максимальному моменту M_m .

Диапазон изменения скольжения $0 \leq s \leq s_m$ является рабочим и соответствует устойчивому участку механической характеристики (s_0 – скольжение холостого хода). Диапазон $s_m < s < 1$ нерабочий, так как работа здесь неустойчива. Обычно $s_m = 0,08 \dots 0,2$, таким образом, рабочая зона АД незначительна. Двигатель 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 ее нулю. Решив это уравнение, получим в результате

$$s_m = \frac{cr_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + cx_2')^2}} \quad (3.3.3)$$

Приближенная формула имеет вид

$$s_m = \frac{r_2'}{x_k}. \quad (3.3.4)$$

Подставляя s_m в выражение для M (3.3.1), получим формулу максимального момента

$$M_m = \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} \approx \frac{m_1 p}{4\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{x_k}. \quad (3.3.5)$$

Обычно кратность максимального момента

$$K_M = \frac{M_m}{M_H} = 1,8 \dots 2,8.$$

Величина K_M характеризует перегрузочную способность АД. Критическое скольжение можно определить, зная K_M и S_H :

$$s_m = S_H (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}). \quad (3.3.6)$$

В расчетной практике широкое распространение получило приближенное аналитическое выражение механической характеристики (формула Клосса)

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2}{\left(\frac{s_m}{s}\right) + \left(\frac{s}{s_m}\right)}. \quad (3.3.7)$$

Следует обратить внимание, что максимальный момент (3.3.5) не зависит от активного сопротивления роторной цепи. Однако критическое скольжение s_m прямо пропорционально r_2' , поэтому при увеличении r_2' место расположения максимума момента на механической характеристике $M = f(s)$ сдвигается влево, а пусковой момент увеличивается (рис. 3.3.2).

Это свойство широко используется на практике для АД с фазным ротором, где есть возможность ввода дополнительного сопротивления (пускового реостата) в цепь ротора. Величину пускового реостата рассчитывают так, чтобы получить при пуске максимально возможный момент $M_H = M_m$. При этом $s_m = 1$ и согласно (3.3.4) сопротивление пускового реостата

$$r_d' = x_k - r_2'. \quad (3.3.8)$$

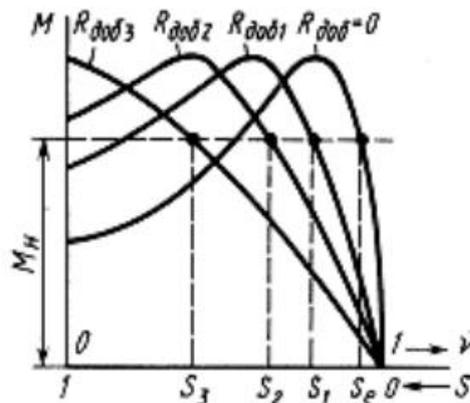


Рис. 3.3.2. Механические характеристики АД при различных добавочных сопротивлениях r_d в цепи ротора

Тема 3.4. Пуск и регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей

Пуск асинхронных двигателей

При пуске двигателя должны удовлетворяться основные требования: процесс пуска должен быть кратким и осуществляться без сложных пусковых устройств, пусковой момент большим, а пусковые токи – по возможности малыми. Иногда к этим требованиям добавляют и другие, обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используют двигатели: пуск плавным, пусковой момент максимальный и др. Практически используют следующие способы пуска: непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск), понижение напряжения, подводимого к обмотке статора, при пуске, и реостатный пуск.

3.4.1. Прямой пуск

Этот способ применяют для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Такие двигатели малой и средней мощности обычно проектируют так, чтобы при непосредственном подключении обмотки статора к сети возникающие пусковые токи не создали чрезмерных электродинамических усилий и превышения температуры, опасных для механической и термической прочности основных элементов машины. Двигатели обычно пускаются с помощью электромагнитного выключателя SF – магнитного пускателя (рис. 3.4.1, а) и разгоняются автоматически по естественной механической характеристике (рис. 3.4.1, б) от точки Π , соответствующей начальному моменту пуска, до точки P , соответствующей условию $M = M_{ст}$. Ускорение при разгоне определяется разностью абсцисс кривых M и $M_{ст}$ и моментом инерции ротора двигателя и механизма, который приводится во вращение. Если в начальный момент пуска $M_{п} < M_{ст}$, двигатель разогнаться не сможет.

Недостатком данного способа пуска, кроме сравнительно небольшого пускового момента, является также большой бросок пускового тока, в 5-7 раз превышающий номинальное значение тока. При электрических сетях сравнительно небольшой мощности это может вызвать значительное понижение напряжения, нежелательное для других потребителей. Несмотря на указанные недостатки, пуск двигателя путем непосредственного подключения обмотки статора к сети широко применяется благодаря простоте и хорошим технико-экономическим свойствам двигателя с короткозамкнутым ротором: низкой стоимости и высоким энергетическим показателям (η , $\cos \varphi$, и др.).

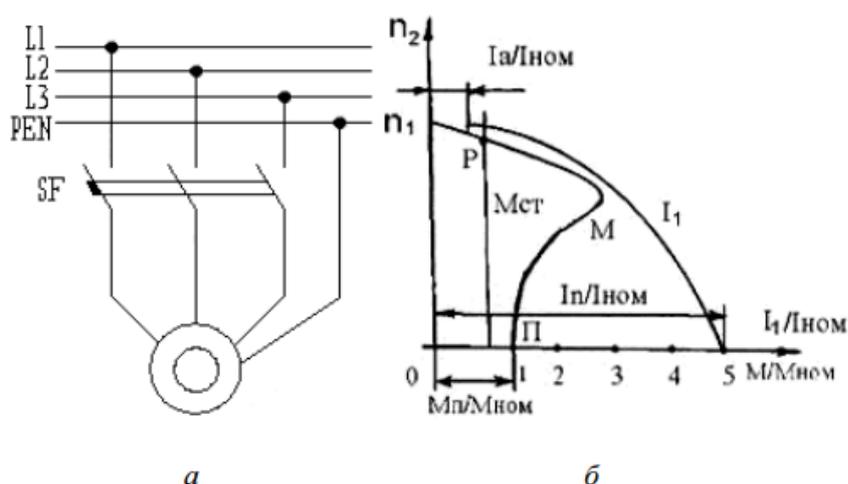


Рис. 3.4.1. Схема прямого пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя (а) и графики изменения моментов и токов (б)

3.4.2. Пуск при пониженном напряжении

Такой пуск применяют для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, а также для двигателей средней мощности при недостаточно мощных электрических сетях. Понижение может осуществляться различными путями:

А. Переключением обмотки статора при пуске с рабочей схемы Δ на пусковую схему Y . Это можно осуществлять с помощью трехполюсного переключателя Π (рис. 3.4.2, а) или контактора. При включении обмотки статора по схеме Y напряжение, подаваемое на фазы этой обмотки, уменьшается в 3 раза. По окончании процесса пуска и разгона двигателя до номинальной частоты вращения обмотку статора переключают обратно на схему Δ .

Б. Включением в цепь обмотки статора на период пуска добавочных активных (резисторов) или реактивных (реакторов) сопротивлений (рис. 3.4.2, б). При этом на указанных сопротивлениях создается некоторое падение напряжения ΔU_d , пропорциональное пусковому току, вследствие чего к обмотке статора будет приложено пониженное напряжение. По мере разгона двигателя снижается ЭДС E_2 , индуцированная в обмотке ротора, следовательно, и пусковой ток. В результате этого уменьшается падение напряжения ΔU_d на указанных сопротивлениях и возрастает приложенное к двигателю напряжение. Таким образом, при рассматриваемом способе пуска напряжение, приложенное к двигателю, автоматически растет по мере разгона ротора. После окончания разгона добавочные резисторы или реакторы замыкаются накоротко контактором K_1 .

В. Подключение двигателя к сети через понижающий автотрансформатор $Атр$ (рис. 3.4.2, в). Последний может иметь несколько ступеней, которые в процессе пуска двигателя переключаются соответствующей аппаратурой.

Недостатком указанных способов является значительное уменьшение пускового и максимального моментов двигателя, пропорциональных квадрату приложенного напряжения. Поэтому их можно использовать только при пуске двигателей без нагрузки.

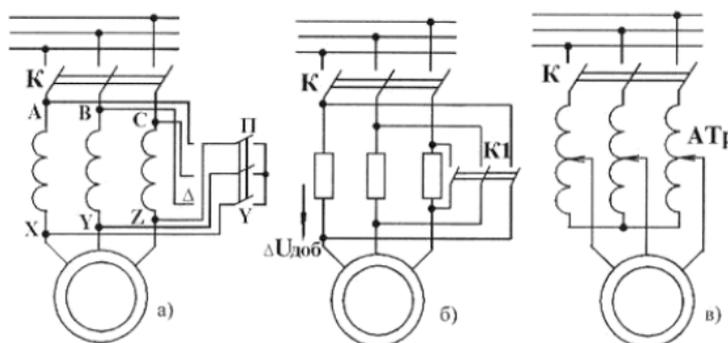


Рис. 3.4.2. Схема включения асинхронного двигателя при пуске с понижением напряжения

На рис. 3.4.3 приведены механические характеристики двигателя при нормальном и пониженном напряжении, т. е. при соединении обмотки статора по схеме Y и Δ . При соединении по схеме Y максимальный и пусковой моменты уменьшаются в 3 раза, вследствие чего двигатель не в состоянии осуществить пуск механизма с номинальным нагрузочным моментом.

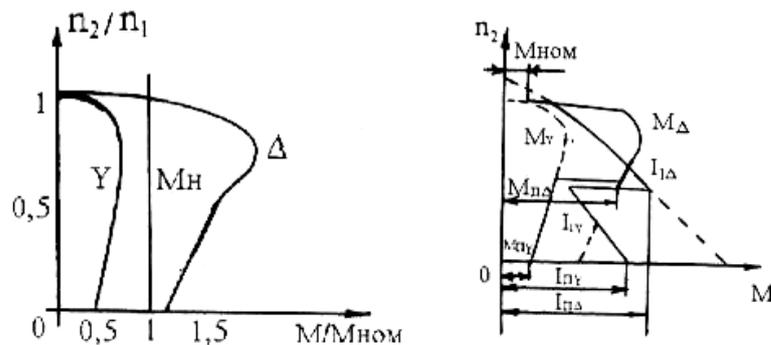


Рис. 3.4.3. Механические характеристики при включении обмотки статора по схемам Δ и Y (а) и графики изменения момента M и тока I при пуске с переключением обмотки статора со Y и Δ

3.4.3. Пуск с помощью реостата в цепи ротора

Наличие контактных колец у двигателя с фазным ротором позволяет подключить к обмотке ротора пусковой реостат. При этом активное сопротивление цепи ротора увеличивается до значения $R_2 = r_2' + r_0'$, где r_0' – электрическое сопротивление пускового реостата. Влияние возросшего значения активного сопротивления вызывает увеличение момента и уменьшение пускового тока, что и показано на рис. 3.4.4.

Тема 3.5. Регулирование частоты и направления вращения асинхронного двигателя

Лекция проводится в форме дискуссии

Под регулированием понимается такое изменение частоты вращения, которое производится воздействием на двигатель со стороны эксплуатирующего персонала. При этом предполагается, что механическая характеристика нагрузки при регулировании остается прежней.

Частота вращения асинхронного двигателя:

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s)$$

Из формулы следует три принципиально возможных метода регулирования асинхронных двигателей: изменение частоты f_1 (частотное регулирование); изменение числа полюсов $2p$ и скольжения s . Скольжение s обычно изменяют путем изменения потерь в цепи ротора с помощью реостата, но в некоторых случаях для этого изменяют величину питающего напряжения. Все указанные способы регулирования частоты вращения находят практическое применение. Рассмотрим их подробнее.

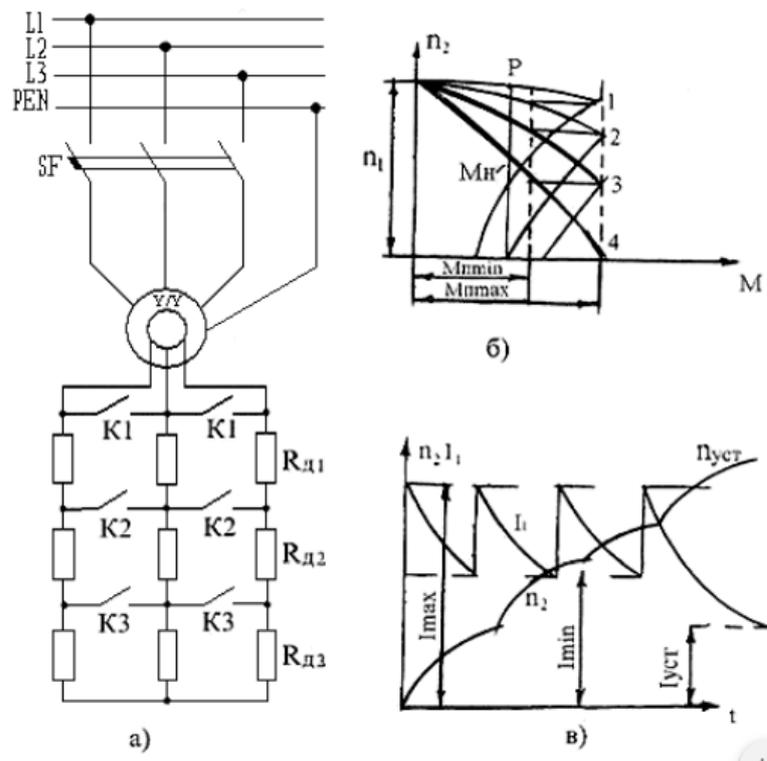


Рис. 3.4.4.Схема включения асинхронного двигателя при реостатном пуске (а),его пусковая диаграмма (б), графики изменения частоты вращения и тока (в)

3.5.1. Частотное регулирование

Этот способ регулирования частоты вращения позволяет применять наиболее надежные и дешевые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и является одним из наиболее перспективных и широко используемых в настоящее время. Принцип его заключается в том, что, изменяя частоту питающего двигатель напряжения, можно изменять его частоту вращения, получая тем самым различные искусственные характеристики. Такой способ обеспечивает плавное регулирование в широком диапазоне, а получаемые характеристики обладают высокой жесткостью. Частотный способ к тому же отличается и еще одним важным свойством: при регулировании частоты вращения асинхронного двигателя не происходит увеличения его скольжения, и потери скольжения оказываются небольшими, в связи с чем частотный способ оказывается весьма экономичным. Недостатком частотного регулирования является громоздкость и высокая стоимость источника питания.

3.5.2. Регулирование путем изменения числа полюсов

Среди производственных механизмов, требующих изменения скорости движения рабочего органа, имеются такие, у которых это изменение может происходить не плавно, а ступенчато. К таким механизмам можно отнести большинство грузовых и пассажирских лифтов, где для достижения требуемой точности остановки кабины производится предварительное снижение скорости ее движения. Для механизмов подачи многих металлорежущих станков регулирование скорости часто осуществляется путем ступенчатого изменения частоты вращения приводного электродвигателя. В этих случаях, а также и в некоторых других в качестве приводных двигателей широко используются многоскоростные асинхронные электродвигатели, у которых регулирование частоты вращения производится путем изменения числа пар полюсов статорной обмотки. При этом изменяется частота вращения магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, а тем самым и частота вращения ротора двигателя.

На рис. 3.5.1 показана простейшая схема (для одной фазы), позволяющая изменять число полюсов обмотки статора в 2 раза.

Для этого каждую фазу обмотки статора разделяют на две части, которые переключают с последовательного соединения на параллельное. При включении катушек 1-2 и 3-4 в две параллельные ветви число полюсов уменьшается в два раза, следовательно, частота вращения магнитного поля увеличивается в 2 раза (рис. 3.5.1). При переключении число последовательно включенных витков в каждой фазе уменьшается вдвое, но т. к. частота вращения возрастает в два раза, ЭДС, индуцированная в фазе, остается неизменной. Следовательно, двигатель при обеих частотах вращения может быть подключен к сети с одинаковым напряжением. Чтобы не осуществлять переключений в обмотке ротора, последний выполняют короткозамкнутым.

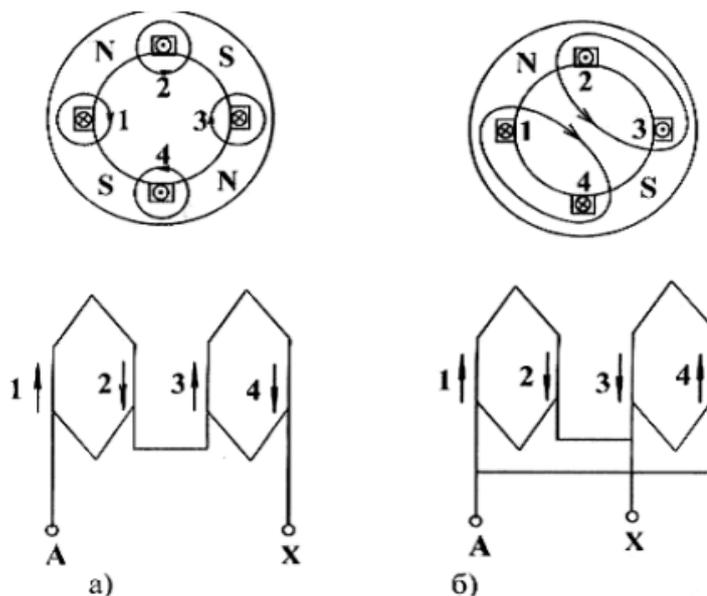


Рис. 3.5.1. Схема переключения одной фазы обмотки статора для изменения числа полюсов при $2p=4$ (а) и $2p=2$ (б)

3.5.3. Регулирование путем включения реостата в цепь ротора

Одним из наиболее простых способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является реостатное регулирование, т.е. регулирование введением дополнительных активных сопротивлений в цепи обмоток двигателей.

Однако на практике для целей регулирования частоты вращения преимущественно применяются дополнительные сопротивления в роторной цепи по схеме на рис. 3.4.4, а.

При включении в цепь ротора добавочных активных сопротивлений $R_{доб1}$, $R_{доб2}$, $R_{доб3}$ и других изменяется форма зависимости и механической характеристики $n_2 = f(M)$ двигателя (рис. 3.5.2, а). При этом некоторому нагрузочному моменту M_n соответствуют скольжения s_1 , s_2 , s_3, \dots , большие, чем скольжение s_e при работе двигателя на естественной характеристике (при $R_{доб} = 0$). Следовательно, установившаяся частота вращения двигателя уменьшается (рис. 3.5.2, б). Этот метод регулирования может быть использован только для двигателей с фазным ротором. Он позволяет плавно изменять частоту вращения в широких пределах. Недостатками его являются: а) большие потери энергии в регулировочном реостате; б) чрезмерно «мягкая» механическая характеристика двигателя при большом сопротивлении в цепи ротора.

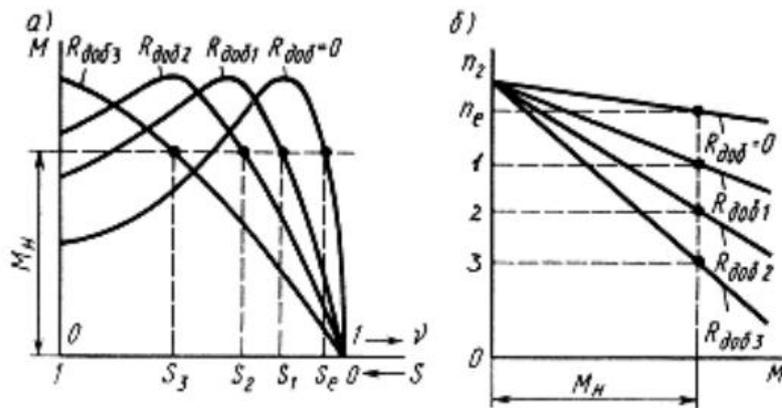


Рис. 3.5.2. Изменение формы механической характеристики при регулировании частоты вращения с помощью добавочного активного сопротивления

3.5.4. Регулирование путем изменения питающего напряжения

Возможность этого регулирования подтверждается графиками $M = f(s)$, построенными для разных значений U_1 (рис. 3.5.3).

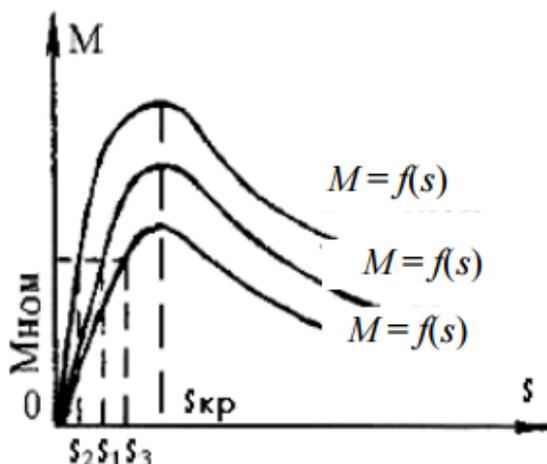


Рис. 3.5.3. Влияние напряжения на вид механической характеристики асинхронного двигателя

При неизменной нагрузке на валу двигателя увеличение напряжения вызывает рост частоты вращения. Однако диапазон регулирования частоты вращения получается небольшим, что объясняется узкой зоной устойчивой работы двигателя, ограниченной значениями критического скольжения и недопустимостью значительного изменения значения номинального напряжения.

3.5.5. Изменение направления вращения

Для изменения направления вращения ротора электродвигателя надо изменить направление вращения магнитного поля. Для этого необходимо изменить порядок чередования тока в фазах обмоток статора. В трехфазных машинах это осуществляется путем переключения двух любых проводов, подводящих ток из трехфазной сети к фазам этой обмотки (рис. 3.5.4).

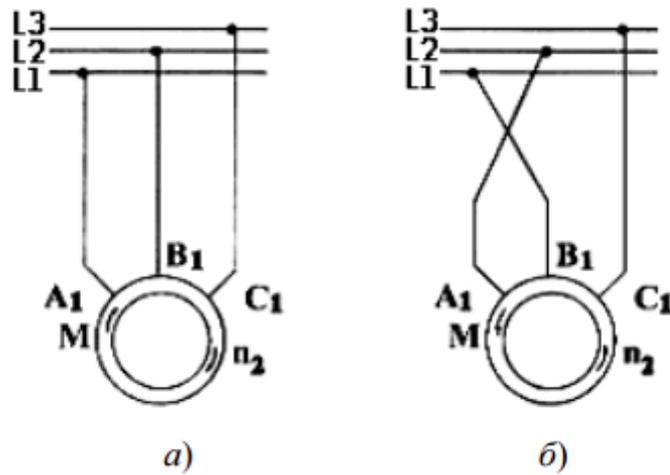


Рис. 3.5.4. Схема включения двигателя при изменении направления вращения (а,б)

Раздел 4. Синхронные машины

Тема 4.1. Общие сведения о синхронных машинах. Принцип действия синхронного генератора. Возбуждение синхронных машин
Лекция проводится в форме дискуссии

4.1.1. Конструкция, назначение и области применения синхронных машин

Синхронной машиной называется электрическая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора n находится в строгом соответствии с частотой сети f_1 .

$$n = n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

На статоре синхронной машины располагается трехфазная обмотка переменного тока, называемая обмоткой якоря, а на роторе обмотка постоянного тока, называемая обмоткой возбуждения. Существует две основных разновидности исполнения обмоток возбуждения: распределенные и сосредоточенные. Распределенные обмотки применяются при неявнополюсной конструкции ротора (рис. 4.1.1)

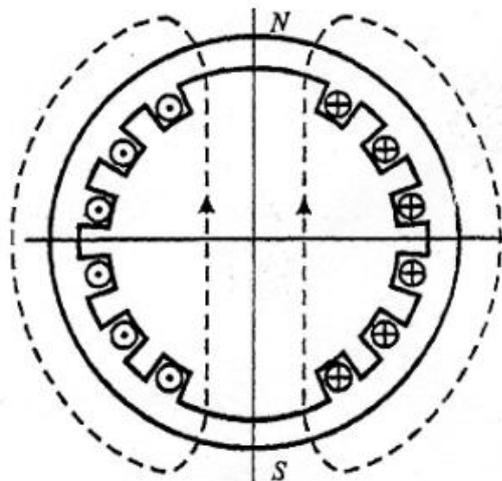


Рис. 4.1.1 Ротор с неявно выраженными полюсами

В каждом пазу ротора располагается только одна сторона катушки. Поэтому такая обмотка является однослойной. Число катушек на полюсном делении равно q_f . Они соединяются последовательно, образуя полное число витков обмотки возбуждения:

$$w_f = qpw_k.$$

Неявнополюсную конструкцию ротора имеют быстроходные синхронные машины с $2p = 2$ и $2p = 3$. Частота вращения ротора таких машин при $f_1 = 50$ Гц соответственно равна 3 000 и 1 500 об/мин. Для получения необходимой механической прочности неявнополюсные роторы выполняются из массивной стальной поковки.

В машинах с $2p \geq 4$ ротор имеет явнополюсную конструкцию (рис. 4.1.2).

Обмотка возбуждения таких машин выполняется сосредоточенной в виде катушек 1 и размещается на сердечниках полюсов 2. Для закрепления катушек на полюсах используются полюсные наконечники 3. Все катушки соединяются последовательно, образуя полное число витков обмотки возбуждения

$$w_f = 2pw_k$$

Для улучшения динамических свойств синхронной машины в полюсные наконечники помещают дополнительную короткозамкнутую обмотку 4, выполняемую аналогично короткозамкнутой обмотке асинхронной машины. Ее называют успокоительной или демпферной. Иногда роль демпферной обмотки выполняют массивные полюсные наконечники.

Основная область применения синхронных машин – энергетика, где они используются в качестве генераторов электрической энергии. В зависимости от типа привода синхронные генераторы делятся на турбогенераторы, гидрогенераторы и дизельные генераторы.

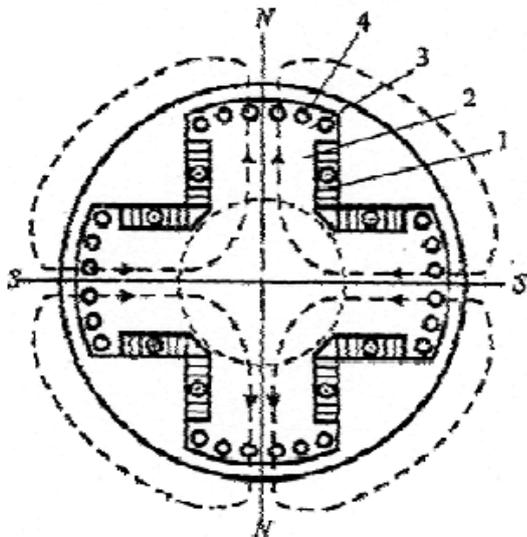


Рис. 4.1.2. Ротор с явно выраженными полюсами

Турбогенераторы приводятся во вращения быстроходными паровыми или газовыми турбинами. Это и обуславливает их конструкцию. Ротор турбогенератора имеет неявнополюсное исполнение (рис. 4.1.3) с горизонтальным расположением оси вращения.

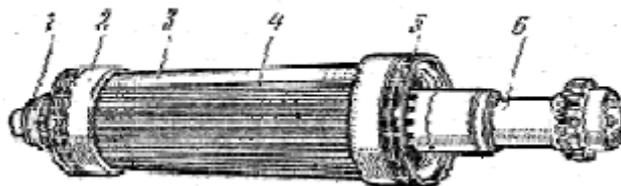


Рис. 4.1.3. Внешний вид неявнополюсного ротора:

- 1 – контактные кольца; 2 – бандажное кольцо; 3 – массивный магнитопровод ротора;
- 4 – немагнитный клин паза ротора; 5 – центробежный вентилятор; 6 – хвостовик ротора

Предельный диаметр ротора по условию механической прочности составляет $1,2 \dots 1,25$ м. Активная длина ротора достигает $6 \dots 7$ м.

Максимальная мощность, развиваемая такими турбогенераторами при 3000 об/мин, составляет 1 200 МВт.

Гидрогенераторы приводятся во вращения гидротурбинами. В зависимости от напора воды и мощности турбины частота вращения гидрогенераторов колеблется в пределах от 50 до 600 об/мин.

Дизельные генераторы приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания. Они имеют сравнительно небольшую мощность (до 10 МВт) и используются для питания автономных потребителей. Дизельные генераторы имеют явнополюсную конструкцию ротора при числе полюсов $2p = 6 - 8$ и выполняются с горизонтальным расположением вала (рис. 4.1.4).

4.1.2. Принцип действия синхронных генераторов

На статоре 1 синхронной машины расположена трехфазная (в общем случае многофазная) обмотка 3. Обмотку ротора 4, питаемую от источника постоянного тока, называют обмоткой возбуждения, так как она создает в машине магнитный поток возбуждения. Вращающуюся обмотку ротора соединяют с внешним источником постоянного тока посредством контактных колец 5 и щеток 6 (рис. 4.1.5).

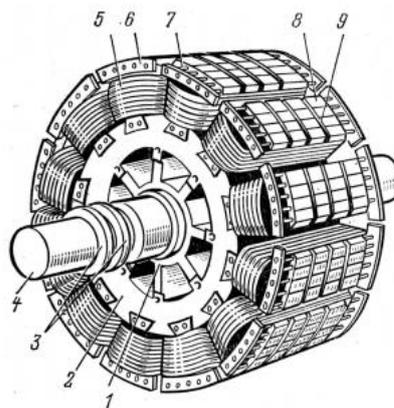


Рис. 4.1.4. Внешний вид явнополюсного ротора:

1 – остов ротора; 2 – обод ротора; 3 – контактные кольца; 4 – вал; 5 – катушка обмотки возбуждения; 6 – сегмент демпферной обмотки; 7 – стержень демпферной обмотки; 8 – пакет сердечника полюса; 9 – вентиляционный канал в полюсе

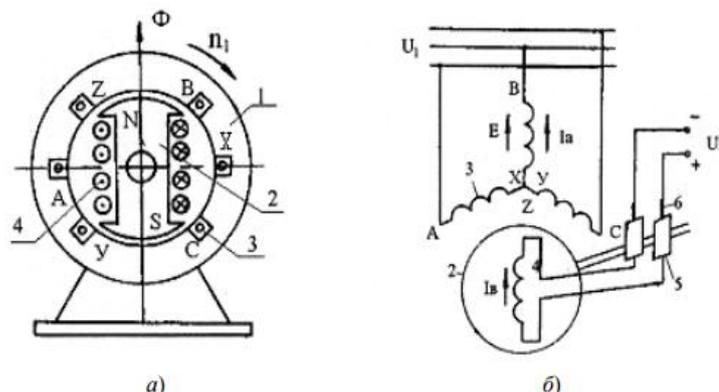


Рис. 4.1.5. Электромагнитная схема синхронной машины (а) и схема ее включения (б)

Под действием вращающего момента приводного двигателя ротор генератора 2 приводится во вращения с некоторой частотой n_2 , поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ее фазах переменную ЭДС E , изменяющуюся с частотой

$$f_1 = \frac{pn_2}{60}.$$

Если обмотку статора подключить к какой-либо нагрузке, то проходящий по ней многофазный ток I_a создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого

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

Из выражений следует, что $n_1 = n_2$, т. е. что ротор вращается с той же частотой, что и магнитное поле статора. Поэтому рассматриваемую машину называют синхронной.

Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ синхронной машины создается совместными действиями МДС обмотки возбуждения и обмотки статора, и результирующее магнитное поле вращается в пространстве с той же частотой, что и ротор.

В синхронной машине обмотку, в которой индуцируется ЭДС и проходит ток нагрузки, называют обмоткой якоря, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, – индуктором. Следовательно, в приведенной машине (рис. 4.1.5) статор является якорем, а ротор – индуктором. Для принципа действия и теории работы машины не имеет значения, вращается якорь или индуктор, поэтому в некоторых случаях применяют синхронные машины с обращенной конструктивной схемой: обмотку якоря, к которой подключают нагрузку, располагают на роторе. Такую машину называют обращенной. Обращенные машины имеют сравнительно небольшую мощность, так как у них затруднен отбор мощности от обмотки ротора.

Система охлаждения синхронных генераторов

Для машин предельной мощности, какими являются гидро- и турбогенераторы, важнейшей проблемой является проблема их охлаждения. Повышение единичной мощности неразрывно связано с совершенствованием системы охлаждения. Применение более интенсивных способов охлаждения позволило создать в последнее время турбогенераторы мощностью 800...1 200 МВт, имеющие практически такие же габаритные размеры, как и турбогенераторы мощностью 100 МВт, выпускавшиеся в 40-е годы (1930– 1950 годы).

В турбогенераторах мощностью до 25 МВт применяется замкнутая система вентиляции, где в качестве охлаждающей среды используется воздух. Для машин большой мощности воздух замещается водородом с избыточным давлением до 5·10⁵ Па. По сравнению с воздухом водород имеет лучшую теплопроводность и в 14 раз меньшую плотность.

Благодаря этому улучшается охлаждение машины и уменьшаются вентиляционные потери.

В рассматриваемых случаях охлаждающая среда омывает наружную поверхность катушек обмоток и сердечника, нагретый газ идет в теплообменник, откуда после охлаждения попадает в машину. Такая система охлаждения машины называется замкнутой системой косвенного охлаждения обмоток.

Для машины мощностью 300 МВт замкнутая система вентиляции с косвенным водородным охлаждением оказывается недостаточной. В этом случае применяют непосредственное охлаждение обмоток. Обмотки у таких машин изготавливаются из полых проводников, внутри которых циркулирует охлаждающая среда.

В качестве охлаждающей среды используется газ (водород) или жидкости (вода, трансформаторное масло). При непосредственном охлаждении обмоток перепады температуры в изоляции обмоток исключаются и можно значительно увеличить плотность

тока в проводниках. Применяется также непосредственное охлаждение сердечников с помощью трубок, заделанных в ярмо статора.

4.1.3. Системы возбуждения синхронных машин

Способы возбуждения генераторов

Система возбуждения синхронного генератора состоит из обмотки ротора генератора и источника постоянного тока. К наиболее часто встречающимся видам систем возбуждения относятся следующие:

- электромашинное возбуждение с генератором постоянного тока;
- электромашинное возбуждение с генератором переменного тока частотой 500 Гц (высокочастотное возбуждение); тиристорное возбуждение; бесщеточное возбуждение.

Возможны и другие модификации систем возбуждения. Поскольку они не получили широкого распространения, то далее не рассматриваются. Применение различных систем возбуждения обусловлено особенностями турбо – и гидрогенераторов.

Исходя из нормального и аварийного режимов, к системе возбуждения генератора предъявляются определенные требования. В нормальном режиме источник возбуждения должен обеспечить на кольцах ротора номинальное напряжение и номинальный ток возбуждения, при которых генератор выдает номинальную мощность. В аварийных ситуациях к источнику возбуждения предъявляются требования в отношении быстродействия и предела изменения напряжения на кольцах ротора. С этих позиций система возбуждения оценивается двумя величинами: скоростью подъема напряжения $dU_{\text{возб}}/dt$ и кратностью максимального значения напряжения (потолок возбуждения) по отношению к номинальному $U_{\text{возб.макс}}/U_{\text{возб.ном}}$.

Для современных электромашинных возбудителей скорость подъема напряжения возбуждения должна быть не менее $2U_{\text{возб.ном}}$ в секунду. Кратность форсировки составляет не менее $2U_{\text{возб.ном}}$. В случае работы гидростанции через линию большой протяженности к системе возбуждения предъявляют более высокие требования. Так, например, тиристорная система возбуждения гидрогенераторов выполняется с кратностью напряжения при форсировке $4U_{\text{возб.ном}}$. В отношении быстродействия тиристорная система практически безынерционна.

Электромашинное возбуждение с генератором постоянного тока

Основой системы электромашинного возбуждения является генератор постоянного тока (возбудитель В), который непосредственно соединяется с обмоткой возбуждения (ОВ) синхронного генератора (Г) (рис. 4.1.6). Обмотка возбуждения возбудителя (ОВВ) питается от самого возбудителя (система самовозбуждения). Воздействие автоматического регулятора напряжения (АРН) на возбудитель может осуществляться двумя способами: путем изменения сопротивления в цепи ОВВ путем перемещения движка резистора R (рис. 4.1.6, а) или за счет введения в обмотку возбуждения дополнительной подпитки постоянным током (рис. 4.1.6, б). Такая подпитка может осуществляться либо в основную, либо в дополнительную обмотку возбуждения возбудителя.

Для изменения положения движка реостата регулятор должен иметь в своем составе электромеханическое устройство, преобразующее электрический сигнал в механическое перемещение. Из-за существенных недостатков электромеханические регуляторы не используются на современных крупных генераторах. Более надежным является регулятор (схема на рис. 4.1.6, б), в котором нет вращающихся и трущихся частей. К тому же такая схема обладает большим быстродействием, благодаря чему получила распространение в электромашинных системах возбуждения.

К достоинству электромашинной системы возбуждения следует отнести ее независимость от коротких замыканий в сети синхронного генератора.

В большинстве случаев возбудитель находится на одном валу с синхронным генератором, чем обеспечивается высокая надежность системы возбуждения. Этот вариант используется на турбогенераторах мощностью до 100 – 160 МВт.

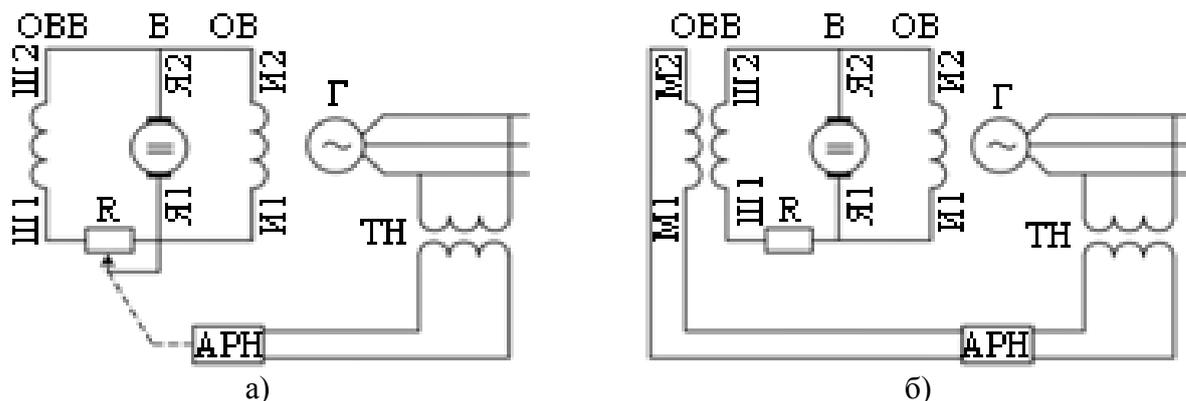


Рис. 4.1.6. Электромашинное возбуждение с генератором постоянного тока

Применение машинного возбудителя постоянного тока для генераторов большей мощности встречает ряд затруднений, обусловленных условиями работы коллектора и механической прочностью возбудителя. Для крупных турбогенераторов мощностью 200 МВт и 300 МВт разработаны и применяются два варианта электромашинной системы возбуждения на основе возбудителя постоянного тока с пониженной частотой вращения. В первом варианте возбудитель приводится во вращение асинхронным двигателем с маховиком. Этот двигатель подключается на сборные шины собственных нужд станции. Во втором варианте возбудитель постоянного тока имеет привод от вала турбогенератора через редуктор. За счет снижения частоты вращения улучшаются условия работы коллектора.

Электромашинное возбуждение с генератором переменного тока (высокочастотное возбуждение)

Принципиальная схема высокочастотной системы возбуждения показана на рис. 4.1.7.

Основой системы возбуждения также является электрическая машина. Однако, учитывая серьезные недостатки коллектора у машин постоянного тока, здесь в качестве возбудителя используется генератор переменного тока с частотой 500 Гц, а функции выпрямления выполняют полупроводниковые вентили (ПВ). Выбор повышенной частоты 500 Гц сделан с целью уменьшения пульсации выпрямленного тока, снижения габаритов возбудителя, повышения надежности. Последнее обстоятельство требует пояснения. Дело в том, что на повышенной частоте 500 Гц представляется возможным выполнить генератор индукторного типа, у которого и обмотка возбуждения, и обмотка переменного тока расположены в пазах статора. Вследствие этого возбудитель не имеет контактных колец со щетками, что и повышает надежность его работы.

Возбудитель переменного тока располагается на одном валу с главным генератором, кроме того, электрическая система возбуждения не связана с основной сетью, что также повышает ее надежность.

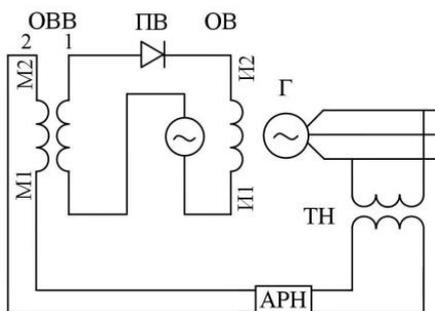


Рис. 4.1.7. Высокочастотная система возбуждения

Основное возбуждение возбудителя обеспечивается последовательной обмоткой $ОВВ_1$. Автоматический регулятор напряжения создает дополнительную подпитку в обмотку $ОВВ_2$. Дополнительных обмоток может быть несколько (как правило, две). Высокочастотная система возбуждения используется для турбогенераторов мощностью 200 – 300 МВт.

Тиристорное возбуждение

Свое название тиристорная система возбуждения получила от тиристоров, используемых в качестве управляемых выпрямителей. В зависимости от типа источника тока различают два варианта тиристорного возбуждения. Первый вариант – система независимого возбуждения с питанием от вспомогательного синхронного генератора (ВСГ), установленного на одном валу с главным генератором (рис. 4.1.8, а). Второй вариант – система самовозбуждения с питанием от главного генератора (рис. 4.1.8, б).

Недостатком схемы самовозбуждения является зависимость напряжения, подаваемого на выпрямители, от режима работы главного генератора. Частично этот недостаток компенсируется тем, что с помощью трансформатора T_1 в цепь возбуждения подается дополнительная составляющая напряжения, пропорциональная току генератора. В режимах близких коротких замыканий, когда напряжение на выводах генератора значительно уменьшается, подпитка в функции тока через трансформатор T_1 увеличивается. Однако полной компенсации во всех режимах получить не удастся. Недостатком схемы является и то, что при пуске генератора его первоначальное возбуждение должно осуществляться от постороннего источника, поскольку остаточное напряжение генератора недостаточно.

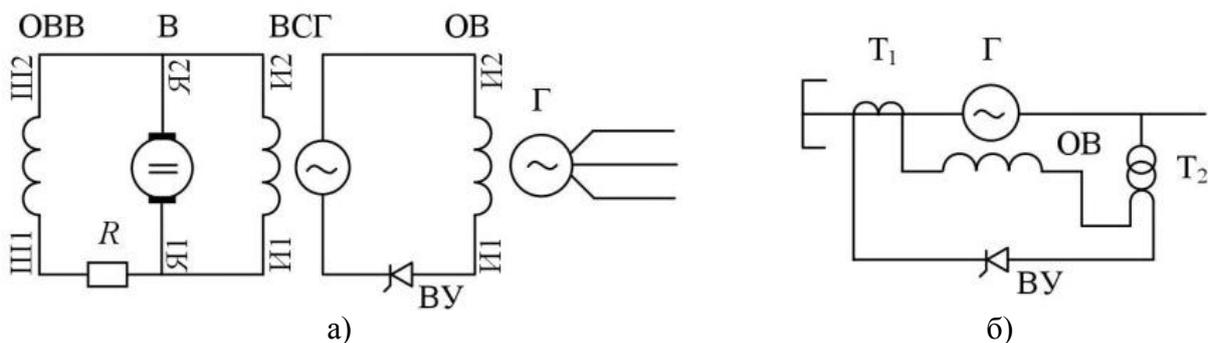


Рис. 4.1.8. Тиристорное возбуждение с независимым источником питания (а) и с самовозбуждением (б)

В схеме независимого возбуждения напряжение питания вентиля не зависит от режима работы главного генератора и станции в целом, что является достоинством этой схемы. Однако эта схема дороже и сложнее.

К достоинствам тиристорного возбуждения также относятся высокое быстродействие и высокая кратность форсировки, для чего достаточно иметь напряжение источника питания (ВСГ или T_2) на заданную кратность форсировки. При полном открытии выпрямителей это напряжение практически мгновенно прикладывается к обмотке возбуждения генератора Г. В нормальном режиме выпрямители открыты не полностью, поэтому к обмотке возбуждения подводится номинальное напряжение возбуждения.

Так как турбогенераторы мощностью 200 – 300 МВт и выше останавливаются достаточно редко и, следовательно, переключение возбуждения при пуске на автономный источник не требует частых переключений в цепях возбуждения, для них рекомендуется применять систему самовозбуждения.

На гидрогенераторах также применяется система самовозбуждения, что объясняется экономической целесообразностью. Следует отметить, что системы возбуждения без вспомогательного синхронного генератора, располагаемого на одном валу с главным генератором, снижают высоту агрегата, а следовательно, и высоту здания ГЭС.

Система бесщеточного возбуждения

Коллектор со щетками у генератора постоянного тока является одним из ненадежных элементов электромашинной системы возбуждения. Этот недостаток устранен в высокочастотной системе возбуждения, где выпрямление осуществляется с помощью полупроводниковых вентилей. Однако и в этой системе остаются щетки и контактные кольца для подключения системы возбуждения на ротор. При использовании надежных полупроводниковых вентилей представляется возможным создать систему возбуждения полностью без щеток. Такой вариант получил название бесщеточного возбуждения.

Принципиальная схема бесщеточного возбуждения представлена на рис. 4.1.9. Источником тока возбуждения служит вспомогательный синхронный генератор повышенной частоты (ВСГ), расположенный на одном валу с главным генератором. Для целей выпрямления тока применяется вращающийся выпрямитель (ВВ), выполненный на основе неуправляемых вентилей, которые монтируются на валу генератора. При такой схеме отпадает надобность в контактных кольцах и щетках.

Регулирование возбуждения осуществляется путем воздействия на ток возбуждения вспомогательного синхронного генератора. Обмотка возбуждения вспомогательного синхронного генератора (ВСГ) – неподвижна. Регулирование возбуждения посредством воздействия на машинный возбудитель несомненно уступает по быстродействию тиристорной системе возбуждения. Однако применение в качестве возбудителя специального многофазного генератора позволяет получить требуемые показатели системы, а именно, потолочное возбуждение не менее двукратного и быстродействие не менее $2U_{\text{возб.ном}}$ в секунду.

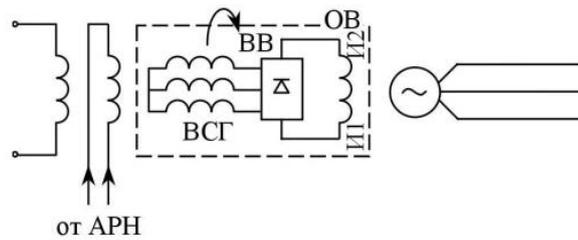


Рис. 4.1.9. Система бесщеточного возбуждения

Бесщеточная система возбуждения является весьма надежной и применяется для турбогенераторов мощностью 300 МВт и выше.

Релейная форсировка возбуждения

Релейная форсировка возбуждения предназначена для сохранения устойчивости параллельной работы генератора при коротком замыкании в прилегающей сети. Как известно, активная мощность генератора равна

$$P = \frac{EU}{X} \sin \delta. \quad (4.1.1)$$

При близких к.з. напряжение на шинах генератора снижается, что снижает предел передаваемой мощности P . Для компенсации снижения множителя U в числителе выражения (4.1.1) необходимо соответственно увеличить множитель E – э.д.с. генератора, что выполняет форсировка возбуждения.

Релейная форсировка возбуждения осуществляется переводом возбудителя в режим с потолочным напряжением путем шунтирования его регулировочного сопротивления. При увеличении напряжения возбудителя ток возбуждения генератора возрастает. Поскольку время срабатывания реле мало, то скорость нарастания возбуждения определяется только

постоянными времени цепей возбуждения и генератора. Таким образом, релейная форсировка является быстродействующим средством повышения возбуждения генератора.

Принципиальная схема устройства релейной форсировки возбуждения применительно к электромашинной системе возбуждения показана на рис. 4.1.10.

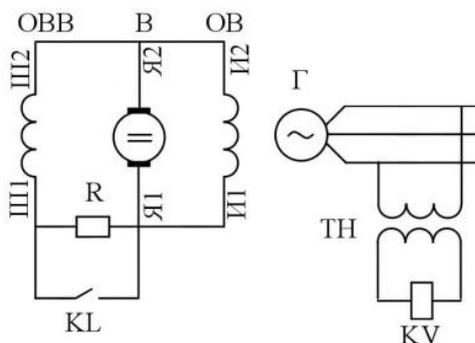


Рис. 4.1.10. Схема релейной форсировки возбуждения

При номинальном напряжении генератора контакты реле напряжения KV разомкнуты. Уставка реле обычно выбирается около $0,85U_{ном}$. При снижении напряжения генератора ниже $0,85U_{ном}$ реле напряжения замыкает контакт и подает напряжение на промежуточное реле KL, при срабатывании которого дополнительное сопротивление в цепи возбуждения возбудителя замыкается накоротко. За счет этого возбуждение генератора форсируется.

Для устранения ложного действия релейной форсировки при перегорании предохранителя в цепи трансформатора напряжения используется схема с двумя реле напряжения, которые подключаются к разным трансформаторам напряжения. Контакты этих реле должны быть включены последовательно. Для этих же целей рекомендуется подключить реле KV непосредственно к выводам трансформатора напряжения до предохранителей. С одним реле напряжения устройство форсировки работает правильно при трехфазном коротком замыкании и двухфазном коротком замыкании тех фаз, на которых установлено реле. Для правильного действия форсировки при любых двухфазных коротких замыканиях реле напряжения подключается через фильтр напряжения положительной последовательности. Возможно использование схемы с двумя реле, включенными через трансформатор напряжения на разные фазы.

На гидрогенераторах с электромашинной системой возбуждения помимо устройства форсировки возбуждения устанавливаются дополнительно устройства развозбуждения. Необходимость установки устройств развозбуждения на гидрогенераторах вызывается следующими обстоятельствами. При сбросе нагрузки число оборотов гидрогенератора может превысить номинальное значение на 30 – 40 %, вследствие медленного действия его регулятора частоты вращения. За счет увеличения частоты вращения генератора и уменьшения размагничивающего действия тока статора напряжение генератора может значительно увеличиться. Поскольку регулятор напряжения не рассчитан на регулирование напряжения генератора в широких пределах, то его действие при сбросе нагрузки оказывается недостаточным.

Устройство развозбуждения выполняется с помощью одного реле максимального напряжения KV и промежуточного реле KL. Обычно реле KV настраивается на напряжение $1,15U_{ном}$, при этом оно замыкает свой контакт и подает напряжение на промежуточное реле. Последнее в свою очередь размыкает контакт, и тем самым в цепь обмотки возбуждения возбудителя вводится дополнительное сопротивление. Схема развозбуждения настраивается так, чтобы при ее срабатывании напряжение гидрогенератора при полном сбросе нагрузки не поднималось выше $1,3U_{ном}$.

В аварийных режимах форсировка возбуждения весьма эффективна, поэтому она применяется на всех турбо и гидрогенераторах с любой системой возбуждения. Форсировка возбуждения выполняется либо с помощью реле, либо входит в структуру регулятора возбуждения.

Система возбуждения обеспечивает форсировку напряжения до $2U_{ном}$, следовательно, и ток возбуждения в режиме форсировки будет достигать двукратного значения. Для генераторов с форсированным охлаждением такое повышение тока ротора допускается только на непродолжительное время. Так, для турбогенераторов серии ТВФ двукратное значение тока ротора разрешается в течение 30 с, а для турбогенераторов типа ТВВ и ТГВ двукратная форсировка тока ротора допускается в течение 20 с.

Тема 4.2. Магнитное поле и характеристики синхронных генераторов

4.2.1. Гашение поля генераторов

Гашением поля называется процесс, заключающийся в быстром уменьшении магнитного потока возбуждения генератора до величины, близкой к нулю. При этом соответственно уменьшается ЭДС генератора.

Гашение магнитного поля приобретает особое значение при аварийных режимах, вызванных повреждениями внутри самого генератора или на его выводах.

Короткие замыкания внутри генератора обычно происходят через электрическую дугу – именно это обстоятельство обуславливает значительное повреждение обмоток статора и активной стали. Это тем более вероятно, что ток I_k при внутреннем повреждении может быть больше тока при коротком замыкании на выводах генератора. В таком случае быстрое гашение поля генератора необходимо, чтобы ограничить размер аварии и предотвратить выгорание обмотки и стали статора.

Таким образом, при внутренних коротких замыканиях в генераторах необходимо не только отключить их от внешней сети, но и быстро погасить магнитное поле возбуждения, что приведет к уменьшению ЭДС генератора и погасанию дуги.

Для гашения поля необходимо отключить обмотку ротора генератора от возбудителя. Однако при этом вследствие большой индуктивности обмотки ротора на ее зажимах могут возникнуть большие перенапряжения, способные вызвать пробой изоляции. Поэтому гашение поля нужно выполнять таким образом, чтобы одновременно с отключением возбудителя происходило быстрое поглощение энергии магнитного поля обмотки ротора генератора, а перенапряжения на ее зажимах не превышали допустимого значения.

В настоящее время в зависимости от мощности генератора и особенностей его системы возбуждения используются три способа гашения магнитного поля: замыкание обмотки ротора на гасительное (активное) сопротивление; включение в цепь обмотки ротора дугогасительной решетки быстродействующего автомата; противовключения возбудителя. В первых двух способах предусматривается осуществление необходимых переключений в цепях возбуждения с помощью специальных коммутационных аппаратов, которые называют автоматами гашения поля (АГП).

При замыкании обмотки ротора генератора на специальное сопротивление процесс гашения магнитного поля сильно затягивается, поэтому в настоящее время наибольшее распространение получил более действенный способ: гашение магнитного поля генератора при помощи АГП с дугогасительной решеткой.

4.2.2. Векторные диаграммы синхронных генераторов при симметричной нагрузке

Векторная диаграмма генератора строится с целью определения изменения напряжения на его зажимах при изменении нагрузки. Для проектируемой машины диаграмма строится по расчетным данным, а для выполненной – по результатам испытаний, в основе которых лежат опыты холостого хода и короткого замыкания.

Напряжение на зажимах генератора является результатом взаимодействия следующих факторов:

- 1) основной НС полюсов, создающей основной поток Φ_0 ;

2) продольной НС реакции якоря F_{ad} , пропорциональной реактивной составляющей нагрузочного тока, $I_d = I \sin \Psi$;

3) поперечной НС реакции якоря F_{ad} , пропорциональной активной составляющей тока нагрузки, $I_q = I \cos \Psi$;

4) ЭДС рассеяния, пропорциональной току нагрузки, $E_\sigma = \omega L_\sigma I$. Сюда же следует отнести и падение напряжения на активном сопротивлении, $I r_a$, которое мало по сравнению с другими составляющими.

Каждую НС можно рассматривать как существующую отдельно от других, и каждая из них создает свой поток и ЭДС. Таким образом, имеем 4 потока и 4 создаваемые ими ЭДС:

- а) основной поток Φ_o и основную ЭДС E_o ;
- б) поток и ЭДС продольной реакции якоря – Φ_{AD} и E_{ad} ;
- в) поток и ЭДС поперечной реакции якоря – Φ_{aq} и E_{aq} ;
- г) поток и ЭДС рассеяния – Φ_σ и E_σ .

Геометрическая сумма перечисленных ЭДС дает напряжение на зажимах U . В этом случае получают основную диаграмму ЭДС.

С другой стороны, при разложении всех потоков, создаваемых током нагрузки I , по продольной и поперечной осям, можно воспользоваться реактивностями синхронной машины по продольной и поперечной осям – x_a и x_d , называемых параметрами машины.

Исходя из сказанного, уравнения напряжения синхронного

$$\dot{U} = \dot{E}_o + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - r_a \dot{I}. \quad (4.2.1)$$

Выражая ЭДС через параметры как

$$\dot{E}_{ad} = -j x_{ad} \dot{I}_d; \quad \dot{E}_{aq} = -j x_{aq} \dot{I}_q; \quad \dot{E}_{\sigma a} = -j x_\sigma \dot{I},$$

Получим

$$\dot{U} = \dot{E}_o - j x_{ad} \dot{I}_d - j x_{aq} \dot{I}_q - j x_\sigma \dot{I} - r_a \dot{I}. \quad (4.2.2)$$

Уравнение (4.2.1) читается следующим образом: напряжение на зажимах генератора равно ЭДС E_o , индуктируемой потоком возбуждения Φ_o , минус падения напряжений в индуктивных сопротивлениях реакции якоря x_{ad} и x_{aq} , рассеяния $x_{\sigma a}$ и в активном сопротивлении r_a .

Уравнениям (4.2.1), (4.2.2) соответствуют векторные диаграммы явнополюсного синхронного генератора ($x_{ad} > x_{aq}$) на рис. 4.2.1 при смешанной активно-индуктивной (рис. 4.2.1, а) и активно-емкостной нагрузке (рис. 4.2.1, б) (диаграммы Blondеля).

Обратим внимание на угол θ между векторами \dot{E} и \dot{U} , который в синхронных машинах называется углом нагрузки. В соответствии с общими принципами создания момента в электрических машинах угол θ является ничем иным, как углом момента, т. е. углом между двумя магнитными полями – возбуждения (Φ_o) и результирующего поля (Φ_δ). Величина угла θ зависит от нагрузки генератора и ЭДС, E_o всегда опережает U , а угол считают положительным. Разложив ЭДС $E_{\sigma a}$ на составляющие и пользуясь реактивностями машины по продольной и поперечной осям

$$X_d = X_{ad} + X_\sigma; \quad X_q = X_{aq} + X_\sigma,$$

получим уравнение

$$\dot{E}_o = \dot{U}_H + j x_d \dot{I}_d + j x_q \dot{I}_q + r_a \dot{I} \quad (4.2.3)$$

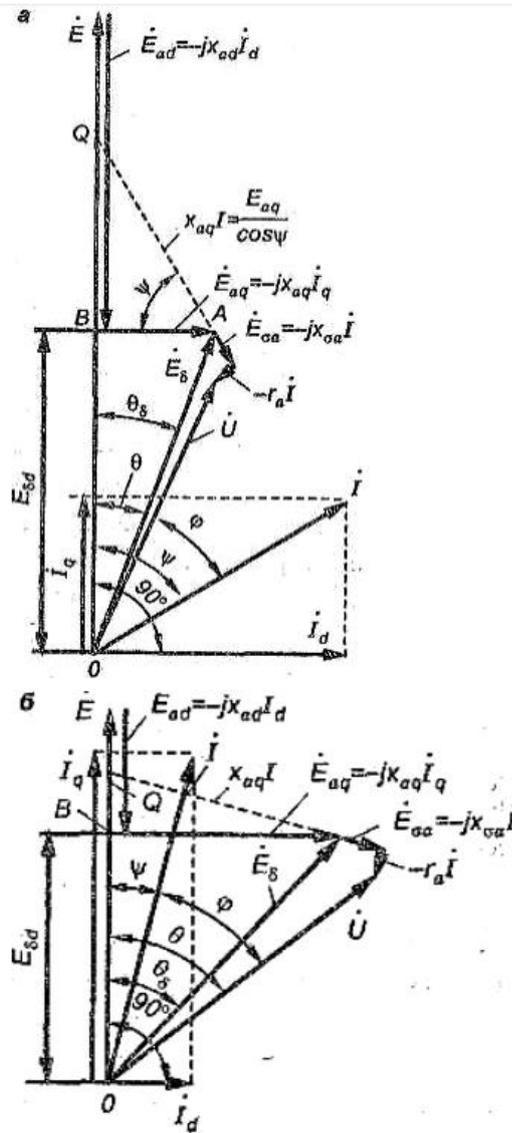


Рис. 4.2.1. Векторные диаграммы напряжений явнополюсного синхронного генератора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

и соответствующие ему диаграммы, в которых направления векторов падений напряжения изменены на обратные по сравнению с рис. 4.2.1, а, б.

Векторные диаграммы на рис. 4.2.1 справедливы для любого установившегося симметричного режима работы синхронного генератора, если пользоваться значениями параметров X_{ad} , X_{aq} , X_d , X_q , соответствующими реальному состоянию насыщения магнитной цепи. Однако в зависимости от режима работы степень насыщения различна, поэтому определение точных насыщенных значений указанных параметров весьма сложно.

4.2.3. Практическое построение диаграммы Blondеля

Раньше при построении диаграммы Blondеля предполагали, что угол ψ (между I и E_0) известен. Однако угол ψ неизвестен, а он нужен для определения F'_{ad} и F'_{aq} . Обычно при построении диаграммы Blondеля бывают заданы I , U , φ . Построение выполнено на рис. 4.2.2, а.

Строим вектор напряжения \dot{U} . К нему прибавляем векторы падения напряжения $\dot{I}r_1$ и $j\dot{I}x_s$. Далее на продолжении вектора $j\dot{I}x_s$ откладываем отрезок AD, равный $\frac{E_{aq}}{\cos \varphi}$.

Величину $\frac{E_{aq}}{\cos \varphi}$ находим по ХХХ для МДС (рис. 4.2.2, б)

$$k_{aq} F_a = \frac{F'_{aq}}{\cos \varphi}.$$

Действительно, имеем

$$F'_{aq} = F_a k_{aq} \cos \varphi \text{ или } k_{aq} F_a = \frac{F'_{aq}}{\cos \varphi}.$$

Для поперечного поля с большим воздушным промежутком при определении E_{aq} можно воспользоваться прямолинейной частью ХХХ.

Таким образом, для определения точки D знание угла ψ необязательно.

На линии OD будут находиться векторы продольных ЭДС $\dot{E}_{\delta d}$; \dot{E}_0 ; \dot{E}_{ad} . Перпендикуляр, опущенный из точки A на эту линию, равен E_{aq} . Из этого построения определяется угол ψ . Зная его, найдем $F'_{aq} = F_a k_{ad} \sin \varphi$. Для определения \dot{E}_0 и \dot{E}_{ad} используем ХХХ. По ней и по найденному значению результирующей продольных ЭДС \dot{E}_0 и \dot{E}_{ad} , т. е. по $\dot{E}_{\delta d}$, находим результирующую МДС $\dot{F}_{\delta d}$.

Тогда

$$\dot{F}_e = \dot{F}_{\delta d} + \dot{F}_{ad},$$

так как $\psi > 0$ \dot{F}_{ad} действует против \dot{F}_e . Затем определяем \dot{E}_0 и \dot{E}_{ad} .

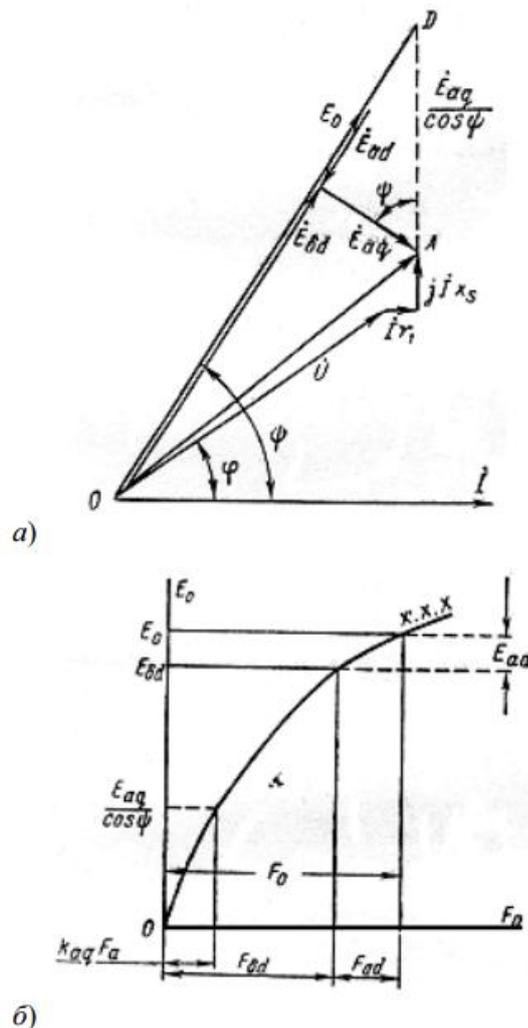


Рис. 4.2.2. Построение диаграммы Blondеля

Тема 4.3. Параллельная работа синхронного генератора с сетью. Включение синхронного генератора на параллельную работу по способу точной синхронизации. Регулирование активной и реактивной мощности синхронной машины включенной в сеть

Лекция проводится в форме дискуссии

4.3.1. Включение синхронного генератора на параллельную работу

При включении синхронного генератора в сеть на параллельную работу необходимо соблюдать следующие условия: ЭДС генератора E_0 в момент подключения его к сети должна быть равна и противоположна по фазе напряжению сети ($\dot{E}_0 = -\dot{U}_c$); частота ЭДС генератора f_T должна быть равна частоте переменного напряжения в сети f_c ; порядок следования фаз на выводах генератора должен быть таким же, что и на зажимах сети. Приведение генератора в состояние, удовлетворяющее всем указанным условиям, называют синхронизацией. Несоблюдение любого из условий синхронизации приводит к появлению в обмотке статора больших уравнивающих токов, чрезмерное значение которых может явиться причиной аварии. Включить генератор в сеть с параллельно работающими генераторами можно или способом точной синхронизации, или способом самосинхронизации (грубой синхронизации).

4.3.2. Способ точной синхронизации

Сущность этого способа состоит в том, что, прежде чем включить генератор в сеть, его приводят в состояние, удовлетворяющее всем выше перечисленным условиям. Момент соблюдения этих условий, т. е. момент синхронизации, определяют прибором, называемым синхроноскопом. По конструкции их делят на стрелочные и ламповые. Рассмотрим процесс синхронизации генераторов с применением лампового синхроноскопа, который состоит из трех ламп 1, 2, 3, расположенных в вершинах равностороннего треугольника. При включении ламп по схеме «на погасание» (рис. 4.3.1, а) момент синхронизации соответствует одновременному погасанию всех ламп. Предположим, что звезда ЭДС генератора $\dot{E}_A; \dot{E}_B; \dot{E}_C$ вращается с угловой частотой ω_T , превышающей угловую частоту вращения ω_c звезды напряжений сети $\dot{U}_A; \dot{U}_B; \dot{U}_C$. В этом случае напряжение на лампах определяется геометрической суммой $\dot{E}_A + \dot{U}_A; \dot{E}_B + \dot{U}_B; \dot{E}_C + \dot{U}_C$ (рис. 4.3.1, б)

В момент совпадения векторов звезды ЭДС с векторами звезды напряжений эта сумма достигает наибольшего значения, при этом лампа горит с наибольшим накалом (напряжение на лампах равно удвоенному напряжению сети). Затем звезда ЭДС обгоняет звезду напряжений и напряжения на лампах уменьшается. В момент синхронизации векторы ЭДС и напряжений занимают положение, при котором $\dot{E}_A + \dot{U}_A = 0; \dot{E}_B + \dot{U}_B = 0; \dot{E}_C + \dot{U}_C = 0$ и все три лампы одновременно гаснут (рис. 4.3.1, в). При большой разности угловых частот ω_c и ω_T лампы вспыхивают часто. Изменяя частоту вращения двигателя, добиваются равенства $\omega_c = \omega_T$, о чем будет свидетельствовать погасание ламп на длительное время. В этот момент и следует замкнуть рубильник, после чего генератор окажется подключенным к сети.

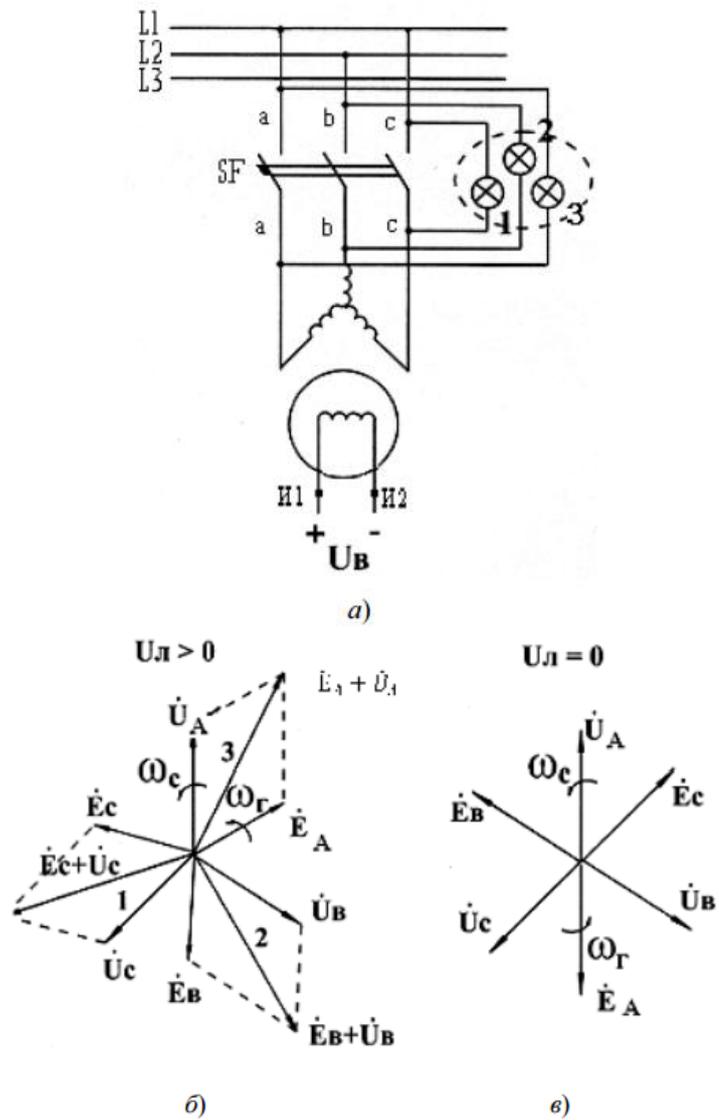


Рис. 4.3.1. Схема подключения синхронного генератора к сети с помощью лампового синхроскопа

4.3.3. Способ самосинхронизации

Ротор невозбужденного генератора приводят во вращение первичным двигателем до частоты вращения, отличающейся от синхронной не более чем на 2...5 %, затем генератор подключают к сети. Для того чтобы избежать перенапряжений в обмотке ротора в момент подключения генератора к сети, ее замыкают на некоторое сопротивление. Сразу же после присоединения генератора к сети обмотку возбуждения подключают на клеммы возбуждения и генератор начинает работать синхронно. Так как в момент подключения генератора к сети ЭДС равна нулю (генератор не возбужден), то под действием напряжения сети в обмотке статора наблюдается резкий бросок тока, превышающий номинальное значение тока генератора. Одновременно на валу ротора появляются механические усилия, они не опасны для генератора. В течение 1...7 с после момента подключения генератора ток в обмотке статора спадает до номинального значения.

Способом самосинхронизации включаются на параллельную работу генераторы мощностью до 500 МВт.

Этот способ очень удобен в условиях частых включений, так как требует немного времени и легко автоматизируется, а это необходимо для обеспечения надежной и экономичной работы энергосистемы.

4.3.4. Параллельная работа синхронных генераторов на мощную сеть

В современных энергосистемах на общую сеть работают несколько электростанций, следовательно, параллельно работает большое число синхронных генераторов различной мощности. При этом полагают, что мощность сети бесконечно велика по сравнению с мощностью отдельного генератора, т. е. $U_c = \text{const}$, $f_c = \text{const}$. При параллельной работе генераторов встречаются два основных режима:

1) изменяется подведенная механическая мощность (количество пара, воды и др.) и, следовательно, вращающий момент на валу генератора, но остается неизменным ток возбуждения: $M_1 = \text{var}$ и $I_f = \text{const}$;

2) постоянны подведенная механическая мощность и вращающий момент, изменяется ток возбуждения: $M_1 = \text{const}$ и $I_f = \text{var}$. В обоих случаях изменяются мощности генератора: в первом активная, во втором – реактивная. Перераспределение реактивной мощности является особенностью совместной работы синхронных машин вообще. Это свойство позволяет использовать синхронную машину в режиме компенсатора, т. е. генератора реактивной мощности. Весь комплекс явлений, возникающих при совместной (параллельной) работе синхронных машин, основывается на рассмотрении электромагнитных мощности и момента.

Тема 4.4. Угловые и U-образные характеристики синхронного генератора

4.4.1. Электромагнитная мощность и момент синхронной машины. Угловая характеристика

Если P_1 – подведенная к генератору механическая мощность, $p_0 = p_{\text{мх}} + p_{\text{мг}}$ – потери холостого хода, то электромагнитная мощность, передаваемая с ротора на статор, равна

$$P_M = P_1 - p_0 = P_1 - p_{\text{мх}} - p_0. \quad (4.4.1)$$

Полезная мощность генератора, отдаваемая в сеть, меньше электромагнитной на величину потерь в обмотке статора

$$P_2 = P_M - p_{\text{эл1}} = mUI \cos \varphi. \quad (4.4.2)$$

Пренебрегая активным сопротивлением якорной обмотки ($r_a = 0$, $p_{\text{эл1}} = 0$), можно сказать, что

$$P_M \cong P_2 = mUI \cos \varphi.$$

Соответствующие мощностям моменты:

$$M_1 = \frac{P_1}{\omega}; M_M = \frac{P_M}{\omega}; M_0 = \frac{p_0}{\omega}; M_2 = M + m_0 = \frac{P_M}{\omega} + \frac{p_0}{\omega}. \quad (4.4.3)$$

Из (4.4.3) видно, что при $\omega = \text{const}$ мощности и моменты синхронной машины выражаются одними и теми же синхронными величинами в соответствующем масштабе: $P = kM$, $M = (1/k)P$.

Для понимания физических процессов и условий совместной работы синхронных машин важно выразить электромагнитную мощность машины в зависимости от ее параметров.

Исходя из диаграммы напряжений синхронного генератора (рис. 4.4.1, а), выражение (4.4.2) можно представить в виде

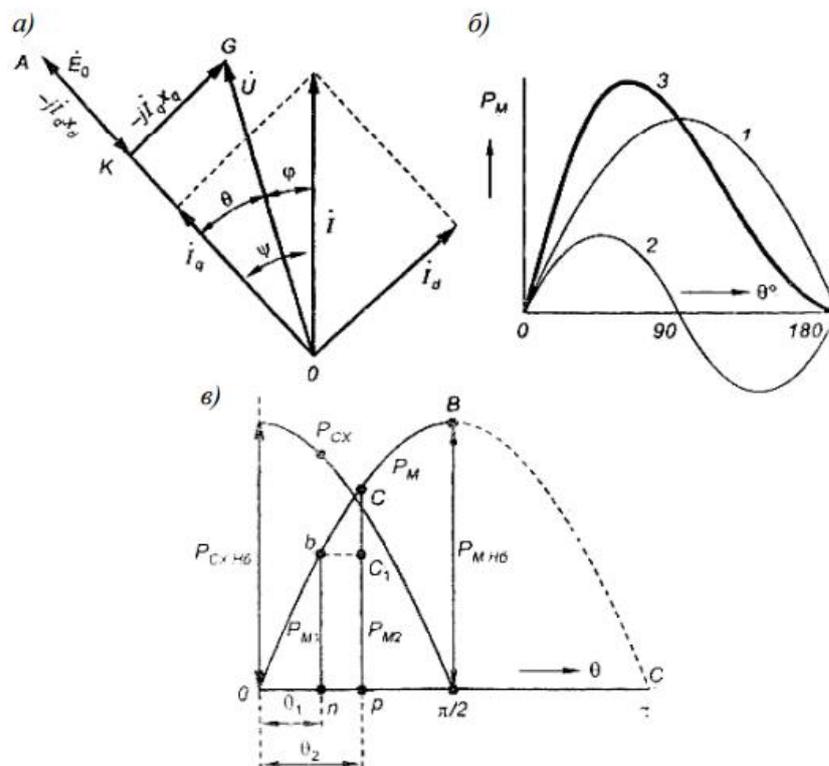


Рис. 4.4.1. Электромагнитная и синхронизирующая мощности синхронной машины:

a – к определению P_M из диаграммы ЭДС; *б* – составляющие электромагнитной мощности P'_M (3), P''_M (2); *в* – зависимости $P_M(\theta)$ и $P_{cx}(\theta)$

$$P_M = mUI \cos \varphi = mUI \cos(\varphi - \theta) = mUI \cos \varphi \cos \theta + mUI \sin \varphi \sin \theta = mUI_q \cos \theta + mUI_d \sin \theta. \quad (4.4.4)$$

Из диаграммы следует, что

$$I_q x_q = U \sin \theta, \quad I_d x_d = E_0 - U \cos \theta.$$

Тогда

$$I_q = (U/x_q) \sin \theta, \quad I_d = (E_0 - U \cos \theta) / x_d.$$

Подставив эти значения токов в (4.4.4) и проведя преобразования, получим угловую характеристику активной мощности синхронной машины как функцию параметров $P_M = f(E_0, U, \theta, x_d, x_q)$

$$P_M = \frac{mE_0 U}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = P'_M + P''_M; \quad (4.4.5)$$

$$P'_M = \frac{mE_0 U}{x_d} \sin \theta; \quad P''_M = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (4.4.6)$$

Таким образом, электромагнитную мощность синхронной машины можно рассматривать в общем случае состоящей из двух слагаемых: основной P'_M и добавочной P''_M (рис. 4.4.1, б)

$$M' = \frac{P'_M}{\omega}; M'' = \frac{P''_M}{\omega}. \quad (4.4.7)$$

Для неявнополюсных машин, когда $x_d \approx x_q$, $P_M = P'_M = (mE_0U/x_d) \cdot \sin\theta$, а для явнополюсных имеет место и составляющая P''_M , характерная для реактивных (индукторных) машин. Видно также, что величина P''_M пропорциональна квадрату результирующего магнитного потока в зазоре ($U \rightarrow \Phi_\delta$, ЭДС $E_0 \rightarrow \Phi_0$) разности магнитных проводимостей по осям d и q, синусу двойного угла θ .

Она достигает наибольшего значения при $\theta = 45^\circ$. По сути, эта составляющая обусловлена силами магнитного притяжения характерными для систем с одной обмоткой возбуждения (электромагниты). Эта составляющая мощности в явнополюсных машинах может достигать 25 % от основной.

Регулирование активной мощности

Рассмотрим работу полнополюсного генератора, когда $x_d \approx x_q$. При этом электромагнитная мощность

$$P_M = \frac{mE_0U}{x_d} \sin \theta, \quad (4.4.8)$$

которая при $U = \text{const}$, $I_f = \text{const}$, $E_0 = \text{const}$, $x_d = \text{const}$ определяется только углом θ и пропорциональна синусу этого угла (см. рис.3.17). При этом диапазон изменения $0 < \theta < \pi$ соответствует генераторному режиму ($P > 0$); $-\pi < \theta < 0$ – двигательному ($P < 0$, мощность потребляется).

Пусть режим работы определяется углом $\theta = \theta_1$ (см. рис. 4.4.1, в) и мощностью P_{M1} . Увеличив мощность первичного двигателя (дизеля, турбины), ротор начнет смещаться относительно статора вперед по направлению вращения, и угол θ увеличивается до значения θ_2 . Видно, что при этом электромагнитная и полезная мощности увеличиваются, следовательно, растет и тормозящий момент. Этот процесс увеличения θ , P_M , P_2 будет идти до тех пор, пока тормозящий момент генератора не будет равным вращающему моменту двигателя, т. е. $M_1 = M_0 + M_M$. В итоге генератор будет работать с той же синхронной скоростью, но с большим углом θ , значит, и большей нагрузкой.

Процессу можно придать пространственное толкование для понимания физической стороны явления. Действительно, ЭДС E_0 создается основным потоком Φ_0 , а напряжение U – результирующим Φ_δ . Следовательно, можно считать, что вектор E_0 представляет ось основного потока Φ_0 , вектор напряжения – ось результирующего потока Φ_δ , а угол θ – угол между осями этих потоков. В результате имеем два магнитных потока, сдвинутых в пространстве на угол θ , вращающихся синхронно, т. е. они неподвижны относительно друг друга, что полностью соответствует фундаментальному принципу непрерывного преобразования энергии. Здесь ротор и его поток являются ведущим звеном машины, а поток статора – ведомым (рис. 4.4.2), поэтому в режиме генератора вектор E_0 всегда опережает вектор напряжения U . Сам же момент создается в результате стремления магнитных полей статора и ротора расположиться так, чтобы их пространственные оси совпадали.

Способность генератора увеличивать мощность при увеличении угла θ и тем самым синхронизировать его работу, что видно по угловой характеристике, непостоянна: она ослабевает по мере приближения θ к 90° . При $\theta = 90^\circ$, $\sin \theta = 1$ генератор развивает наибольшую электромагнитную мощность $P_{Mm} = mE_0U/x_d$. При $\theta > 90^\circ$ генератор сбрасывает нагрузку и избыток вращающего момента $M_1 - M = \Delta M_1$ пойдет на придание ускорения ротору, в итоге генератор выпадает из синхронизма. Следовательно, при $\theta > 90^\circ$ – область неустойчивой работы, а при $0 < \theta < 90^\circ$ – устойчивой.

Способность генератора синхронизироваться с сетью определяется удельной синхронизирующей мощностью (см. рис. 4.4.1, в)

$$P_{cx} = \frac{dP_M}{d\theta} = m \frac{UE_0}{x_d} \cos \theta, \quad (4.4.9)$$

которая имеет наибольшее значение при $\theta = 0$ и равна нулю при $\theta = 90^\circ$.

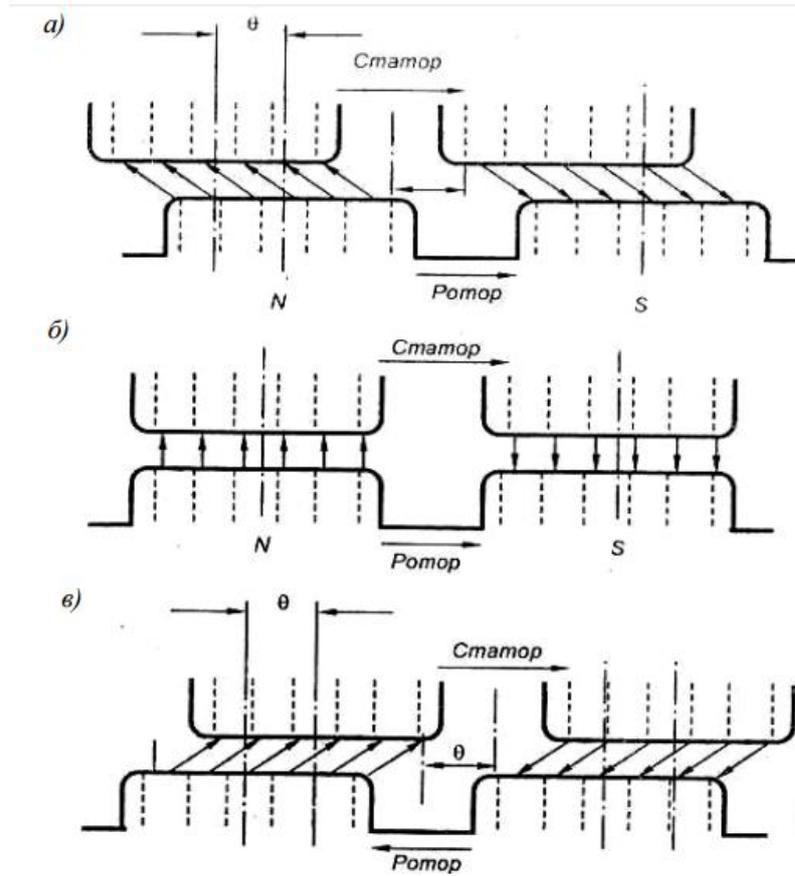


Рис. 4.4.2. Взаимодействие магнитных полюсов статора и ротора синхронной машины в различных режимах: а – генератора; б – холостого хода; в – двигателя

Синхронизирующий момент $M_{cx} = P_{cx}/\omega$. Сравним процесс регулирования электромагнитной мощности с генератором постоянного тока. Для повышения P_M необходимо увеличить ЭДС $E_a = C\Phi\omega$, что при постоянстве тока возбуждения возможно только увеличением частоты вращения (угловой скорости).

4.4.2. U-образные характеристики синхронной машины. Регулирование реактивной мощности

Рассмотрим работу синхронного генератора на сеть бесконечно большой мощности ($U = \text{const}, f = \text{const}$) при $M = \text{const}$ и $I_f = \text{var}$.

Для замкнутого контура, образованного генератором и сетью (например, другим генератором), справедливо соотношение

$$\dot{E}_0 - IZ = \dot{U}_2 = -\dot{U}_c,$$

где $\dot{E}_0, I, Z, \dot{U}_r$ – ЭДС, ток, полное сопротивление и напряжение генератора.

Согласно условию, $\dot{U}_c = \text{const}$, а ЭДС E_0 можно изменять, регулируя ток возбуждения I_f генератора.

В режиме холостого хода мощность $P_M = 0$, следовательно, угол $\theta = 0$ (см. рис. 4.4.2, б). При этом ток I_f можно отрегулировать так, что $I = 0, \dot{E}_0 = -\dot{U}_c$ (рис. 4.4.3, а). Такое значение тока $I_f = I_{f0}$ называют нормальным.

Увеличим ток возбуждения, $I_f > I_{f0}$, т. е. перевозбудим генератор. При этом остается $P_M = 0, \theta = 0, \dot{E}_0$ и \dot{U}_c в противофазе (рис. 4.4.3, б), но появляется разность $\Delta E = \dot{E}_0 - (-\dot{U}_c)$

вектор которой направлен в сторону \dot{E}_0 . Под действием этой ЭДС ΔE появится уравнивающий ток, отстающий от ΔE на 90° .

Этот ток является чисто индуктивным относительно напряжения генератора и чисто емкостным по отношению к напряжению сети. Он создает продольную реакцию якоря, размагничивает генератор и намагничивает сеть (другие генераторы). Являясь практически реактивным, этот ток не приводит к перераспределению активной нагрузки.

Если уменьшить ток возбуждения, $I_f < I_{f0}$, т. е. недовозбудить генератор, то все произойдет в обратном порядке (рис. 4.4.3, в): при недовозбуждении генератора появляется уравнивающий ток, являющийся чисто емкостным относительно генератора и индуктивным по отношению к сети. Он стремится намагнитить генератор и размагнитить сеть.

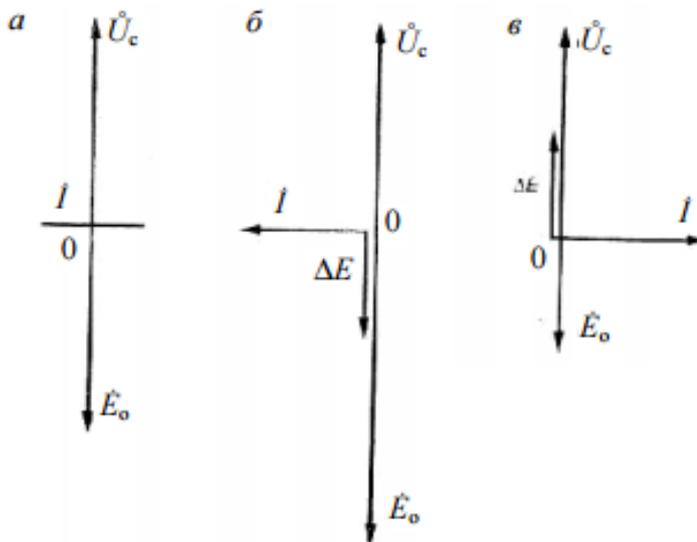


Рис. 4.4.3. Положение векторов напряжения и ЭДС генератора в режиме $M = \text{const}$: а – нормальное возбуждение; б – перевозбуждение; в – недовозбуждение.

Величина уравнивающего тока при допущении $r \approx 0$

$$i = -j \frac{E_0 + U_c}{x_d} = -j \frac{\Delta E}{x_d}. \quad (4.4.10)$$

Видно, что уравнивающий ток линейно зависит от ΔE , а при $U_c = \text{const}$ от ЭДС E_0 . На рис. 4.4.4 приведены U -образные характеристики синхронного генератора. Если $E_0 = 0$ ($I_B = 0$), то $I = U_c/x_d$, соответствует точке а на оси ординат. При $E_0 = U_c$, $\Delta E = 0$, $I = 0$ (точка б на оси абсцисс). Таким образом, прямая ab соответствует режиму недовозбуждения генератора при холостом ходе. Правая часть, прямая bb' , строится симметрично ab и определяет режим перевозбуждения при холостом ходе и ненасыщенной магнитной системе. Однако при перевозбуждении генератора ($I_f > Ob$) все больше сказывается насыщение стали и зависимость $I(I_f)$ отклоняется от прямой (кривая bc на рис. 4.4.4).

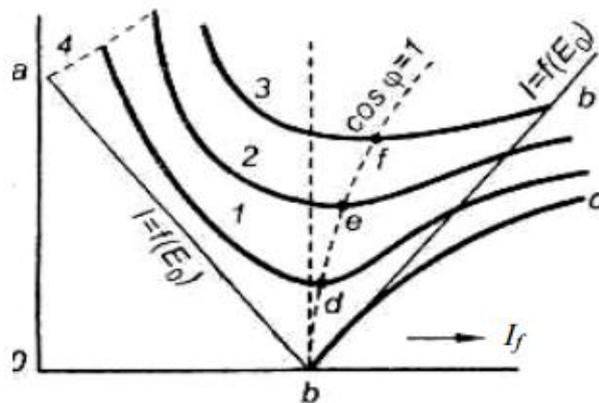


Рис. 4.4.4. U -образные кривые синхронного генератора

При нагрузке и $U_c = \text{const}$, $f = \text{const}$, $M = \text{const}$, $P_m = M\omega = \text{const}$, $P_2 \cong P_m = mU_f I \cos \varphi = mU_f I_a = \text{const}$, т. е. при заданном моменте на валу генератора активная составляющая тока статора $I_a = \text{const}$ и не зависит от тока возбуждения. Регулируя I_f как и в режиме холостого хода, появится реактивная составляющая тока статора: при перевозбуждении – индуктивная относительно генератора; при недо возбуждении – емкостная. На рис. 4.4.4 приведены U -образные кривые 1, 2, 3, соответствующие трем разным нагрузкам генератора. В точках d , e , f ток I имеет минимальное значение, $\cos \varphi = 1$. С точки зрения наименьших потерь в обмотках статоров наилучшими условиями работы генераторов являются такие, при которых все они имеют одинаковый $\cos \varphi$. Следует отметить, что, перераспределяя реактивную мощность, можно улучшить коэффициент мощности одного генератора (или электростанции, в целом в энергосистеме), например, перевозбудив его. Однако уравнивающий ток непременно вызовет ухудшение $\cos \varphi$ другого генератора (или группы генераторов в энергосистеме). Практически чаще применяются особые синхронные машины – компенсаторы, или синхронные двигатели, специально рассчитанные на работу при перевозбуждении.

4.4.3. Синхронные двигатели

Синхронная машина, как любая электрическая машина, обратима, т. е. может работать как в двигательном, так и в генераторном режимах. Однако особенности работы машины в том или ином режиме связаны с различными требованиями, предъявляемыми к ее конструктивному исполнению. Наиболее существенным отличием условий работы синхронного двигателя является процесс включения его в сеть, называемый пуском.

Собственный пусковой момент синхронного двигателя равен нулю, так как вследствие инерции ротора поток возбуждения Φ_f не может сразу достичь синхронной частоты вращения потока статора Φ_1 . Поэтому после включения возбуждения двигателя в сеть при $n = 0$ поля Φ_f и Φ_1 перемещаются друг относительно друга с большой скоростью и среднее взаимодействие этих полей равно нулю.

Пуск синхронного двигателя можно осуществить с помощью преобразователя частоты, который плавно повышает частоту вращения поля якоря Φ_1 от нуля до номинального значения по мере разгона двигателя. Такой способ пуска называется частотным. Возможен также пуск синхронного двигателя при помощи дополнительного асинхронного двигателя, осуществляющего предварительный разгон недо возбужденного синхронного двигателя до подсинхронной частоты вращения. Затем производится включение синхронного двигателя в сеть и его синхронизация по методу грубой синхронизации – подобно тому, как это делается для синхронных генераторов.

Однако наиболее распространенным является асинхронный пуск синхронного двигателя. С этой целью на роторе в специальных пазах полюсных наконечников явнополюсных синхронных двигателей размещают короткозамкнутую обмотку (рис. 4.4.5) в виде латунных, медных или бронзовых стержней 1, соединенных по торцам короткозамыкающими кольцами 2. Эта обмотка называется пусковой. При использовании

массивных полюсов, а также в случае неявнополюсных синхронных двигателей с ротором в виде массивного стального цилиндра роль пусковой обмотки выполняет внешняя поверхность полюсов или цилиндра ротора. Схема асинхронного пуска представлена на рис. 4.4.6.

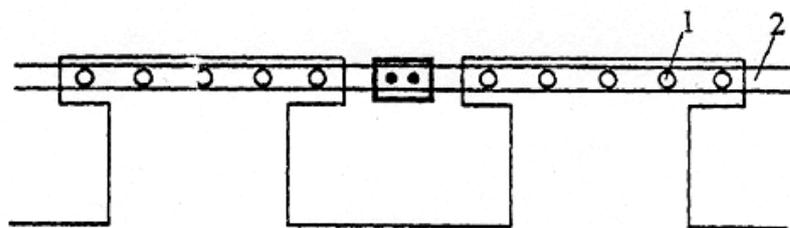


Рис. 4.4.5. Пусковая обмотка синхронного двигателя

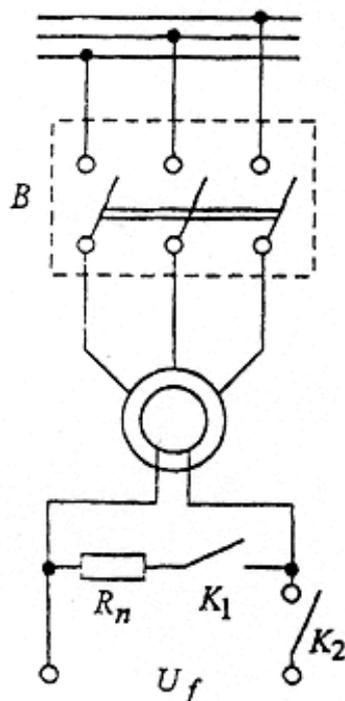


Рис. 4.4.6. Схема пуска асинхронного двигателя

В соответствии с этой схемой процесс пуска выполняется в два этапа. На первом этапе после включения обмотки статора в сеть ротор двигателя разгоняется под действием асинхронного момента до подсинхронной частоты вращения. Скольжение ротора

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0,03 \dots 0,03.$$

Обмотка возбуждения в течение первого этапа пуска замыкается на активное сопротивление $R_n = (5-10)r_f$. Оставлять обмотку возбуждения разомкнутой нельзя, так как вращающееся поле статора наводит в ней в начальный период пуска значительную ЭДС, способную «пробить» изоляцию обмотки возбуждения и опасную для эксплуатационного персонала.

Замыкать обмотку возбуждения накоротко также нецелесообразно, так как при этом возрастают провалы в кривой асинхронного момента M_a (рис. 4.4.7).

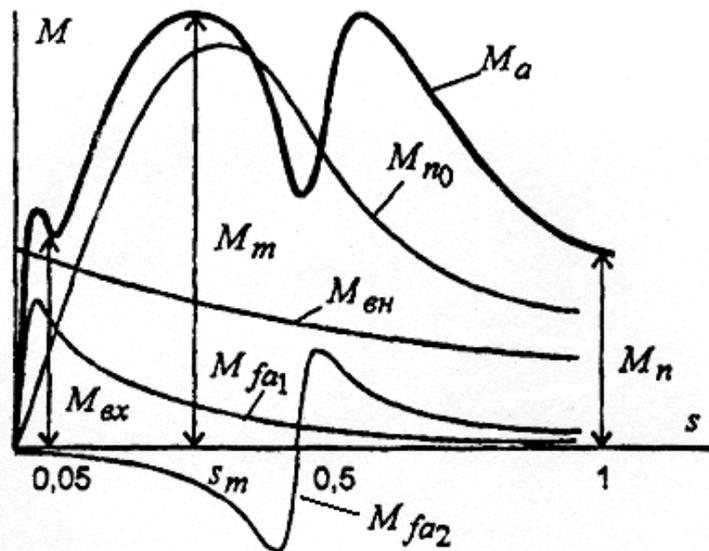


Рис. 4.4.7. Кривые моментов двигателя

Обмотка возбуждения является однофазной обмоткой. Индуцированный в ней ток создает пульсирующее магнитное поле. Прямо вращающаяся составляющая этого поля создает момент M_{fa1} , а обратно вращающаяся составляющая – момент M_{fa2} . При суммировании этих моментов с моментом пусковой обмотки $M_{п0}$ в кривой результирующего момента, а $M = f(s)$ появляются провалы в зоне малых скольжений и в области скольжения $s = 0,5$, которые могут затруднить пуск двигателя. Введение в цепь обмотки возбуждения дополнительного сопротивления $R_{п}$ позволяет уменьшить величину этих провалов. Для оценки пусковых свойств синхронного двигателя используются три показателя:

- кратность пускового момента $\frac{M_n}{M_n}$;
- кратность максимального момента $\frac{M_m}{M_n}$;
- кратность входного момента $\frac{M_{ex}}{M_n}$.

Входной момент определяется при скольжении $s = 0,05$, примерно соответствующем верхнему уровню скольжения, при котором двигатель может войти в синхронизм после подачи возбуждения. Момент сопротивления на валу двигателя M_{bn} должен быть меньше развиваемого двигателем асинхронного момента M_a (рис. 4.4.7). Разность моментов M_a и M_{bn} определяет динамический момент

$$M_{дин} = M_a - M_{bn} = \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt}.$$

Чем больше динамический момент, тем меньше время пуска

$$dt_{п} = \int_0^{\omega_1} \frac{J}{pM_{дин}} d\omega_r$$

Если динамический момент мал, то пуск затягивается. Это может привести к перегреву обмотки статора и пусковой обмотки из-за значительных токов, протекающих по этим обмоткам при асинхронном пуске. Пусковой ток статорной обмотки (при $s = 1$) в несколько раз превышает номинальный ток и обычно составляет

$$I_{п} = (4 - 6)I_n.$$

Рабочие свойства синхронных двигателей могут быть исследованы с помощью уравнений и векторных диаграмм, полученных для синхронных генераторов. Основным режимом синхронных двигателей является режим при $P_1 = \text{const}$. Этот режим описывается U -

образными характеристиками (рис. 4.4.8), которые практически повторяют U -образные характеристики генератора.

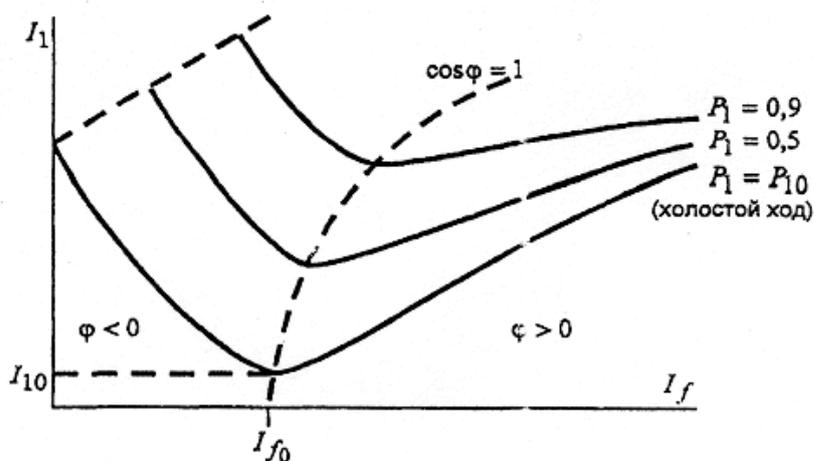


Рис. 4.4.8. U -образные характеристики СД при различной мощности

Отличается лишь U -образная характеристика в режиме холостого хода $P_1 = P_{10}$, когда для своей работы двигатель потребляет из сети активный ток $I_1 = I_{10}$.

Другим характерным режимом является работа двигателя при постоянном возбуждении ($I_f = \text{const}$) и переменной нагрузке ($P_1 = \text{var}$). Характеристиками этого режима являются угловые (рис. 4.4.9) и рабочие характеристики (рис. 4.4.10).

Угловые характеристики построены без учета знака угла и мощности, для трех значений тока возбуждения. Они показывают, что синхронные двигатели допускают регулирование максимального момента. Это имеет очень важное значение в аварийных режимах для сохранения устойчивости параллельной работы двигателя с сетью.

Рабочие характеристики (рис. 4.4.10) построены при токе возбуждения $I_f = I_{f0}$ (рис. 4.4.8). С ростом нагрузки $\cos \varphi$ падает, двигатель переходит в режим потребления реактивной мощности ($\varphi < 0$). При автоматическом регулировании тока возбуждения можно обеспечить работу двигателя с любым заданным характером изменения коэффициента мощности.

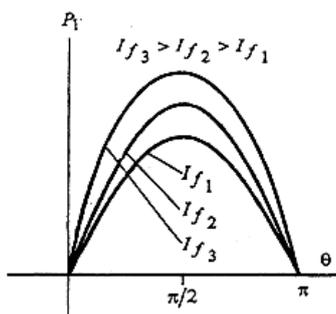


Рис. 4.4.9. Угловые характеристики при $I_f = \text{var}$

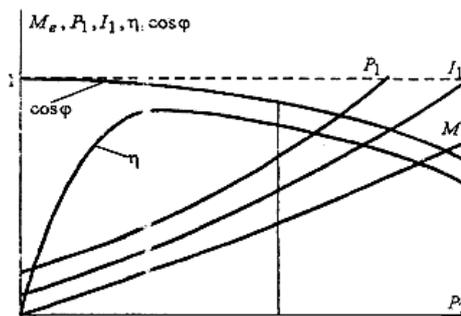


Рис. 4.4.10. Рабочие характеристики

Синхронные двигатели обычно проектируются для работы в режиме перевозбуждения ($\varphi > 0$) с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,9$. Это позволяет уменьшить реактивную мощность синхронных генераторов на электростанциях и тем самым сократить потери в линиях электропередачи. Однако, в сравнении с асинхронными двигателями, синхронные двигатели являются более дорогими, главным образом, из-за затрат, связанных с изготовлением системы возбуждения. Они сложнее в конструктивном отношении, нуждаются в квалифицированном обслуживании и менее надежны в эксплуатации.

Выбор того или иного типа двигателя осуществляется на основе технико-экономических расчетов. При мощности 100...200кВт синхронные двигатели часто оказываются выгоднее асинхронных.

4.4.4. Синхронные компенсаторы

Синхронные компенсаторы (СК) являются генераторами и потребителями реактивной мощности. Они включаются в систему вблизи мощных узлов нагрузки (рис. 4.4.11).

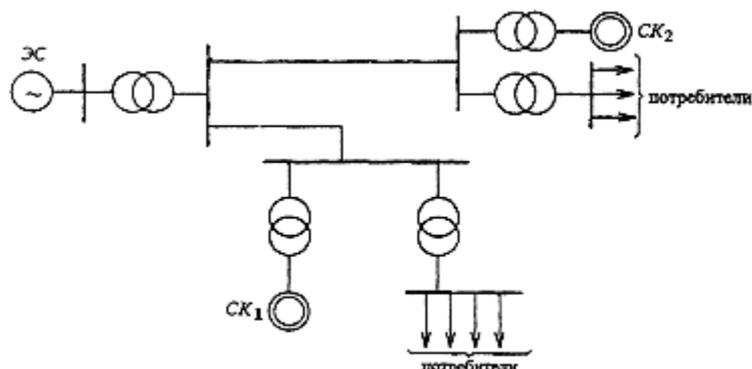


Рис. 4.4.11. Включение СК в узлах нагрузки

Синхронные компенсаторы позволяют разгружать линии электропередачи от реактивных токов, повышая их использование и поддерживая заданный уровень напряжения в системе. Последнее имеет важное значение не только в отношении качества электроэнергии у потребителей, но и с точки зрения повышения устойчивости работы энергосистемы.

Затраты, связанные с установкой и эксплуатацией синхронных компенсаторов окупаются, если их мощность составляет 0,2...0,3 полной мощности линии электропередачи.

Конструктивно синхронные компенсаторы выполняются так же, как синхронные двигатели. Отличие состоит лишь в том, что они не имеют выходного конца вала. Мощность синхронных компенсаторов 10...345 МВ·А при напряжении 6,6...15,75 кВ. Частота вращения 750-1000 об/мин, исполнение – горизонтальное с явнополюсным ротором.

Включение синхронных компенсаторов в сеть производится методом асинхронного пуска, подобно синхронным двигателям. Рабочий процесс синхронного компенсатора описывается U-образной характеристикой $I_1 = f(I_f)$ (рис. 4.4.12). Эта характеристика ничем не отличается от соответствующей характеристики синхронного двигателя при $P_2 = 0$.

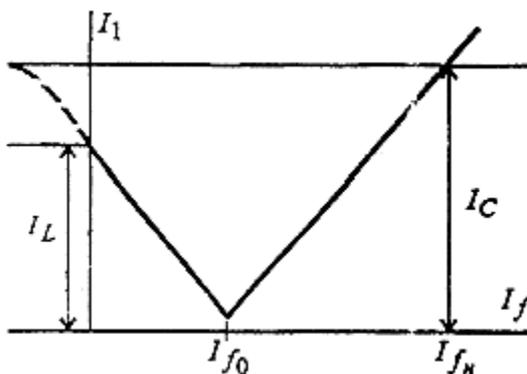


Рис. 4.4.12. U-образные кривые СК

Важным свойством синхронного компенсатора является его способность к стабилизации напряжения сети. При уменьшении напряжения сети (рис. 4.4.13, в) реактивная мощность, отдаваемая компенсатором в сеть, увеличивается, а при увеличении напряжения (рис. 4.4.13, г) компенсатор переходит в режим потребления реактивной мощности.

Благодаря такой реакции компенсатора происходит стабилизация реактивного тока в линии электропередачи и, следовательно, стабилизация напряжения.

Повышение $\cos \varphi$. При подключении синхронного компенсатора параллельно нагрузке Z (рис. 4.4.13, б) и создании режимов перевозбуждения, в сети появляется ток $I_{СК}$, опережающий по фазе U_c на 90° . В результате получаем (рис. 4.4.13, а):

$$I_C = I_Z + I_{СК}.$$

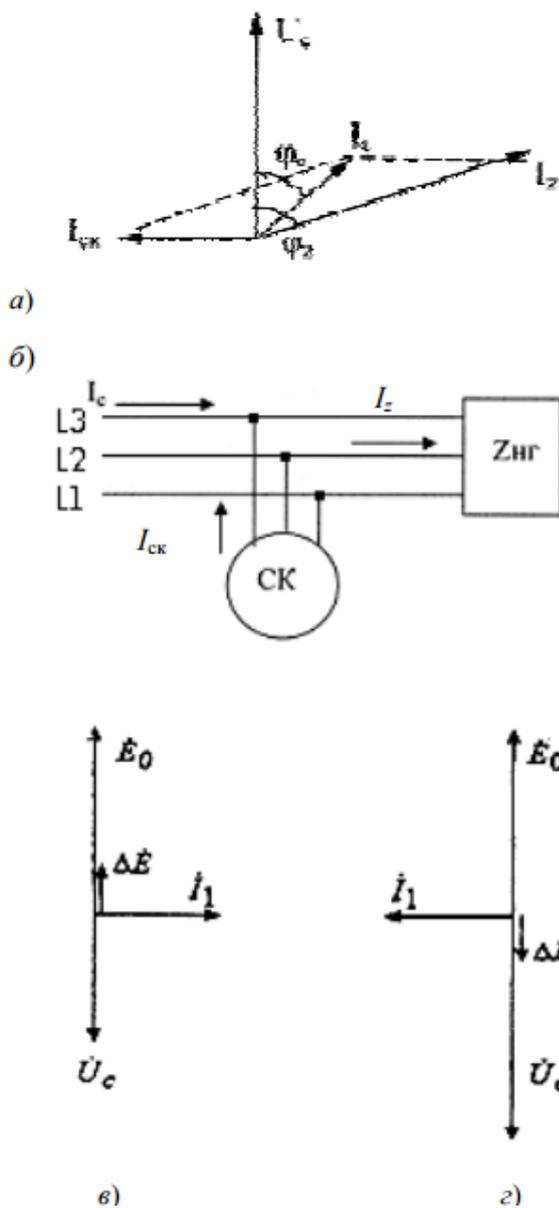


Рис. 4.4.13. Регулирование реактивной мощности СК

Фазовый сдвиг I_c относительно U_c (угол φ_c) намного меньше (φ_z), и $I_c < I_z$, следовательно, $\cos \varphi_c > \cos \varphi_z$ – в результате СГ и ЛЭП разгружаются, а потери мощности в ней уменьшаются.

Раздел 5. Машины постоянного тока

Тема 5.1. Принцип действия и устройство коллекторных машин постоянного тока

Лекция проводится в форме дискуссии.

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части – статора, вращающейся части – якоря и двух щитов. Статор образует станина с закрепленным на ней главными и дополнительными полюсами.

На рис. 5.1.1 показано устройство машины постоянного тока. Станина 8, как правило, выполняется литой из стали Ст 3, она является основным несущим элементом конструкции и одновременно магнитопроводом (ярмо) для потока главных и дополнительных полюсов. В торцах станины имеются кольцевые центрирующие выточки для посадки подшипниковых щитов 2 и 9. Штампованные лапы 11 приварены к станине, а в верхнюю ее часть ввернуто подъемное кольцо (рис. 5.1.1), предназначенное для транспортировки. Сердечники главных полюсов крепятся к станине с помощью винтовых соединений 6 (см. рис. 5.1.2), они набраны из штампованных пластин холоднокатаной электротехнической стали марки 3411, как единое целое с полюсными наконечниками (башмаками). Ширина наконечника по окружности якоря занимает 0,6–0,8 длины полюсного деления, где полюсное деление – это часть окружности якоря приходящаяся на один полюс.

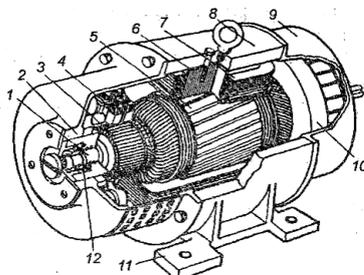


Рис. 5.1.1. Устройство машины постоянного тока:

- 1 – вал; 2 и 9 – щиты подшипников; 3 – коллектор; 4 – щетка; 5 – якорь с обмоткой;
6 – сердечник главного полюса; 7 – катушка возбуждения; 8 – станина; 10 – вентилятор;
11 – лапа станины; 12 – подшипник

Сердечники главных полюсов 1 для уменьшения потерь, вызванных пульсацией магнитного поля в воздушном зазоре под полюсами, набраны из листов электротехнической стали толщиной 1 мм. Пакет листов сердечника стянут заклепками, проходящими сквозь выштампованные в листах отверстия.

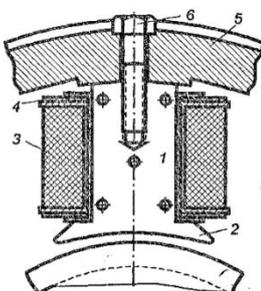


Рис. 5.1.2. Главный полюс с обмоткой возбуждения:

- 1 – сердечник полюса; 2 – наконечник (башмак); 3 – катушка; 4 – каркас крепления катушки;
5 – станина; 6 – винт крепления полюса

Полюсные катушки 3 этих полюсов многослойные из обмоточного провода круглого сечения.

В машинах смешанного возбуждения на каждом сердечнике главных полюсов расположено по две обмотки. Нижние катушки образующие параллельную обмотку

возбуждения, выполнены из круглого изолированного провода с большим числом витков. Верхние катушки 7 образуют последовательную обмотку и имеют небольшое число витков из прямоугольного провода (рис. 5.1.3, а).

Сердечник якоря 5 (рис. 5.1.1) набирается из листов, которые штампуются с отверстиями под вал и аксиальную вентиляцию, зубцовой зоной.

Эти листы предварительно покрывают изолирующим лаком, а затем набирают на валу, спрессовывают и сжимают двумя шайбами или шпильками.

Дополнительные полюсы имеют цельный сердечник 4 (рис. 5.1.3) и полюсные катушки 5, которые состоят из провода прямоугольного сечения намотанного на ребро.

На валу машины расположены коллектор (рис. 5.1.3) и вентилятор 10 (рис. 5.1.1).

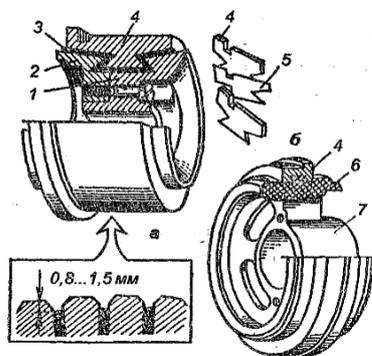


Рис. 5.1.3. Коллекторы машины постоянного тока с металлическими нажимными шайбами (а) и на пластмассе (б):

- 1 – корпус; 2 – нажимная шайба; 3 – изоляционная манжета; 4 – коллекторные пластины; 5 – изоляционные прокладки; 6 – пластмасса; 7 – втулка

Коллектор собирается из медных пластин, имеющих трапециевидную форму, разделенных изоляционными прокладками. Крепления коллекторных пластин показаны на рис. 5.1.3, а, б. На коллектор накладываются щетки, через которые подводится или отводится электроэнергия постоянного тока, количество их, как правило, равно числу полюсов, щетки одинаковой полярности соединяются. Щетки, как правило, устанавливаются по геометрической нейтрали (поперечной оси q), образуя параллельные ветви обмотки.

Обмотка якоря, обычно двухслойная, укладывается в пазы (рис. 5.1.4, а) в виде катушек (рис. 5.1.4, б).

При этом каждая катушка имеет одну сторону в нижней части паза, а другую в верхней для выполнения условий симметрии.

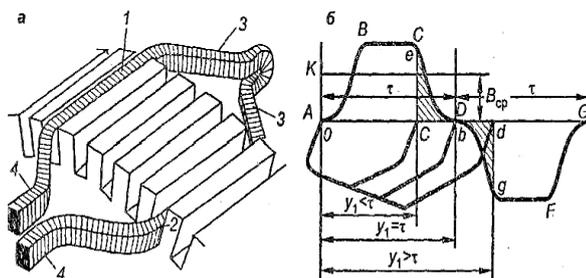


Рис. 5.1.4. Расположение секции обмотки якоря в пазах (а) и расположение сторон секций с полным, укороченным и удлиненным шагом (б):

- 1, 2 – верхняя и нижняя активные стороны; 3, 4 – лобовые части

Характерной частью машины постоянного тока является коллектор. Он служит для выпрямления переменной ЭДС, индуктированной во вращающейся обмотке якоря, в режиме генератора и для получения постоянного по направлению электромагнитного момента, когда машина работает двигателем.

5.1.2. Принцип действия машины постоянного тока

Машиной постоянного тока (МПТ) называют двухобмоточную электрическую машину, одна из обмоток которой (обмотка якоря) соединяется с электрической сетью постоянного тока с помощью механического преобразователя частоты (коллектора), преобразующего переменный ток в якоре в постоянный ток сети, а вторая (обмотка возбуждения) питается постоянным током.

Принцип действия машины постоянного тока основан на законах электромагнитной индукции и электромагнитных сил. На основании названных законов, а также законов Джоуля Ленца, Кирхгофа, Ома описываются физические процессы в МПТ.

При разомкнутой обмотке якоря ($I_{\beta} = 0$) магнитное поле в машине создается только МДС обмотки возбуждения, по которой протекает постоянный ток I_A . При вращении якоря частотой n в его обмотке индуцируется переменная ЭДС частотой f , которая при помощи коллектора и механических щеток выпрямляется. На рис. 5.1.5 представлена электромагнитная схема двухполюсной МПТ.

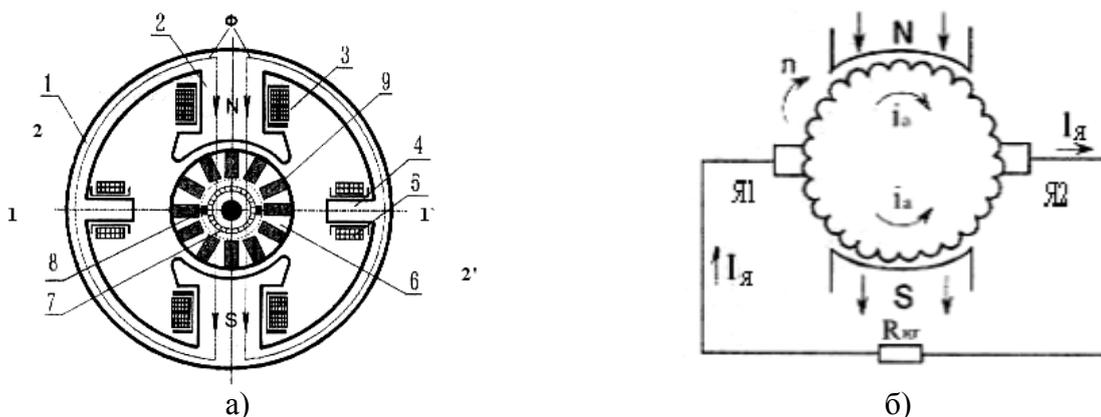


Рис. 5.1.5. Электромагнитная схема двухполюсной МПТ (а) и эквивалентная схема обмотки якоря (б):

1 – станина; 2 – сердечник главного полюса; 3 – обмотка возбуждения; 4 – сердечник дополнительного полюса; 5 – обмотка дополнительного полюса; 6 – сердечник якоря; 7 – коллектор; 8 – щетки; 9 – обмотка якоря

При подключении к щеткам активной нагрузки или сети постоянного тока в обмотке якоря появляется ток, значение и направление которого зависят от соотношения между ЭДС и напряжением сети.

При работе в генераторном режиме (рис. 5.1.5) ЭДС больше, чем напряжение сети ($E > U$), ток якоря совпадает по направлению с ЭДС и механическая энергия, подведенная к валу машины, преобразуется в электрическую энергию, поступающую в сеть. При работе в режиме двигателя ЭДС, индуцированная в обмотке якоря, меньше, чем напряжение сети ($E < U$), ток якоря совпадает по направлению с напряжением сети, а электрическая энергия, поступающая из сети, преобразуется в механическую энергию, передаваемую через вал исполнительному механизму.

Когда машина нагружена и работает в режиме двигателя или генератора ($I_{\beta} \neq 0$), магнитное поле в ней создается действием МДС обмотки возбуждения и МДС обмотки якоря.

Картина магнитного поля машины искажается, и линия 2-2', проходящая через точки на поверхности якоря, в которых индукция равна нулю (физическая нейтраль), смещается на угол β по отношению к поперечной оси машины 1-1' (геометрическая нейтраль) (см. рис. 5.1.5).

Тема 5.2. Генераторы постоянного тока. Генератор независимого возбуждения. Генератор параллельного возбуждения

Лекция проводится в форме дискуссии

5.2.1. Схемы возбуждения генераторов

Свойства генераторов постоянного тока зависят от схемы включения обмоток возбуждения. На рис. 5.2.1 показаны схемы генераторов с электромагнитным возбуждением. В генераторе с независимым возбуждением (рис. 5.2.1, а) обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника постоянного тока.

В генераторе с параллельным возбуждением (рис. 5.2.1, б) обмотка возбуждения включается на зажимы якоря. В генераторе с последовательным возбуждением (рис. 5.2.1, в) обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря. Генераторы со смешанным возбуждением имеют две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную (рис. 5.2.1, г).

Генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения являются машинами с самовозбуждением, т.к. в качестве источника питания обмоток возбуждения используется сам генератор.

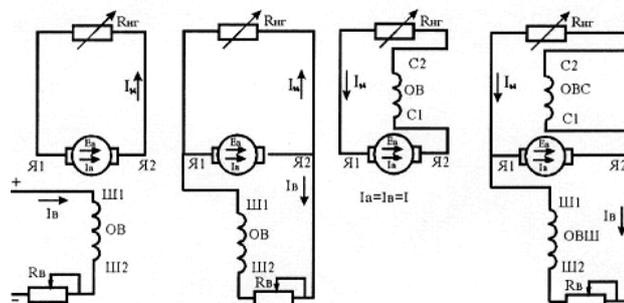


Рис. 5.2.1. Схема генераторов постоянного тока:

а – с независимым возбуждением; б – с параллельным возбуждением;
в – с последовательным возбуждением; г – со смешанным возбуждением

5.2.2. Характеристики генераторов постоянного тока

Свойства электрических машин анализируются с помощью характеристик, которые устанавливают зависимости между основными параметрами и величинами, определяющими работу машины в различных режимах – генератора и двигателя.

Характеристики могут быть получены как экспериментально, так и расчетным путем. Для расчета необходимо знать значения конструктивных параметров и электромагнитных нагрузок.

Для генератора величинами, характеризующим его работу, являются: 1) напряжение на зажимах обмотки якоря U ; 2) ток возбуждения I_A ; 3) ток якоря I_β (он же ток нагрузки); 4) частота вращения n .

Основные характеристики:

– холостого хода $U = E = f(I_A)$ при $I_\beta = 0$, $n = const$;

– внешняя $U = f(I)$ при $I_A = const$, $n = const$;

– регулировочная $I_A = f(I_\beta)$ при $U = const$, $n = const$.

Нагрузочная, внешняя и регулировочная характеристики могут быть сняты опытным путем или построены с помощью характеристики холостого хода и характеристического треугольника.

Затем производится сравнение характеристик с объяснением причин, вызывающих их несовпадение.

Внешние характеристики генератора для всех способов возбуждения строятся на одном рисунке на понижение напряжения, а на другом на повышение напряжения. Примерный вид этих характеристик на понижение и повышение напряжения показан на рис. 5.2.2, а, б.

Уравнение внешней характеристики:

$$U = E - I_{\beta} \cdot R_{\beta} - 2\Delta \cdot U_{\dot{U}} ,$$

где R_{β} – сопротивление обмотки якоря, компенсационной и добавочных полюсов; $\Delta U_{\dot{U}}$ – падение напряжения в щёточном контакте, $\Delta U_{\dot{U}} = 0,5..2$ В; $\Delta U_{\dot{U}} = I_{\beta} \cdot R_{\beta}$ – внутреннее падение напряжения, а сопротивление R_{β} включает и щеточный контакт $R_{\dot{U}} = 2\Delta U_{\dot{U}} / I_{\beta}$.

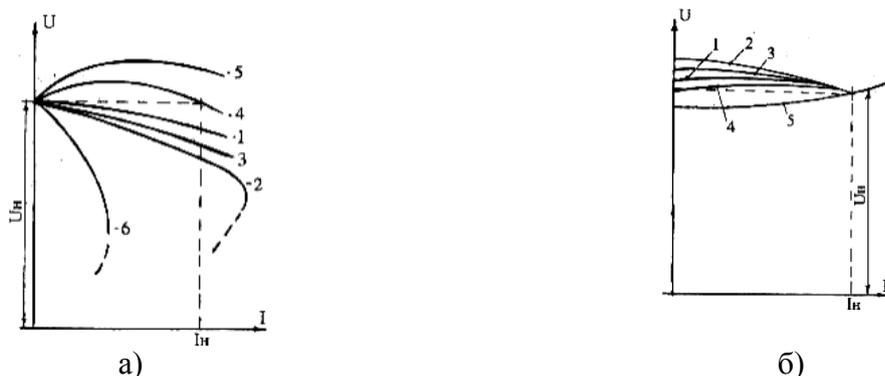


Рис. 5.2.2. Внешние характеристики генератора при различных системах возбуждения: а – на понижение напряжения (увеличение нагрузки); б – на повышение напряжения (сброс нагрузки)

Основная причина изменения (снижения) напряжения под нагрузкой – сопротивления якорной цепи, к этому добавляется размагничивающее действие поперечной реакции якоря. Очевидно, чем больше R_{β} , тем более круто падающей будет внешняя характеристика и больше значения ΔU .

5.2.3. Регулировочные характеристики

Регулировочная характеристика генератора представляет зависимости тока возбуждения от тока нагрузки при постоянном напряжении на зажимах генератора и постоянной скорости вращения:

$$I_{\dot{A}} = a(I_{\beta}) \text{ при } U = const, n = const .$$

Так как при изменении нагрузки напряжение на зажимах генератора изменяется, то для поддержания его постоянным, когда это требуется, регулируют ток возбуждения. Регулировочная характеристика показывает, как нужно регулировать ток возбуждения при изменении тока нагрузки, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным.

Регулировочные характеристики строятся на одном рисунке для всех систем возбуждения генератора.

Примерный вид этих характеристик приведен на рис. 5.2.3.

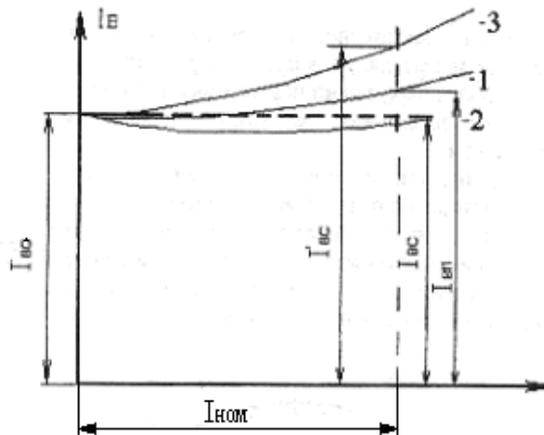


Рис. 5.2.3. Регулировочные характеристики генератора:
 1 – при параллельном и независимом возбуждении; 2 – при смешанном согласном возбуждении; 3 – при смешанном встречном возбуждении

Регулировочные характеристики генераторов независимого и параллельного возбуждения имеют одинаковый вид – с увеличением тока якоря нужно увеличивать ток возбуждения, чтобы компенсировать этим размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения (рис. 5.2.3, кривая 1).

При смешанном возбуждении и согласном включении обмоток для этого требуется меньшее изменение тока возбуждения (кривая 2). При встречном включении обмоток регулировочная характеристика не имеет практического значения.

Тема 5.3. Двигатели постоянного тока. Двигатели параллельного и последовательного возбуждения

Лекция проводится в форме дискуссии

5.3.1. Двигатели постоянного тока

Электродвигатели постоянного тока являются электромеханическими преобразователями электрической энергии постоянного тока в механическую, используются для привода различных механизмов установок и приборов, в современных системах автоматики, вычислительной техники, гибких производственных системах. Одна и та же машина постоянного тока может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, т.е. является обратимой.

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части – статора и вращающейся части – ротора (якоря). Характерной частью машин постоянного тока МПТ является коллектор. Он служит для выпрямления переменной ЭДС, индуцированной во вращающейся обмотке якоря, в режиме генератора и для получения постоянного по направлению электромагнитного момента, когда машина работает двигателем.

5.3.2. Принцип действия ДПТ

Принцип действия ДПТ основан на взаимодействии тока проводников обмотки якоря с магнитным полем возбуждения $B_{\text{нд}}$

$$i_a = \frac{I_{\text{я}}}{2a},$$

где $I_{\text{я}}$ – ток якоря; $2a$ – число параллельных ветвей.

В результате на каждый проводник обмотки якоря действует электромагнитная сила:

$$F_{\text{ЭМ}} = B_{\text{СР}} \cdot l \cdot i_a = B_{\text{СР}} \cdot l \cdot \frac{I_{\text{Я}}}{2a}, \quad (5.3.1)$$

где $B_{\text{СР}}$ – среднее значение индукции на один полюс.

Совокупность всех сил, действующих на проводники обмотки якоря, создает электромагнитный момент M , который приводит якорь двигателя во вращение:

$$M = F_{\text{ЭМ}} \cdot \frac{D}{2} \cdot N = B_{\text{СР}} \cdot l \cdot \frac{I_{\text{Я}}}{2a} \cdot N \cdot \frac{D}{2}, \quad (5.3.2)$$

где D – диаметр якоря; N – число активных проводников обмотки якоря.

Учитывая, что $\pi \cdot D = 2p\tau$ и подставляя в уравнение $D = \frac{2p\tau}{\pi}$, получим

$$M = B_{\text{СР}} \cdot l \cdot \frac{I_{\text{Я}}}{2a} \cdot \frac{2p}{2\pi} \cdot N, \quad (5.3.3)$$

где

$$B_{\text{СР}} \cdot l \cdot \tau = \Phi,$$

где Φ – магнитный поток на один полюс; τ – полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}. \quad (5.3.4)$$

Сделав необходимые преобразования, получим электромагнитный вращающий момент, Н·м:

$$M = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N}{a} \cdot I_{\text{Я}} \cdot \Phi, \quad (5.3.5)$$

или

$$M = C_{\text{М}} \cdot I_{\text{Я}} \cdot \Phi,$$

т.е.

$$C_{\text{М}} = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N}{a}, \quad (5.3.6)$$

где $C_{\text{М}}$ – постоянная машины.

Помимо вращающего (электромагнитного) момента, на вал двигателя действуют тормозные моменты: момент холостого хода M_0 , обусловленный механическими и магнитными потерями; полезный момент M_2 – противодействующий момент, создаваемый механизмом, который приводится в движение данным двигателем. Если двигатель работает в статическом режиме, т.е. с установившейся частотой вращения ($n = \text{const}$), то вращающий момент равен сумме противодействующих моментов:

$$M = M_0 + M_2 = M_{\text{С}}, \quad (5.3.7)$$

где $M_{\text{С}}$ – статический момент сопротивления.

Если двигатель работает в динамическом режиме ($n = \text{var}$), то помимо статического на вал двигателя действует динамический момент M_D :

$$M = M_C \pm M_D, \quad (5.3.8)$$

где $M_D = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ – динамический момент; J – момент инерции.

Динамический момент соответствует изменению кинетической энергии вращающихся масс.

От электрических двигателей других видов двигатели постоянного тока отличаются рядом положительных свойств: большой перегрузочной способностью (она ограничивается только допустимым нагревом машины и условиями ее коммутации), возможностью экономично, плавно и в очень широких пределах (до 1...3000) регулирования скорости и надежностью в работе, а недостатки – относительная высокая стоимость и некоторая сложность в изготовлении, пониженная надежность.

5.3.3. Основные уравнения рабочего процесса и пуска двигателя

Двигатели постоянного тока различаются по способу возбуждения: последовательного, параллельного, смешанного и независимого.

Отношение полезной механической мощности P_2 к потребляемой электрической P_1 , определяет коэффициент полезного действия (КПД) двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}, \quad (5.3.9)$$

где $\sum P$ – полные потери в машине.

У современных двигателей постоянного тока КПД очень высок, достигая у машин большой мощности до 88 %. С уменьшением номинальной мощности КПД двигателей падает до 20...40 % при мощностях порядка 10...25 Вт.

Согласно ГОСТ 183–74 номинальной мощностью двигателя постоянного тока называется полезная механическая мощность на валу (выраженная в Вт, кВт или МВт), которую двигатель может длительно отдавать при номинальном режиме работы.

Полезная механическая мощность на валу двигателя определяет его полезный вращающий момент.

$$M = 9,565 \cdot \frac{P_2}{n}, \quad (5.3.10)$$

где P_2 – полезная мощность на валу, Вт; n – частота вращения двигателя, об/мин; M – вращающий момент, Н·м.

Электромагнитный момент двигателя равен

$$M_{\text{ЭМ}} = C_M \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi, \quad (5.3.11)$$

где $C_M = \frac{pN}{2\pi a}$ – постоянная машины; $I_{\text{я}}$ – ток якоря, А; Φ – результирующий магнитный поток, Вб.

В установившемся режиме приложенное к якору двигателя напряжение равно

$$U = E + I_{\text{я}} \cdot \sum R, \quad (5.3.12)$$

где $\sum R$ – суммарное сопротивление цепи якоря.

Так как $E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot N\Phi = C_e \cdot n \cdot \Phi$, т.е. $C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$ – постоянная машины, то

$$U = C_e \cdot n \cdot \Phi + I_\beta \cdot \sum R, \quad (5.3.13)$$

а ток, потребляемый из сети, равен

$$I_\beta = \frac{U - C_e \cdot n \cdot \Phi}{\sum R}, \quad (5.3.14)$$

Если между двигателем и сетью включено добавочное сопротивление R_d , то напряжение сети

$$U = C_e \cdot n \cdot \Phi + I_\beta \cdot (\sum R + R_d), \quad (5.3.15)$$

и ток, поступающий из сети в двигатель, будет равен

$$I_\beta = \frac{U - E}{\sum R + R_d} = \frac{U - C_e \cdot n \cdot \Phi}{\sum R + R_d}, \quad (5.3.16)$$

Скорость вращения двигателя определяем из (5.3.13) и (5.3.15) при включении через реостат с сопротивлением R_d и без реостата.

При прямом включении в сеть ($U = U_C$):

$$n = \frac{U - I_\beta \cdot \sum R}{C_e \cdot \Phi}, \quad (5.3.17)$$

при включении через реостат с сопротивлением R_d :

$$n = \frac{U - I_\beta \cdot (\sum R + R_d)}{C_e \cdot \Phi}, \quad (5.3.18)$$

Из (5.3.14) при $n = 0$ следует, что пусковой ток двигателя находится в обратной зависимости от сопротивления R_β цепи якоря.

Так как сопротивление R_β у машин постоянного тока средней и большой мощности очень мало, то пусковой ток может достигать значительной величины (до 10...25 $I_{\beta,н}$). Поэтому прямой пуск возможен лишь для двигателей небольшой мощности (до 1 кВт), имеющих относительно большое сопротивление цепи якоря.

Как правило, двигатели постоянного тока пускаются вход с добавочным сопротивлением (пусковой реостат) в цепи якоря (рис. 4.9).

При этом пусковой ток будет меньше, так как в момент пуска $n = 0$ и $C_e n \Phi = 0$ [см. (5.3.16)]:

$$I_{\beta,п.} = \frac{U}{R_\beta + R_\pi}, \quad (5.3.19)$$

где R_π – сопротивление пускового реостата.

Пусковой реостат предназначен лишь для кратковременного включения в цепь (якоря) двигателя на время пуска. Пользоваться этим реостатом в целях регулирования двигателя под нагрузкой не допускается

Для этого, чтобы время пуска было меньше, следует обеспечить возможно больший момент на его валу. Из выражения (5.3.11) видно, что это может быть

достигнуто при наибольшем магнитном потоке Φ машины. Практически это означает, что любой пуск двигателя постоянного тока должен производиться при максимальном токе возбуждения (при минимальном сопротивлении цепи возбуждения). Как правило, обмотка возбуждения включается на полное напряжение сети. Наличие максимального потока, кроме сокращения продолжительности пуска, способствует быстрому спадаю величины пускового тока (5.3.14).

При включенном пусковом реостате и минимальном сопротивлении цепи возбуждения максимальный пусковой ток для двигателей постоянного тока обычно поддерживается в пределах $1,5 \dots 2,0 I_{я.н.}$

В процессе пуска сопротивление пускового реостата ступенями выводится до положения, когда $R_D = 0$ (рис. 5.3.1).

Если в (5.3.17) пренебречь небольшой величиной $I_{я} \cdot \sum R$, то видно, что изменение направления вращения двигателя можно осуществить двумя способами: или изменением полярности питающего напряжения на зажимах якоря, или изменением потока (тока) возбуждения. В этих случаях изменяется направление момента действующего на валу двигателя.

Из выражения (5.3.18) следует три возможных способа регулирования скорости вращения двигателя:

- 1) введением в цепь рабочего тока $I_{я}$, добавочного реостата с сопротивлением R_D – «реостатное регулирование».
- 2) изменением величины магнитного потока Φ (тока возбуждения) – «регулирование полем»;
- 3) изменением величины питающего напряжения (5.3.17) для случая $R_D = 0$ и $U = U_C$.

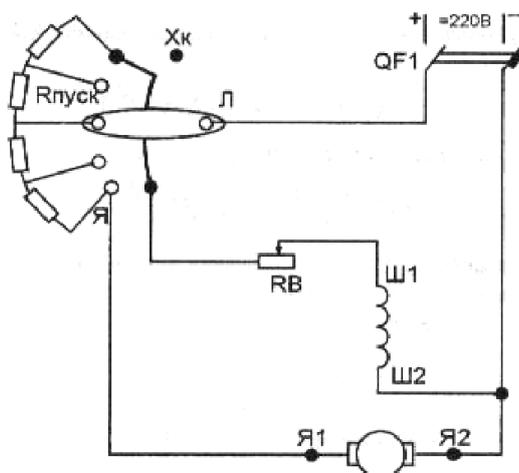


Рис. 5.3.1. Схема пуска двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Рабочие свойства двигателей постоянного тока оцениваются по их электромеханическим или рабочим и регулировочным характеристикам, получаемым расчетным или опытным путем.

5.3.4. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока можно осуществлять путем изменения потока Φ , введения дополнительного сопротивления $R_{доп}$ в цепь якоря и изменения напряжения сети U_C . В двигателях параллельного возбуждения наиболее просто осуществляется регулирование изменением потока, реализуемого с помощью реостата R_p в цепи возбуждения. При увеличении сопротивления поток Φ уменьшается и частота вращения растет. На рис. 5.3.2 представлены механические характеристики двигателя параллельного возбуждения при трех значениях потока.

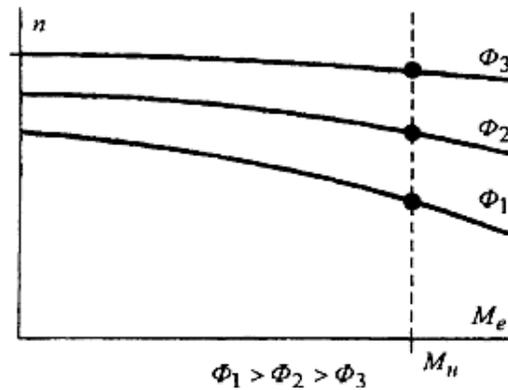


Рис. 5.3.2. Механические характеристики при изменении магнитного потока Φ

Таким способом регулируют частоту вращения в пределах 1...1,5, 1...2. Верхний уровень частот ограничивается условиями коммутации. Кроме того, при глубоком уменьшении потока возбуждения усиливается размагничивающее действие реакции якоря, жесткость механической характеристики растет, и падающая характеристика при номинальном потоке может стать возрастающей при ослабленном потоке, что приведет к нарушению устойчивой работы двигателя.

Регулирование частоты вращения двигателя путем введения в цепь якоря дополнительного сопротивления $R_{доп}$ позволяет изменять частоту вращения вниз от номинальной в широких пределах (рис. 5.3.3).

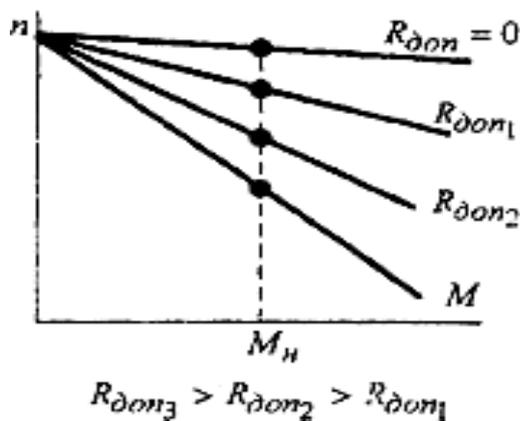


Рис. 5.3.3. Механические характеристики при введении дополнительного сопротивления в цепь якоря

Но этот способ не экономичен. Полезная мощность двигателя при постоянном моменте пропорциональна частоте вращения (без учета потерь в якоря)

$$P_2 \approx M \cdot \frac{2\pi n}{60}, \tag{5.3.20}$$

а потребляемая из сети мощность от частоты вращения не зависит

$$P_1 = U_c \cdot I_\beta = \frac{U_c \cdot M}{C_M \cdot \Phi}, \tag{5.3.21}$$

Поэтому КПД двигателя пропорционален частоте вращения якоря

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2\pi C_M \cdot \Phi}{60 \cdot U_c} n, \tag{5.3.22}$$

Кроме того, при введении дополнительного сопротивления $R_{\text{дон}}$ жесткость механической характеристики двигателя снижается, что может привести к ухудшению работы приводного механизма.

Более совершенным способом регулирования частоты вращения вниз является регулирование путем изменения подводимого к двигателю напряжения. На рис. 5.3.4 представлены механические характеристики двигателя параллельного возбуждения для трех значений напряжений. Жесткость механических характеристик практически не меняется, поэтому таким способом можно регулировать частоту вращения от номинальной до нуля. С развитием силовой полупроводниковой техники этот способ регулирования наиболее перспективен.

Частоту вращения двигателей последовательного возбуждения можно регулировать изменением либо напряжения U , либо магнитного потока обмотки возбуждения. Последовательное включение обмотки возбуждения с обмоткой якоря вызывает также некоторые особенности и в регулировании скорости вращения двигателя. Так как в общем случае скорость вращения двигателей постоянного тока при всех способах возбуждения определяется одним и тем же выражением:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{р}})}{C_e \cdot \Phi}, \quad (5.3.23)$$

где $R_{\text{р}}$ – сопротивление регулировочного реостата, то регулирование скорости вращения их осуществляется одними и теми же способами, а именно: изменением напряжения сети, введением сопротивления в цепь якоря и изменением потока возбуждения.

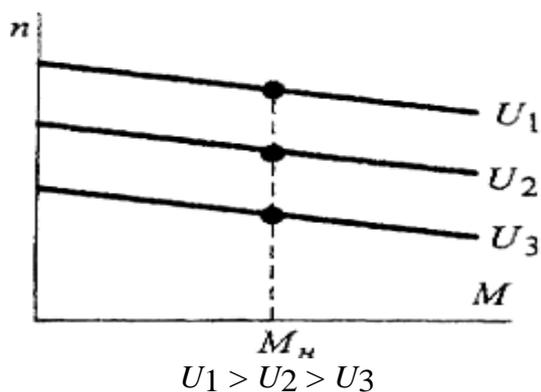


Рис. 5.3.4. Механические характеристики при различных напряжениях

Способ регулирования скорости введением сопротивления в цепь якоря в основном подобен аналогичному способу для двигателя параллельного возбуждения.

Рассмотрим регулирование скорости изменением магнитного потока возбуждения, поскольку в двигателе последовательного возбуждения регулирование скорости по этому способу отличается от аналогичного способа регулирования в двигателе параллельного возбуждения и осуществляется не по нормальной схеме включения, а по схемам шунтирования или обмотки возбуждения или обмотки якоря. Принципиальная схема для регулирования скорости двигателя приведена на рис. 5.3.5.

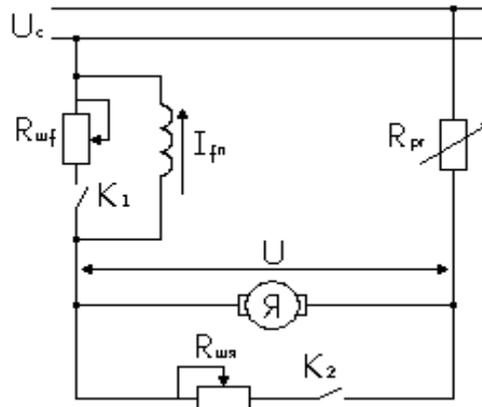


Рис. 5.3.5. Схема двигателя последовательного возбуждения

Если регулирование скорости производится шунтированием обмотки возбуждения, то ключ K_1 замкнут, а ключ K_2 разомкнут и наоборот при шунтировании обмотки якоря ключ K_1 разомкнут, а ключ K_2 замкнут.

Пусть напряжение сети $U = \text{const}$, момент сопротивления, приложенный к валу двигателя $M = \text{const}$, и сопротивление регулировочного реостата в цепи якоря $R_p = 0$.

При шунтировании обмотки возбуждения скорость двигателя, а также ток возбуждения в первый момент не могут измениться соответственно из-за инерции вращающихся масс двигателя и исполнительного механизма и электромагнитной инерции обмотки возбуждения. Поэтому ток якоря возрастет на величину тока в шунтирующем реостате $I'_я = I_я + I_{шф}$. Вследствие этого возрастет вращающий момент двигателя ($M_s = C_M I_я \Phi$) и станет больше момента сопротивления на валу. Под действием положительного избыточного момента скорость вращения двигателя начнет увеличиваться. По мере увеличения скорости ток возбуждения и соответственно поток Φ , а также ток якоря и вращающий момент будут уменьшаться. Новый установившийся режим наступит при $n_2 > n_1$ тогда, когда вращающий момент (если пренебречь изменением потерь холостого хода и обусловленного ими момента M_0) достигнет первоначального значения, причем ток якоря вследствие уменьшения магнитного потока будет иметь значение больше первоначального. Кривые изменения тока якоря, тока возбуждения и скорости вращения показаны на рис. 5.3.6, а.

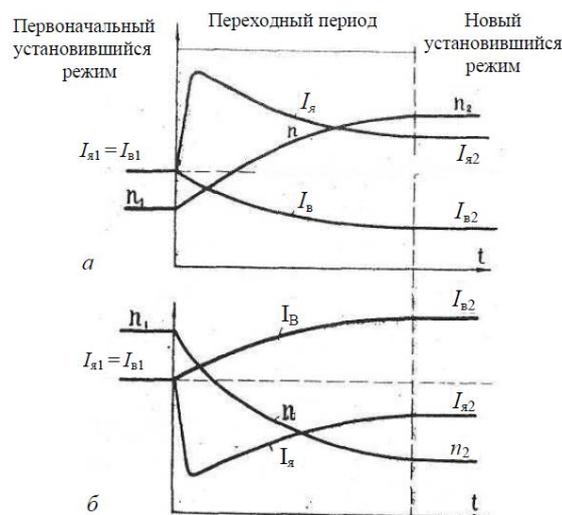


Рис. 5.3.6. Регулирование скорости двигателя последовательного возбуждения шунтированием обмотки возбуждения (а) и обмотки якоря (б)

При шунтировании обмотки возбуждения потребляемая из сети $P_1 = U \cdot I_я$ и полезная мощность

$$P_2 = M \cdot \omega = M \cdot \frac{2\pi n}{60}$$

одновременно возрастают и КПД изменяется незначительно. Способ регулирования экономичен и применяется для регулирования скорости выше номинальной.

При шунтировании обмотки якоря так же как при шунтировании обмотки возбуждения в первый момент скорость двигателя и ток возбуждения не изменятся. Ток якоря уменьшится на величину тока в шунтирующем реостате $I'_я = I_я - I_{шf}$. Вследствие этого вращающий момент двигателя ($M_я = C_M I'_я \Phi$) станет меньше момента сопротивления на валу и скорость вращения начнет уменьшаться. При уменьшении скорости ток возбуждения и соответственно поток Φ , а также ток якоря и вращающий момент будут увеличиваться. Новый установившийся режим наступит при такой скорости вращения $n_2 < n_1$, при которой вращающий момент (если пренебречь изменением потерь холостого хода и обусловленного ими момента M_0) достигнет первоначального значения, причем вследствие увеличения потока ток якоря будет меньше, а ток возбуждения $I_в$ (он же ток, потребляемый двигателем из сети) будет больше первоначального.

При шунтировании обмотки якоря потребляемая из сети мощность $P_1 = U \cdot I_в$ увеличивается, а полезная мощность

$$P_2 = M \cdot \omega = M \cdot \frac{2\pi n}{60}$$

уменьшается пропорционально уменьшению скорости вращения. Коэффициент полезного действия уменьшается быстрее уменьшения скорости вращения из-за больших потерь в шунтирующей обмотке якоря реостате. Способ регулирования неэкономичен и редко применяется на практике.

На рис. 5.3.7 представлены механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при регулировании частоты вращения изменением магнитного потока Φ по схемам шунтирования обмотки возбуждения и шунтирования обмотки якоря. Принципиальная схема для регулирования частоты вращения приведена на рис. 5.3.5

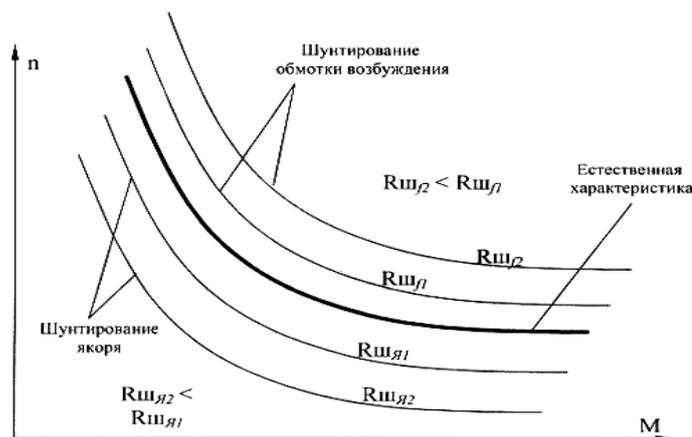


Рис. 5.3.7. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

В первом случае реостат $R_{шf}$ включается параллельно обмотке возбуждения (ключ K_1 замкнут). Уменьшение $R_{шf}$ сопровождается уменьшением тока возбуждения $I_{fn} = I_я - I_{шf}$, а следовательно, ростом частоты вращения.

Во второй схеме реостат $R_{ш.я}$ включается параллельно обмотке якоря (ключ K_2 замыкается, а K_1 разомкнут) и уменьшение $R_{ш.я}$ сопровождается увеличением тока возбуждения $I_{fn} = I_я + I_{ш.я}$, что вызывает снижение частоты вращения.

Однако значительные потери на нагрев реостата $R_{ш.я}$ делают этот способ регулирования частоты вращения неэкономичным, что ограничивает его применение.

Тема 5.4. Реакция якоря машины постоянного тока

При работе машины в режиме холостого хода ток в обмотке якоря практически отсутствует, а поэтому в машине действует лишь МДС обмотки возбуждения $F_{в.о.}$. Магнитное поле машины в этом случае симметрично относительно оси полюсов (рис. 5.4.1, а). График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре представляет собой кривую, близкую к трапеции.

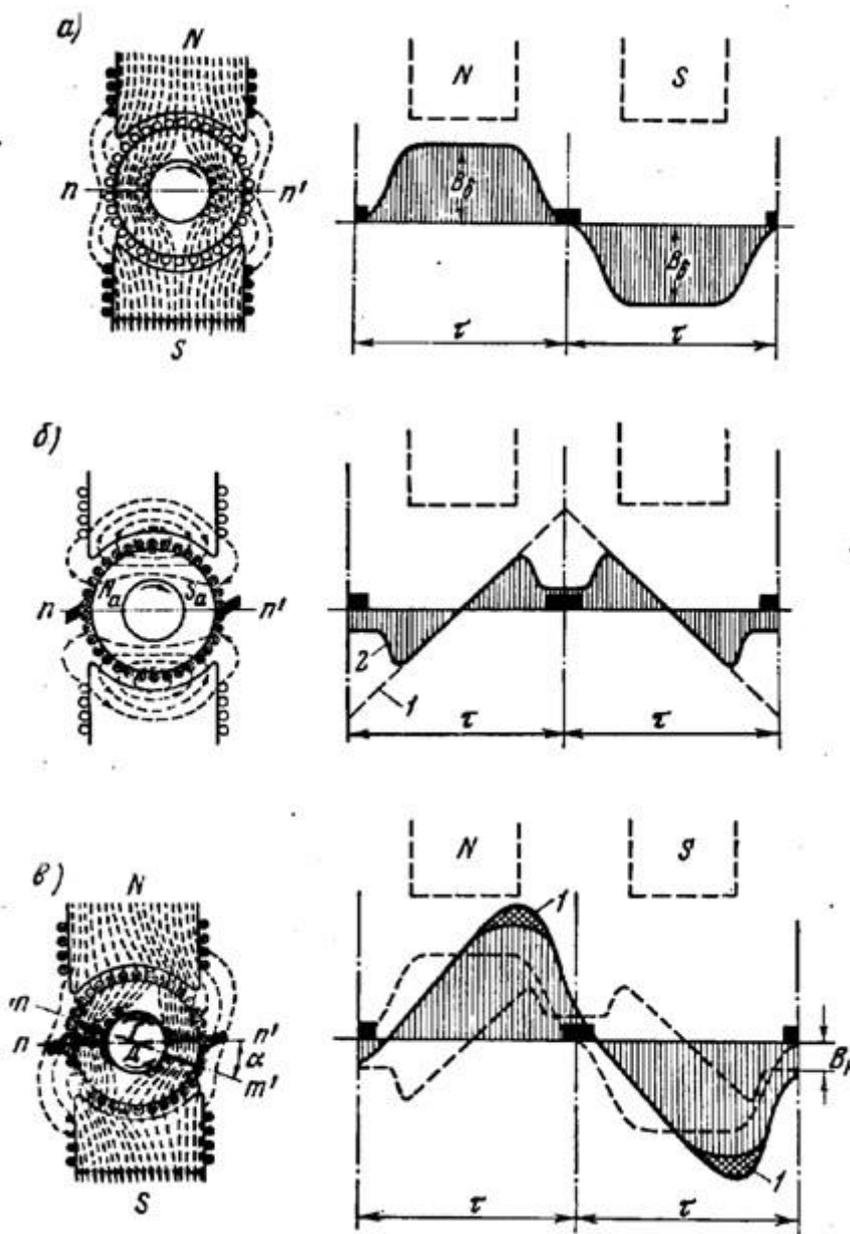


Рис. 5.4.1. Магнитное поле машины и распределение магнитной индукции в воздушном зазоре

Если же машину нагрузить, то в обмотке якоря появится ток, который создаст в магнитной системе машины МДС якоря F_a . Допустим, что МДС возбуждения равна нулю и в машине действует лишь МДС якоря. Тогда магнитное поле, созданное этой МДС будет иметь вид представленный на рис. 5.4.1, б. Из этого рисунка видно, что МДС обмотки якоря направлена по линии щеток (в данном случае по геометрической нейтрали). Несмотря на то, что якорь вращается, пространственное положение МДС

обмотки якоря остается неизменным, так как направление этой МДС определяется положением щеток,

Наибольшее значение МДС якоря – на линии щеток (рис. 5.4.1, б, кривая 1), а по оси полюсов эта МДС равна нулю. Однако распределение магнитной индукции в зазоре от потока якоря совпадает с графиком МДС лишь в пределах полюсных наконечников. В межполюсном пространстве магнитная индукция резко ослабляется (рис. 5.4.1, б, кривая 2). Объясняется это увеличением магнитного сопротивления потоку якоря в межполюсном пространстве. МДС обмотки якоря на пару полюсов пропорциональна числу проводников в обмотке N и току якоря I_a :

$$F_a = N \cdot \frac{I_a}{(4ap)} \quad (5.4.1)$$

Введем понятие *линейной нагрузки* (А/м), представляющей собой суммарный ток якоря, приходящийся на единицу длины его окружности по наружному диаметру якоря D_a :

$$A = N \cdot \frac{i_a}{(\pi \cdot D_a)} \quad (5.4.2)$$

где $i_a = I_a \cdot (2a)$ – ток одного проводника обмотки, А.

Значение линейной нагрузки для машин постоянного тока общего назначения в зависимости от их мощности может быть, $(100 \div 500) \cdot 10^2$ А/м. Воспользовавшись линейной нагрузкой, запишем выражение для МДС якоря: $F_a = A \cdot \tau$. Таким образом, в нагруженной машине постоянного тока действуют две МДС: возбуждения $F_{в0}$ и якоря F_a .

Влияние МДС обмотки якоря на магнитное поле машины называют *реакцией якоря*. Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов.

На рис. 5.4.1, в показано распределение магнитных силовых линий результирующего поля машины, работающей в генераторном режиме при вращении якоря по часовой стрелке. Такое же расправление магнитных линий соответствует работе машины в режиме двигателя, но при вращении якоря против часовой стрелки. Если принять, что магнитная система не насыщена, то реакция якоря будет лишь искажать результирующий магнитный поток, не изменяя его значения: край полюса и находящийся под ним зубцовый слой якоря, где МДС якоря совпадает по направлению с МДС возбуждения, подмагничиваются; другой край полюса и зубцовый слой якоря, где МДС направлена против МДС возбуждения, размагничиваются. При этом результирующий магнитный поток как бы поворачивается относительно оси главных полюсов на некоторый угол, а физическая нейтраль mm' (линия, проходящая через точки на якоре, в которых индукция равна нулю) смещается относительно геометрической нейтрали mn' на угол α . Чем больше нагрузив машины, тем сильнее искажение результирующего поля, а следовательно, тем больше угол смещения физической нейтрали. При работе машины в режиме генератора физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а при работе двигателем – против вращения якоря.

Искажение результирующего поля машины неблагоприятно отражается на ее рабочих свойствах. Во-первых, сдвиг физической нейтрали относительно геометрической приводит к более тяжелым условиям работы щеточного контакта и может послужить причиной усиления искрения на коллекторе. Во-вторых, искажение результирующего поля машины влечет за собой перераспределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины. На рис. 5.4.1, в показан график распределения результирующего поля в зазоре, полученный совмещением кривых, изображенных на рис. 5.4.1, а, б. Из этого графика следует, что магнитная индукция в зазоре машины распределяется несимметрично относительно оси полюсов, резко увеличиваясь под

подмагниченными краями полюсов. Это приводит к тому, что мгновенные значения ЭДС секций обмотки якоря в моменты попадания их пазовых сторон в зоны максимальных значений магнитной индукции (под подмагниченными краями полюсных наконечников) резко повышаются. В результате возрастает напряжение между смежными коллекторными пластинами U_k . При значительных нагрузках машины напряжение U_k может превзойти допустимые пределы и миканитовая прокладка между смежными пластинами будет перекрыта электрической дугой. Имеющиеся на коллекторе частицы графита будут способствовать развитию электрической дуги, что приведет к возникновению мощной электрической дуги, перекрывающей весь коллектор или значительную его часть, – явления чрезвычайно опасного.

Таковы последствия влияния реакции якоря на машину с ненасыщенной магнитной системой. Если же магнитная система машины насыщена, что имеет место у большинства электрических машин, то подмагничивание одного края полюсного наконечника, и находящегося под ним зубцового слоя якоря происходит в меньшей степени, чем размагничивание другого края и находящегося под ним зубцового слоя.

Это благоприятно сказывается на распределении магнитной индукции в зазоре, которое становится более равномерным, так как максимальное значение индукции под подмагничиваемым краем полюсного наконечника уменьшается на величину, определяемую высотой участка I на рис. 5.4.1, в. Однако результирующий магнитный поток машины при этом уменьшается. Таким образом, реакция якоря в машине с насыщенной магнитной системой размагничивает машину (так же как и у синхронной машины при активной нагрузке). В результате ухудшаются рабочие свойства машины: у генераторов снижается ЭДС, у двигателей уменьшается вращающий момент.

Влияние реакции якоря на работу машины усиливается при смещении щеток с геометрической нейтральной. Объясняется это тем, что вместе со щетками смещается и вектор МДС якоря (рис. 5.4.2, а). При этом МДС якоря F_a помимо поперечной составляющей $F_{aq} = F_a \cdot \cos\beta$ приобретает и продольную составляющую $F_{ad} = F_a \cdot \sin\beta$, направленную по оси полюсов. Если машина работает в генераторном режиме, то при смещении щеток в направлении вращения якоря продольная составляющая МДС якоря действует встречно МДС обмотки возбуждения $F_{в0}$, что ослабляет основной магнитный поток машины; при смещении щеток против вращения якоря продольная составляющая МДС якоря F_{ad} действует согласованно с МДС $F_{в0}$, что вызывает некоторое подмагничивание машины и может явиться причиной искрения на коллекторе. Если машина работает в двигательном режиме, то при смещении щеток по направлению вращения якоря продольная составляющая МДС якоря F_{ad} подмагничивает машину, а при смещении щеток против вращения якоря продольная составляющая F_{ad} размагничивает машину. При дальнейшем рассмотрении вопросов, связанных с действием продольной составляющей МДС якоря, будем иметь в виду лишь ее размагничивающее действие, так как подмагничивающее действие F_{ad} в машинах постоянного тока общего назначения недопустимо из-за нарушения работы щеточного контакта.

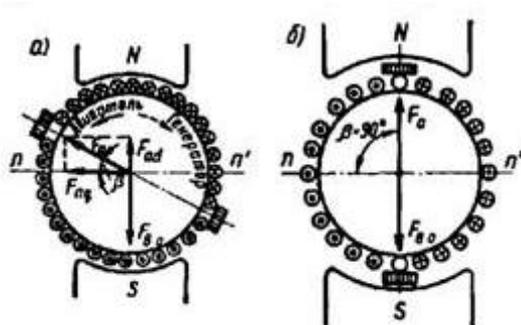


Рис. 5.4.2. Разложение МДС обмотки якоря на продольную и поперечную составляющие

Следует обратить внимание на то, что смещение щеток с геометрической нейтрали влияет и на поперечную составляющую МДС якоря – величину, зависящую от угла β , с ростом которого она уменьшается ($F_{aq} = F_a \cdot \cos\beta$). Таким образом, в коллекторных машинах возможны два случая: 1) щетки установлены на геометрической нейтрали и реакция якоря является только поперечной; 2) щетки смещены с геометрической нейтрали и реакция якоря имеет две составляющие – поперечную и продольную (размагничивающую). Принципиально также возможен случай, когда реакция якоря по поперечной оси отсутствует. Это имеет место, когда щетки расположены по оси, перпендикулярной геометрической нейтрали, т.е. когда $\beta = 90^\circ$ (рис. 5.4.2, б). Однако такой случай не имеет практического применения, так как машина становится неработоспособной: в генераторном режиме ЭДС машины равна нулю, так как в параллельную ветвь обмотки входит равное число секций со встречным направлением ЭДС, а в двигательном режиме электромагнитные силы активных сторон обмотки якоря, действующие слева и справа от оси щеток, равны и противоположно направлены, а поэтому вращающего момента не создают.

4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем Лабораторных работ</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивно й, активной, инновационно й формах, (час.)</i>
1	2.	Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора	4	-
2	2.	Определение групп соединений и параллельная работа трехфазных трансформаторов	6	-
3	3.	Исследование асинхронного двигателя с фазным ротором	4	
4	3.	Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	4	-
5	4.	Исследование трехфазного синхронного генератора методом непосредственной симметричной нагрузки	10	Дискуссия (5 часов)-
6	4.	Параллельная работа трехфазного синхронного генератора с сетью	8	-
7	5.	Исследование генератора постоянного тока при различных схемах возбуждения	10	-
8	5.	Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения	6	-
ИТОГО			52	5

4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем практических занятий</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивно й, активной, инновационно й формах, (час.)</i>
1	4.	Решение типовой задачи по разделу «Трансформаторы»	13	-
2	4.	Решение типовой задачи по разделу «Асинхронные двигатели»	13	-
3	5.	Решение типовой задачи по разделу «Синхронные машины»	14	-
4	5.	Решение типовой задачи по разделу «Машины постоянного тока»	13	-
ИТОГО			53	-

4.5. Контрольные мероприятия: контрольная работа

Цель: расчет и конструирование силового трансформатора.

Для выполнения курсовой работы студенту выдается индивидуальное задание, согласно которому требуется рассчитать магнитную систему трансформатора, произвести выбор типа обмоток. В задании дан тип, рассчитываемого трансформатора и его паспортные данные.

Расчет силового трансформатора и изложение материала в контрольной работе следует выполнять в следующей последовательности:

Введение

1 Предварительный расчет трансформатора обобщенным методом

1.1 Определение основных электрических величин

1.2 Определение основных размеров трансформатора

1.2.1 Расчет размеров трансформатора

2 Расчет обмоток трансформатора

2.1 Предварительный расчет обмоток

2.2 Расчет обмотки низкого напряжения

2.3 Расчет обмотки высокого напряжения

2.4 Расчет регулировочной обмотки

3 Расчёт потерь и КПД трансформатора

3.1 Основные потери в трансформаторе

3.2 Коэффициент добавочных потерь

3.3 Потери в отводах

3.4 Потери короткого замыкания

3.5 Плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности

4 Расчёт напряжения короткого замыкания и поля рассеяния

4.1 Параметры схемы замещения

4.2 Активная составляющая $U_{кз}$

4.3 Реактивная составляющая $U_{кз}$

4.4 Расчетное напряжение короткого замыкания

5 Расчет магнитной цепи

5.1 Выбор площади поперечного сечения

5.2 Активное сечение стержня

5.3 Активное сечение ярма

5.4 Индукция в стержне

5.5 Индукция в ярме

- 5.6 Масса стали в стержнях
- 5.7 Масса стали в яре
- 5.8 Потери холостого хода
- 5.9 Ток холостого хода
- 5.10 Параметры схемы замещения при холостом ходе
- 5.11 Расчёт характеристик холостого хода
- 5.12 Расчет потер холостого хода
- 6 Выводы

Рекомендуемый объем: контрольной работы выполняется на листах формата А4, объём 10-15 печатных страниц.

Выдача задания, прием КР и защита КР проводится в соответствии с календарным учебным графиком.

Оценка	Критерии оценки контрольной работы
зачтено	Выполнены все требования к раскрытию вопроса контрольной работы: обозначена проблема и обоснована её актуальность, сделан краткий анализ различных точек зрения на рассматриваемую проблему и логично изложена собственная позиция, сформулированы выводы, тема раскрыта полностью.
не зачтено	Вопрос контрольной работы по изучаемой дисциплине не раскрыт, обнаруживается существенное непонимание теоретических основ изучаемой дисциплины.

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>			<i>Σ комп.</i>	<i>t_{ср}, час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
			<i>ОПК</i>	<i>ПК</i>					
			<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1. Электрические машины		2,5	+	-	-	1	2,5	Лк, СР	экзамен
2. Трансформаторы		49,5	+	-	-	1	49,5	Лк, ЛР, ПЗ, СР, К	К, экзамен
3. Асинхронные машины		56	-	+	-	1	56	Лк, ЛР, ПЗ, СР	Экзамен
4. Синхронные машины		73	-	+	-	1	72	Лк, ЛР, ПЗ, СР	Зачет
5. Машины постоянного тока		71	-	-	+	1	72	Лк, ЛР, ПЗ, СР	зачет
<i>всего часов</i>		252	52	129	71	3	63		

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с. (стр. 13-82, 144-227)
2. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с. (стр. 4-20, 123-161)

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	<i>Наименование издания</i>	<i>Вид занятия (Лк, ПЗ, ЛР, К)</i>	<i>Количество экземпляров в библиотеке, шт.</i>	<i>Обеспеченность, (экз./ чел.)</i>
1	2	3	4	5
Основная литература				
1.	Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Санкт-Петербург: Питер, 2008. - 350 с.	Лк, ЛР, ПЗ	149	1,0
2.	Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.	Лк, ЛР, ПЗ	148	1,0
3.	Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.	Лк, ЛР, ПЗ, К	98	1,0
4.	Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с.	Лк, ЛР, К	183	1,0
Дополнительная литература				
5.	Сыровешкин, А. М. Электрические машины. Трансформаторы. Расчет и конструирование трансформаторов: учебное пособие / А. М. Сыровешкин. - Братск: БрГТУ, 2003. - 149 с.	К	64	1,0
6.	Хвостов, В. С. Электрические машины. Машины постоянного тока: учебник для вузов / В. С. Хвостов; Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1988. - 335 с. - Б. ц.	Лк, ЛР, ПЗ	222	1,0
7.	Радин, В. И. Электрические машины: Асинхронные машины: [Учебник для вузов] / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович. - М.: Высшая школа, 1988. - 327 с.: ил.	ЛР, ПЗ	209	1,0
8.	Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.	ЛР, ПЗ	200	1,0
9.	Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М.	ЛР, ПЗ	28	1,0

	Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1973 - Ч.2. Машины переменного тока. - 648 с.: ил. - Б. ц.			
10.	Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1972 - Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы - 543 с.: ил. - Б. ц.	ЛР, ПЗ	26	1,0
11.	Осин, И. Л. Электрические машины. Синхронные машины: учебное пособие / Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1990. - 303 с.: ил.	ЛР, ПЗ	101	1,0

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ
http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.
2. Электронная библиотека БрГУ
<http://ecat.brstu.ru/catalog> .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
<http://biblioclub.ru> .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
<http://e.lanbook.com> .
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"
<http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)
<https://uisrussia.msu.ru/> .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ
<http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/> .

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучение обучающимися учебной дисциплины «Электрические машины» рассчитано на два семестра.

Занятия лекционного типа

В ходе лекций преподаватель излагает и разъясняет основные, наиболее сложные понятия темы, а также связанные с ней теоретические и практические проблемы, дает рекомендации на выполнение самостоятельной работы. В ходе лекций обучающимся рекомендуется:

- вести конспектирование учебного материала;
- обращать внимание на категории, формулировки, раскрывающие содержание тех или иных явлений и процессов, научные выводы и практические рекомендации по их применению;

- задавать преподавателю уточняющие вопросы с целью уяснения теоретических положений, разрешения спорных ситуаций.

В рабочих конспектах желательно оставлять поля, на которых во внеаудиторное время можно сделать пометки из учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся, дополняющего материал прослушанной лекции, а также пометки, подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений. Для успешного овладения курсом необходимо посещать все лекции, так как тематически отдельные темы курса взаимосвязаны между собой. В случаях пропуска занятия обучающемуся необходимо самостоятельно изучить материал и ответить на контрольные вопросы по пропущенной теме во время индивидуальных консультаций.

Лабораторные занятия

При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать все указания преподавателя или учебно-вспомогательного персонала. Перед работой необходимо ознакомиться с методическими указаниями, оформить необходимые таблицы в тетради. После всех произведенных расчетов и выполненных графиков необходимо оформить отчет.

Практические занятия

При подготовке к практическим занятиям обучающемуся необходимо изучить основную литературу, ознакомиться с дополнительной литературой, подготовить конспект по методической литературе с учетом рекомендаций преподавателя. На практическом занятии главное - уяснить связь решаемых задач с теоретическими положениями. При решении предложенной задачи нужно стремиться не только получить правильный ответ, но и усвоить общий метод решения подобных задач. Рекомендуется использовать следующий порядок записи решения задачи:

- исходные данные для решения задачи;
- что требуется получить в результате решения;
- какие законы и положения должны быть применены;
- общий план (последовательность) решения;
- расчеты;
- полученный результат и его анализ.

Логическая связь лекций и практических занятий заключается в том, что информация, полученная на лекции, в процессе самостоятельной работы на практическом занятии осмысливается и перерабатывается, при помощи преподавателя анализируется до мельчайших подробностей, после чего прочно усваивается.

Самостоятельная работа. Подготовка к занятиям лекционного и семинарского типа

Важной частью самостоятельной работы является умение выделить основополагающие, отправные точки в понимании материала. Особо важную роль в этом процессе необходимо уделить конспекту лекций, в котором преподаватель сформировал «скелет», структуру

раздела дисциплины. Читением учебной и научной литературы обучающийся углубляет и расширяет знания о предмете изучения. Основная функция учебников – ориентировать студента в системе знаний, умений и навыков, которые должны быть усвоены будущими специалистами по данной дисциплине. Подготовка к занятиям лекционного типа подразумевает приобретение обучающимся первичных знаний по теме лекции для подготовки к структуризации объекта изучения, которую преподаватель выполняет на лекции. Изучение материала по теме лекции имеет цель уточнения отдельных моментов. Перед практическим занятием следует изучить конспект лекции и рекомендованную преподавателем литературу, обращая внимание на практическое применение теории и на методику решения типовых задач. Перед лабораторной работой обучающийся подготавливает заготовку отчета, выполняя конспект теоретического материала по методической литературе с учетом рекомендаций преподавателя.

Самостоятельная работа. Выполнение курсовой работы

Курсовая работа представляет собой изложение в письменном виде результатов теоретического анализа и практической работы студента по определенной теме. Преследуется цель, как углубленного усвоения пройденного теоретического материала, так и развития у обучающихся некоторых практических навыков творческого применения основных положений курса к решению практических задач. В процессе выполнения работы обучающийся приобретает навыки в области взаимозаменяемости деталей машин. Прорабатываются темы связанные с выбором и расчетом посадок для различных соединений нормированием точности, расчетом размерных цепей. Обучающимся задаётся календарный график выполнения контрольной работы. По представлению законченной работы преподавателю и после её проверки, студент должен защитить свою работу, ответив на вопросы по отдельным этапам. Итоговая оценка выводится исходя из условий соблюдения графика выполнения этапов контрольной работы, обеспечения, правильности расчётов и оформления отчетной документации, умения вести диалог и отвечать на вопросы преподавателя по существу решаемых задач, определяющих значимость взаимозаменяемости как теоретической и прикладной науки.

Самостоятельная работа. Подготовка к экзамену, зачету

Подготовка к экзамену/зачету предполагает:

- изучение основной и дополнительной литературы;
- изучение конспектов лекций;
- изучение конспектов практических занятий и отчетов по ним;

Перечень вопросов к экзамену/зачету представлен в приложении 1 п. 2. Баллы за экзамен выставляются по критериям, представленным в приложении 1 п. 3.

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ /практических работ

Лабораторная работа № 1

Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора

Цель работы: ознакомиться с устройством, принципом действия, характеристиками силового трансформатора и методами экспериментального определения параметров схемы замещения.

Краткие теоретические сведения.

Опыт холостого хода.

Опыт холостого хода проводится с целью определения тока и потерь холостого хода. В опыте холостого хода определяют коэффициент трансформации и по данным опыта находят параметры контура ветви намагничивания схемы замещения.

Коэффициентом трансформации называется отношение ЭДС, наводимых в первичных и вторичных обмотках трансформатора основным магнитным потоком:

$$K_{12} = \frac{E_{\text{вн}}}{E_{\text{нн}}} = \frac{W_1}{W_2}.$$

Практически ГОСТ 11920–85 определяет коэффициент трансформации как отношение фазных напряжений на зажимах двух обмоток в опыте холостого хода:

$$K_{12} = \frac{U_{\text{вн фазн}}}{U_{\text{нн фазн}}}.$$

Током холостого хода называется ток первичной обмотки трансформатора, возникающий в режиме холостого хода при номинальном напряжении на его зажимах. Потери, возникающие в трансформаторе при этом токе, называются потерями холостого хода. На рис. 1.1 приведены характеристики холостого хода трансформатора ТСЗИ-2,5/0,4. Характер кривой тока I_0 определяется изменением его реактивной составляющей I_{0p} , создающей основной магнитный поток в трансформаторе. Активная составляющая тока I_{0A} в режиме холостого хода невелика. При напряжении, значительно меньшем по сравнению с номинальным, магнитная система не насыщена ($\Phi \equiv U$) и зависимость тока от напряжения прямолинейна.

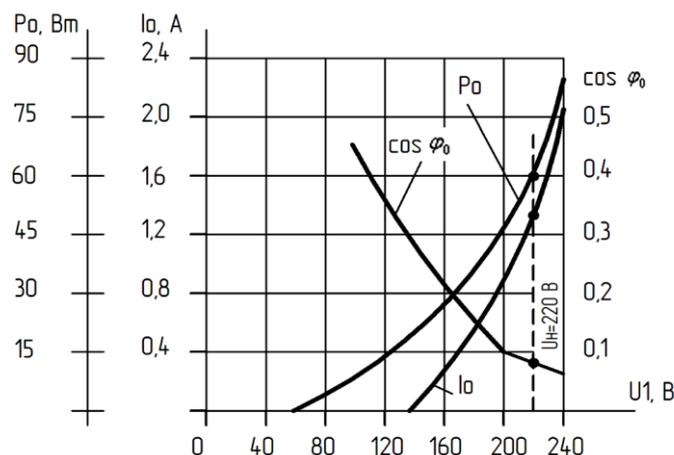


Рис. 1.1. Характеристики холостого хода трансформатора ТСЗИ-2,5/0,4

По мере насыщения магнитной системы магнитная проводимость падает, реактивная составляющая тока холостого хода I_{0p} растет быстрее повышения напряжения и кривая $I_0 = f(U_1)$ отгибается к оси ординат.

Мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме холостого хода, идет в основном на компенсацию потерь в стали (потери на гистерезис и вихревые токи), так как потери в меди при этом ничтожно малы ($I_0 = 2 \div 10\% I_n$). Потери в стали пропорциональны квадрату индукции и частоте в степени $1/3$.

В режиме холостого хода частота остается постоянной, индукция же в магнитопроводе изменяется пропорционально подводимому напряжению, поэтому потери в стали практически пропорциональны квадрату подводимого напряжения, следовательно, характеристика $P_0 = f(U_1)$ представляет собой параболу ($P_0 = B^2 = \Phi^2 = U_1^2$).

Характер кривой $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ объясняется соотношениями

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{3U_1 I_0} \equiv \frac{U_1}{I_0}.$$

При малом насыщении магнитной системы $I_0 \equiv U_1$ по мере ее насыщения ток I_0 резко возрастает за счет увеличения реактивной составляющей и $\cos\varphi_0$ уменьшается.

На рис. 1.2 показана однофазная схема замещения трансформатора для режима холостого хода. Согласно этой схеме по данным опыта определяют параметры холостого хода:

$$Z_0 = Z_1 + Z_m = \frac{U_{1\Phi}}{I_{0\Phi}};$$

$$R_0 = R_1 + R_m = \frac{P_0}{3I_{0\Phi}^2};$$

$$X_0 = X_1 + X_m = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2},$$

где $U_{1\Phi}$, $I_{1\Phi}$ – фазные значения.

Поскольку ток холостого хода мал, то можно, не сделав ошибки, пренебречь потерями в меди и считать, что все измеренные потери являются магнитными.

Падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния в первичной обмотке $I_0 X_1$ мало по сравнению с $I_0 X_m$, и им можно пренебречь. На основании сказанного можно считать:

$$R_0 \approx R_m; X_0 \approx X_m; Z_0 \approx Z_m.$$

Вследствие нелинейной зависимости между напряжением и током при холостом ходе I_0 значения Z_0 , R_0 , X_0 не являются постоянными для данного трансформатора и изменяются с изменением напряжения U_1 . В практике принято рассчитывать эти величины для номинального значения напряжения трансформатора U_n .

Коэффициент мощности при холостом ходе можно подсчитать по формуле

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{m U_{\Phi} I_{0\Phi}}.$$

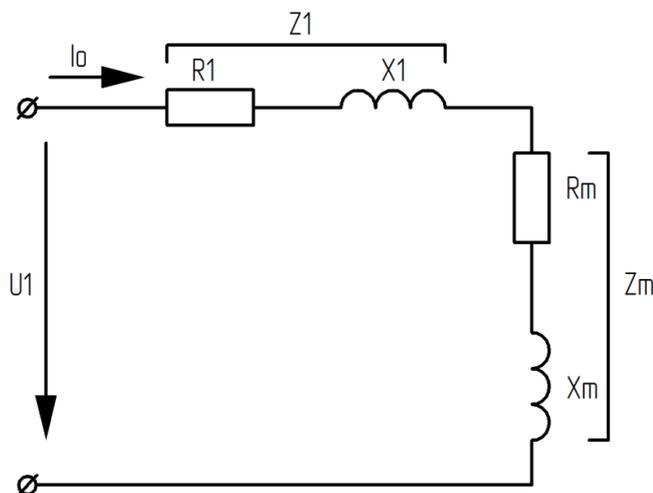


Рис. 1.2. Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

По опытным данным могут быть также определены активная и реактивная составляющие тока холостого хода:

$$I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0 ; I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0 .$$

Соответственно в процентном содержании

$$I_{0a} \% = \frac{I_{0a}}{I_H} \cdot 100 \% ;$$

$$I_{0p} \% = \frac{I_{0p}}{I_H} \cdot 100 \% .$$

Опыт короткого замыкания.

Опыт короткого замыкания проводится с целью определения напряжения и потерь короткого замыкания трансформатора. По данным опыта находят параметры схемы замещения (активные сопротивления и индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток).

Согласно ГОСТ напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется напряжение, которое надо подвести к одной из обмоток при замкнутой накоротко второй обмотке, чтобы в них установились номинальные токи.

Обычно значение напряжения короткого замыкания U_k выражается в процентах от номинального напряжения той обмотки, со стороны которой проводились измерения в опыте:

$$U_k \% = \frac{U_{кф}}{U_{нф}} \cdot 100 \% = \frac{I_{нф} Z_k}{U_{нф}} \cdot 100 \% .$$

Процентное значение номинального напряжения короткого замыкания для трансформаторов общего назначения лежит в пределах 5–10 % и указывается на шитке трансформатора. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания также выражаются в процентах от номинального напряжения:

$$U_{ка} \% = \frac{I_{нф} R_k}{U_{нф}} \cdot 100 \% ;$$

$$U_{кр} \% = \frac{I_{нф} X_k}{U_{нф}} \cdot 100 \% .$$

Характеристики короткого замыкания трансформатора ТСЗИ-2,5/0,4 показаны на рис. 1.3. При весьма слабом магнитном насыщении трансформатора, что имеет место при опыте короткого замыкания, зависимость $I_k = f(U_k)$ и $\cos \varphi_k = f(U_k)$ в пределах от нуля до номинального значения тока прямолинейны. Значение $\cos \varphi_k$ определяют по формуле

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{m U_{фк} I_{фк}} = \frac{R_k}{Z_k} .$$

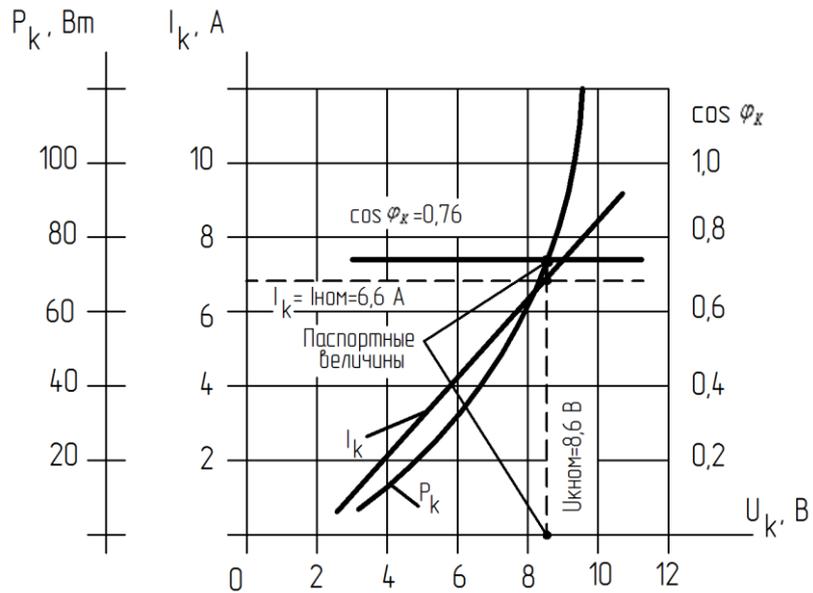


Рис. 1.3. Характеристики короткого замыкания трансформатора ТСЗИ-2,5/0,4

Потери в трансформаторе в опыте короткого замыкания состоят из электрических потерь в обмотках и магнитных потерь в стальном сердечнике. Поскольку опыт проводится при пониженном напряжении, потери в стали малы и ими можно пренебречь. Мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, с достаточной точностью может быть принята равной сумме электрических потерь обмоток:

$$P_k = P_{m1} + P_{m2} = 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2 = 3I_1^2 (R_1 + R_2') = 3I_k R_k.$$

Однофазная схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания показана на рис. 1.4, а. Так как $Z_1 \approx Z_2' \ll Z_m$, то схема, представленная на рис. 4, а, может быть заменена другой схемой (рис. 1.4, б).

Параметры этой схемы подсчитываются по формулам

$$Z_1 + Z_2 = Z_k = \frac{U_{кф}}{I_{кф}};$$

$$R_1 + R_2 = R_k = \frac{P_k}{3I_{кф}^2};$$

$$X_1 + X_2' = X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Определенное из опыта значение активного сопротивления приводят к $t = 75^\circ \text{C}$, которая считается средней температурой обмоток в эксплуатации и называется номинальной рабочей температурой обмоток:

$$r_{к75} = R_k [1 + \alpha(75^\circ - \Theta_1)],$$

где $\alpha = 0,004$ – температурный коэффициент сопротивления обмоток; Θ_1 – температура обмоток в момент проведения опыта, $^\circ \text{C}$.

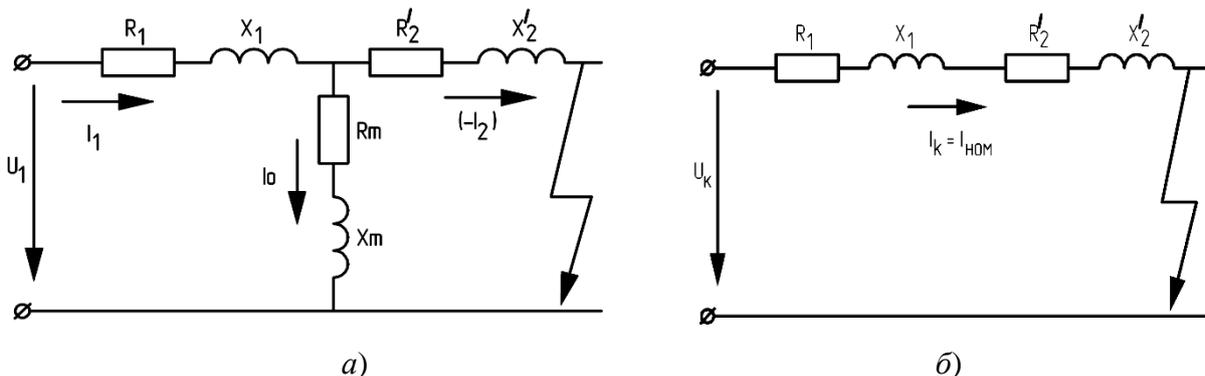


Рис. 1.4. Схема замещения для режима короткого замыкания

Внешние характеристики трансформатора.

Внешняя характеристика трансформатора представляет собой зависимость вторичного напряжения от вторичного тока при постоянном напряжении U_1 и постоянном коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi_2$. Примерный вид внешних характеристик показан на рис. 1.5. Напряжение на зажимах трансформатора из-за наличия в его обмотках активных (R_1, R_2) и индуктивных (X_1, X_2) сопротивлений при изменении величины нагрузки изменяется. Вызываемое наличием нагрузки изменение вторичного напряжения характеризуется процентным изменением вторичного напряжения, под которым понимается

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%,$$

где U_{20} – вторичное напряжение трансформатора при холостом ходе; U_2 – вторичное напряжение трансформатора при нагрузке.

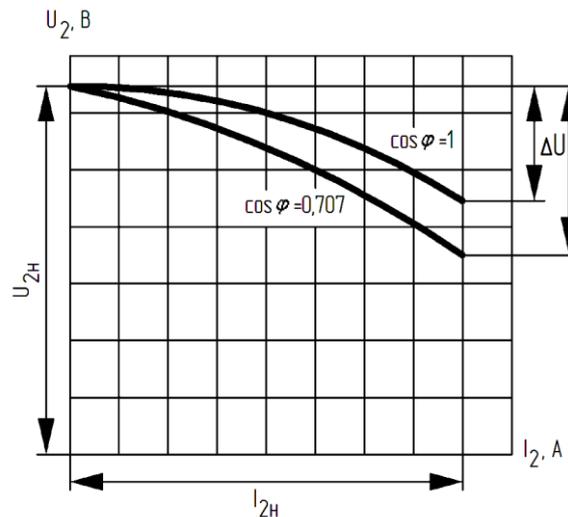


Рис. 1.5. Внешние характеристики трансформатора при различном характере нагрузки

Для более точного определения ΔU следует рассчитывать по формуле

$$\Delta u\% = \beta(u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2(u_{кр} \cos \varphi_2 - u_{ка} \sin \varphi_2)^2}{200},$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_H}$ – коэффициент нагрузки трансформатора; $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности вторичной цепи.

Обычно ΔU при номинальной нагрузке составляет 4–5%.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки

$$U_2 = U_{2н} \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right).$$

Коэффициент полезного действия трансформатора.

В соответствии с законом сохранения энергии потребляемая трансформатором мощность P_1 больше мощности P_2 , отданной им в нагрузку, так как при работе трансформатора, как и любого преобразователя энергии, неизбежно происходит потеря преобразуемой им электрической энергии.

При работе трансформатора на какую-либо нагрузку из питающей сети, помимо полезной мощности P_2 , потребляется мощность, идущая на покрытие потерь в стали магнитопровода и в проводниках обмотки (потери короткого замыкания) P_k . При постоянном приложенном напряжении потери в стали постоянны, не зависят от нагрузки и равны потерям холостого хода, то есть $P_{ст} = P_0$.

КПД трансформатора представляет собой отношение полезной мощности, отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности, потребляемой им из первичной сети, то есть

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ или } \eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% .$$

Так как КПД силового трансформатора весьма высок (в трансформаторах большой мощности выше 90 %), то метод прямого определения его путем измерения мощности P_1 и P_2 может дать грубую ошибку из-за неизбежных погрешностей при получении результата. Поэтому определять КПД таким образом недопустимо.

В целях получения более точного значения КПД и возможности сравнения этих значений для различных трансформаторов КПД следует рассчитать по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k} ,$$

где P_k – потери в обмотках при номинальном токе (зависят от тока нагрузки и являются потерями переменными), определяются из опыта короткого замыкания; S_n – номинальная мощность трансформатора, кВА или ВА.

КПД трансформатора имеет максимальное значение при равенстве постоянных и переменных потерь:

$$P_0 = \beta^2 P_k .$$

Относительное значение тока нагрузки

$$\beta = \sqrt{\frac{P_{0н}}{P_{кн}}} .$$

Порядок выполнения:

1. Определить коэффициент трансформации фазных напряжений.
2. Провести опыт холостого хода. По данным опыта построить характеристики холостого хода:

$$I_0 = f(U_1); P_0 = f(U_1); \cos \varphi_0 = f(U_1) .$$

3. Провести опыт короткого замыкания. По данным опыта построить характеристики короткого замыкания:

$$I_k = f(U_k); P_k = f(U_k); \cos \varphi_k = f(U_k) .$$

4. Снять и построить внешние характеристики при $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,707$:

$$I_1; P_1; \cos \varphi_1; U_2; I_2; \eta = f(P_2) .$$

Определить процентное изменение ΔU % .

5. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания рассчитать параметры схемы замещения трансформатора.

6. Рассчитать процентное значение напряжения короткого замыкания $U_{к\%}$ и его активную $U_{ка\%}$ и реактивную $U_{кр\%}$ составляющие, процентное изменение напряжения ΔU % и коэффициент полезного действия.

7. Построить векторную диаграмму трансформатора для случая активно-индуктивной нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,707$.

Экспериментальная установка.

Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора проводится на универсальном лабораторном стенде (УЛС), состоящем из силового оборудования и пульта управления (рис. 1.6). Силовое оборудование – трансформатор ТС-2,5/0,4 – установлено в лабораторном стенде. Номинальное фазное напряжение обмоток высшего напряжения 220 В, а обмоток низшего напряжения – 133 В. Начала и концы обмоток испытуемых трансформаторов A, B, C, X, Y, Z и a, b, c, x, y, z выведены на наборное поле УЛС. Номинальные данные трансформаторов указаны на табличке, укрепленной на лицевой панели стенда.

Измерение токов, напряжений, мощностей в ходе проведения эксперимента выполняется с помощью приборов, расположенных на панелях стенда, а также измерительного комплекта К-505 или К-51. Для питания различных схем на УЛС установлен автомат питания QF2, а регулирование напряжения, подводимого на обмотки трансформатора, осуществляется регулятором напряжения типа РНТ-220/12 или индукционным регулятором (ИР).

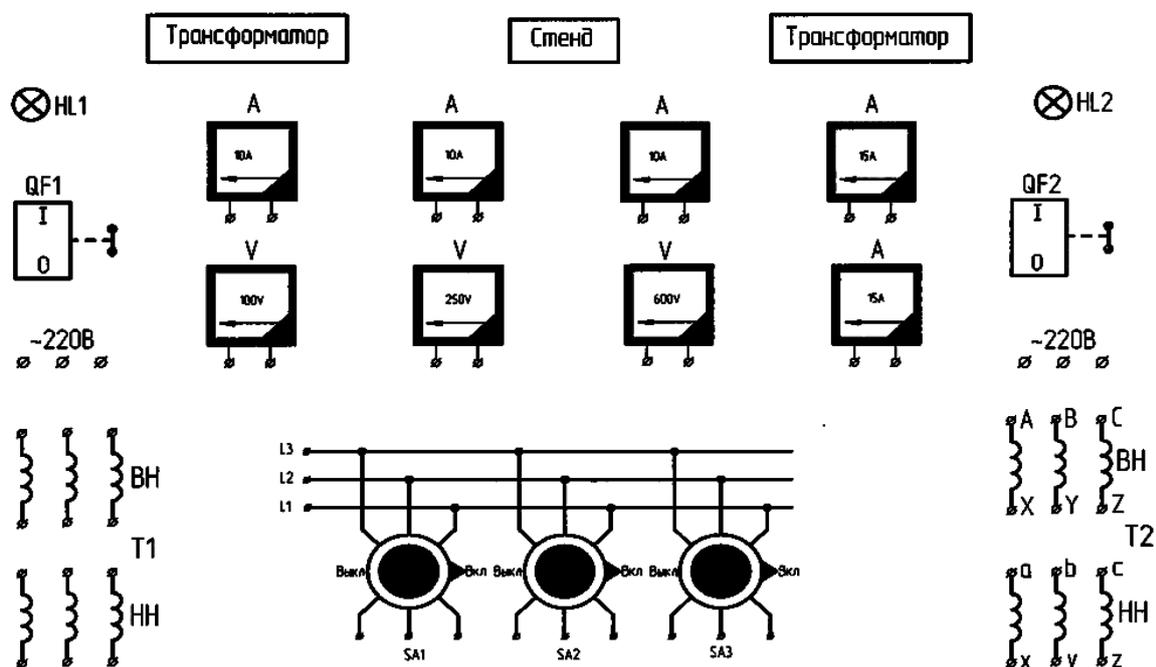


Рис. 1.6. Стенд для испытания трехфазного двухобмоточного трансформатора типа ТСЗН-2.5/0.4

Для нагрузки трансформатора используются трехфазные активные и индуктивные сопротивления.

Полное снятие напряжения со стенда обеспечивают выключением автомата АП-50, расположенного против стенда на стене.

Объектом исследования является трехфазный двухобмоточный трансформатор стержневого типа с воздушным охлаждением.

Для плавного регулирования напряжения применяется трехфазный индукционный регулятор напряжения (ИР). Активной нагрузкой трансформатора служат реостаты (R_1, R_2, R_3), реактивной – индукционный регулятор (ИР).

До начала исследования необходимо ознакомиться с устройством испытуемого трансформатора и регулятора напряжения и записать в протокол номинальные данные трансформатора, указанные на щитке. Следует установить то положение рукоятки регулятора напряжения, при котором напряжение на его зажимах окажется наименьшим, и выяснить пределы регулирования напряжения.

В схеме стенда предусмотрена токовая защита, при ее срабатывании загорается сигнальное табло, и стенд обесточивается.

Далее проводится исследование в определенном порядке.

1. Коэффициент трансформации определяется при холостом ходе по схеме рис. 1.7. Трансформатор с разомкнутой вторичной обмоткой присоединяется к сети 220 В, и вольтметром измеряются первичное и вторичное фазные напряжения. Коэффициент трансформации можно определить как при номинальном, так и при пониженном напряжении.

2. Опыт холостого хода проводится по схеме рис. 7. В процессе проведения эксперимента измеряются напряжения на зажимах трансформатора, линейные токи и мощность, потребляемая из сети; по полученным данным строятся характеристики:

$$I_0 = f(U_1); P_0 = f(U_1); \cos \varphi_0 = f(U_1).$$

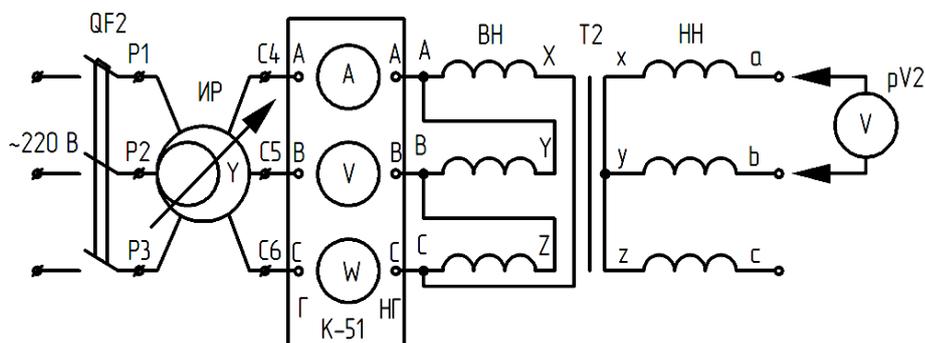


Рис. 1.7. Схема опыта холостого хода

Измерение напряжения производится в пределах от $0,3U_n$ до $1,2U_n$ (снимают в 7–8 точках), при этом одно из измерений обязательно следует провести при номинальном напряжении. В начале опыта должна быть проведена симметрия измеряемых напряжений; если несимметрия оказывается незначительной (не более 5 %), то в процессе снятия характеристик достаточно измерять U_1 и U_2 для любой фазы. В противном случае необходимо записывать значения U_1 и U_2 для всех фаз.

Ток и мощность холостого хода следует измерять в каждой фазе обмотки трансформатора, так как вследствие несимметрии магнитной цепи трехфазного – токи в фазах различны. По данным измерений определяется среднее арифметическое значение тока холостого хода $I_{0\text{cp}}$. Полная активная мощность, потребляемая трансформатором, равна сумме мощностей трех фаз. Ток холостого хода силовых трансформаторов при номинальном напряжении составляет 2–10 % от номинального тока.

Запись опытных данных рекомендуется вести в форме табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	Напряжение		Токи				Мощность				$\cos\varphi_0$
	U_1	U_2	I_A	I_B	I_C	I_0	P_A	P_B	P_C	P_0	
	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	Вт	Вт	Вт	Вт	

Примечание. Измерительный комплект К-51 измеряет линейные напряжения, токи и полную мощность трех фаз, а комплект К-505 – фазные значения напряжений, токов, мощностей.

3. Опыт короткого замыкания проводится по схеме (рис. 1.8). Трансформатор с замкнутой накоротко вторичной обмоткой присоединяется к источнику напряжения. Измеряются потребляемые ток, мощность, напряжение на зажимах трансформатора. По полученным данным строят зависимости

$$I_k = f(U_k); P_k = f(U_k); \cos\varphi_k = f(U_k).$$

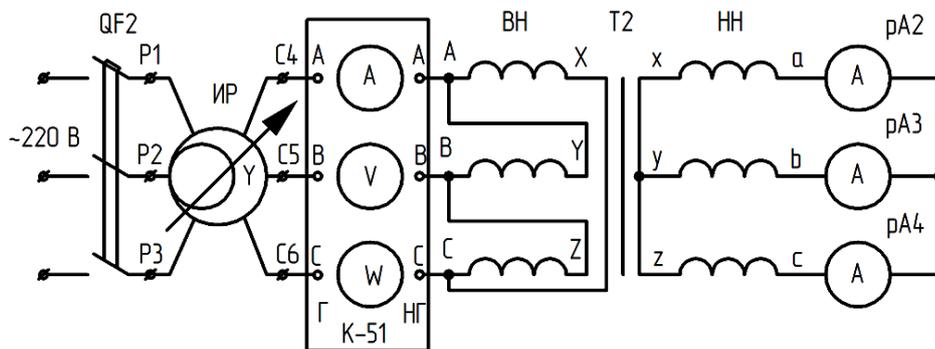


Рис. 1.8. Схема опыта короткого замыкания

Ток короткого замыкания изменяют в пределах от $1,2I_n$ до $0,5I_n$ (снимают в 5–6 точках), одно из измерений следует провести при номинальном значении тока. Напряжение на зажимах трансформатора обычно составляет 5–15 % U_n .

Результаты измерений заносят в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Напряжение	Токи				Мощность				$\cos\varphi_0$
	I_A	I_B	I_C	I_A	P_A	P_B	P_C	P_K	
$U_{1к}$	A	A	A	A	Вт	Вт	Вт	Вт	
B									

4. Внешние характеристики трансформатора определяют по схеме (рис. 1.9). Характеристики снимают при активной ($\cos\varphi = 1$) и активно-индуктивной ($\cos\varphi = 0,707$) нагрузках. При $\cos\varphi = 0,707$ активная и индуктивная составляющие тока равны и амперметры pA3 и pA4 должны иметь одинаковые показания.

Показания приборов необходимо занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

№ п/п	Измеренные величины							Рассчитанные		$\cos\varphi_2$
	P_1	U_1	I_1	U_2	I_a	I_p	I_2	P_2	η	
	Вт	В	А	В	А	А	А	Вт	%	
1										
2										
3										
4										
5										
1										
2										
3										
4										
5										

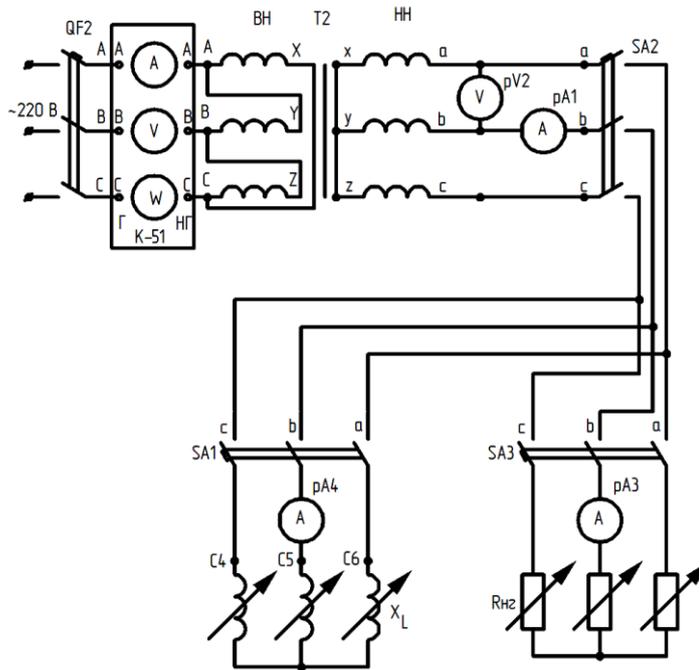


Рис. 1.9. Схема опыта нагрузки

Форма отчетности:

1. По данным п.1 определить коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_{\text{фнн}}}{U_{\text{фнн}}}$$

2. Рассчитать номинальный ток трансформатора, используя известную формулу:

$$I_{1н} = \frac{S_{н}}{\sqrt{3}U_{1н}}$$

где $S_{н}$ номинальная мощность трансформатора, ВА; $U_{1н}$ – номинальное напряжение трансформатора, В; $U_{1н} = 220\text{В}$ при соединении в Δ .

3. Используя таблицу 1, рассчитать:

$$P_0 = P_A + P_B + P_C ;$$

$$I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} ;$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_1 I_0} = \frac{P_0}{3U_{1\phi} I_0} .$$

В относительных единицах

$$I_0^* = \frac{I_0}{I_{1н}} ; U_0^* = \frac{U_{10}}{U_{1н}} .$$

По данным табл. 1.1 построить зависимости $I_0 = f(U_1)$; $P_0 = f(U_1)$; $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ в одних осях.

4. Определить параметры R_0 , X_0 , Z_0 по опытным данным холостого хода при номинальном напряжении.

5. Определить активную и реактивную составляющие тока холостого хода:

$$I_{0a} = I_0 \cos\varphi_0 ; I_{0p} = I_0 \sin\varphi_0 ;$$

соответственно в процентном содержании

$$I_{0a\%} = \frac{I_{0a}}{I_{1н}} 100\% ; I_{0p\%} = \frac{I_{0p}}{I_{1н}} 100\% .$$

6. Используя данные из табл. 1.2, построить в одних осях зависимость

$$I_k = f(U_k) ; P_k = f(U_k) ; \cos\varphi_k = f(U_k) ,$$

где

$$P_k = P_A + P_B + P_C ;$$

$$I_k = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} ;$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_k I_k} = \frac{P_k}{3 U_{\text{кф}} I_k} .$$

7. Определить параметры короткого замыкания, используя построенные кривые короткого замыкания для тока $I_k = I_{\text{н}}$.

8. Определить стороны треугольника короткого замыкания в процентах от $U_{\text{н}}$, которое равно $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$:

$$r_{\text{к}[75^\circ \text{C}]} = R_{\text{к}} [1 + \alpha (75^\circ \text{C} - \Theta)] ;$$

$$U_{\text{к}\%} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{н}} Z_{\text{к}}}{U_{\text{н}}} 100\% ;$$

$$U_{\text{ка}\%} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{н}} R_{\text{к}[75^\circ \text{C}]}}{U_{\text{н}}} 100\% ;$$

$$U_{\text{кр}\%} = \frac{\sqrt{3} I_{\text{н}} X_{\text{к}}}{U_{\text{н}}} 100\% ,$$

где Θ – температурный коэффициент окружающей среды во время опыта, $^\circ \text{C}$; α – температурный коэффициент материала обмотки, $\alpha = 0,004$;

$$Z_{\text{к}} = \sqrt{R_{\text{к}[75^\circ \text{C}]}^2 + X_{\text{к}}^2} .$$

9. По данным опыта холостого хода и короткого замыкания рассчитать коэффициент полезного действия:

$$\eta = 1 - \frac{P_{0\text{н}} + \beta^2 P_{\text{кн}}}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + P_{0\text{н}} + \beta^2 P_{\text{кн}}} ,$$

где $\cos \varphi_2 = 0,707$, а

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{н}}} = 1 ; \beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_{0\text{н}}}{P_{\text{кн}}}} .$$

Найти максимальное значение КПД.

10. По данным табл. 1.3 построить зависимости

$$I_1, P_1, \cos \varphi_1 ; U_2, I_2 ; \eta = f(P_2)$$

при $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,707$. Определить процентное изменение напряжения $\Delta U \%$.

11. Рассчитать $\Delta U \%$ для различных значений коэффициента нагрузки трансформатора:

$$\Delta U \% = \beta (u_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \sin \varphi_2) .$$

Данные расчета занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

β	0,25	0,5	0,75	0,01	1,25	Примечание
$\Delta U \%$						$\cos \varphi_2 = 1$
$\Delta U \%$						$\cos \varphi_2 = 0,707$

12. Расчет и построение внешней характеристики $U_2 = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,707$ производить по формуле

$$U_2 = U_{20} (1 - 0,01 \Delta U) ; U_{20} = 220 \text{ В} .$$

13. Все результаты расчета рекомендуется свести в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Холостой ход $U_1=U_{1H}$	$I_0\%$	$I_{0a}\%$	$I_{0p}\%$	P_0	$\cos \varphi_0$	R_0	X_0	Z_0
Короткое замыкание $I_H=I_K$	$U_K\%$	$U_{Ka}\%$	$U_{Kp}\%$	P_K	$\cos \varphi_0$	$R_{K[75]}$	X_K	Z_K
Нагрузка $I_1=I_H$	$\eta \%$	Опыт			η_{\max}	Расчет		
		$\Delta U \%$ $\cos \varphi_2=1$	$\Delta U \%$ $\cos \varphi_2=0,707$			$\Delta U \%$ $\cos \varphi_2=1$	$\Delta U \%$ $\cos \varphi_2=0,707$	

14. Построить векторную диаграмму для активно-индуктивной нагрузки ($\cos \varphi_2 = 0,707$).

Основная литература:

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.

2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

3. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с.

4. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.

Дополнительная литература:

1. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1972 - Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы - 543 с.: ил. - Б. ц.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Чему равен коэффициент трансформации и как он определяется экспериментальным путем?

2. Дать количественную (в процентах к суммарным потерям) и качественную оценку принятым допущениям

$$(P_0 \approx P_{ст}; P_K \approx P_{\varphi 1} + P_{\varphi 2}).$$

3. Пояснить, почему на холостом ходу трансформатора токи фаз различны.

4. Дать определение характера зависимостей тока, потерь и коэффициентов мощности при холостом ходе и коротком замыкании трансформатора от величины напряжения.

5. Что называется изменением напряжения двухобмоточного трансформатора? В каких единицах оно выражается? Чему равно ΔU в работе?

6. Чему равно напряжение U_2 при номинальной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 0,707$, полученное из опыта, расчета и векторной диаграммы?

Лабораторная работа № 2

Определение групп соединений и параллельная работа трехфазных трансформаторов

Цель работы: ознакомиться с условиями параллельной работы трехфазных трансформаторов, а также приобрести практические навыки в маркировке выводных концов обмоток и сборке определенной группы соединений обмоток трансформатора.

Краткие теоретические сведения.

При эксплуатации трансформаторов возникает необходимость включения на параллельную работу двух или более трансформаторов. При этом мощности их могут быть не равны.

Наиболее благоприятные условия работы параллельно работающим трансформаторам имеют место, если суммарная нагрузка распределяется пропорционально их номинальным мощностям, а в замкнутых контурах, состоящих из первичных и вторичных обмоток, отсутствуют уравнивающие токи. Эти условия выполняются в следующих случаях:

1. Номинальные первичные и вторичные напряжения трансформаторов должны быть соответственно равны, т.е.

$$U_{11} = U_{12} = \dots = U_{1N} \text{ и } U_{21} = U_{22} = \dots = U_{2N}.$$

Практически это требование сводится к равенству коэффициентов трансформации параллельно работающих трансформаторов.

$$K_1 = K_2 = \dots = K_N.$$

2. Трансформаторы должны иметь одинаковую группу соединения обмоток.

3. Трансформаторы должны иметь равные напряжения короткого замыкания:

$$u_{к1} = u_{к2} = \dots = u_{кN}.$$

Несоблюдение первого требования приводит к неравенству вторичных ЭДС трансформаторов и появлению в замкнутых контурах уравнивающих токов, величина которых зависит от неравенства коэффициентов трансформации. Для трансформаторов с коэффициентом трансформации меньше трех неравенство коэффициентов трансформации должно быть не более 1 % ($0 < K \leq 1\%$), а для остальных трансформаторов – не более 0,5 % ($0 < K \leq 0,5\%$).

Несоблюдение второго требования приводит к несовпадению вторичных ЭДС по фазе и, как следствие, к появлению уравнивающих токов, величина которых может превышать номинальные значения токов.

Поэтому параллельная работа трансформаторов, имеющих различные группы соединений, практически невозможна.

Третье требование наименее жесткое. Допускается параллельная работа трансформаторов с напряжениями короткого замыкания, отличающимися не более чем на +10 % от их среднего значения.

Неравенство напряжений короткого замыкания ведет к неравномерной загрузке трансформатора, причем, если выполнены два первых условия, нагрузка распределяется прямо пропорционально напряжениям короткого замыкания.

Схема и группа соединения показывают способ соединения обмоток трансформатора (звезда, треугольник, зигзаг) и угол сдвига между одноименными векторами линейных ЭДС обмотки ВН и обмотки НН. Группа обозначается числом, которое следует умножить на 30° (угловое смещение, принятое за единицу) для определения того, на сколько градусов смещены эти векторы. При этом угол смещения всегда отсчитывается по часовой стрелке от вектора ЭДС обмотки ВН по направлению к вектору ЭДС обмотки НН. Величина угла, на который сдвинуты векторы линейных ЭДС, зависит как от схемы, так и от применяемой маркировки зажимов обмоток. Всего возможно получить 12 групп, причем схемы соединений У/У и Д/Д дают четные группы, а схемы У/Д и Д/У – нечетные (1,3,7 и т.д.). При определении группы обычно предполагается, что фазы обмоток ВН и НН, находящиеся на одном стержне, имеют намотку в одну сторону. Если обмотки имеют различное направление намотки, то это специально указывается, так как фаза вторичной ЭДС поворачивается на 180° .

Маркировку зажимов и соединение обмоток в заданную группу можно выполнить на основании потенциальной диаграммы.

Рассмотрим пример. Пусть требуется соединить обмотки трехфазного трансформатора по схеме У/Д-3.

Для этой группы сдвиг между линейными ЭДС обмотки ВН и обмотки НН равен $3 \cdot 30^\circ = 90^\circ$. Потенциальная диаграмма представлена на рис. 2.1, а.

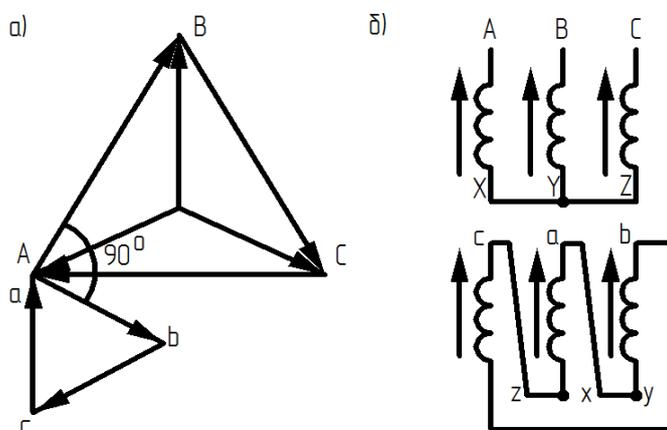


Рис. 2.1. Соединение обмоток в заданную группу

Из рисунка видно, что сдвиг между векторами AB и ab , BC и bc , CA и ca равен 90° .

На рис. 2.1, б изображены фазы первичной (ВН) и вторичной (НН) обмоток трансформатора. Зажимы обмотки ВН обозначаем произвольно: AX, BY, CZ .

Предполагая, что фазы намотаны в одном направлении, отмечаем стрелками мгновенное направление ЭДС в фазах обмотки ВН, например от концов к началам, и в том же направлении ЭДС в фазах обмотки НН. Остается разметить зажимы обмотки НН. Из потенциальной диаграммы видно, что вектор линейной ЭДС обмотки НН- bc направлен так же, как вектор XA фазной ЭДС обмотки ВН.

Следовательно, зажимы «bc» расположатся на крайней левой фазе, причем стрелка должна указывать направление от «b» к «c».

Аналогично на средней фазе должны быть обозначены зажимы «ca», а на крайней правой – «ab». Соединением одноименных зажимов образована заданная группа.

Аналогичным образом могут быть получены и остальные одиннадцать групп.

Следует отметить, что круговая перестановка обозначений зажимов обмотки НН вправо приводит к сдвигу вектора ЭДС обмотки НН на $+120^\circ$, т.е. из 3-й группы получается 7-я или, например, из 12-й – 4-я. Сдвиг обозначений влево дает соответственно 11-ю и 8-ю группы. Перемена обозначений зажимов «a» и «b» местами ведет к нарушению группы и недопустима.

С целью более эффективного использования трансформаторов, выпускаемых промышленностью, для параллельной работы желательно иметь по возможности меньшее число групп. Поэтому стандартизированы лишь группы

$$Y/Y-0 ; Y/Y_n-0 ; Y/D-11 ; Y/Z-11.$$

В случае, если обмотки трансформатора уже соединены и требуется определить группу соединений или убедиться в правильности соединений, могут быть использованы различные методы.

В данной работе используется метод определения соотношения напряжений между зажимами обмоток ВН и НН. Эти соотношения для четырех групп представлены формулами в табл. 2.1. Там же указан способ соединения фаз обмоток трансформатора для получения заданной группы.

Таблица 2.1

Группа соединений обмоток трансформатора

Схема и группа соединений	Обозначение выводов и способ соединения обмоток		Диаграмма векторов линейных напряжений	Напряжение между зажимами		
	высшего напряжения	низшего напряжения		$U_{\text{вв}}=U_{\text{сс}}$	$U_{\text{св}}$	$U_{\text{сс}}$
Y/Y-0				$U_2 \cdot (K_{\text{Л}} - 1)$	$U_2 \sqrt{1 - K_{\text{Л}} + K_{\text{Л}}^2}$	$U_2 \sqrt{1 - K_{\text{Л}} + K_{\text{Л}}^2}$
Y/Y-6				$U_2 \cdot (K_{\text{Л}} + 1)$	$U_2 \sqrt{1 + K_{\text{Л}} + K_{\text{Л}}^2}$	$U_2 \sqrt{1 + K_{\text{Л}} + K_{\text{Л}}^2}$
$\Delta/Y-11$				$U_2 \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K_{\text{Л}} + K_{\text{Л}}^2}$	$U_2 \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K_{\text{Л}} + K_{\text{Л}}^2}$	$U_2 \sqrt{1 + K_{\text{Л}}^2}$
$\Delta/Y-5$				$U_2 \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot K_{\text{Л}} + K_{\text{Л}}^2}$	$U_2 \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot K_{\text{Л}} + K_{\text{Л}}^2}$	$U_2 \sqrt{1 + K_{\text{Л}}^2}$

$K_{\text{Л}}$ – коэффициент трансформации линейных напряжений;
 U_2 – линейное напряжение обмотки НН.

Порядок выполнения:

1. Промаркировать выводные концы обмоток трансформатора Т1 (см. рис. 2.2):
а) найти пары выводов, принадлежащих одной фазе;
б) найти обмотки высокой и низкой сторон, расположенные на одном стержне;
в) определить начала и концы фаз.
2. Проверить обозначения зажимов обмоток трансформатора.
3. Соединить обмотки трансформаторов по заданной преподавателем схеме и группе и проверить расчетным путем правильность соединений. Построить векторные диаграммы.
4. Включить трансформаторы на параллельную работу.
5. Снять и построить внешние характеристики $U_2 = f(I_2)$ для каждого трансформатора при работе на активную нагрузку; сделать выводы относительно загрузки трансформаторов.
6. Замерить коэффициенты трансформации и напряжения короткого замыкания Т1 и Т2.

Экспериментальная установка.

Исследование параллельной работы трехфазных двухобмоточных трансформаторов проводятся на универсальном лабораторном стенде (УЛС), состоящем из силового оборудования и пульта управления (рис. 2.2). Силовые трансформаторы типа ТСЗИ-2,5/0,4 размещены в стенде (УЛС). Обмотки трансформаторов выведены на стенд и для Т2 промаркированы, а Т1 необходимо маркировать по ходу работы.

На стенде установлены два силовых автомата QF1 и QF2 для питания от сети 220 В, частотой 50 Гц, над автоматами установлены сигнальные лампы HL1, HL2.

Для включения трансформаторов Т1 и Т2 в параллель следует использовать выключатели SA1, SA3, а для подключения нагрузки – SA2. На наборном поле пульта управления УЛС располагаются электроизмерительные приборы с выведенными зажимами. Принципиальные схемы исследования представлены на рисунках настоящей работы. Полное

снятие напряжения со стенда обеспечивается выключением сетевого автомата АП-50, расположенного против УЛС на стене.

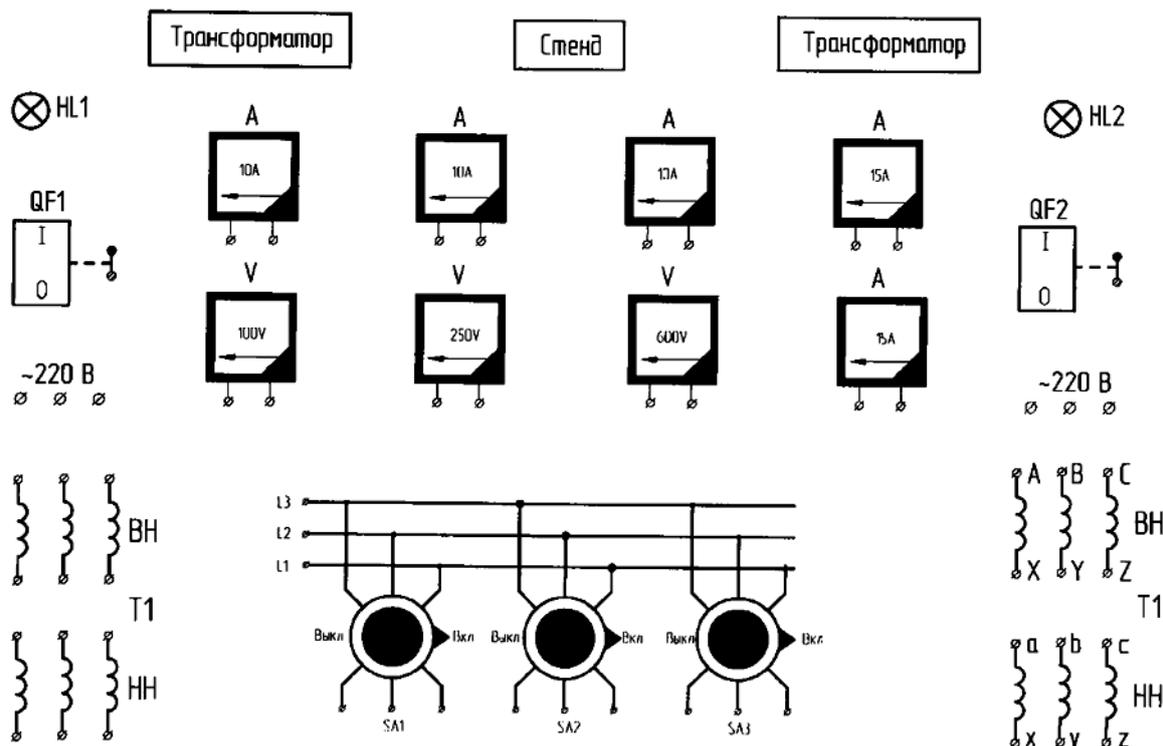


Рис. 2.2. Стенд исследования параллельной работы трехфазных трансформаторов

Проведение исследований.

Объектом исследования являются трехфазные двухобмоточные трансформаторы типа ТСЗИ-2,5/0,4, установленные в стендах УЛС. На наборном поле УЛС показаны обмотки, принадлежащие высокой ВН и низкой НН сторонам трансформаторов Т1 и Т2.

Определение пары выводов, принадлежащих одной фазе.

В группе из шести выводов, принадлежащих высокой или низкой стороне каждого трансформатора, нужно найти пары выводов, принадлежащих одной фазе. Индикатором наличия электрической цепи между двумя выводами одной группы служит вольтметр или лампочка.

Один конец контрольной цепи (рис. 2.3) присоединяют к клемме группы выводов, а другой конец поочередно присоединяют к остальным пяти клеммам. При подключении к клемме, принадлежащей той же фазе, индикатор покажет наличие цепи. Аналогичным способом «прозванивают» остальные группы выводов исследуемого трансформатора, отмечая в протоколе испытаний наличие электрической цепи между клеммами.

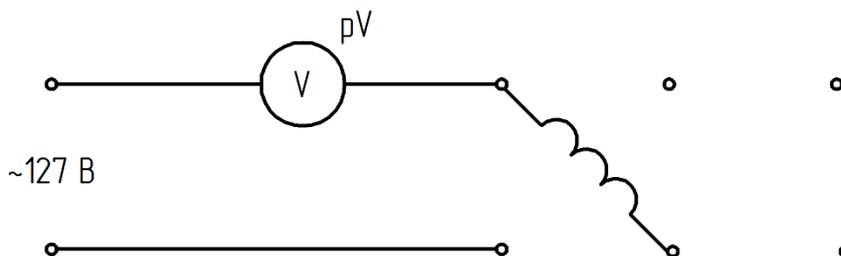


Рис. 2.3. Контрольная электрическая цепь

Нахождение обмоток высокой и низкой сторон, расположенных на одном стержне

Условно приняв любую обмотку высокой стороны (рис. 2.5) за фазу 1 и подключив ее к источнику тока, находят фазы 2,3 на высокой стороне и одноименные фазы на низкой стороне по величине отклонения стрелки вольтметра.

Принцип определения представлен на рис. 2.4. Если за фазу 1 была принята обмотка, расположенная на крайнем стержне, то величины магнитных потоков, сцепленных с фазами, находятся в следующем соотношении:

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3.$$

Причем $\Phi_2 > \Phi_3$ из-за разницы магнитных сопротивлений на пути этих потоков. Так как ЭДС, индуцированные в фазах, пропорциональны магнитным потокам, то на высокой стороне $E_1 > E_2 > E_3$.

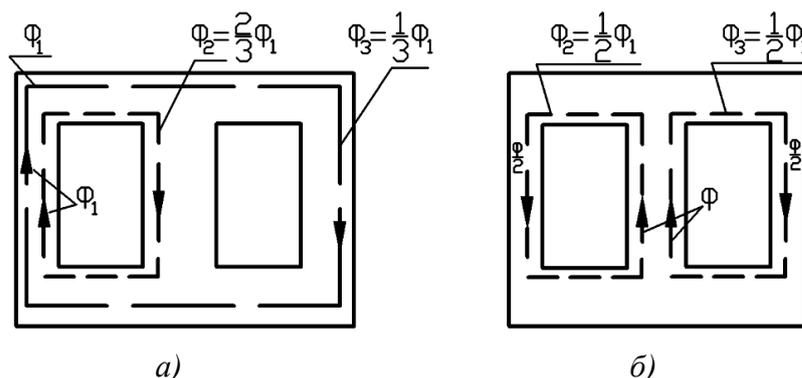


Рис. 2.4. Распределение магнитного потока в сердечнике при питании:
а – крайней фазы; б – средней фазы

Для измерения ЭДС и, следовательно, определения фаз на высокой стороне используется вольтметр со шкалой, рассчитанной на $U_{1н}$; на низкой – $U_{2н}$.

Если в результате замеров во 2-й и 3-й фазах обмотки высшего напряжения ЭДС окажутся равными, это значит, что обмотка, принятая за фазу 1, расположена на среднем стержне.

Эксперимент следует повторить, подключив к источнику напряжения другую обмотку высшего напряжения.

Маркировка выводных концов обмоток трансформатора Г1.

Маркировка обмоток трансформатора является одним из факторов, определяющих его группу соединения.

Под маркировкой понимают условное обозначение выходных концов обмоток высокого (ВН) и низкого (НН) напряжений, которое при заданной схеме соединения обмоток и одинаковом направлении их намотки однозначно определяет группу соединений трансформатора. Соединение и маркировка концов обмоток трехфазного трансформатора являются правильными только в случае, если, во-первых, при симметричных первичных напряжениях будут симметричные вторичные напряжения и, во-вторых, при одинаковом чередовании во времени фаз первичных и вторичных напряжений получается заданная группа соединений трансформатора. Симметричность напряжений легко проверяется с помощью вольтметра. Одинаковость чередования фаз и группа соединений в условиях учебной лаборатории проверяется путем построения топографической векторной диаграммы напряжений по данным измерений во время опыта.

Маркировка может быть выполнена с помощью специальных опытов, после которых при соединении У/У получается нулевая группа, а далее выполняются перемаркировка и соответствующие обозначения для получения заданной группы соединений трехфазного трансформатора.

Маркировка нулевой группы трехфазного трансформатора характеризуется тем, что обмотки одноименных фаз находятся на одном стержне, и, кроме того, принято, чтобы обмотки фазы *B* находились на среднем стержне магнитопровода, а *A* и *C* – на крайних.

Для быстрой и безошибочной маркировки предлагается следующий ее порядок:

1) Изобразить мнемоническую схему Т1 в протоколе согласно рис. 2.5.

2) Левую верхнюю обмотку (рис. 2.5), относящуюся к стороне ВН, обозначить *AX*. На эту обмотку подать напряжение 220 В. Измерить напряжение на зажимах каждой обмотки.

Результаты занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Обозначение	U_{AX}	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
Величина напряжения	220					
Предварительная маркировка	<i>AX</i>					

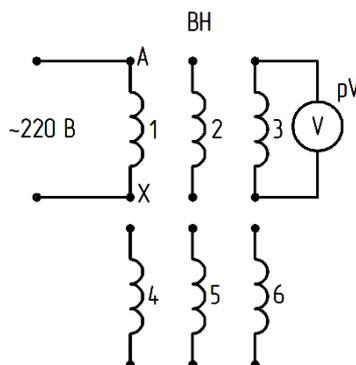


Рис. 2.5. Схема первого опыта

Ток, протекающий по обмотке *AX*, создает магнитный поток, замыкающийся по магнитопроводу в соответствии с рис. 2.6.

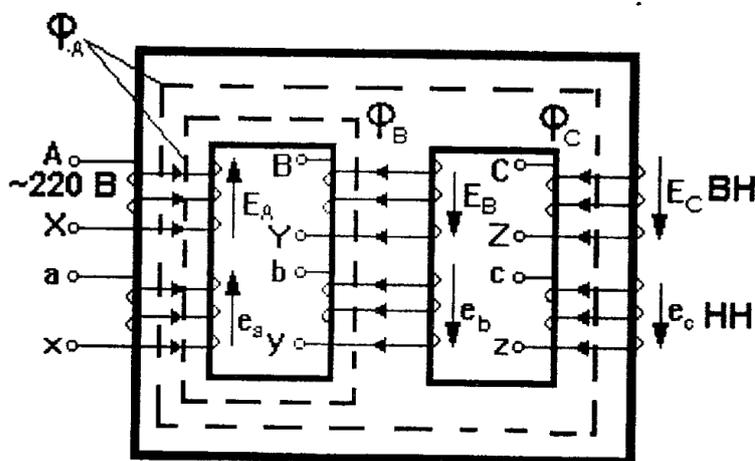


Рис. 2.6. Картина магнитных потоков и ЭДС в трехстержневом трансформаторе при однофазном питании обмотки *AX*

Вследствие магнитной несимметрии двух параллельных участков будет справедливо следующее соотношение между потоками стержней:

$$\Phi_A > \Phi_B > \Phi_C$$

А это значит, что в обмотках будут индуцироваться ЭДС разной величины:

$$1. E_A > E_B > E_C;$$

$$2. e_A > e_B > e_C.$$

В соответствии с условием 1, 2 предварительно обозначают обмотки, указывая маркировку в последней строчке таблицы 2.2.

Если в результате опыта получилось, что $E_B = E_C$, то это значит, что напряжение подается на обмотку, находящуюся на среднем стержне магнитопровода. Поэтому необходимо обозначить через $AХ$ любую другую обмотку ВН и повторить опыт. Таким образом определяются обмотки, находящиеся на одном стержне.

3) Проверить маркировку обмоток.

По условиям техники безопасности маркировку обмоток *высокого напряжения* трансформатора нужно проверять при значительно пониженном напряжении.

В соответствии с предлагаемым ниже способом сначала проверяют маркировку обмотки высокого напряжения. Обмотку высшего напряжения, соединенную в звезду, подключают фазой ВУ к однофазному источнику переменного тока (рис. 2.7) при пониженном напряжении и измеряют напряжения и ЭДС U_{BY} , E_{AX} , E_{CZ} , U_{AB} , U_{BC} .

В этом случае в крайних стержнях магнитный поток равен половине потока среднего стержня, следовательно, ЭДС, индуцированная в фазах $AХ$ и CZ , численно равна половине ЭДС фазы среднего стержня или половине напряжения U_{BY} , так как $U_{BY} \approx E_{BY} \approx 220$ В.

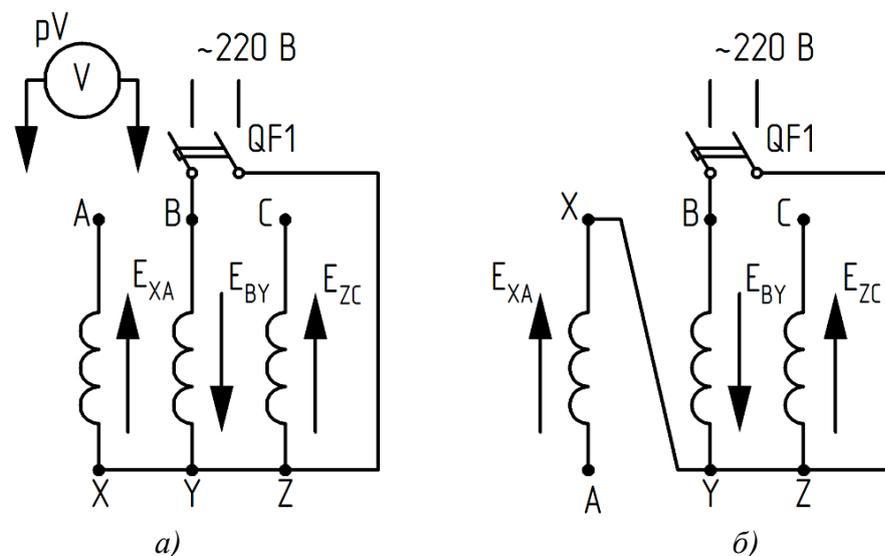


Рис. 2.7. Схема проверки обозначений зажимов обмотки высшего напряжения трансформатора

При правильной маркировке обмоток показания вольтметра, включенного между зажимами A и B или B и C , будут определяться суммой ЭДС, индуцированных в обмотках средней (E_{BY}) и крайней (E_{AX} или E_{CZ}) фаз.

Численно напряжение $U_{AB} = U_{BC} = 1,5U_{BY}$.

Если маркировка обмоток неправильная, показания вольтметра, включенного на зажимах A и B или B и C , будут определяться разностью тех же ЭДС (см. рис. 7, б), т.е. $U_{AB} = 0,5U_{BY}$.

Маркировку обмоток низшего напряжения проверяют последовательно для каждой фазы по схеме рис. 2.8.

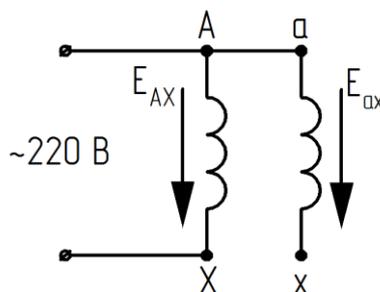


Рис. 2.8. Схема проверки обозначений зажимов обмоток низшего напряжения трансформатора

Фазу обмотки высшего напряжения при электрическом соединении ее начала с началом обмотки этой же фазы низшей стороны подключают к источнику переменного тока и измеряют напряжение и ЭДС: U_{AX} , U_{Xx} , E_{Ax} и т.д.

При правильном обозначении зажимов обмотки низшего напряжения показания вольтметра, включенного, например, между зажимами X и x , будут определяться разностью ЭДС, индуцированных в обмотках AX и ax и т.п. Когда обозначения зажимов обмотки низшего напряжения обратны по сравнению с предыдущим случаем, показания вольтметра будут определяться суммой ЭДС, индуцируемых в обмотках.

Проверив таким образом обмотки трех фаз, следует дать новую маркировку концам обмоток, если этого требуют данные ответов.

4) Построить векторную диаграмму.

В результате проведенной маркировки при соединении обмоток ВН и НН звездой получается группа соединений $Y/Y-0$. Для проверки этого необходимо собрать обмотки ВН и НН звездой (рис. 2.10) и, соединив одноименные зажимы А-а проводником, измерить напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , U_{Cb} , U_{Bb} и построить топографическую диаграмму (рис. 2.9). Топографическая векторная диаграмма строится следующим образом:

- а) масштаб напряжения выбирают таким, чтобы величина линейного вектора ВН была не менее 50 мм;
- б) в выбранном масштабе строят треугольник линейных напряжений обмотки ВН;
- в) к этому треугольнику с помощью циркуля засечками пристраивают треугольник вторичных напряжений (рис. 9) (точки A и a совмещены), а положение « b » и « c » определяют измеренными напряжениями.

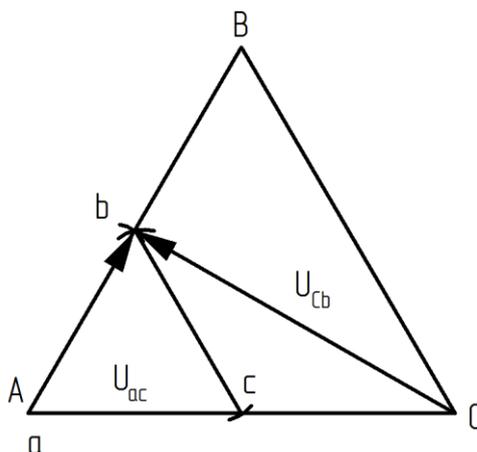


Рис. 2.9. Построение векторной диаграммы

Опытное определение группы соединений.

1) Собрать схему по рис. 2.10 (гр. $Y/Y-0$), измерить напряжение и проверить правильность результатов по формулам

$$U_{bB} = U_{AB} - U_{ab}; \quad U_{cC} = U_{AC} - U_{ac}.$$

Если коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_{AB}}{U_{ab}},$$

то

$$U_{Bb} = kU_{ab} - U_{ab} = U_{ab}(k-1);$$

$$U_{bB} = U_{AB} - U_{ab};$$

$$U_{Bc} = U_{Cb} = U_2 \sqrt{1-k+k^2},$$

где U_2 – линейное напряжение на зажимах обмотки НН при испытании.

2) Собрать схему по рис. 2.11 (гр. У/У-6), измерить напряжение и проверить правильность измерений по формулам

$$U_{Bb} = U_2(k + 1);$$

$$U_{Bc} = U_{Cb} = U_2\sqrt{1+k+k^2}.$$

3) Собрать схему по рис. 2.12 (гр. Д/У-11), измерить напряжения и проверить правильность измерений по формулам

$$U_{Bb} = U_2\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2};$$

$$U_{bC} = U_2\sqrt{1+k^2};$$

$$U_{Bc} = U_2\sqrt{1-\sqrt{3}k+k^2}.$$

4) Собрать схему по рис. 2.13 (гр. Д/У-5), измерить напряжения и проверить правильность измерений по формулам

$$U_{Bb} = U_2\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2};$$

$$U_{Cb} = U_2\sqrt{1+k^2};$$

$$U_{Bc} = U_2\sqrt{1+\sqrt{3}k+k^2}.$$

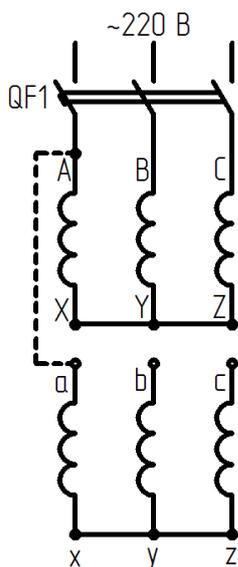


Рис. 2.10

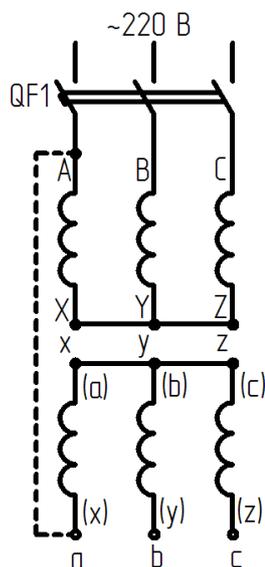


Рис. 2.11

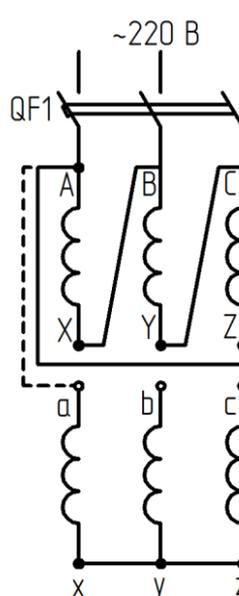


Рис. 2.12

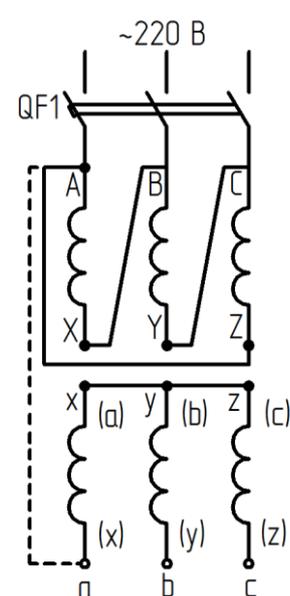


Рис. 2.13

5) Построить топографические векторные диаграммы в масштабе для соединения обмоток трансформатора по схемам У/У-0, У/У-6, Д/У-11, Д/У-5 (см. построение векторной диаграммы рис. 2, 9 и табл. 2.1).

Включение трансформаторов на параллельную работу.

Включение трансформаторов на параллельную работу производится по схеме рис. 2.14. Прежде чем включить трансформаторы на параллельную работу (замкнуть SA1 и SA3), необходимо убедиться в равенстве вторичных напряжений обоих трансформаторов и в том, что напряжение между однопотенциальными зажимами выключателей SA1, SA3 равно нулю.

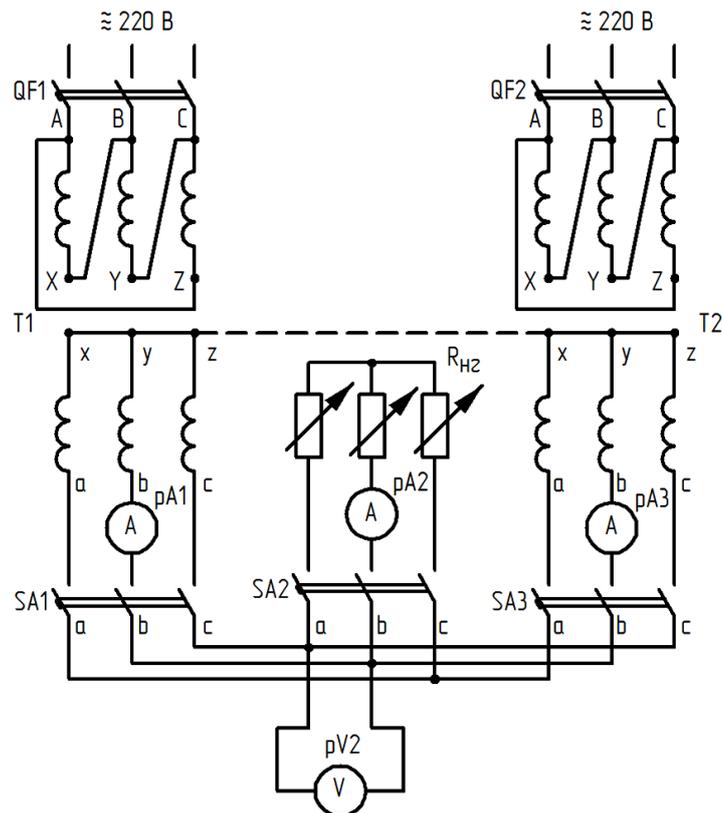


Рис. 2.14. Схема включения трансформаторов на параллельную работу

Для этого соединяют нейтралы вторичных обмоток трансформаторов и измеряют напряжение между $a-a$, $b-b$, $c-c$ одноименных фаз обоих трансформаторов.

При одинаковых группах соединений и правильном присоединении первичных и вторичных обмоток трансформаторов к SA1 и SA3 показания вольтметров будут равны нулю.

После того как окончательно установлено, что одноименные зажимы однопотенциальны, трансформаторы можно включить на параллельную работу, т.е. замкнуть ключи SA1 и SA3.

Замыканием SA2 подключают нагрузку и снимают внешние характеристики трансформаторов.

Запись опытных данных рекомендуется вести в форме табл. 2.3.

Таблица 2.3

Параллельная работа трансформаторов

U_{AB}	U_{ab}	T1	T2	Общая нагрузка
		I_{2I}	I_{2II}	I_2

Определение напряжения короткого замыкания.

Провести опыт короткого замыкания T1 для определения напряжения короткого замыкания (см. работу № 1).

При пониженном питающем напряжении (5–15 В), замкнутой вторичной обмотке и $I_{\text{ном}} = I_{\text{к}}$ по вольтметру определить $U_{\text{к}}$.

Форма отчетности:

1. Промаркировать выводные концы обмоток трансформатора Т1.
2. Построить в масштабе топографические векторные диаграммы линейных напряжений обеих обмоток трансформатора для всех заданных схем соединений обмоток.
3. Построить зависимость токов каждого из трансформаторов от общего тока нагрузки $I_{21}; I_{22} = f(I_{\text{общ}})$ и вторичного напряжения:

$$U_2 = f(I_{\text{общ}}); U_2 = f(I_{21}); U_2 = f(I_{22}).$$

4. Определить напряжения короткого замыкания трансформаторов $u_{к1\%}$ и $u_{к2\%}$ (см. работу № 1).

Основная литература:

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.
3. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с.
4. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.

Дополнительная литература:

1. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1972 - Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы - 543 с.: ил. - Б. ц.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Как проверить выполнение условия включения на параллельную работу для исследуемых трансформаторов?
2. Имеет ли место уравнительный ток в условиях холостого хода, какова его величина, чем он вызван?
3. Дать критическую оценку результатов, проанализировав графики $I_{21}; I_{22} = f(I_{\text{общ}}); U_2 = f(I_{\text{общ}})$.
4. Как будут распределяться токи нагрузки параллельно работающих трансформаторов, если напряжения короткого замыкания не одинаковы, а остальные условия включения соблюдаются?
5. Как распределится нагрузка мощностью $S = 5$ кВА между трансформаторами Т1 и Т2? Номинальные данные и напряжения короткого замыкания см. в работах № 1 и № 2.

Лабораторная работа № 3

Исследование асинхронного двигателя с фазным ротором

Цель работы: исследование эксплуатационных свойств трехфазного двигателя с фазным ротором и ознакомление с косвенными методами построения характеристик посредством круговой диаграммы.

Краткие теоретические сведения

Принцип работы асинхронной машины основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля и проводника с током. При подключении трехфазной обмотки статора к сети переменного тока возникает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется по формуле

$$n_1 = \frac{f_1}{p},$$

где f_1 – частота питающей сети; p – число пар полюсов.

При вращении магнитное поле индуцирует в проводниках обмотки ротора ЭДС, под действием которой в замкнутой обмотке ротора возникнут токи. На проводники с током в магнитном поле действует электромагнитная сила. Создается электромагнитный момент, который направлен в сторону вращения магнитного поля и пропорционален результирующему магнитному потоку и активной составляющей тока ротора. Если этот момент больше тормозного на валу, ротор приходит во вращение.

В двигательном режиме работы частота вращения ротора меньше частоты вращения магнитного поля, так как процесс индуцирования ЭДС, возникновения токов в проводниках замкнутой обмотки ротора и появления электромагнитного момента имеет место только при наличии разницы в частотах вращения магнитного поля и проводников ротора. Эту разницу принято выражать в относительных единицах в долях от частоты вращения магнитного поля (или в процентах) и называть скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ или } s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%,$$

где n_2 – частота вращения ротора.

Скольжение является одним из важнейших параметров асинхронной машины. В двигательном режиме работы $0 < s \leq 1$. У современных трехфазных асинхронных двигателей нормального исполнения при номинальной нагрузке скольжение составляет $0,015 \div 0,07$.

ЭДС и токи в обмотке ротора имеют частоту f_2 , которую называют частотой скольжения:

$$f_2 = p(n_1 - n_2) = f_1 s.$$

Магнитный поток, созданный обмоткой ротора, также будет вращающимся. Частота вращения его относительно ротора

$$n_s = \frac{f_2}{p} = s n_1,$$

а так как сам ротор имеет частоту вращения, равную

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

то магнитное поле ротора относительно неподвижного статора перемещается с частотой вращения

$$n_2 + n_s = n_1(1 - s) + n_1 s = n_1,$$

т.е. при любом скольжении магнитные поля, созданные обмотками статора Φ_1 и ротора Φ_2 , неподвижны относительно друг друга.

В машине образуется результирующий магнитный поток Φ_0 :

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2.$$

Магнитное состояние стального сердечника, а также величины ЭДС в обмотках статора и ротора определяются величиной результирующего магнитного потока.

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя и записать паспортные данные машины.
2. Измерить сопротивление обмоток и привести его к температуре 75°C .
3. Снять характеристики холостого хода двигателя:

$$I_0; P_0; \cos \varphi_0 = f(U_{10}) \text{ при } f = f_n = \text{const.}$$

4. Снять характеристики короткого замыкания:

$$I_k; P_k; \cos \varphi_k = f(U_k) \text{ при } f = f_n = \text{const.}$$

5. Снять рабочие характеристики при работе в режиме двигателя:

$$I_1; P_1; M; s; n; \cos\varphi_0 = f(U_{10})$$

при $U = U_{ном} = const; f = f_H = const.$

6. По опытным данным пп.2, 3, 4 построить круговую диаграмму. Пользуясь круговой диаграммой, построить рабочие характеристики для режима двигателя. Сравнить рабочие характеристики, полученные методом непосредственной нагрузки (п.5), с рабочими характеристиками, полученными из круговой диаграммы.

7. По круговой диаграмме определить перегрузочную способность двигателя K_M и кратность пускового момента K_H :

$$K_M = \frac{M_{max}}{M_H}; K_H = \frac{M_H}{M_n},$$

где M_{max} – максимальный момент, развиваемый двигателем;

M_H – номинальный момент;

M_n – пусковой момент, развиваемый двигателем.

Экспериментальная установка.

Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором проводится на универсальном лабораторном стенде (УЛС), состоящем из силового пульта управления (рис. 3.1).

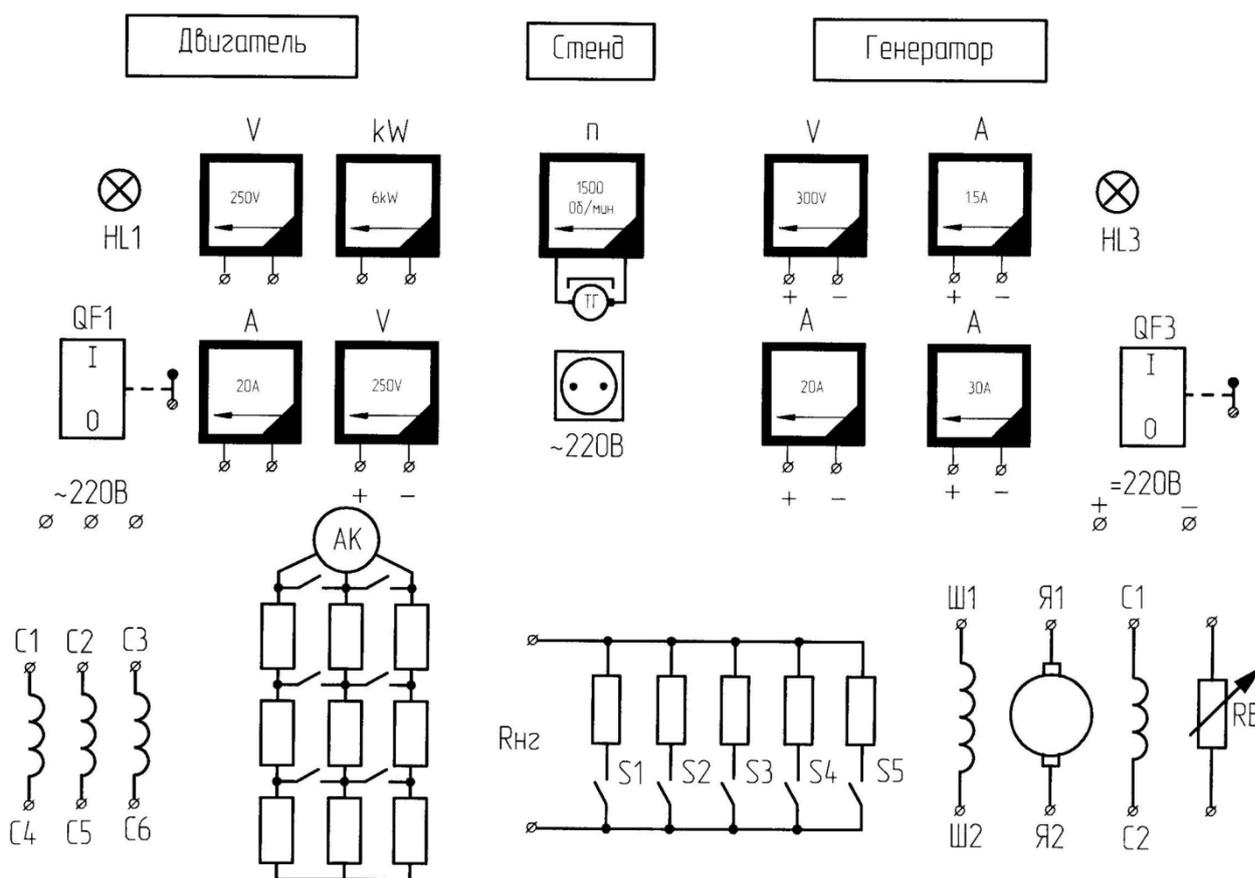


Рис. 3.1. Стенд испытания асинхронного двигателя с контактными кольцами

Силовое оборудование: асинхронный двигатель с фазным ротором и сочлененный с ним генератор постоянного тока – является объектом изучения. АД-ГПТ размещены на отдельно стоящем фундаменте.

Схема установки представлена на рис. 3.2.

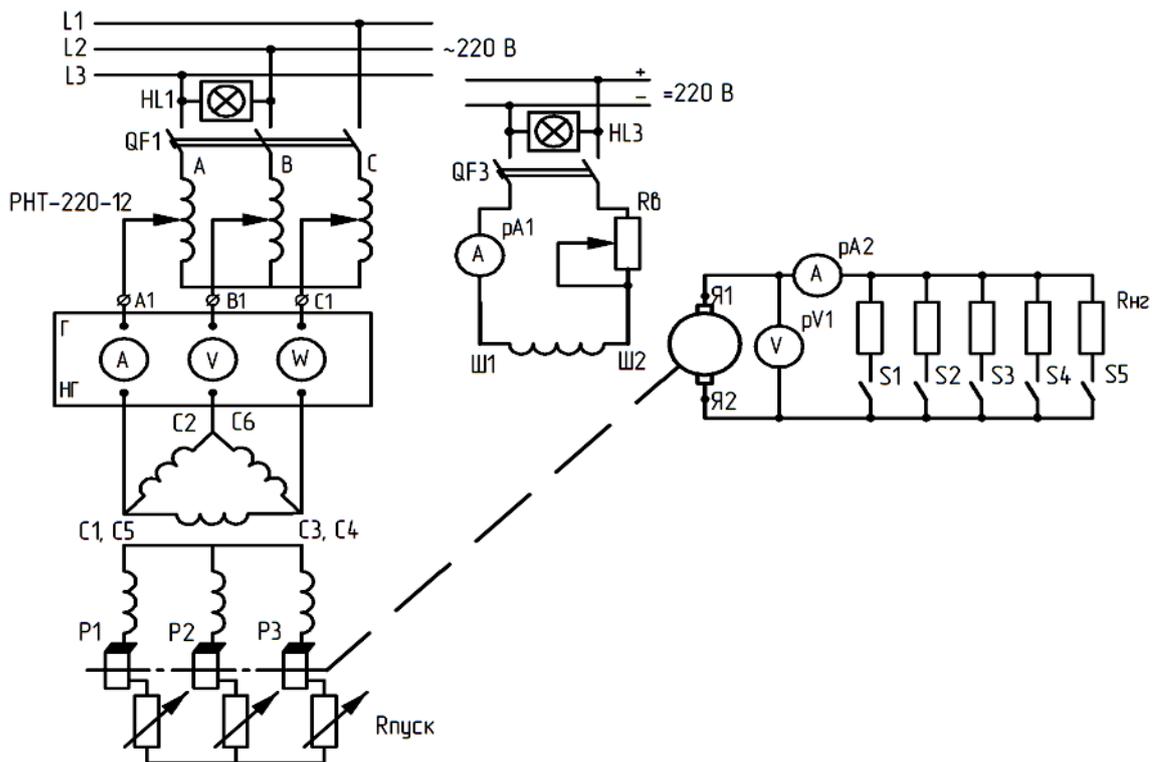


Рис. 3.2. Принципиальная схема испытания асинхронного двигателя с фазным ротором

Обмотка статора соединяется треугольником, т.к. питающее напряжение в лаборатории ~ 220 В, 50 Гц. Обмотка ротора соединена звездой и стационарно подключена к $R_{\text{пуск}}$. Для регулирования напряжения питания используется регулятор напряжения трехфазный типа РНТ-220-12 или индукционный регулятор, схемы включения которых приведены на рис. 3.3.

Для нагрузки ГПТ используется ступенчатый металлический реостат. Начала и концы обмоток двигателя АК-51/4 С1, С2, С3, С4, С5, С6 и генератора Я1, Я2, Ш1, Ш2 выведены на наборное поле лабораторного стенда.

Питание на стенд подается включением автоматов АП-50, расположенных на стенде напротив, при этом на опытном стенде загораются сигнальные лампы HL1 и HL3.

Питание ~ 220 В на двигатель АК-51/4 и $=220$ В на обмотку возбуждения Ш1-Ш2 ГПТ подается включением автоматов QF1 и QF3, расположенных на лицевой части стенда.

Для измерения напряжения, токов и мощности на наборном поле расположены электромагнитные приборы, кроме того, при исследовании АД можно использовать измерительный комплект К 51 или К 505.

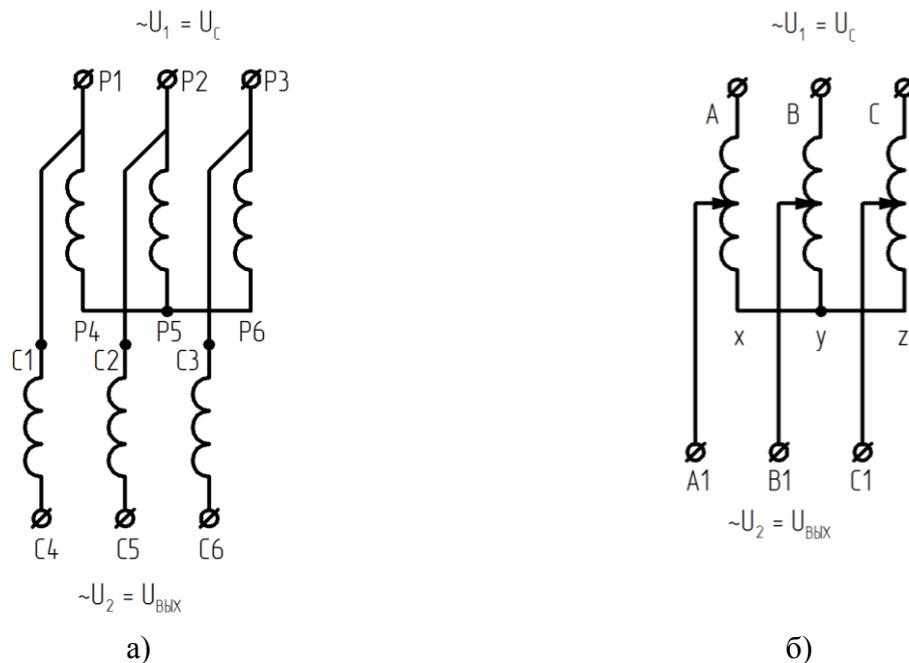


Рис. 3.3. Схема соединений обмоток фазорегулятора в режиме индукционного регулятора (а) и трехфазного автотрансформатора (б) типа РНТ-220-12

Проведение исследований.

Сопротивление фазы статора двигателя АК-51/4 измеряют мостом постоянного тока типа МО-62 или методом амперметра-вольтметра каждой обмотки отдельно и приводят к температуре 75°C :

$$r_{175^{\circ}\text{C}} = r_1[1 + \alpha(75 - \Theta)],$$

где $\alpha - 0,004$ 1/град.; Θ – температура окружающей среды.

Пуск двигателя и изменение направления вращения.

Пуск двигателя осуществляется следующим образом.

Прежде чем подключить к сети обмотку статора, необходимо установить рукоятку пускового реостата в положение «Пуск», в этом положении реостат полностью введен, т.е. в каждую фазу обмотки ротора будет включено наибольшее сопротивление.

При подключении обмотки статора к сети двигатель приходит во вращение. Следует плавно вывести пусковой реостат, передвигая рукоятку в положение «Ход». В этом случае кольца ротора будут замкнуты накоротко. Для перемены направления вращения двигателя необходимо изменить направление вращения магнитного поля.

Для этого достаточно поменять местами два любых провода, идущих к обмотке статора.

Опыт холостого хода.

Режимом холостого хода называется такой режим, когда двигатель вращается при отсутствии механической нагрузки на валу. В этом случае скорость ротора близка к синхронной, а его ток – к нулю.

Режим холостого хода описывается характеристиками, представляющими собой зависимость тока, мощности и коэффициента мощности от подводимого напряжения:

$$I_0, P_0, \cos\varphi_0 = f(U_{10}).$$

Схема для проведения опыта представлена на рис. 3.2.

Измерительные приборы, замеряющие ток и мощность, выбирают по току холостого хода, который у асинхронных двигателей составляет (25 ÷ 40) % от номинального тока. При снятии характеристики холостого хода подводимое к двигателю напряжение изменяется от

значения, примерно равного $U_{10} = 1,2U_n$, до величины $U_{10} = (0,2 \div 0,4)U_n$, при котором еще возможна устойчивая работа двигателя (дальнейшее снижение напряжения ведет к заметному снижению скорости и увеличению потребляемого тока).

Результаты измерения и расчетов заносят в табл. 3.1.

По данным табл. 3. строятся графики зависимостей: $I_0, P_0, \cos\varphi_0 = f(U_{10})$.

Таблица 3.1

№ п/п	Из опыта						Из расчета		
	U_{10} В	I_A А	I_B А	I_C А	I_0 А	$P_{x,x}$ Вт	$P_{эл1}$ Вт	P_0 Вт	$\cos\varphi_0$

В таблице ток холостого хода находят как среднее значение линейных токов:

$$I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3};$$

$P_{x,x}$ – мощность, покрывающая все потери в двигателе при холостом ходе (берется по ваттметру);

$P_{эл1}$ – электрические потери в обмотке статора;

$P_{ст}$ – потери в стали сердечника статора;

$P_{мех}$ – механические потери.

Потерями в обмотке ротора и добавочными потерями при холостом ходе пренебрегают, поэтому

$$P_0 = P_{x,x} - P_{эл1} = P_{ст} + P_{мех}.$$

При соединении обмотки статора в треугольник

$$P_{эл1} = I_{0л}^2 r_{\phi}.$$

При соединении обмотки в звезду

$$P_{эл1} = 3I_{0л}^2 r_{\phi}.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{x,x}}{\sqrt{3}U_{10}I_0}.$$

В этих формулах берется неприведенное сопротивление одной фазы обмотки статора, так как опыт холостого хода проводится в начале работы, когда машина еще не нагрета. Если опыт производится при нагретой машине, то в формулу подставляют сопротивление обмотки, приведенное к $75^\circ C$.

Характеристики холостого хода АД мощностью 3,0 кВт показаны на рис. 3.4.

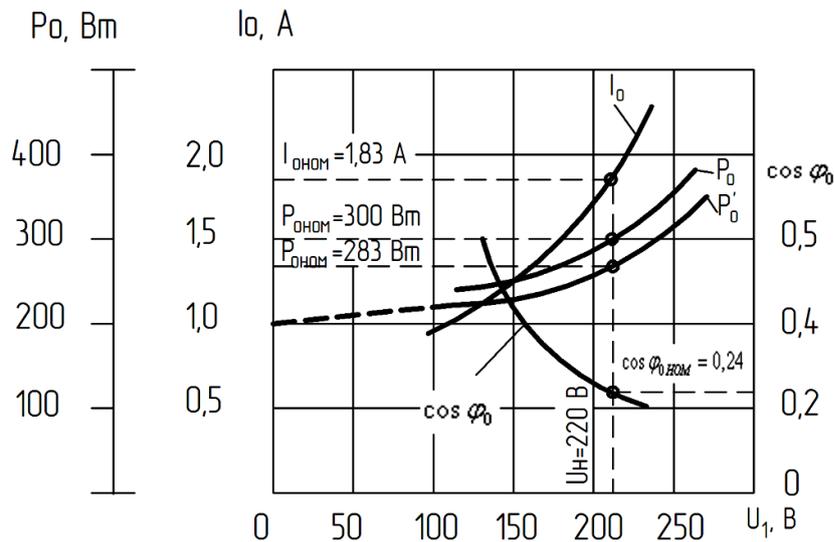


Рис. 3.4. Характеристики холостого хода асинхронного двигателя (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/мин)

Мощность $P_0 = P_{ст} + P_{мех}$, при холостом ходе с увеличением напряжения возрастает приблизительно по квадратичной зависимости, так как потери в стали пропорциональны квадрату индукции и, следовательно, квадрату ЭДС E_1 . Изменение тока холостого хода I_0 при изменении напряжения определяется главным образом изменением его реактивной составляющей. Можно считать, что реактивная составляющая тока идет на создание основного поля, так как поля рассеяния при холостом ходе незначительны.

Основная часть намагничивающей силы, создаваемой током холостого хода, идет на преодоление воздушного зазора. При малых напряжениях насыщением стали можно пренебречь и зависимость $I_0 = f(U_{10})$ представляет собой прямую линию. По мере увеличения напряжения, подводимого к статору, сталь машины насыщается, МДС, необходимая на проведение потока через стальные участки, растет и кривая тока начинает отклоняться в сторону оси ординат в соответствии с кривой намагничивания стали:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{x,x}}{\sqrt{3}U_{10}I_0}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе с увеличением подводимого напряжения уменьшается. Это объясняется тем, что кажущаяся мощность с насыщением стали растет значительно быстрее активной мощности.

Разделение потерь холостого хода.

Пользуясь зависимостью $P_0 = f(U_{10}^2)$, можно произвести разделение потерь холостого хода на потери в стали и механические (рис. 3.5).

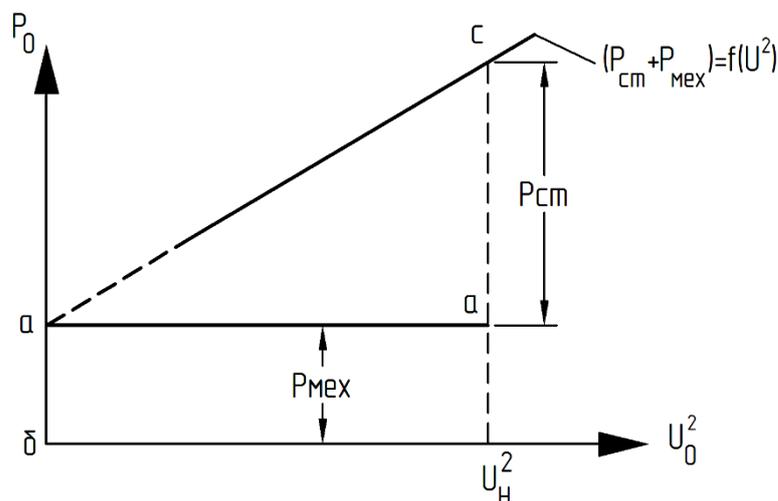


Рис. 3.5. Разделение потерь холостого хода асинхронного двигателя

Зависимость $P_0 = P_{ст} + P_{мех} = f(U_{10})$ представляет собой почти параболу, так как потери в стали пропорциональны квадрату индукции $P_{ст} \equiv B^2$ и, следовательно, пропорциональны U_1^2 , а механические потери постоянны, поскольку в опыте холостого хода скорость двигателя изменяется незначительно.

Поэтому зависимость $P_0 = f(U_{10}^2)$ будет представлять собой прямую, продолжение которой до оси ординат дает отрезок ab , равный $P_{мех}$ при $U_{10} = 0$, $P_{ст} = 0$, а отрезок $ac = P_{ст}$ при $U_{10} = U_H$.

Опыт короткого замыкания.

В опыте короткого замыкания ротор двигателя должен быть замкнут накоротко и заторможен. Напряжение, подводимое к статору от источника регулируемого напряжения, снижают почти до нуля и после этого выключателем QF1 (рис. 3.2) подают напряжение U_k на обмотку статора. Величина индуктивного сопротивления X_k , а также величина тока короткого замыкания зависят от взаимного расположения зубцов статора и ротора. Поэтому следует, медленно поворачивая ротор, отметить по амперметру наибольшее и наименьшее значения тока. После этого ротор закрепляют неподвижно в положении, соответствующем среднему значению тока.

Затем напряжение кратковременно повышают до значения, при котором ток короткого замыкания достигает величины, равной $(1,1 \div 1,3) I_n$, и записывают показания приборов. Это будет первая точка характеристики короткого замыкания. Затем подводимое напряжение уменьшают, делая при этом 5–6 замеров. Электроизмерительные приборы в схеме (рис. 3.2) должны быть выбраны с учетом тех величин напряжения и тока, которые имеют место в опыте короткого замыкания.

Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 3.2 следующей формы:

Таблица 3.2

№ п/п	Из опыта						Из расчета			
	$U_{кл}$, В	I_A , А	I_B , А	I_C , А	I_k , А	P_k , Вт	$\cos\varphi_k$	Z_k , Ом	r_k , Ом	X_k , Ом

По данным табл. 3.2 строятся характеристики короткого замыкания:

$$I_k, P_k, \cos\varphi_k = f(U_k).$$

По данным характеристики короткого замыкания определяют сопротивление короткого замыкания для $I_k = I_{кн}$.

При соединении обмоток статора в треугольник

$$r_k = \frac{P_k}{I_k^2}; z_k = \frac{\sqrt{3}U_k}{I_k}; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

При соединении обмоток статора в звезду

$$r_k = \frac{P_k}{3I_k^2}; z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3}I_k}; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Значения P_k и U_k для $I_k = I_n$ берутся из построенных графиков. Примерный вид зависимостей $I_k, P_k, \cos\varphi_k = f(U_k)$ представлен на рис. 3.6.

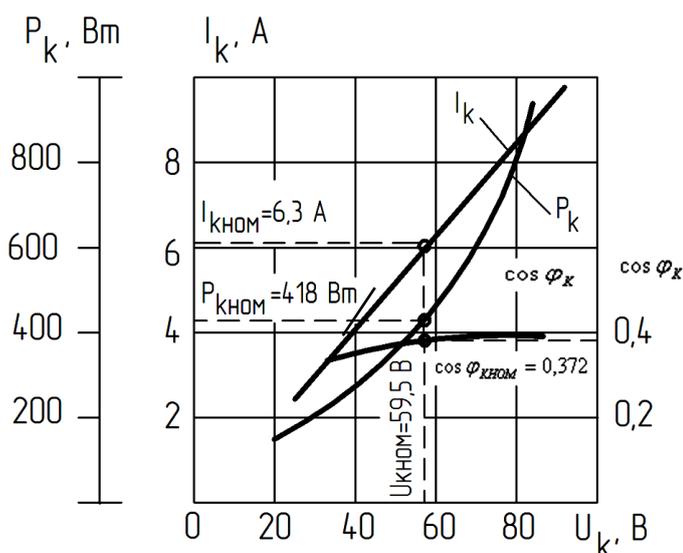


Рис. 3.6. Характеристики короткого замыкания асинхронного двигателя (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/мин)

Ток короткого замыкания $I_{кн}$ при номинальном напряжении, необходимый для построения круговой диаграммы, необходимо пересчитать по формуле

$$I_{кн} = I_n \frac{U_n - \Delta U_k}{U_k - \Delta U_k}.$$

Снятие рабочих характеристик асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики представляют зависимость $I_1, P_1, M, s, \eta, \cos\varphi = f(P_2)$ при постоянном значении напряжения на зажимах машины $U_1 = U_{1н}$ и постоянной частоте питания сети $f = \text{const}$.

Для снятия рабочих характеристик асинхронной машины, работающей в режиме двигателя, необходимо сочлененную с ней машину постоянного тока использовать в качестве нагрузочного генератора. Для этого (см. схему рис. 3.2) запускают асинхронную машину как двигатель и возбуждают машину постоянного тока. Увеличивая затем ток генератора, нагружают испытуемый асинхронный двигатель в пределах от $P_2 = 0$ до $P_2 = (1,2 \div 1,3)P_n$. При этом записывается потребляемый ток, мощность P_1 , число оборотов или скольжение двигателя.

Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 3.3.

Таблица 3.3

№	Из опыта							Из расчета				
	U_1 В	I_A А	I_B А	I_C А	I_{cp} А	P_1 Вт	n об/мин	S	$\cos\varphi_1$	P_2 Вт	M кг·м	η %

В таблице 3.3: I_{cp} – среднее значение линейных токов; P_1 – потребляемая мощность, подводимая к двигателю из сети и измеряемая ваттметром; P_2 – полезная мощность на валу при работе асинхронной машины в режиме двигателя.

Для режима работы двигателя

$$P_2 = P_1 - (P_0 + P_{эл1} + P_{эл2} + P_{доб}),$$

где P_0 – из характеристики холостого хода при $U_1 = U_{1н}$ (см. рис. 3.4); $P_{эл1}$ – потери в обмотке статора асинхронной машины.

При соединении обмоток статора звездой

$$P_{эл1} = 3I_{cp}^2 r_{\Phi 75^\circ}.$$

При соединении обмоток статора треугольником

$$P_{эл1} = I_{cp}^2 r_{\Phi 75^\circ},$$

где $P_{эл2}$ – электрические потери в обмотке ротора.

Для двигательного режима

$$P_{эл2} = (P_1 - P_{эл1} - P_{ст})S = P_{эм}S,$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

где $P_{ст}$ – потери в стали, которые находят путем разделения потерь (рис. 3.5);

$P_{доб}$ – добавочные потери. Для асинхронных двигателей в соответствии с ГОСТ 183–55 их принимают условно;

$$P_{доб} = 0,005P_1.$$

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} 100\% = \frac{P_1 - (P_0 + P_{эл1} + P_{эл2} + P_{доб})}{P_1} 100\%.$$

M – момент на валу двигателя, кг·м:

$$M = \frac{P_2(\text{Вт})}{1,028n(\text{об/мин})}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1}.$$

Вид рабочих характеристик представлен на рис. 3.7.

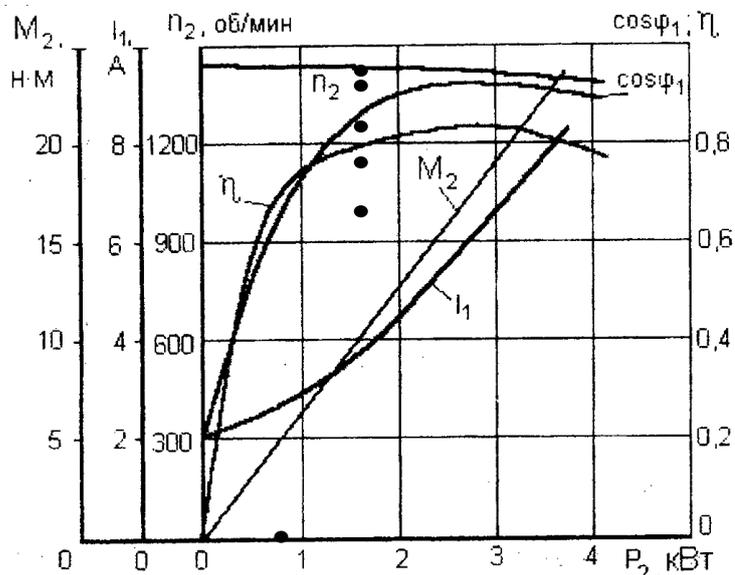


Рис. 3.7. Рабочие характеристики асинхронного двигателя (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/мин)

Построение круговой диаграммы.

При расчетах и построении круговой диаграммы берут фазные значения токов и напряжений. В данной работе производится построение упрощенной круговой диаграммы.

При построении предполагается, что от холостого хода до короткого замыкания на зажимах статора сохраняется номинальное напряжение. Однако опыт короткого замыкания производится при пониженном напряжении, и поэтому результаты измерений должны быть пересчитаны на номинальное напряжение.

Выполняя пересчет тока короткого замыкания, вводят поправку на насыщение машины при номинальном напряжении.

На рис. 8 построена кривая $I_k = f(U_k)$. Предполагается, что, начиная с точки А, соответствующей току короткого замыкания I_k при наибольшем напряжении, этот ток растет с увеличением напряжения по прямой линии. Поэтому через точку А проводят касательную к кривой $I_k = f(U_k)$ до пересечения с осью абсцисс. Тогда (из подобных треугольников):

$$I_{II} = I_k \frac{OB - OB}{OC - OB} = I_H \frac{U_H - \Delta U_k}{U_k - \Delta U_k}.$$

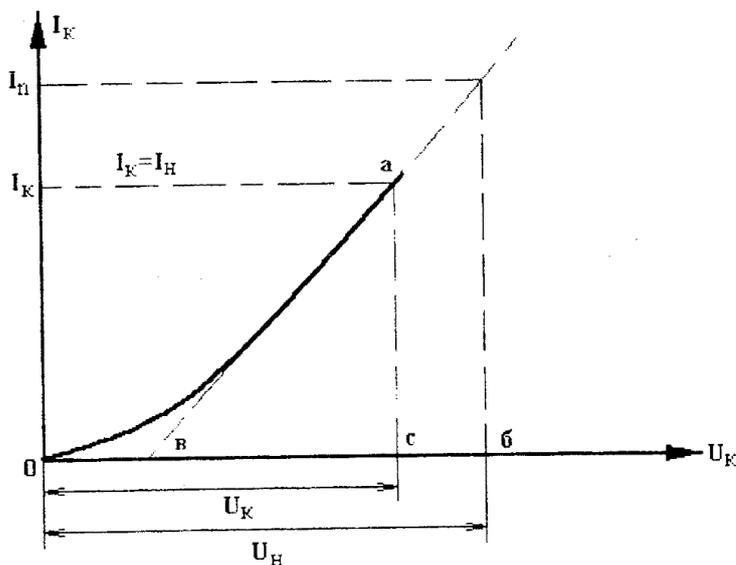


Рис. 3.8. Характеристика короткого замыкания

Мощность короткого замыкания также следует рассчитывать на ток $I_{\text{н}}$, соответствующий номинальному напряжению:

$$P_{\text{кн}} = P_{\text{к}} \left(\frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{к}}} \right)^2.$$

Для построения круговой диаграммы требуются следующие величины:

- 1) ток холостого хода I_0 и потери P_0 , которые находят по кривым холостого хода для номинального напряжения $U_0 = U_{\text{н}}$;
- 2) ток короткого замыкания $I_{\text{к}}$ и мощность $P_{\text{к}}$, полученные по опыту короткого замыкания;
- 3) сопротивление одной фазы статора r_1 , приведенное к 75°C ;
- 4) активное сопротивление короткого замыкания $r_{\text{к}}$, которое находят из опыта короткого замыкания.

В целях удобства построения диаграммы выбирают масштаб для тока $m_i = [\text{A/см}]$.

Размер листа миллиметровой бумаги по длине должен соответствовать масштабу $I_{\text{н}}$.

Масштаб мощности по диаграмме при выбранном масштабе тока будет $m_p = \sqrt{3}U_{\text{н}}m_i$.

Все значения токов и мощности откладывают на диаграмме в соответствии с принятыми масштабами. Построение диаграммы показано на рис. 3.9.

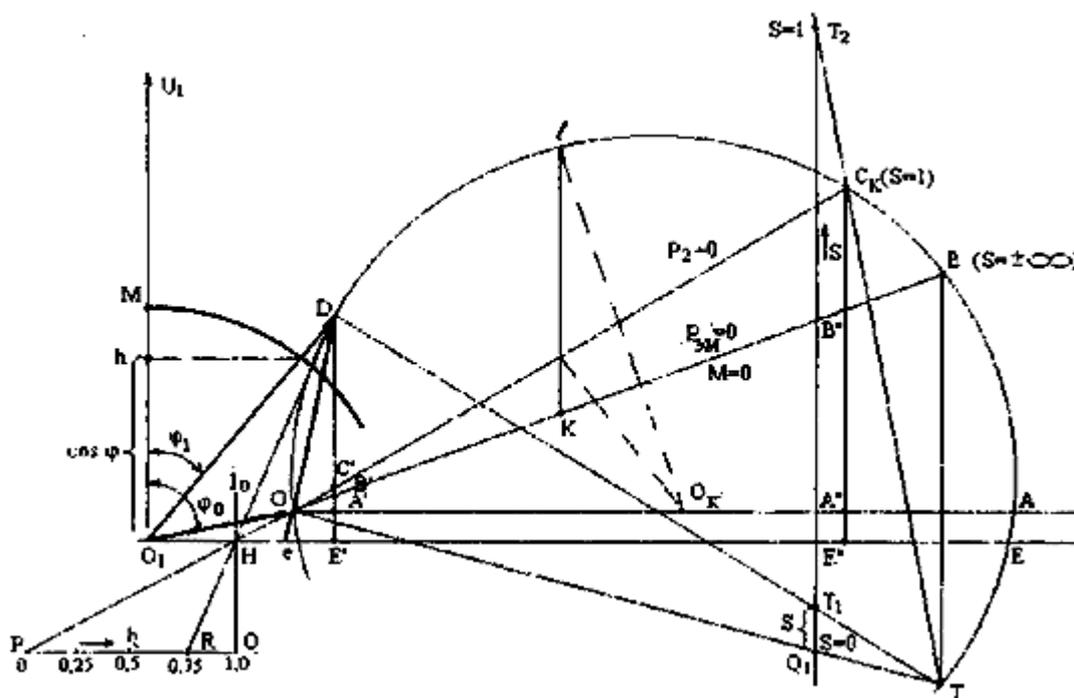


Рис. 3.9. Упрощенная круговая диаграмма

Построение точек холостого хода, короткого замыкания и центра окружности.

Для номинального напряжения находят по кривой $I_0 = f(U_0)$ ток I_0 . Его составляющие $I_0 \sin \varphi$ в о.е. и $I_0 \cos \varphi$ в о.е. откладывают на рис. 3.9.

Так получают точку холостого хода O , лежащую на окружности. Через точку O параллельно оси OE проводят линию OA . Точку короткого замыкания $C_{\text{к}}$ находят по составляющим тока короткого замыкания $O_1E'' = I_{\text{н}} \sin \varphi_{\text{к}}$, $C_{\text{к}}E'' = I_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{к}}$, которые вычисляются на основании результатов опыта короткого замыкания, причем

$$\cos \varphi_{\text{к}} = \frac{P_{\text{кн}}}{\sqrt{3}U_{\text{н}}I_{\text{н}}}.$$

Соединив точки O и $C_{\text{к}}$, получают хорду окружности $OC_{\text{к}}$.

Перпендикуляр, восстановленный в середине хорды OC_k , пересечет линию OA в точке O_k , которая будет центром искомой окружности.

Построение линий P_1 , P_2 , $P_{эм}$ и момента.

На диаграмме отрезок $C_k A''$ делят в отношении r_1 и r_k :

$$\frac{A''B''}{A''C_k} = \frac{r_1}{r_k},$$

где r_k – активное сопротивление короткого замыкания, равное сумме r_1 и r_2' ; его находят из опыта короткого замыкания.

При соединении обмоток статора в звезду

$$r_k = \frac{P_{кн}}{3I_{п}^2}.$$

Сопротивление r_1 определяется измерением по методу амперметра и вольтметра.

Линия OB , проведенная через точку B'' , будет линией электромагнитной мощности $|P_{эм} = 0|$ и моментов $|M = 0|$; линия OC_k – линией полезной мощности $|P_2 = 0|$ при $n_0 \approx n_1$; линия O_1E – линией подведенной мощности $|P_1 = 0|$.

Если из точки O_1 радиусом O_1D , равным I_1 , сделать засечку на окружности и из точки D опустить перпендикуляр на ось O_1E_1 , то

$$P_2 = DC'm_p; P_1 = DE'm_p; P_{эм} = DB'm_p.$$

Определение скольжения.

Скольжение находят следующим образом. Любую точку кривой T круговой диаграммы соединяют с точками B , где ($s = \infty$); O , где ($s = 0$); C_k , где ($s = 1$). Параллельно прямой TB проводят шкалу скольжения Q_1T_2 . Точка Q_1 пересечения шкалы скольжения с прямой OT соответствует скольжению $s = 0$. Точка T_2 пересечения прямой TC со шкалой скольжения соответствует скольжению $s = 1$. Точка T_1 пересечения прямой DT со шкалой скольжения Q_1T_2 дает значение скольжения s , соответствующее заданному току I :

$$s = \frac{Q_1T_1}{Q_1T_2}.$$

Определение коэффициента мощности.

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{O_1h}{O_1M},$$

где O_1M – радиус окружности, равный 100 мм.

Вращающийся момент находят по электромагнитной мощности:

$$M = \frac{P_{эм} 1000}{2\pi \cdot n_1} = 9555 \frac{P_{эм}}{n_1} [\text{нм}] \quad (P_{эм} \text{ в кВт, } n_1 \text{ в об/мин}).$$

60

Определение максимального момента M_{\max} .

Если из центра O_k опустить перпендикуляр на линию моментов и продолжить его до пересечения с окружностью в точке l , то отрезок lk , перпендикулярный оси O_1E , будет соответствовать наибольшему моменту M_{\max} .

Определение коэффициента полезного действия.

Коэффициент полезного действия лучше определить расчетным путем, так как результаты, полученные по круговой диаграмме, недостаточно точны.

Подведенная к двигателю мощность

$$P = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Потери двигателя

$$\sum P = P'_0 + m_1 I_1^2 r_{175} + m_1 (I'_2)^2 (r_k + r_1)_{75} + P_{\text{доб}},$$

где

$$P'_0 = P_0 + m_1 I_0^2 r_1,$$

I'_2 – приведенный ток ротора, определяемый по диаграмме (отрезок DO); m_1 – число фаз;

$r_{175} = (r_k - r_1)_{75}$ – сопротивление обмоток статора и ротора, приведенное к температуре 75°C ;

$P_{\text{доб}}$ – добавочные потери, принимаемые для номинальной мощности равными $0,005P_{\text{н}}$.

Для других мощностей потери пересчитывают в отношении квадрата токов:

$$P_{\text{доб}} = 0,005P_{\text{н}} \left(\frac{I}{I_{\text{н}}}\right)^2,$$

тогда

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

Построение рабочих характеристик асинхронного двигателя по круговой диаграмме.

Задав ряд значений тока статора $0,5I_{\text{ном}}$; $0,75I_{\text{ном}}$; $I_{\text{ном}}$; $1,15I_{\text{ном}}$; $1,25I_{\text{ном}}$, строят векторы этих токов и получают на окружности токов ряд точек (D_1, D_2, D_3, D_4 и D_5). Для каждой из них определяют все необходимые данные и сводят в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Расчетные данные											
I_1 А	P_1 Вт	S	$\cos \varphi$	$P_{\text{эл1}}$ Вт	$P_{\text{м}}$ Вт	$P_{\text{эл2}}$ Вт	$P_{\text{доб}}$ Вт	$\sum P$ Вт	P_2 Вт	η %	M Нм

По данным табл. 3.4 следует построить рабочие характеристики АД с фазным ротором и сравнить их с экспериментальными.

Форма отчетности:

1. Проанализировать полученные данные исследования асинхронного двигателя с фазным ротором и дать критическую оценку результатов.

2. Оценить:

- относительную величину тока холостого хода $I_0/I_{\text{н}}$;
- степень насыщения магнитной цепи;
- все виды потерь при номинальном режиме работы в процентном отношении от номинальной мощности двигателя;
- величину $\cos \varphi$ и КПД η при номинальной нагрузке;
- перегрузочную способность двигателя;
- кратность пускового момента;
- степень совпадения опытных данных и данных, полученных из круговой диаграммы, для чего вписать в таблицу значения $U_1, I_1, \cos \varphi, P_2, M, s, n, \eta$, соответствующие

номинальной нагрузке, полученные методом непосредственной нагрузки и косвенным методом, а также известные щитковые данные этих величин.

Основная литература:

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Санкт-Петербург: Питер, 2008. - 350 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.
3. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с.

Дополнительная литература:

1. Радин, В. И. Электрические машины: Асинхронные машины: [Учебник для вузов] / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович. - М.: Высшая школа, 1988. - 327 с.: ил
2. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.
3. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1973 - Ч.2. Машины переменного тока. - 648 с.: ил. - Б. ц.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Дайте описание конструкции испытуемого асинхронного двигателя.
2. Объясните порядок проведения опыта холостого хода и короткого замыкания АД.
3. Объясните процесс пуска в ход АД с контактными кольцами, последовательность отдельных операций.
4. Почему зависимость между приложенным к АД напряжением и током холостого хода носит нелинейный характер?
5. Почему в опыте короткого замыкания на АД следует подавать пониженное напряжение?
6. Почему пусковой ток больше номинального?
7. Как из опыта холостого хода определяются потери в стали и механические потери?
8. Покажите на рисунке построение круговой диаграммы АД по данным опытов холостого хода и короткого замыкания
9. Почему коэффициент мощности холостого хода зависит от величины приложенного напряжения?

Лабораторная работа № 4

Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы: практическое ознакомление с конструкцией АД с короткозамкнутым ротором и исследование его свойств при включении обмоток статора по схеме «звезда» и «треугольник».

Краткие теоретические сведения.

В асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором обмотка последнего выполнена в виде беличьей клетки из меди или алюминия. Рабочие характеристики двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором практически одинаковы. Двигатель с короткозамкнутым ротором обладает несколько лучшим коэффициентом мощности за счет меньшей индуктивности обмотки ротора, но разница эта незначительна.

Что касается пусковых характеристик, то двигатель с короткозамкнутым ротором значительно уступает двигателю с контактными кольцами. Развивая относительно

небольшой момент при пуске, двигатель с короткозамкнутым ротором потребляет из сети ток, в несколько раз превосходящий его номинальное значение. Поэтому на практике нашли применение методы ограничения пускового тока, такие как пуск через автотрансформатор, реактор, переключение обмоток двигателя при пуске с «треугольника» на «звезду» (если для данного напряжения нормальным соединением является «треугольник») и другие.

Существенный недостаток этих методов заключается в том, что суть их сводится к снижению подводимого к двигателю напряжения, а следовательно, и к резкому уменьшению пускового момента, который пропорционален квадрату напряжения.

Порядок выполнения.

1. Записать паспортные данные двигателя и ознакомиться с его конструкцией.
2. Измерить сопротивление обмотки статора постоянному току.
3. Сопротивление привести к температуре 75°C .
4. Снять характеристики холостого хода при соединении обмотки статора треугольником: P_0 ; I_0 ; $\cos\varphi_0 = f(U_{10})$ при $f_1 = \text{const}$.
5. Снять характеристики короткого замыкания при соединении обмотки статора треугольником: P_k ; I_k ; $\cos\varphi_k = f(U_k)$ при $f_1 = \text{const}$.
6. Снять рабочие характеристики P_1 ; I_1 ; $\cos\varphi_1$, η , M , $s = f(P_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ для соединения обмотки статора треугольником, а затем снять те же характеристики для соединения обмотки статора звездой, не изменяя напряжения на зажимах двигателя.
7. По опытным данным (см. пп. 3, 4, 5) построить круговую диаграмму. Из нее определить все величины, характеризующие номинальный режим работы АД, а также перегрузочную способность АД, кратность пускового момента и токов двигателя. Построение круговой диаграммы показано в лабораторной работе № 3.

Экспериментальная установка.

Лабораторный стенд состоит из силового оборудования и пульта управления. Силовое оборудование: асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором и сочленённый с ним ГПТ смешанного возбуждения – представлено на рис. 4.1.

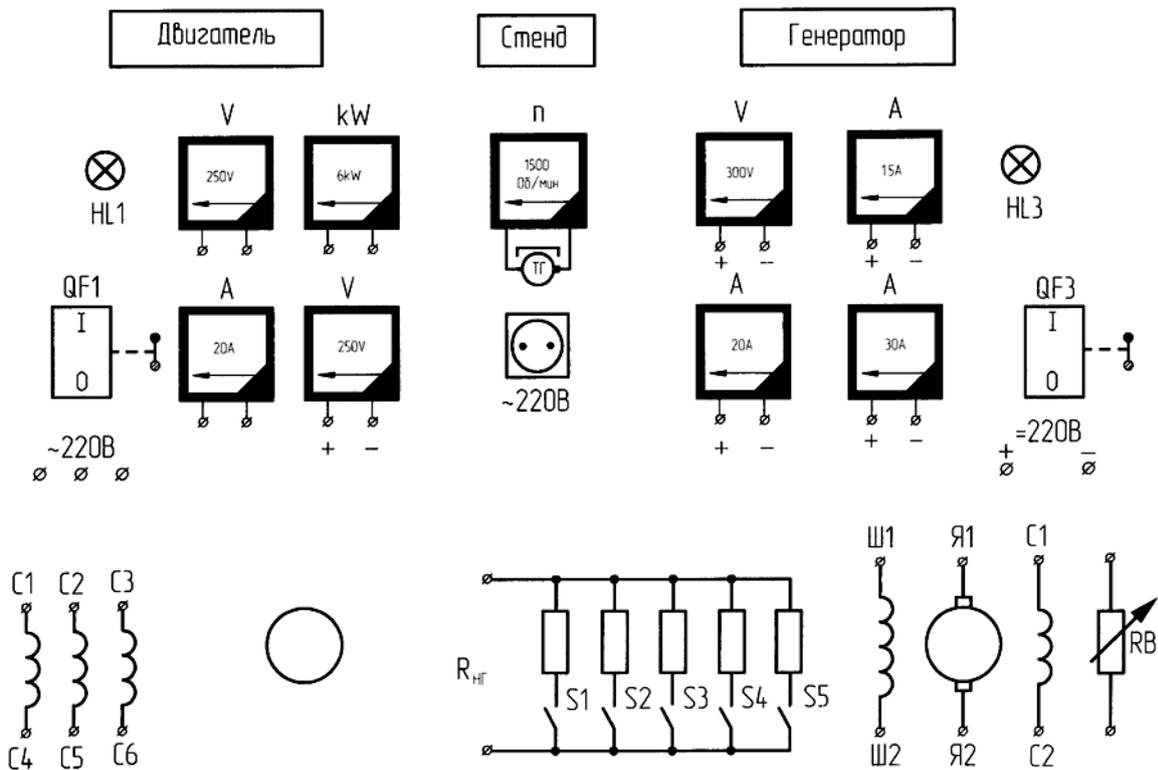


Рис. 4.1. Стенд испытания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

АД-ГПТ размещены на отдельно стоящем фундаменте.
 Схема установки представлена на рис. 4.2.

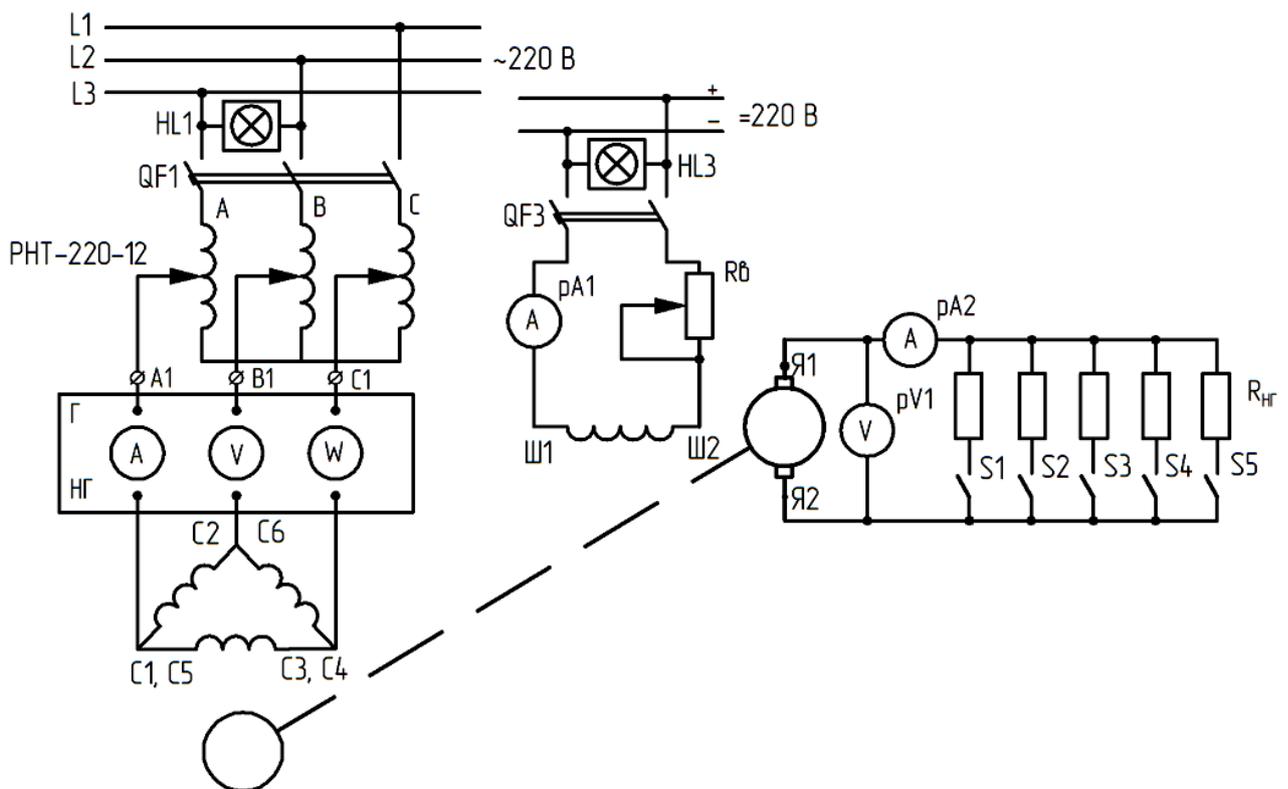


Рис. 4.2. Принципиальная схема испытания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Регулирование напряжения питания осуществляется регулятором напряжения типа РНТ-220-12 или индукционным регулятором, схема которого представлена на рис. 4.2. Для нагрузки ГПТ используется ступенчатый металлический реостат. Начала и концы обмоток

АД АО-51/4 С1, С2, С3, С4, С5, С6 и генератора Я1, Я2, Ш1, Ш2, С1, С2 выведены на наборное поле лабораторного стенда. Питание на стенд подаётся включением автоматов АП-50, расположенных на стене напротив, при этом на стенде загораются сигнальные лампы НЛ1 и НЛ3.

Питание ~220 В, 50 Гц на двигатель АО-51/4 и 220 В на обмотку возбуждения ГПТ подается от автоматов QF1 и QF3, расположенных на лицевой части стенда.

Для измерения напряжений, токов, мощности на наборном поле имеются электроизмерительные приборы, а при исследовании АО-51/4 можно использовать измерительный комплект К-51.

Проведение исследований.

Измерение сопротивления обмотки статора.

Сопротивление обмотки статора измеряют мостом постоянного тока типа МО-52 или методом амперметра – вольтметра, который описан в работе № 3, и приводят к температуре 75°С:

$$r_{175^{\circ}C} = r_1[1 + \alpha(75 - \Theta)],$$

где $\alpha = 0,004$ 1/град; $\Theta = 20^{\circ}C$ – температура окружающей среды.

Опыт холостого хода.

Схема для снятия характеристик холостого хода представлена на рис. 4.2.

Испытуемый двигатель подключается к регулируемому источнику напряжения, индукционному регулятору.

Режимом холостого хода называется такой режим, когда двигатель вращается при отсутствии механической нагрузки на валу. В этом случае скорость ротора близка к синхронной, а ток статора близок к нулю.

Характеристики холостого хода представляют зависимость тока, мощности и коэффициента мощности от подводимого напряжения:

$$P_0; I_0; \cos\varphi_0 = f(U_{10}).$$

Измерительные приборы, замеряющие ток и мощность, выбирают по току холостого хода, который у асинхронных двигателей составляет 25 ÷ 40 % от номинального тока. При снятии характеристики холостого хода подводимое к двигателю напряжение изменяется от значения, примерно равного $U_{10} = 1,2U_n$, до величины $U_{10} = (0,2 \div 0,4)U_n$, при котором ещё возможна устойчивая работа двигателя (дальнейшее снижение напряжения ведёт к заметному падению скорости и увеличению потребляемого тока).

В этом диапазоне делают 6–7 замеров. Результаты измерения и расчётов заносят в табл. 4.1 следующей формы:

Таблица 4.1

№ п/п	Из опыта						Из расчета		
	U_{10} В	I_A А	I_B А	I_C А	I_O А	P_{xx} Вт	$P_{эл1}$ Вт	P_0 Вт	$\cos\varphi_0$

По данным табл. 4.1 строят характеристики холостого хода.

В таблице ток холостого хода I_0 находят как среднее значение линейного тока:

$$I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} .$$

В таблице 4.1:

P_{xx} – мощность, покрывающая все потери в двигателе при холостом ходе (берётся по ваттметру);

$P_{эл1}$ – электрические потери в обмотке статора;

$P_{ст}$ – потери в стали сердечника статора;

$P_{мех}$ – механические потери.

Потерями в обмотке ротора и добавочными при холостом ходе пренебрегают, поэтому

$$P_0 = P_{xx} - P_{эл1} = P_{ст} + P_{мех} .$$

При соединении обмотки статора в треугольник

$$P_{эл1} = I_{ол}^2 r_{\phi} .$$

При соединении обмотки в звезду

$$P_{эл1} = 3I_{ол}^2 r_{\phi} .$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{xx}}{\sqrt{3}U_{10}I_0} .$$

В этих формулах берётся неприведённое сопротивление одной фазы обмотки статора, так как опыт холостого хода проводится в начале работы, когда машина ещё не нагрета. Если опыт производится при нагретой машине, то в формуле подставляется сопротивление обмотки, приведённое к 75°C.

Примерный вид характеристик P_0 ; I_0 ; $\cos \varphi_0 = f(U_{10})$ показан на рис. 4.3.

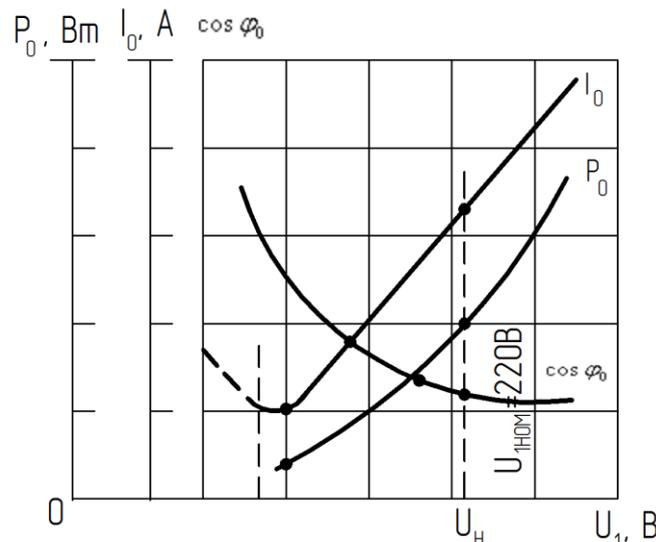


Рис. 4.3. Характеристики холостого хода асинхронного двигателя

Мощность $P_0 = P_{ст} + P_{мех}$ при холостом ходе с увеличением напряжения возрастает приблизительно по квадратичной зависимости, так как потери в стали пропорциональны квадрату индукции и, следовательно, квадрату ЭДС E_1 . Изменение тока холостого хода I_0 при изменении напряжения определяется главным образом изменением его реактивной составляющей. Можно считать, что реактивная составляющая тока идёт на создание основного поля, так как поля рассеяния при холостом ходе незначительны.

Основная часть намагничивающей силы, создаваемой током холостого хода двигателя, идёт на преодоление воздушного зазора.

При малых напряжениях насыщением стали можно пренебречь, и зависимость $I_0 = f(U_{10})$ представляет собой прямую линию. По мере повышения напряжения,

подводимого к статору, сталь машины насыщается, м.д.с., необходимая на проведение потока через стальные участки, увеличивается, и кривая тока начинает отклоняться в сторону оси ординат в соответствии с кривой намагничивания стали.

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{xx}}{\sqrt{3}U_{10}I_0}$$

с увеличением подводимого напряжения уменьшается. Это объясняется тем, что кажущаяся мощность $\sqrt{3}U_{10}I_0$ с насыщением стали растёт значительно быстрее активной мощности.

Разделение потерь холостого хода.

Пользуясь зависимостью $P_0 = f(U_{10}^2)$, можно произвести разделение потерь холостого хода на потери в стали и механические (рис. 4.4).

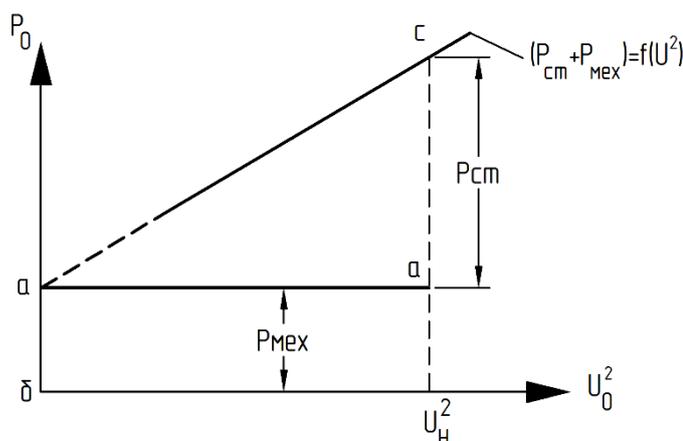


Рис. 4.4. Разделение потерь холостого хода на потери в стали и механические

Зависимость $P_0 = P_{ст} + P_{мех} = f(U_{10})$ представляет собой почти параболу, так как потери в стали пропорциональны квадрату индукции $P_0 = f(U_{10}^2)$ и, следовательно, пропорциональны U_1^2 , а механические потери постоянны, так как в опыте холостого хода скорость двигателя изменяется незначительно.

Поэтому зависимость $P_{ст} \equiv B^2$ будет представлять собой прямую, продолжение которой до оси ординат даёт отрезок ab , равный $P_{мех}$ при $U_{10} = 0$, $P_{ст} = 0$, а отрезок $ac = P_{ст}$ при $U_{10} = U_H$.

Опыт короткого замыкания.

В опыте короткого замыкания ротор двигателя должен быть заторможен. Напряжение, подводимое к статору от источника регулируемого напряжения, снижают почти до нуля и после этого выключателем QF1 подают на обмотку статора.

Затем напряжение кратковременно повышают до значения, при котором ток короткого замыкания достигает величины, равной $(1,2 \div 1,3) I_H$, и записывают показания приборов. Это будет первая точка характеристики короткого замыкания. Затем подводимое напряжение уменьшают, делая при этом 5–6 замеров. Электроизмерительные приборы в схеме должны быть выбраны в зависимости от тех величин напряжения и тока, которые имеют место в опыте короткого замыкания.

Результаты измерений и расчётов заносят в табл. 4.2 следующей формы:

Таблица 4.2

№ п/п	Из опыта						Из расчета			
	$U_{\text{ккл}},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_K,$ А	$P_K,$ Вт	$\cos\varphi_K$	$Z_K,$ Ом	$r_K,$ Ом	$X_K,$ Ом

По данным табл. 4.2 строятся характеристики

$$P_K; I_K; \cos\varphi_K = f(U_K).$$

По данным характеристики короткого замыкания для $I_K = I_{\text{кн}}$ определяют сопротивление короткого замыкания.

При соединении обмоток статора в треугольник

$$r_K = \frac{P_K}{I_K^2}; z_K = \frac{\sqrt{3}U_K}{I_K}; x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$

При соединении обмоток статора в звезду:

$$r_K = \frac{P_K}{3I_K^2}; z_K = \frac{U_K}{\sqrt{3}I_K}; x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$

Значение P_K и U_K для $I_K = I_{\text{н}}$ берут из построенных графиков. Примерный вид зависимостей $P_K, I_K, \cos\varphi_K = f(U_K)$ представлен на рис. 4.5.

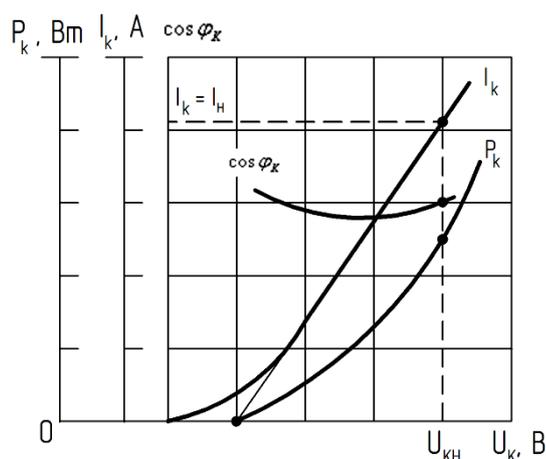


Рис. 4.5. Характеристики КЗ асинхронного двигателя

Снятие рабочих характеристик двигателя.

При снятии рабочих характеристик схема остаётся прежней, электроизмерительные приборы выбирают из условий измерения номинального тока и мощности. Испытуемый двигатель сочленяется с генератором постоянного тока параллельного возбуждения, схема которого представлена на рис. 4.2.

Рабочие характеристики $M, s, n, I_1, P_2, \cos\varphi_1, \eta = f(U_K)$ при $U_1 = U_{\text{н}}$ снижаются по методу непосредственной нагрузки. Значения M от 0 до $1,2 M_{\text{н}}$ устанавливают с помощью нагрузочного генератора постоянного тока, замыкая ключи S1÷S5 (см. рис. 4.2). Значение $M_{\text{н}}$ можно определить по паспортным данным двигателя из формулы

$$M_{\text{н}} = 9,55 \frac{P_{2\text{н}}}{n_{2\text{н}}} \text{ (Нм)},$$

где $P_{2\text{н}}$ – номинальная мощность, Вт; $n_{2\text{н}}$ – номинальная частота вращения, об/мин.

Результаты измерения и расчётов заносят в табл. 4.3 и 4.4. Опыт производится при соединении обмоток статора треугольником и звездой при одинаковых линейных напряжениях.

Таблица 4.3

Рабочие характеристики для соединения обмоток в «Δ»

№	Из опыта							Из расчета				
	U_1 В	I_A А	I_B А	I_C А	I_{cp} А	P_1 Вт	n об/мин	S	$\cos\varphi_1$	P_2 Вт	M КГМ	η %

Таблица 4.4

Рабочие характеристики для соединения обмоток в «Y»

№	Из опыта							Из расчета				
	U_1 А	I_A А	I_B А	I_C А	I_{cp} А	P_1 Вт	n об/мин	S	$\cos\varphi_1$	P_2 Вт	M КГМ	η %

В таблицах 4.3 и 4.4:

U_1 – номинальное напряжение двигателя при соединении обмоток статора треугольником;

I_{cp} – среднее значение линейного тока, потребляемого из сети:

$$I_{cp} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3};$$

P_1 – мощность, потребляемая двигателем (отсчитывают по показаниям ваттметра);

n, s – соответственно скорость и скольжение двигателя:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

где $n_1 = \frac{60f}{P}$ – синхронная скорость; n_1 – число оборотов двигателя, измеряемое

тахогенератором или тахометром; P_2 – полезная мощность двигателя:

$$P_2 = P_1 - (P_{эл1} + P_{эл2} + P_0 + P_{доб}),$$

где $P_{эл1}$ – потери меди в обмотке статора; $P_{эл1} = I_{cp}^2 r_{\phi 75^\circ}$ при соединении обмотки статора в

треугольник; $P_{эл1} = 3I_{cp}^2 r_{\phi 75^\circ}$ при соединении обмотки статора в звезду; $r_{\phi 75^\circ}$ – приведённое к 75°C сопротивление одной фазы обмотки статора;

$$P_{эл2} = s(P_1 - P_{эл1} - P_{ст}),$$

где $P_{эл2}$ – электрические потери в обмотке ротора; $P_{ст}$ – потери в стали двигателя при номинальном напряжении; которые могут быть определены методом разделения потерь;

P_0 – берут из п.4; $P_{доб} = 0,005P_1$.

Коэффициент мощности, КПД и момент подсчитывают по известным формулам:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%;$$

$$M = \frac{P_2(Bm)}{1,028n(об/мин)} \text{ кгм.}$$

По данным таблиц 4.3 и 4.4 строятся графики зависимости P_1 , I_1 , $\cos\varphi_1$, n , M , $\eta = f(P_2)$ для соединения обмотки в звезду и треугольник. Построение графиков рекомендуется выполнить в одинаковом масштабе, т.е. совместив на одном и том же рисунке для двигателя, соединённого в звезду и в треугольник, одноимённые зависимости: I_1 , $\cos\varphi = f(P_2)$; η , $M = f(P_2)$; n , $P_1 = f(P_2)$.

Примерный вид графиков показан на рис. 4.6; 4.7; 4.8.

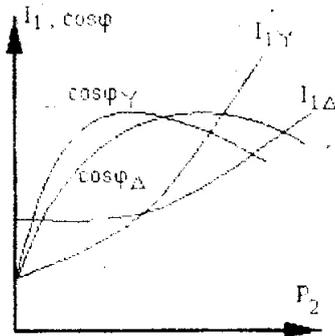


Рис. 4.6

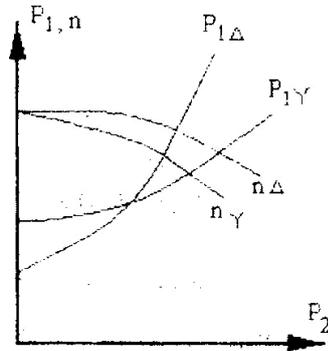


Рис. 4.7

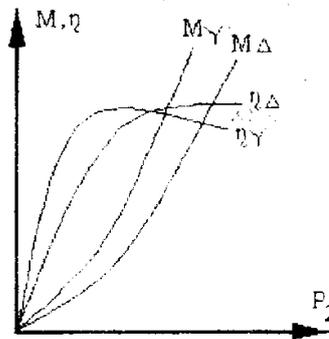


Рис. 4.8

Форма отчетности:

Проанализировать полученные данные исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и дать критическую оценку результатов.

Оценить:

- 1) относительную величину тока холостого хода I_0/I_N ;
- 2) кратность тока короткого замыкания $I_{кн}/I_N$;
- 3) степень насыщения магнитной цепи;
- 4) все виды потерь при номинальных нагрузках работы машины в процентном отношении от номинальной мощности двигателя (для каждого режима работы);
- 5) величину $\cos\varphi$ и КПД η при номинальной нагрузке;
- 6) кратность пускового момента;
- 7) степень совпадения опытных данных и данных, полученных из круговой диаграммы для номинальной нагрузки, для чего вписать в таблицу значения U_1 , I_1 , P_1 , M , s , η , соответствующие номинальной нагрузке, полученные методом непосредственной нагрузки и косвенным методом, а также известные щитковые данные;
- 8) произвести сопоставление рабочих характеристик трёхфазного двигателя при соединении обмоток статора в треугольник и звезду.

Основная литература:

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Санкт-Петербург: Питер, 2008. - 350 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.
3. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с.

Дополнительная литература:

1. Радин, В. И. Электрические машины: Асинхронные машины: [Учебник для вузов] / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович. - М.: Высшая школа, 1988. - 327 с.: ил
2. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.
3. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1973 - Ч.2. Машины переменного тока. - 648 с.: ил. - Б. ц.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Почему зависимость между приложенным к АД напряжением и током холостого хода носит нелинейный характер?
2. Почему опыт холостого хода осуществляется путём постепенного понижения приложенного напряжения?
3. Почему ток холостого хода АД, выраженный в % к номинальному, всегда больше тока холостого хода трансформатора, при условии равенства их выходной активной мощности?
4. Почему в опыте короткого замыкания на АД следует подавать пониженное напряжение?
5. Почему пусковой ток АД больше номинального?
6. Как изменить направление вращения ротора АД?
7. Почему коэффициент мощности холостого хода зависит от величины приложенного напряжения?
8. Как нужно включить обмотки АД, работающего при нагрузке 30–40 % от номинальной? Почему?

Лабораторная работа № 5

Исследование трехфазного синхронного генератора методом непосредственной симметричной нагрузки

Лабораторная работа проводится в форме дискуссии (5 часов)

Цель работы: изучение устройства синхронного генератора, ознакомление с системой его возбуждения. Исследование свойств и режимов работы генератора с помощью характеристик и векторной диаграммы.

Краткие теоретические сведения

Синхронные машины – это вторая группа машин переменного тока которые имеют отличительные особенности, касающиеся как конструкций, так и режимов работы. Анализ этих и других свойств синхронных машин посвящена лабораторная работа.

Устройство и принцип действия.

Синхронной называется такая машина, частота вращения которой находится в строгом постоянном соотношении с частотой сети. Эта зависимость может быть представлена следующим выражением:

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \text{ об/мин,}$$

где n_1 – частота вращения ротора, равная синхронной частоте магнитного поля статора; f_1 – электрическая частота питающего или генерируемого напряжения машины, выраженная в герцах; p – число пар полюсов машины.

Конструктивно синхронная машина состоит из тех же основных узлов, что и асинхронная. Более того, ее статор аналогичен статору последней.

Обмотка, находящаяся на роторе, называется обмоткой возбуждения и подключается к источнику постоянного тока через контактные кольца и щетки. В этом случае говорят, что машина имеет электромагнитное возбуждение.

В синхронных машинах малой мощности вместо обмотки возбуждения часто применяют постоянные магниты либо эта обмотка может отсутствовать. В последнем случае синхронная машина, называемая реактивной, создает поток возбуждения за счет тока, потребляемого из сети.

Независимо от способа возбуждения роторы синхронных машин имеют два конструктивных исполнения: с явновыраженными (рис. 5.1, а) или с неявновыраженными полюсами (рис. 5.1, б). В зависимости от этого синхронная машина называется явнополюсной или неявнополюсной.

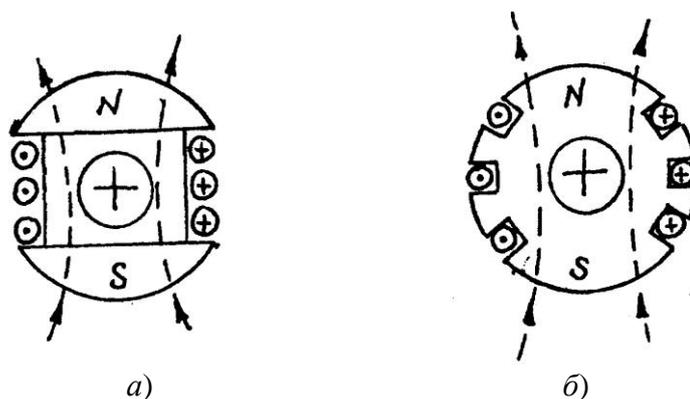


Рис. 5.1. Конструктивное исполнение ротора синхронной машины

Синхронные машины используются главным образом как генераторы для производства электроэнергии переменного тока. В то же время они находят применение и как двигатели в установках, где требуется иметь постоянную частоту вращения при переменной нагрузке.

Работа синхронной машины в режиме генератора.

Для получения данного режима работы необходимо ротор машины привести во вращение при помощи внешнего источника механической мощности. Вращающийся магнитный поток ротора, полученный магнитоэлектрическим или электромагнитным способом, будет пересекать проводники обмотки статора и индуцировать в них переменную электродвижущую силу (ЭДС).

Если генератор работает без нагрузки (в режиме холостого хода), то ток в обмотке статора отсутствует и в магнитной системе действует лишь поток возбуждения. Он направлен по оси полюсов ротора и вращается вместе с ним с частотой $n_1 = \text{const}$.

При подключении обмотки статора к потребителю (например, осветительной сети) в цепи статора будет протекать ток, который создаст свое магнитное поле. В случае трехфазного синхронного генератора магнитный поток статора будет вращаться относительно статора с частотой $n_1 = f_1/p$. Другими словами, вращающийся магнитный

поток статора является неподвижным относительно ротора, вращающегося с той же частотой. Очевидно, что он определенным образом будет оказывать влияние на магнитный поток возбуждения. Воздействие магнитного поля статора на магнитное поле возбуждения называется реакцией статора. Наиболее просто действие реакции статора можно показать с помощью векторных диаграмм (рис. 5.2).

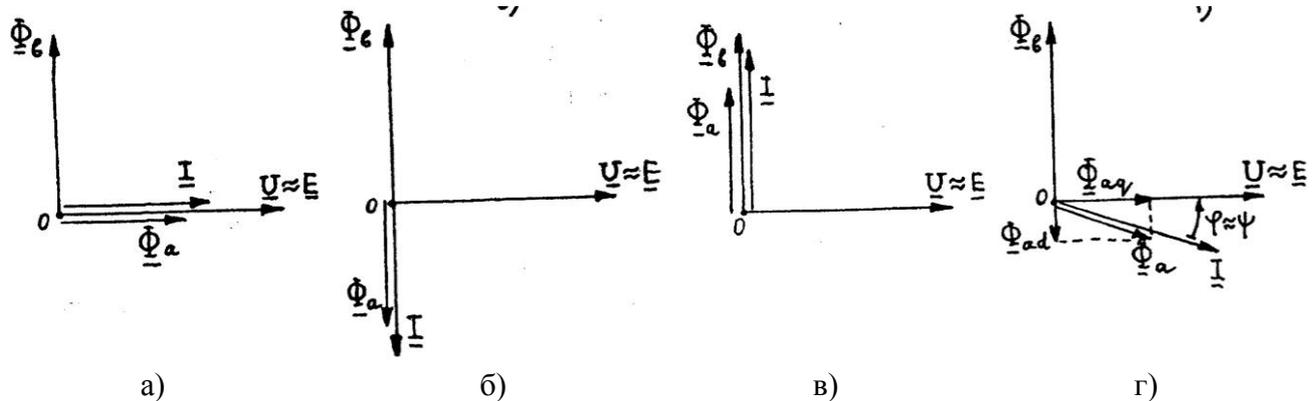


Рис. 5.2. Иллюстрация реакции статора при помощи векторных диаграмм: а, б – начало; в, г – окончание.

На основании векторных диаграмм приходим к выводу:

– когда вектор тока совпадает с вектором ЭДС ($\psi = 0$), магнитный поток, создаваемый обмоткой статора, перпендикулярен магнитному потоку возбуждения. Такая реакция статора называется поперечной. В ненасыщенной магнитной системе это приводит лишь к искажению магнитного потока (поля) возбуждения (рис. 5.2, а).

– при индуктивной и емкостной нагрузках ($\psi = +\pi/2$ или $-\pi/2$ соответственно) поток статора направлен по оси полюсов и в первом случае вычитается из потока возбуждения (реакция статора продольно размагничивающая), тогда как во втором случае потоки имеют одинаковое направление (складываются), а реакция статора называется продольно намагничивающей (рис. 5.2, б, в).

– при смешанной нагрузке (например, активно-индуктивной) реакция статора может быть представлена в виде двух составляющих: поперечной Φ_{aq} и продольной Φ_{ad} (рис. 5.2, г).

Следовательно, действие реакции статора в синхронном генераторе зависит не только от величины нагрузки (силы тока), но и от ее характера (коэффициента мощности – $\cos\varphi$).

Реакция статора оказывает существенное влияние на вид внешней характеристики синхронного генератора. Внешняя характеристика – зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки, при условии постоянства тока возбуждения и коэффициента мощности потребителя:

$$U = \xi(I_{\text{нг}}) \text{ при } I_{\text{в}} = \text{const}, \cos\varphi_{\text{нг}} = \text{const}.$$

На рис. 5.3 представлены типовые внешние характеристики синхронного генератора при различных характерах нагрузки.

Как видно из графика, в случае активно-емкостной нагрузки напряжение на зажимах генератора увеличивается. Подобный эффект имеет место при работе синхронного генератора на длинную линию электропередач, провода которой и земля образуют две обкладки эквивалентного конденсатора и, наряду с активными и индуктивными сопротивлениями, обладают еще и емкостным.

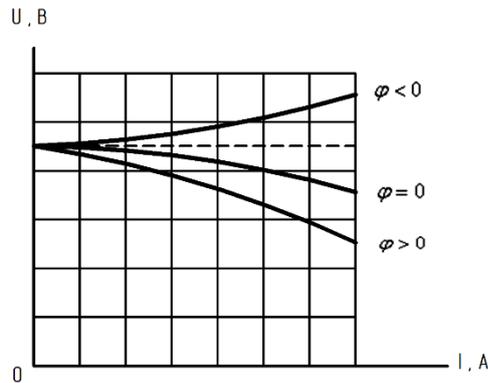


Рис. 5.3. Внешние характеристики синхронного генератора

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с учебной установкой. Записать в протокол испытаний номинальные данные испытуемой машины.

2. Собрать схему установки в соответствии с рис. 5.6.

3. Снять и построить х.х.х. $U_0 = f(I_B)$.

4. Снять и построить характеристику трехфазного короткого замыкания $I_{кз} = f(I_B)$.

5. Снять и построить нагрузочные характеристики $U_\Phi = f(I_B)$, при $I = I_H$;

$n = n_H = const$; $\cos\varphi \approx 0$; $\cos\varphi \approx 1$.

6. Снять и построить четыре внешние характеристики $U_\Phi = f(I)$ при $I_B = const$;

$n = n_H = const$; $\cos\varphi$.

7. Снять и построить регулировочные характеристики $I_B = f(I)$ при $U = U_H = const$; при $\cos\varphi = 1$ и $\cos\varphi = 0,2$; $n = n_H$.

8. Определить индуктивное сопротивление Потье X_p , синхронное индуктивное сопротивление в насыщенном и ненасыщенном состоянии $X_{d\text{ненас}}$; $X_{d\text{нас}}$, отношение короткого замыкания $K_{О.к.з}$.

9. Построить диаграммы ЭМДС при $\cos\varphi = 1$ и $\cos\varphi = 0,2$ (инд.). Определить повышения напряжения и сравнить эти результаты с опытными, полученными из внешних характеристик.

Экспериментальная установка.

Исследование трехфазного синхронного генератора производится на универсальном лабораторном стенде (УЛС) (рис. 5.4), состоящем из силового оборудования и пульта управления. Силовое оборудование: синхронный генератор (СГ) и сочлененный с ним двигатель постоянного тока (ДПТ) смешанного или параллельного возбуждения – размещено на отдельно стоящем фундаменте.

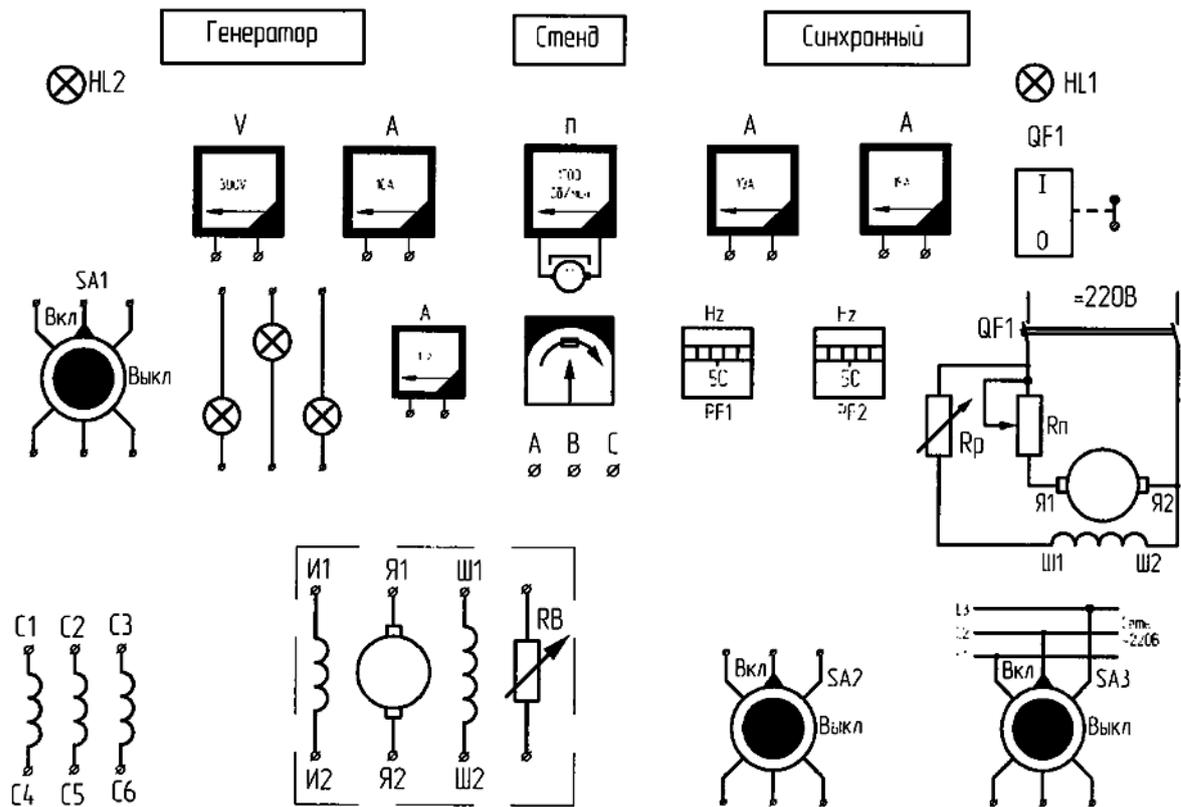


Рис. 5.4. Стенд испытания трехфазного синхронного генератора

Для проведения испытаний используются три вида напряжений: переменное 220 В частотой 50 Гц, постоянное 220 В и выпрямленное 22 В. Для удобства сборки схемы и безопасности проведения эксперимента пункты подключения снабжены сигнальными лампочками HL1, HL2, HL3, расположенными на наборном поле над автоматами QF1, SA1.

Там же находятся клеммы контрольно-измерительных приборов.

Обмотки якоря синхронного генератора C1, C2, C3, C4, C5, C6, индуктора И1, И2 и возбудителя Я1, Я2, Ш1, Ш2 выведены на наборное поле.

Схема приводного ДТП собрана стационарно, и на УЛС выведены автомат питания QF1, ручки управления пусковым реостатом и реостатом цепи возбуждения ДПП R_p , закрепленные на правой стороне пульта управления. Регулируемые индуктивные $X_{нагр}$ и активное $R_{нагр}$ сопротивления нагрузки присоединяются к СГ через выключатели SA1 и SA2.

Для измерения мощности по ходу экспериментов используются комплекты К505 или К50.

Полное снятие напряжения со стенда обеспечивается выключением автомата АП-50, расположенного напротив стенда на стене.

Измерение сопротивления обмотки якоря синхронного генератора.

Для определения сопротивления обмотки статора СМ опытным путем обычно применяется метод амперметра и вольтметра при обтекании обмоток постоянным током. Схема проведения опыта приведена на рис. 5.5.

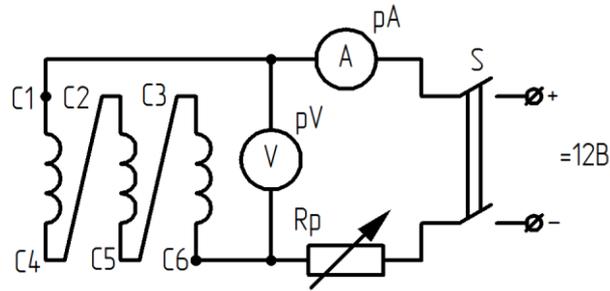


Рис. 5.5. Схема для определения сопротивления обмотки статора

При проведении опыта по схеме 5.5 используются приборы магнитоэлектрической системы класса не ниже 0,2.

В процессе опыта по данной схеме перед включением выключателя S необходимо установить сопротивление регулировочного реостата R_p на максимальное значение, затем, снижая ток, произвести два – три измерения.

Для каждого измерения рассчитать сопротивление фазы обмотки статора по закону Ома:

$$r = \frac{U}{3I}.$$

Среднее их значение по результатам всех измерений привести к температуре $\Theta = 75^\circ \text{C}$:

$$r_{175} = r_1 [1 + \alpha(75 + \Theta_0)],$$

где $\alpha = 0,004$ 1/град; Θ_0 – температура окружающего воздуха.

Снятие характеристики холостого хода (х.х.х.).

Зависимость ЭДС на зажимах генератора от тока возбуждения

$$U_0 = f(I_B) \text{ при } I = 0 \text{ и } n = n_H = \text{const.}$$

Схема опыта представлена на рис. 5.6. (Откл. SA1 и SA2.)

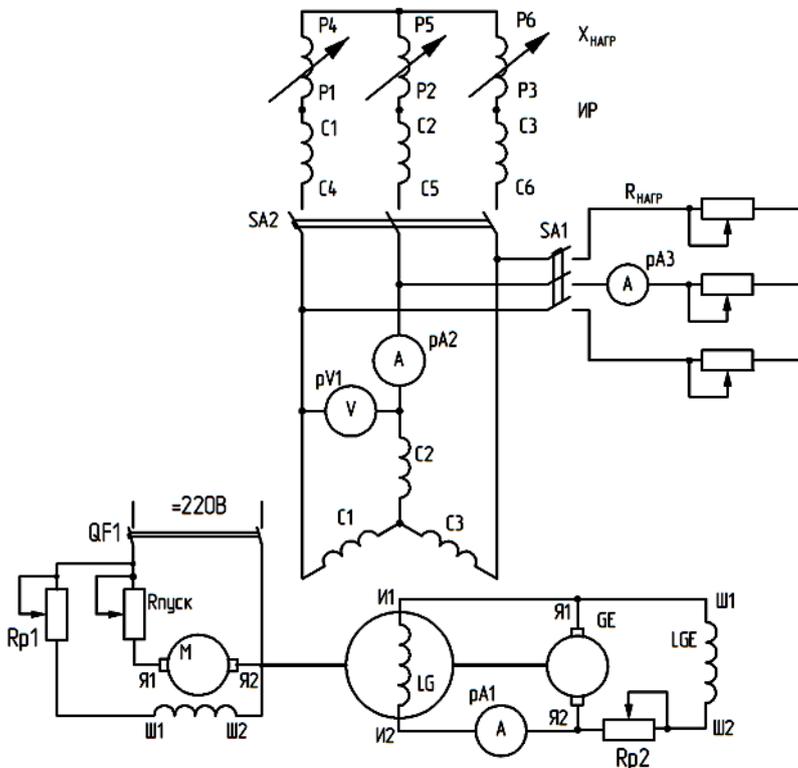


Рис. 5.6. Схема испытаний трехфазного синхронного генератора при включении на автономную нагрузку

Порядок снятия х.х.х. следующий: с помощью первичного двигателя генератор приводят во вращение с номинальной скоростью и подают напряжение на обмотку возбуждения генератора такой величины, чтобы напряжение на зажимах обмотки якоря было равно $(1,2 \div 1,3)U_n$.

Уменьшая ток возбуждения до нуля, снять 6–7 точек характеристики. Показания приборов занести в таблицу 5.1, при этом необходимо следить за тем, чтобы изменение тока возбуждения происходило в одном направлении. Измерить линейное напряжение U_0 , ток возбуждения I_b .

Контролировать постоянство частоты вращения $n = n_n$.

По данным таблицы 5.1 построить х.х.х. $U_0 = f(I_b)$.

Определить из рисунка коэффициент насыщения магнитной цепи машины K_μ для напряжения $U_0 = U_n$.

$$K_\mu = \frac{AC}{AB}$$

Таблица 5.7

$U_0, В$											
$I_b, А$											
$U_\phi, В$											

Примерный вид х.х.х. показан на рис. 5.7.

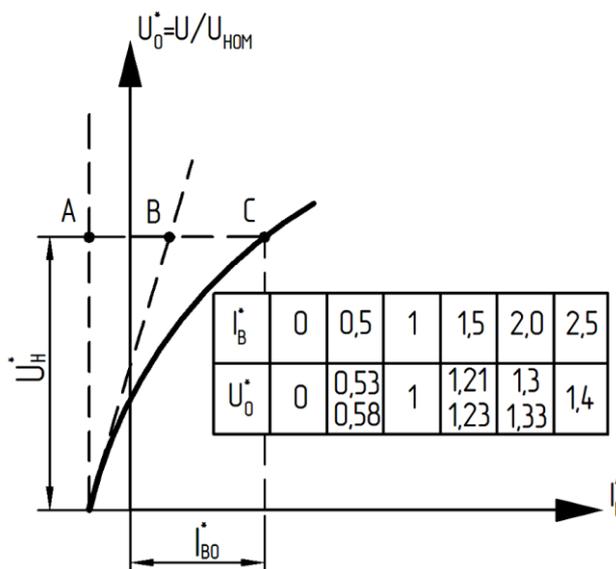


Рис. 5.7. Характеристика холостого хода синхронного генератора

Снятие характеристики трехфазного короткого замыкания.

Опыт трехфазного короткого замыкания проводится по схеме рис. 5.8.

Для этого сначала необходимо установить частоту вращения $n = n_n$ и поддерживать ее постоянной. Далее изменяют ток возбуждения I_b от значения, при котором ток короткого замыкания $I_{кз} = I_n$, до $I_b = 0$. Измеряют ток в трех фазах обмотки статора I , ток возбуждения I_b . Контролируют постоянство частоты вращения $n = n_n$.

Вычисляют среднее значение $I_{кз}$.

Данные опыта записывают в табл. 5.2.

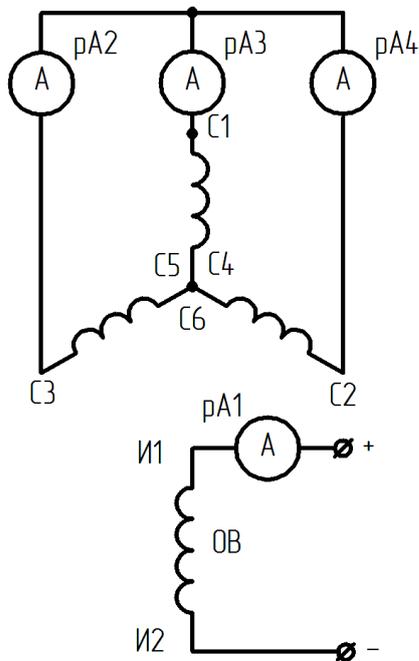


Рис. 5.8. Схема опыта трехфазного короткого замыкания СГ

Таблица 5.2

$I_{кз}, A$						
$I_{в}, A$						

По данным таблицы 5.2 построить зависимость $I_{кз} = f(I_{в})$.

Снятие нагрузочных характеристик.

Нагрузочной характеристикой называется зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения при постоянном значении тока якоря и скорости вращения генератора. Нагрузочные характеристики снимают при активной и индуктивной нагрузках и при номинальной величине тока якоря. Практическое значение имеет индукционная нагрузочная характеристика, снятая при токе якоря, равном номинальному, когда нагрузкой генератора является индуктивность ($\cos\varphi \cong 0$):

$$U = f(I_{в}) \text{ при } I_{а} = I_{н} = \text{const}; \cos\varphi \cong 0.$$

В лаборатории в качестве индуктивной нагрузки используется индукционный регулятор, для которого $\cos\varphi \approx 0,2$.

Схема для снятия нагрузочных характеристик показана на рис. 5.6.

Порядок проведения опыта следующий:

а) установить напряжение на зажимах генератора $U = U_{ном}$ и одновременно с помощью индукционного регулятора установить ток в якоре, равный номинальному; $I_{а} = I_{ном}$;

б) постепенно уменьшить ток возбуждения и тем самым снизить напряжение на зажимах генератора; при этом с помощью индукционного регулятора ток в обмотке якоря поддерживать неизменным и равным первоначальному значению $I = I_{н}$; данные опыта занести в таблицу 5.3;

в) напряжение уменьшить до $U = 0,6U_{н}$, сняв 6–7 точек характеристики.

По данным таблицы 5.3 построить индукционную нагрузочную характеристику $U = f(I_{в})$ на одном рисунке с х.х.х.

Таблица 5.3

$U_{л}, B$							$I = \text{const}$
$I_{в}, A$							
U_{ϕ}, A							$\cos\varphi = 0$
$U_{л}, B$							$I = \text{const}$
$I_{в}, A$							
U_{ϕ}, A							$\cos\varphi = 1$

На рис. 5.9 представлена индукционная нагрузочная характеристика $U = f(I_B)$ и характеристика холостого хода.

Так как при снятии индукционной характеристики в условиях значительного снижения напряжения невозможно поддерживать ток якоря постоянным, то точка «К» может быть определена по характеристике трехфазного КЗ при $I_K = I_n$. Индукционная нагрузочная характеристика располагается значительно ниже х.х. Это объясняется сильным действием продольной реакции якоря при индуктивной нагрузке.

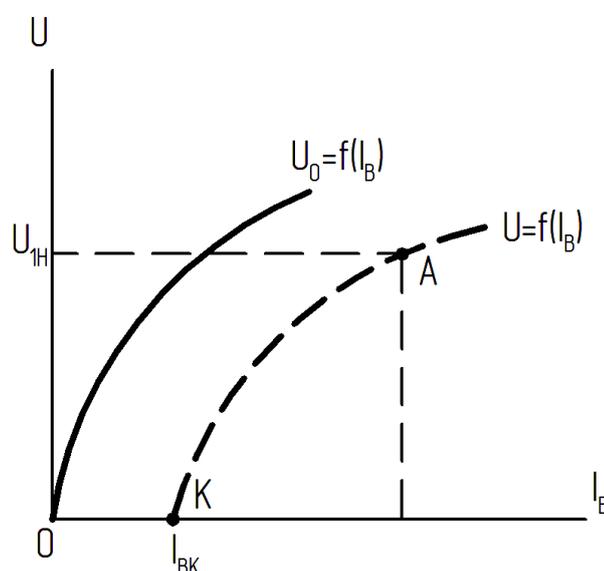


Рис. 5.9. Характеристики холостого хода и индукционная нагрузочная синхронного генератора

Снятие и построение внешних характеристик.

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на зажимах генератора от тока якоря при постоянной величине тока возбуждения, скорости вращения и $\cos\varphi$:

$$U = f(I_a) \text{ при } I_B = \text{const}; n = n_n = \text{const}.$$

Для снятия внешних характеристик используется схема на рис. 5.6. Чтобы снять внешние характеристики при $\cos\varphi = 1$ на понижение напряжения, необходимо установить ток возбуждения I_B такой величины, чтобы напряжение на зажимах генератора при х.х. было равно номинальному.

Затем следует подключить активную нагрузку и, изменяя ток якоря от $I = 0$ до $I = I_n$, при неизменном токе возбуждения $I_B = \text{const}$, записать 6–7 показаний приборов в таблицу 4. После этого можно сразу же снять внешнюю характеристику и на повышение напряжения. Для этого, не отключая активную нагрузку, а изменив ток возбуждения так, чтобы на зажимах генератора напряжение $U = U_{ном}$ при $I_a = I_n$, нужно постепенно уменьшать нагрузку до значения тока якоря $I = 0$, при этом снять 6–7 точек характеристики при неизменном токе

возбуждения $I_B = \text{const}$. Показания приборов записать в таблицу 5.4 (повышение напряжения).

Таблица 5.4

Внешние характеристики при $\cos\varphi = 1$

$U_{л}, B$							Понижение напряжения $I_B = \dots A$
I, A							
U_{Φ}, A							
$U_{л}, B$							Повышение напряжения $I_B = \dots A$
I, A							
U_{Φ}, A							

Чтобы снять внешние характеристики при $\cos\varphi = 0,2$, к генератору подключают только индуктивную нагрузку.

Порядок проведения опыта такой же, что и при $\cos\varphi = 1$. Показания приборов записать в таблицу 5.5.

Форма таблицы 5.5

Внешние характеристики при $\cos\varphi = 0,2$

$U_{л}, B$							Понижение напряжения $I_B = \dots A$
I, A							
U_{Φ}, A							
$U_{л}, B$							Повышение напряжения $I_B = \dots A$
I, A							
U_{Φ}, A							

По данным таблиц 4 и 5 построить все четыре внешние характеристики $U = f(I)$ на одном рисунке и определить процентное понижение напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_H - U}{U_H} 100, \%$$

а также процентное повышение напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_H - U}{U_H} 100, \%$$

при обоих значениях $\cos\varphi$.

Примерный вид внешних характеристик представлен на рис. 5.10.

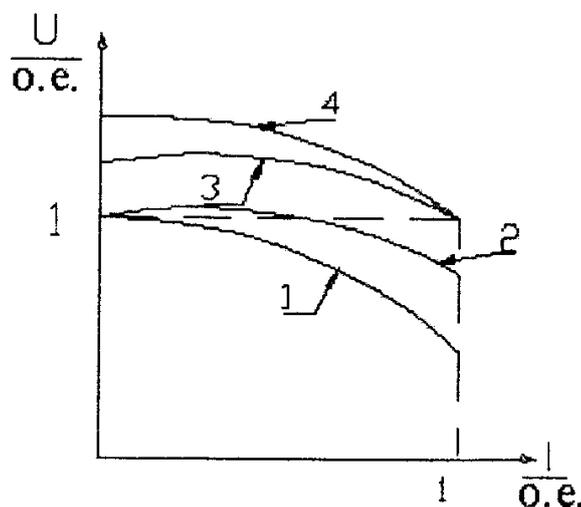


Рис. 5.10. Внешние характеристики: 1,2 – при увеличении нагрузки;
3,4 – при уменьшении нагрузки; 2,3 – при $\cos\varphi=1$

Различный характер кривых объясняется различным влиянием продольной реакции якоря в зависимости от характера нагрузки. Чем ниже ток нагрузки, тем больше изменение напряжения, т.к. в этом случае возрастает продольная размагничивающая составляющая реакции якоря и уменьшается результирующий магнитный поток.

Снятие и построение регулировочных характеристик.

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянном значении скорости вращения, напряжения и $\cos\varphi$:

$$I_B = f(I) \text{ при } U = U_H = \text{const}; \cos\varphi = \text{const}.$$

Регулировочные характеристики при $\cos\varphi=1$, $\cos\varphi=0,2$ снимают с помощью схемы рис. 5.6.

Порядок снятия характеристик следующий: генератор приводят во вращение с номинальной скоростью, затем при отсутствии нагрузки возбуждают до номинального напряжения; записав первую точку характеристики I_{B0} , нагрузку постепенно увеличивают от $I=0$ до $I=I_H$, одновременно регулируя ток возбуждения так, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным, равным номинальному. Данные заносят в таблицу 5.6.

По данным таблицы 5.6 строятся регулировочные характеристики (примерный вид представлен на рис. 5.11).

Таблица 5.6

Регулировочные характеристики

$\cos\varphi=1$	I_B, A					
	I, A					
$\cos\varphi=0,2$	I_B, A					
	I, A					

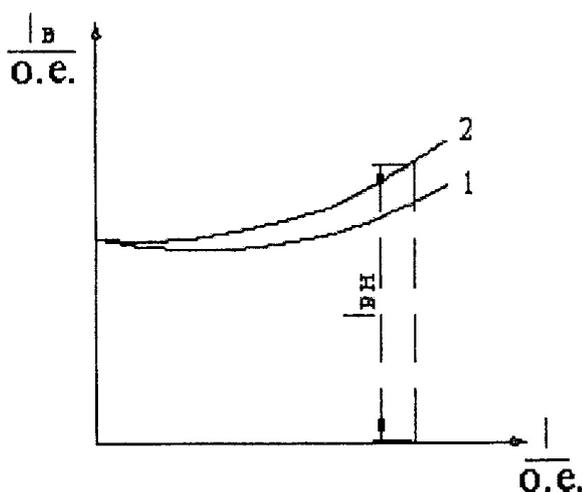


Рис. 5.11. Регулировочные характеристики: 1 – при $\cos\varphi=1$; 2 – при $\cos\varphi=0,2$

Форма отчетности:

Построение характеристик генератора.

Все характеристики строятся в относительных единицах:

$$U^* = \frac{U}{U_{ном}}$$

За номинальный ток возбуждения принимают ток, создающий номинальное напряжение при холостом ходе генератора.

Построить в общих осях координат:

1) характеристику холостого хода $U^* = f(I_B^*)$ по данным табл. 5.1, нормальную характеристику х.х. по данным табл. 5.7 и сравнить эти характеристики;

Таблица 5.7

I_B^*	0,18	0,4	0,6	0,83	1,2	1,48	1,8	2,4	3,4
U_0^*	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

2) нагрузочные характеристики $U^* = f(I_B^*)$ при $\cos\varphi=1$ и $\cos\varphi=0$ по данным табл. 5.3.

Определение сопротивления рассеяния.

Для выполнения этого пункта построить на одном рисунке х.х.х. $E_{0\phi} = f(I_B)$, индукционную нагрузочную характеристику $U_{\phi} = f(I_B)$, характеристику трехфазного короткого замыкания и выполнить все построения так, как это показано на рис. 5.12. По характеристике короткого замыкания (кривая 3) определить ток возбуждения $I_{вк} = OA$, при котором ток КЗ равен номинальному: $I_{к} = I_{н} = DA$. Точка А является исходной для индукционной нагрузочной характеристики (кривая 2).

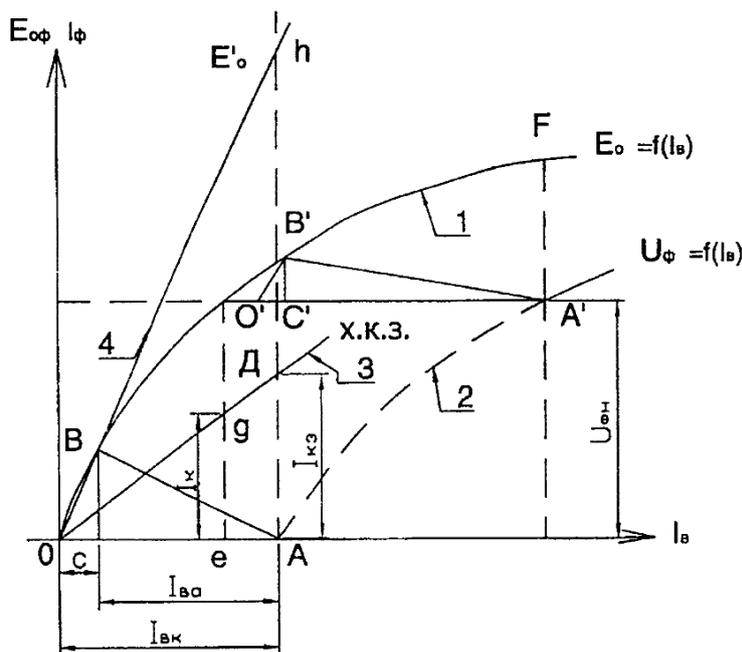


Рис. 5.12. Определение индуктивных сопротивлений $X_{d \text{ ненас}}$, $X_{d \text{ нас}}$ и отношения короткого замыкания (ОКЗ) синхронного генератора

Для построения треугольника Потье и определения индуктивного сопротивления Потье на индукционной нагрузочной характеристике найти точку A' , влево параллельно оси абсцисс отложить отрезок $A'O' = AO = I_{вк}$. Из точки O' параллельно начатой части х.х.х. провести отрезок $O'B'$ до пересечения с х.х.х. Из точки B' опустить перпендикуляр $B'C'$ на отрезок $A'O'$. Треугольник $A'B'C'$ является собой треугольник Потье, где катет $A'C' = K_{aid} I_d$ – ток возбуждения, который компенсирует размагничивающее действие продольной реакции якоря, а катет $C'B' = IX_p$ представляет падение напряжения в сопротивлении Потье. Отсюда можно определить сопротивление X_p :

$$X_p = \frac{C'B'}{I_n}.$$

В относительных единицах

$$X_p = \frac{C'B'}{I_n} \frac{I_n}{U_{\text{фн}}} \text{ (о.е.)}$$

Необходимо определить индуктивные сопротивления и отношения короткого замыкания (ОКЗ) синхронного генератора.

Определение ненасыщенного сопротивления обмотки статора по продольной оси.

Сопротивление обмотки статора X_d можно определить по х.х.х. и трехфазного КЗ. Так как при трехфазном КЗ генератора реакция якоря носит преимущественно размагничивающий характер, то результирующий магнитный поток в этих условиях получается очень небольшим и магнитная система генератора не насыщена. Поэтому при определении индуктивного сопротивления обмотки статора пользуются не действительной х.х.х., а ее прямолинейной частью или продолжением (рис. 5.12). Отношение ЭДС по прямолинейной характеристике трехфазного КЗ дает ненасыщенное значение продольного индуктивного сопротивления $X_{d \text{ ненас}}$, Ом:

$$X_{d \text{ ненас}} = \frac{Ah}{AD} = \frac{E'_0}{I_{\text{кз}}},$$

где $E'_0 = Ah$ – ЭДС в вольтах по спрямленной х.х.х.; $I_{\text{кз}} = AD$ – ток трехфазного КЗ в амперах при токе возбуждения, соответствующем ЭДС.

В относительных единицах

$$X_{d \text{ ненас}}^* = X_{d \text{ ненас}} \frac{I_n}{U_{\text{фн}}} \text{ (о.е.)}.$$

Когда генератор работает в нормальном режиме, его магнитная система всегда имеет некоторое насыщение. Это приводит к уменьшению проводимости продольного потока реакции и соответствующему уменьшению индуктивного сопротивления обмотки статора, которое в этом случае носит название насыщенного синхронного сопротивления по продольной оси $X_{d \text{ нас}}$. Поэтому

$$X_{d \text{ нас}} < X_{d \text{ ненас}}.$$

Насыщенное значение сопротивления $X_{d \text{ нас}}$ можно определить по х.х.х. и индукционной нагрузочной, снятой при токе якоря $I = I_{\text{ном}}$ (рис. 5.12), т.к. в режиме индукционной нагрузочной характеристики при токе возбуждения, соответствующем номинальному напряжению $U = U_{\text{ном}}$, результирующий поток генератора значительно больше, чем при КЗ, когда $U = 0$. Для этого на индукционной нагрузочной характеристике нужно отложить величину номинального напряжения (точка A') и провести вертикальную прямую до пересечения с х.х.х. в точке F . Так как при индуктивной нагрузке реакция якоря носит размагничивающий характер, то отрезок представляет собой падение напряжения в индуктивном сопротивлении обмотки якоря генератора по продольной оси:

$$X_{d \text{ нас}} = \frac{A'F'}{I_n}, \text{ Ом,}$$

где $A'F' = I_n X_{d \text{ нас}}$ – падение напряжения в индуктивном сопротивлении по продольной оси в вольтах.

В относительных единицах:

$$X_{d \text{ нас}}^* = X_{d \text{ нас}} \frac{I_n}{U_{\text{фн}}} \text{ (о.е.)}.$$

Отношение короткого замыкания (ОКЗ).

Отношением короткого замыкания называется отношение тока трехфазного КЗ при токе возбуждения, соответствующем номинальному напряжению при х.х., к номинальному току якоря I_n (рис. 5.12):

$$K_{окз} = \frac{e_q}{AD} = \frac{I_k}{I_n}$$

Построение диаграммы ЭМДС.

Векторная диаграмма ЭМДС служит для определения изменения напряжения при сбросе нагрузки и определения МДС возбуждения при номинальном симметричном режиме генератора. Так как в этом случае во всех фазах процессы протекают одинаково, то диаграмма строится для одной фазы.

Эта диаграмма справедлива для насыщенных неявнополюсных машин, но может быть применена и для явнополюсных машин.

Диаграмма ЭМДС строится обычно для номинального режима генератора, которому соответствует номинальное напряжение $U_{нф}$, номинальный ток $I_{нф}$ и номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi$.

Для построения диаграммы ЭМДС должны быть известны параметры машины r_a и X_p , характеристика холостого хода и МДС реакции якоря F_a .

Диаграмма может быть построена как в именованных, так и в относительных единицах. Порядок построения диаграммы следующий (рис. 5.13).

Сначала необходимо выбрать масштабы для тока и напряжения, чтобы диаграмма разместилась на листе. Затем по горизонтальной оси откладывают вектор тока якоря I_n и под углом φ_n к нему в сторону опережения (для активно-индуктивной нагрузки) вектор напряжения $U_{нф}$.

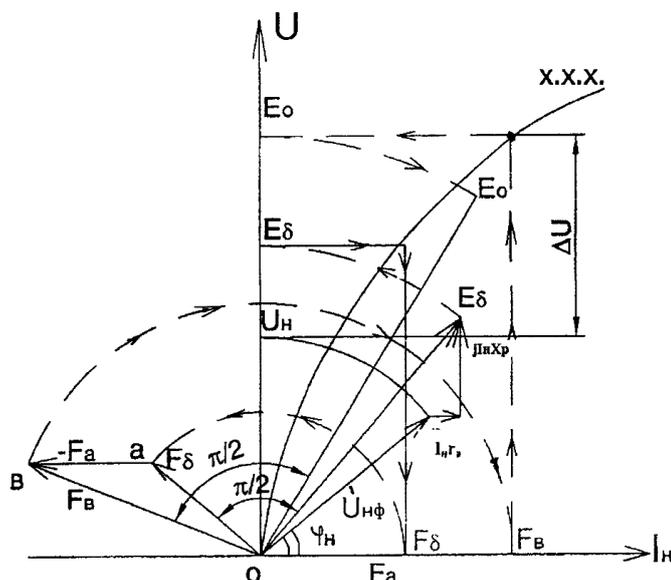


Рис. 5.13. Построение диаграммы ЭМДС синхронного генератора

С вектором напряжения складывают вектор падения напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря $I_n r_a$ по направлению вектора тока и вектор падения напряжения в сопротивлении рассеяния $jI_n X_p$ перпендикулярно к вектору тока в сторону опережения. Полученный вектор E_δ представляет собой ЭДС, которая индуцируется в обмотке якоря результирующим полем при нагрузке генератора. Результирующая МДС \dot{F}_δ состоит из МДС возбуждения \dot{F}_v и реакции якоря \dot{F}_a :

$$\dot{F}_\delta = \dot{F}_a + \dot{F}_v.$$

Вектор результирующей МДС \dot{F}_δ определяют из х.х.х. в масштабе тока возбуждения по найденной ранее ЭДС \dot{E}_δ и откладывают из начала координат перпендикулярно вектору \dot{E}_δ в сторону опережения (Оа).

Для того чтобы определить МДС возбуждения при нагрузке, необходимо сначала найти значение МДС реакции якоря \dot{F}_a . Величина \dot{F}_a может быть определена по х.х.х. и трехфазного КЗ из реактивного треугольника как отрезок AC (рис. 5.12).

Вектор МДС \dot{F}_a совпадает по фазе с вектором тока якоря, поэтому, чтобы найти вектор МДС возбуждения \dot{F}_δ , необходимо из вектора \dot{F}_δ вычесть вектор \dot{F}_a :

$$\dot{F}_\delta = \dot{F}_\delta - \dot{F}_a.$$

Изменение напряжения генератора:

$$\Delta U = \frac{E_{0\phi} - U_{\text{нф}}}{U_{\text{нф}}} 100, \%$$

Найденное значение ΔU необходимо сравнить со значением ΔU , полученным из внешней характеристики.

Форма отчетности:

1. Каково отклонение опытной кривой характеристики холостого хода от нормальной (в процентах)?
2. Объясните взаимное расположение нагрузочных характеристик СГ, снятых при номинальном токе якоря и различном характере нагрузки (активной, индуктивной).
3. Сопоставьте величину тока возбуждения генератора, соответствующую $U = U_{\text{ном}}$, $I = I_{\text{ном}}$, $\cos\phi = 0,2$ и $n = n_n$ (в относительных единицах), из опыта и из диаграммы ЭМДС.
4. Сопоставьте повышение напряжения генератора из опыта и из диаграммы ЭМДС при активной и индуктивной нагрузках.
5. Поясните ход регулировочных характеристик СГ при различных $\cos\phi$.
6. Сопоставьте относительные значения основных параметров со средними значениями, характерными для машин исследуемого типа.

Основная литература:

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Санкт-Петербург: Питер, 2008. - 350 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. - 8-е изд., стереотип. - М.: Академия, 2008. - 496 с.
3. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. - Братск: БрГУ, 2009. - 180 с.

Дополнительная литература:

1. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.
2. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1973 - Ч.2. Машины переменного тока. - 648 с.: ил. - Б. ц.
3. Осин, И. Л. Электрические машины. Синхронные машины: учебное пособие / Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1990. - 303 с.: ил.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Почему при снятии характеристик синхронного генератора необходимо поддерживать постоянную частоту вращения?
2. Синхронный генератор работает на активно-индуктивную нагрузку. Как нужно регулировать ток возбуждения при увеличении нагрузки, чтобы напряжение генератора оставалось постоянным?
3. При сбросе активно-индуктивной нагрузки напряжение генератора повышается на ΔU . Как зависит величина ΔU от коэффициента мощности нагрузки?
4. Имеются два одинаковых генератора. Первый генератор работает на активно-индуктивную нагрузку с $\cos\varphi=0,8$, а второй – на активную нагрузку. Напряжения и токи нагрузки у них равны. Сравните их токи возбуждения.
5. Объясните конструкцию исследуемой синхронной машины.
6. По какой характеристике определяют процентное изменение напряжения генератора?
7. Каков порядок построения векторной диаграммы Потье?
8. Чем обусловлено различие между двумя реактивностями: X_p – Потье и рассеяния обмотки статора X_σ ?
9. Имеются два одинаковых генератора. Первый работает на активно-емкостную нагрузку с $\cos\varphi=0,8$, а второй – на активную нагрузку. Напряжения и токи статора у них одинаковы. Сравните их токи возбуждения.
10. Номинальные данные СГ: $U_n=125\text{В}$, $I_n=10\text{А}$, $X_c=12\text{Ом}$. Используя упрощенную векторную диаграмму в масштабе 50 В/см, построить внешнюю характеристику при емкостной нагрузке.
11. Как построить векторную диаграмму ЭДС (Блонделя) для номинального режима работы СГ? Определить ток возбуждения и повышение напряжения при сбросе нагрузки (номинальной).
12. Как построить диаграмму ЭМДС (Потье) СГ при номинальном напряжении и неизменном значении активной мощности для $\cos\varphi=0,75$ и определить по ней процентное повышение напряжения при сбросе нагрузки?
13. Какая характеристика СГ называется «индукционной нагрузочной»? Как ее снять на исследуемой машине? Как определить точку пересечения этой характеристики с осью абсцисс?

Лабораторная работа № 6

Параллельная работа трехфазного синхронного генератора с сетью

Цель работы: рассмотрение специфических для параллельной работы вопросов: включение генераторов, распределение активных и реактивных нагрузок в различных режимах, устойчивость.

Краткие теоретические сведения.

Синхронные машины в большинстве случаев работают параллельно друг с другом, образуя сложную систему. При простейшем анализе процессов в этой системе обычно считают, что суммарная мощность всех машин в ней является бесконечно большой по отношению к мощности рассматриваемой машины. Такое допущение позволяет заменить все синхронные машины, за исключением исследуемой, сетью бесконечной мощности с постоянным напряжением U_c и частотой f_c . Для совместной работы отдельной синхронной машины с сетью необходимо осуществить их синхронизацию, то есть выровнять напряжение и частоты. Процесс выравнивания может происходить либо путем воздействия на возбуждение и вращающий момент отключенной от сети машины с последующим включением ее в сеть и момент совпадения напряжений машины и сети по фазе (точная

синхронизация), либо за счёт внутренней синхронизирующей мощности машины при ее включении в сеть в произвольный момент (самосинхронизация).

После завершения процесса синхронизации напряжение и частота машины остаются постоянными. Это обстоятельство определяет ряд особенностей параллельной работы синхронной машины с сетью бесконечной мощности.

Во-первых, постоянное напряжение синхронной машины означает и практическое постоянство ее результатов потока. Намагничивающая сила (НС), необходимая для этого потока, создаётся совместным действием тока возбуждения и реактивной составляющей тока статора. При постоянстве тока НС тоже должна быть постоянной. Отсюда появляется возможность регулирования реактивной составляющей тока статора, а следовательно, и реактивной мощности машины за счёт изменения ее тока возбуждения. Такое регулирование имеет большое практическое значение, так как позволяет повысить пределы статической и динамической устойчивости.

Исследование свойств машины при регулировании ее тока возбуждения производится с помощью U -образных характеристик.

Вторая особенность состоит в том, что скорость вращения поля статора постоянна, так как $f_1 = \text{const}$. Поэтому для обеспечения длительной устойчивости машины в сети необходимо, чтобы скорость вращения ее ротора n тоже была постоянной (синхронной). Это постоянство поддерживается за счёт равенства электромагнитного момента машины M и момента $M_{\text{ст}}$, приложенного к её валу.

Любое изменение $M_{\text{ст}}$ ведет к отключению скорости вращения ротора от синхронной. При этом изменяется пространственное положение поля возбуждения по отношению к полю статора, что приводит к появлению электромагнитного момента, компенсирующего изменение момента $M_{\text{ст}}$. Скорость вращения ротора вновь становится синхронной.

Отсюда следует, что, регулируя момент на валу машины, можно регулировать ее электромагнитный момент, а следовательно, и величину активной мощности P . В зависимости от направления потока активной мощности различают генераторный (активная мощность отдается в сеть) и двигательный (активная мощность потребляется из сети) режимы работы синхронной машины.

Следует, однако, отметить, что как в двигательном, так и в генераторных режимах регулирование активной мощности не может быть безграничным. При определенном положении поля возбуждения по отношению к результирующему полю электромагнитный момент машины достигает максимума M_{max} , и если при этом момент $M_{\text{ст}}$ окажется больше M_{max} , то скорость ротора будет продолжать изменяться и машина «выпадает из синхронизма». Для определенных возможных пределов регулирования активной мощности и оценки устойчивости пользуются угловой характеристикой машины $P = f(\theta)$.

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с установкой. Записать в протокол испытаний номинальные данные испытуемой машины.

2. Собрать схему установки в соответствии с рис. 6.2.

3. Включить синхронную машину в сеть методом точной синхронизации.

4. Снять угловые характеристики синхронной машины $P = f(\theta)$ при $I_{\text{в}} = \text{const}$ в двух вариантах:

а) при токе возбуждения холостого хода $I_{\text{в}} = I_{\text{в0}}$;

б) при токе возбуждения $I_{\text{в}} = 1,2I_{\text{в0}}$.

5. Снять и построить U -образные характеристики синхронной машины $I = f(I_{\text{в}})$ при $P = \text{const}$, $U = \text{const}$, $f = \text{const}$ в двух вариантах:

а) при мощности $P = 0$, отдаваемой в сеть;

б) при мощности $P = 0,5 P_{\text{н}}$, отдаваемой в сеть.

6. Осуществить включение генератора на параллельную работу методом самосинхронизации (грубой синхронизации).

Экспериментальная установка.

Исследование параллельной работы синхронного генератора с сетью проводится на универсальном стенде (УЛС), состоящем из силового оборудования и пульта управления (рис. 6.1).

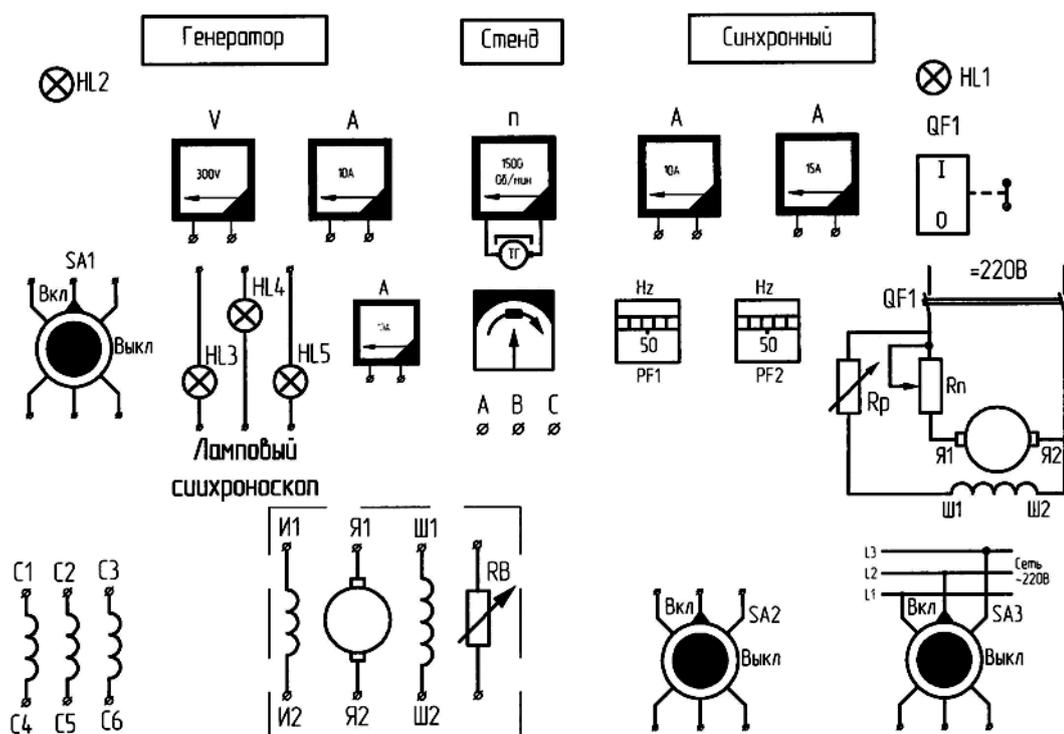


Рис. 6.1. Стенд испытания трехфазного синхронного генератора

Силовое оборудование, синхронный генератор (СГ) и сочленённый с ним двигатель постоянного тока (ДПТ) размещены на отдельно стоящем фундаменте.

Для проведения эксперимента используется три вида напряжений: переменное напряжение 220 В частотой 50Гц, постоянное напряжение 220 В и выпрямленное 22 В. С целью удобства сборки схемы и безопасности проведения эксперимента пункты подключения снабжены сигнальными лампочками HL1, HL2, расположенными на наборном поле над автоматами QF1 и SA1. Там же размещены клеммы контрольно-измерительных приборов.

Обмотки якоря синхронного генератора C1, C2, C3, C4, C5, C6, индуктора И1, И2 и возбуждателя Я1, Я2, Ш1, Ш2 выведены на наборное поле.

Схема приводного двигателя ДПТ собрана стационарно и показана на наборном поле. Питание ДПТ – от автомата QF1, а ручки управления пускового реостата $R_{пуск}$ и реостата в цепи возбуждения (R_{p1}) ДПТ расположены на корпусе УЛС. На наборном поле установлены лампы синхроскопа HL3, HL4, HL5 и автомат SA1, используемые для включения СГ в сеть по методу точной синхронизации.

Для определения мощности по ходу эксперимента используются измерительные комплекты типа К505 или К50.

Полное снятие напряжения со стенда обеспечивается выключением сетевого автомата АП-50, расположенного напротив УЛС на стене.

Исследования необходимо проводить в определенной последовательности:

1. Ознакомиться с установкой. Записать в протокол испытаний данные исследуемой синхронной машины.
2. Собрать схему в соответствии с рис. 6.2.
3. Включить синхронную машину в сеть методом точной синхронизации с помощью лампового синхроскопа. Для этого разогнать синхронную машину приводным двигателем ДПТ до подсинхронной скорости. Затем возбудить синхронный генератор и установить напряжение, близкое к номинальному. Поскольку лампы синхроскопа находятся под разностью напряжений сети U_c и синхронной машины U_r , они начинают мигать, регулируя частоту вращения ДПТ. Необходимо добиться прекращения этих миганий, а регулируя возбуждение синхронной машины, выровнять напряжения. Выключатель SA1 включается в момент, когда все лампы синхроскопа погаснут.

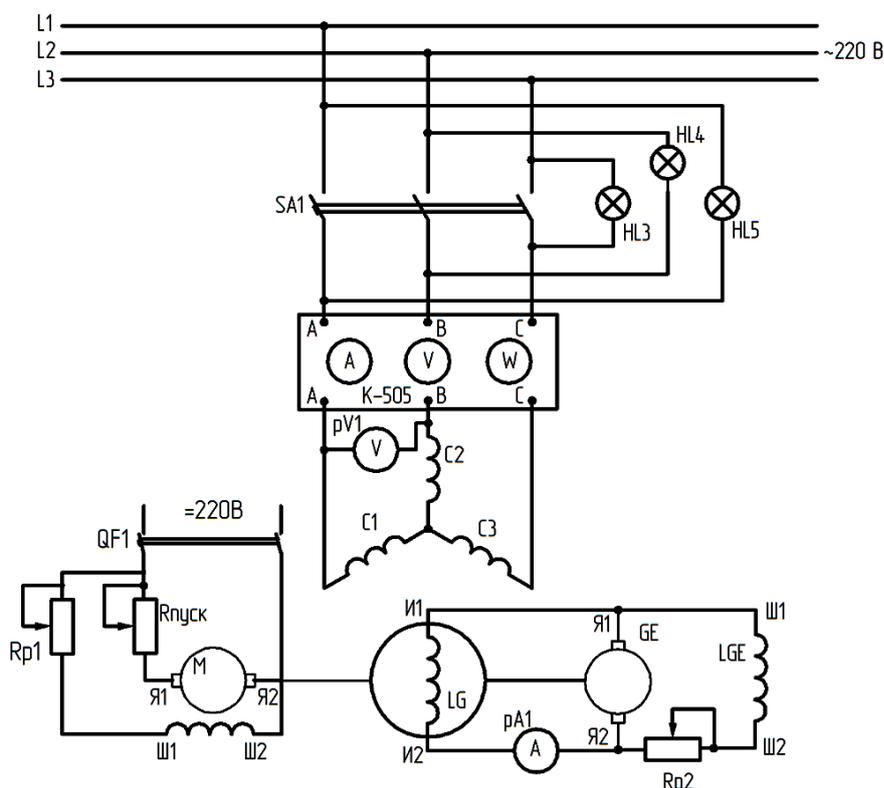


Рис. 6.2. Схема испытаний трехфазного синхронного генератора при включении на параллельную работу с сетью

Для включения генератора на параллельную работу с сетью, следует:

- а) привести во вращение приводной двигатель синхронного генератора;
 - б) включением сетевого автомата АП-50 и пакетного выключателя SA3 подать напряжение сети на шины параллельной работы; проверить по вольтметру напряжение U_1 (на ключе SA1);
 - в) возбудить СГ и, увеличивая ток возбуждения, поднять напряжение подключаемого генератора до значения, равного напряжению сети $U_r = U_1 = U_c$ (изменяя величину R_{p2});
 - г) одновременно изменением тока возбуждения приводного двигателя регулировать скорость синхронного генератора, добиваясь медленного затухания и загорания ламп синхроскопа (при включении ламп «на потухание»);
 - д) подключить генератор к сети выключателем в момент полного потухания ламп.
4. Снять угловые характеристики, при этом, чтобы нагрузить генератор, работающий параллельно с сетью, следует увеличить приложенный к его валу вращающий момент, т.е. момент приводного двигателя.

Для увеличения вращающего момента при постоянстве скорости вращения (скорость вращения СГ определяется частотой сети) необходимо уменьшить ток возбуждения приводного двигателя.

Незначительное уменьшение магнитного потока и ЭДС ДПТ вызывает заметное возрастание тока якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{дв}}}{R_{\text{а}}},$$

а также вращающего момента $M = I_{\text{я}}\Phi$. Для того чтобы увеличить вращающий момент на валу СГ, следует уменьшить ток возбуждения приводного двигателя постоянного тока.

Угловые характеристики снимают при токах возбуждения $I_{\text{в}} = I_{\text{в0}}$; $I_{\text{в}} = 1,2I_{\text{в0}}$.

Мощность можно увеличивать до тех пор, пока ток якоря не достигнет значения $I = 1,5I_{\text{н}}$ или пока генератор работает устойчиво.

Показания приборов записать в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Угловые характеристики при $I_{\text{в}} = I_{\text{в0}}$; $I_{\text{в}} = 1,2I_{\text{в0}}$.

Из опыта		Из расчета			
$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$I \cos\varphi = P/3U$	$I'_{\text{в}} = I_{\text{в}} / K_i$	$\sin \Theta = I \cos\varphi / I'_{\text{в}}$	Θ°

Здесь $I'_{\text{в}} = I_{\text{в}} / K_i$ – ток возбуждения, приведённый к току якоря; $K_i = 0,168$ – коэффициент приведения тока возбуждения к току якоря; $P = mUI \cos\varphi$ – активная мощность генератора.

5. Снять U-образные характеристики – они определяют зависимость тока статора генератора I_1 от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ (рис. 6.2) – при $P = 0$:

а) Выполнив условия синхронизации, включить генератор на параллельную работу с сетью.

б) Регулируя момент приводного двигателя (изменением его тока возбуждения), установить активную нагрузку генератора; $P \approx 0$, при этом ток в цепи статора I_1 близок к нулю, что соответствует режиму холостого хода синхронного генератора.

в) Контроль за активной мощностью P синхронного генератора вести по показаниям измерительного комплекта К505.

г) Уменьшив ток возбуждения генератора до величины, при которой ток I_1 в статоре станет равным номинальному или немного больше его, записать первую точку левой ветви U-образной характеристики. Постепенно увеличивая ток возбуждения генератора, снять 3–4 точки любой ветви, зафиксировать минимальный ток статора, а затем, увеличивая ток $I_{\text{в}}$, снять 3–4 точки правой ветви характеристики. Данные измерений занести в табл. 6.2. Форма таблицы представлена ниже.

д) Для снятия U-образных характеристик при $P = 0,5P_{\text{н}}$ предварительно нагрузить генератор до соответствующей мощности, изменяя момент приводного двигателя.

е) Установить активную нагрузку генератора $P = 0,5P_{\text{н}}$ при $\cos\varphi = 1$ ($\cos\varphi$ генератора регулируется его током возбуждения); величину активной нагрузки определить по показаниям комплекта К505 (при $\cos\varphi = 1$).

ж) Оставляя нагрузку двигателя постоянной (т.е. не меняя вращающего момента приводного двигателя), изменить ток возбуждения генератора в сторону увеличения от значения, соответствующего минимальному току статора ($\cos\varphi = 1$), и в сторону уменьшения (табл. 6.2).

U-образная характеристика синхронного генератора

P = 0	I, A								
	I _B , A								
P = 0,5P _H	I, A								
	I _B , A								
	cosφ								

Примерный вид характеристики представлен на рис. 6.3. Каждую из характеристик снимают при постоянной активной мощности, отдаваемой генератором. Следовательно, активная составляющая тока якоря при изменении тока возбуждения остаётся неизменной. Для каждой из характеристик она равна наименьшему значению тока якоря (I_{\min}). Ток возбуждения, соответствующий минимуму тока якоря, носит название нормального тока возбуждения. Всякое отклонение величины тока возбуждения нормального влечёт увеличение тока якоря за счёт возрастания его реактивной составляющей.

6. Осуществить включение генератора на параллельную работу методом самосинхронизации (грубой синхронизации).

Метод заключается в следующем. Синхронный генератор приводят во вращение приблизительно с синхронной частотой вращения ($n \approx 0,98n_c$). Обмотку возбуждения предварительно замыкают на сопротивление R_r , в 6–10 раз превышающее сопротивление обмотки возбуждения. Включают выключатель S1 и сразу же переключают обмотку возбуждения с R_r на источник напряжения постоянного тока (выключатель S1 настольный).

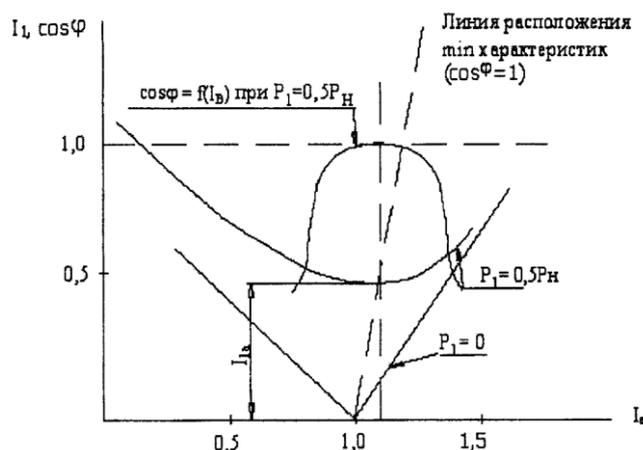


Рис. 6.3. U-образные характеристики синхронного генератора

Под действием возникающего электромагнитного момента ротор машины, совершив несколько колебаний, входит в синхронизм. При включении выключателя S1 наблюдается толчок тока. Порядок чередования фаз генератора и сети должен быть одинаковым.

Форма отчетности:

1. По данным табл. 6.1 построить в одних осях зависимость $P = f(\theta)$ для двух значений тока: $I_B = I_{B0}$ и $I_B = 1,2I_{B0}$.

По параметрам синхронной машины, полученным в работе №1, рассчитать эти зависимости в диапазоне изменения θ (от $\theta = 0$ до $\theta = \pm\pi$) и объяснить их расхождение с результатами опытов.

2. По данным табл. 6.2 построить зависимость $I = f(I_B)$, $\cos\varphi = f(I_B)$ в одних координатных осях. Объяснить характер полученных кривых с помощью векторных диаграмм.

3. Сравнить между собой и оценить методы точной и грубой синхронизации.

Основная литература:

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Санкт-Петербург: Питер, 2008. - 350 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.
3. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с.

Дополнительная литература:

1. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.
2. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1973 - Ч.2. Машины переменного тока. - 648 с.: ил. - Б. ц.
3. Осин, И. Л. Электрические машины. Синхронные машины: учебное пособие / Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1990. - 303 с.: ил.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Как осуществляется регулирование реактивной мощности синхронного генератора при работе его параллельно с мощной сетью?
2. При каких условиях снимается U-образная характеристика синхронного генератора?
3. Как осуществить регулирование активной мощности генератора при работе его параллельно с мощной сетью?
4. Как включается синхронный генератор в сеть методом самосинхронизации?
5. Что произойдёт, если при включении генератора в сеть методом точной синхронизации напряжение сети будет больше напряжения генератора? (Остальные условия выполнены.)
6. Что значит выпадение из синхронизма? Как это явление влияет на работу синхронной машины?
7. Запишите общее выражение электромагнитной мощности для явнополюсного СГ.
8. Постройте зависимость $P_{эм} = f(\theta)$ неявнополюсного СГ. Как изменится эта зависимость, если уменьшить ток возбуждения в полтора раза?
9. Постройте U-образную характеристику при $P \neq 0$. Изобразите векторную диаграмму неявнополюсного СГ в режиме, соответствующем точке A, когда ток I минимален.
10. СГ работает параллельно с сетью. Как изменится векторная диаграмма, когда оператор увеличит ток возбуждения генератора?
11. Объясните работу лампового синхроскопа в схеме «на вращение света».
12. Постройте U-образную кривую, соответствующую $P = 0$. Определите, какова МДС реакции якоря в режиме, соответствующем точке A?
13. Изобразите угловую характеристику явнополюсного СГ.
14. Постройте векторную диаграмму СМ в двигательном и генераторном режимах.

Лабораторная работа № 7

Исследование генератора постоянного тока при различных схемах возбуждения

Цель работы: изучить устройство генератора постоянного тока. Приобрести практические навыки в сборке схем и опытным исследованием генератора в плане определения его основных характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах генератора постоянного тока при различных схемах возбуждения.

Краткие теоретические сведения.

В режиме генератора машина работает тогда, когда ее якорь приводится во вращение каким-либо первичным двигателем, главное магнитное поле возбуждено, а обмотка якоря через щетки замкнута на нагрузку.

В зависимости от способа создания магнитного потока возбуждения машины делятся на две группы: магнитоэлектрические и электромагнитные. В первых магнитный поток возбуждения создается при помощи постоянных магнитов; во вторых – постоянным током, проходящим по обмотке, расположенной на главных полюсах.

В данном разделе мы будем рассматривать электрические машины с электромагнитным способом возбуждения, т.к. они получили наибольшее распространение в различных отраслях промышленности. Машины с магнитоэлектрическим способом возбуждения в качестве элементов устройств автоматики применяются как исполнительные механизмы следящих систем и, поскольку относятся к машинам малой мощности, являются предметом специального рассмотрения.

В зависимости от того, как соединяется обмотка возбуждения относительно обмотки якоря, различают четыре типа машин постоянного тока:

- машины независимого возбуждения, в которых обмотка возбуждения и обмотка якоря подключаются к различным источникам (рис. 7.1, а);
- машины параллельного возбуждения, в которых обмотка возбуждения включается параллельно обмотке якоря (рис. 7.1, б);
- машины последовательного возбуждения, в которых обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря (рис. 7.1, в);
- машины смешанного возбуждения, в которых имеются две обмотки возбуждения: последовательная и параллельная (рис. 7.1, г).

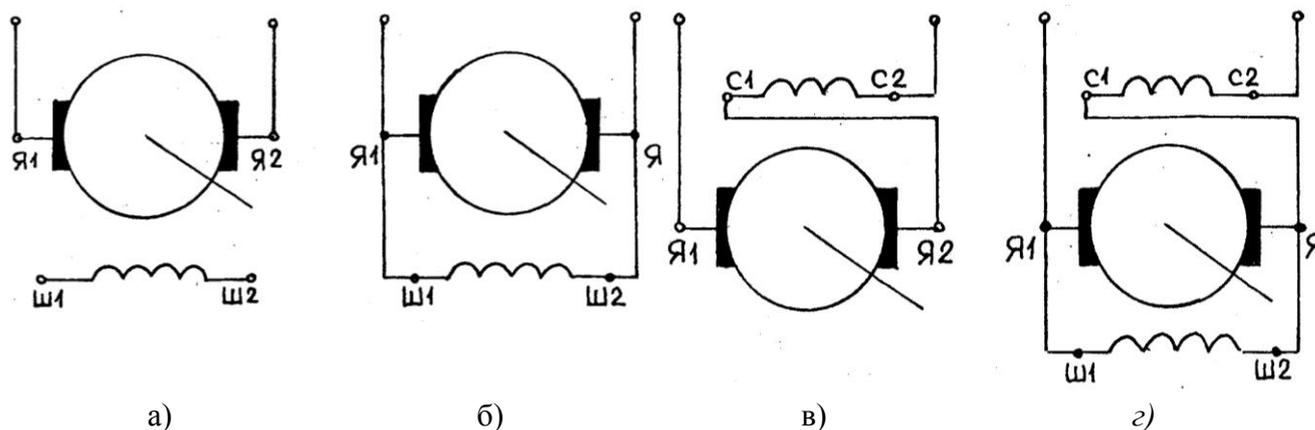


Рис. 7.1. Условные обозначения машин постоянного тока на электрических схемах

Способ соединения обмотки возбуждения с обмоткой якоря оказывает существенное влияние на характеристики генераторов и двигателей. Рассмотрим свойства машин постоянного тока в зависимости от режима их работы.

Генераторы постоянного тока.

При эксплуатации машин постоянного тока в генераторном режиме важно знать три основные характеристики, выражающие зависимость одних переменных величин от других.

К ним относятся: характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная характеристики.

Характеристика холостого хода – зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения при отсутствии тока в обмотке якоря и постоянной частоте его вращения, т.е.

$$U_r = \xi(I_b) \text{ при } I_a = 0, n = \text{const}.$$

Для снятия этой характеристики якорь генератора приводят во вращение вспомогательным устройством, например асинхронным двигателем. Цепь якоря размыкается. Ток в обмотке возбуждения изменяется от нуля до максимального значения и обратно до нуля. При увеличении тока получают восходящую ветвь характеристики; при уменьшении тока – нисходящую ветвь. Особое внимание следует обратить на наличие напряжения на зажимах обмотки якоря при равенстве нулю тока в обмотке возбуждения. Причиной появления напряжения является магнитный поток остаточной индукции, сохраняющийся в магнитной цепи машины от ее предыдущей работы.

Характеристика холостого хода есть средняя линия, проходящая посередине между ветвями петли гистерезиса. В режиме холостого хода напряжение генератора равно по величине его ЭДС.

Данная характеристика позволяет судить о свойствах стали якоря и выбрать положение рабочей точки, соответствующей номинальному напряжению.

Внешняя характеристика – это зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянстве сопротивления цепи возбуждения и частоты вращения якоря, т.е.

$$U_r = \xi(I) \text{ при } R_b = \text{const}, n = n_n = \text{const}.$$

В режиме нагрузки напряжение генератора меньше его ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки якоря:

$$U_r = E_r - I_a R_a.$$

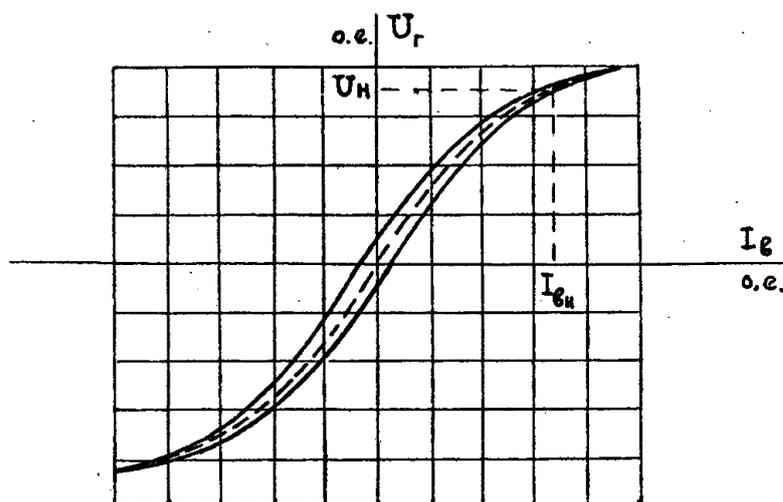
Внешняя характеристика генератора нелинейна. Причина нелинейности обусловлена воздействием магнитного потока обмотки якоря на магнитный поток обмотки возбуждения. Взаимодействие магнитных потоков приводит к неравномерности насыщения полюсного наконечника главного полюса машины.

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянстве напряжения на зажимах генератора и частоты вращения якоря, т.е.

$$I_b = \xi(I) \text{ при } U_r = \text{const}, n = n_n = \text{const}.$$

Характеристика показывает, как надо изменять силу тока в обмотке возбуждения, для того чтобы обеспечить постоянство напряжения на зажимах генератора, при изменении тока нагрузки.

Вид характеристик генератора постоянного тока с независимым возбуждением приведен на рис. 7.2. Характеристики генераторов других типов обычно рассматриваются в сравнении с характеристиками генератора с независимым способом возбуждения.



Порядок выполнения:

1. Снять характеристику холостого хода генератора с независимым возбуждением:

$$U = f(I_B) \text{ при } I_a = 0, n = \text{const.}$$

2. Снять нагрузочную характеристику генератора с независимым возбуждением:

$$U = f(I_B) \text{ при } I_a = \frac{1}{2} I_{ан}, n = \text{const.}$$

3. Снять внешнюю характеристику генератора с независимым возбуждением:

$$U = f(I_a) \text{ при } I_B = \text{const, } n = \text{const.}$$

4. Снять регулировочную характеристику генератора с независимым возбуждением:

$$I_B = f(I_a) \text{ при } U = \text{const, } n = \text{const.}$$

5. Снять внешнюю характеристику генератора с параллельным возбуждением:

$$U = f(I_a) \text{ при } R_B = \text{const, } n = \text{const.}$$

6. Снять регулировочную характеристику генератора с параллельным возбуждением:

$$I_B = f(I_a) \text{ при } U = \text{const, } n = \text{const.}$$

7. Снять две внешние характеристики генератора со смешанным возбуждением для случая согласного и встречного включения обмоток:

$$U = f(I_a) \text{ при } R_B = \text{const, } n = \text{const.}$$

8. Снять регулировочную характеристику генератора со смешанным возбуждением при согласном включении обмоток:

$$I = f(I_a) \text{ при } U = \text{const, } n = \text{const, } I_B = f(I_a).$$

Экспериментальная установка.

Исследование генератора постоянного тока (ГПТ) проводится на универсальном лабораторном стенде (УЛС) (рис. 7.3), состоящем из силового оборудования и пульта управления. Силовое оборудование: генератор постоянного тока (ГПТ) и сочлененный с ним асинхронный двигатель переменного тока (АД) – размещено на отдельно стоящем фундаменте.

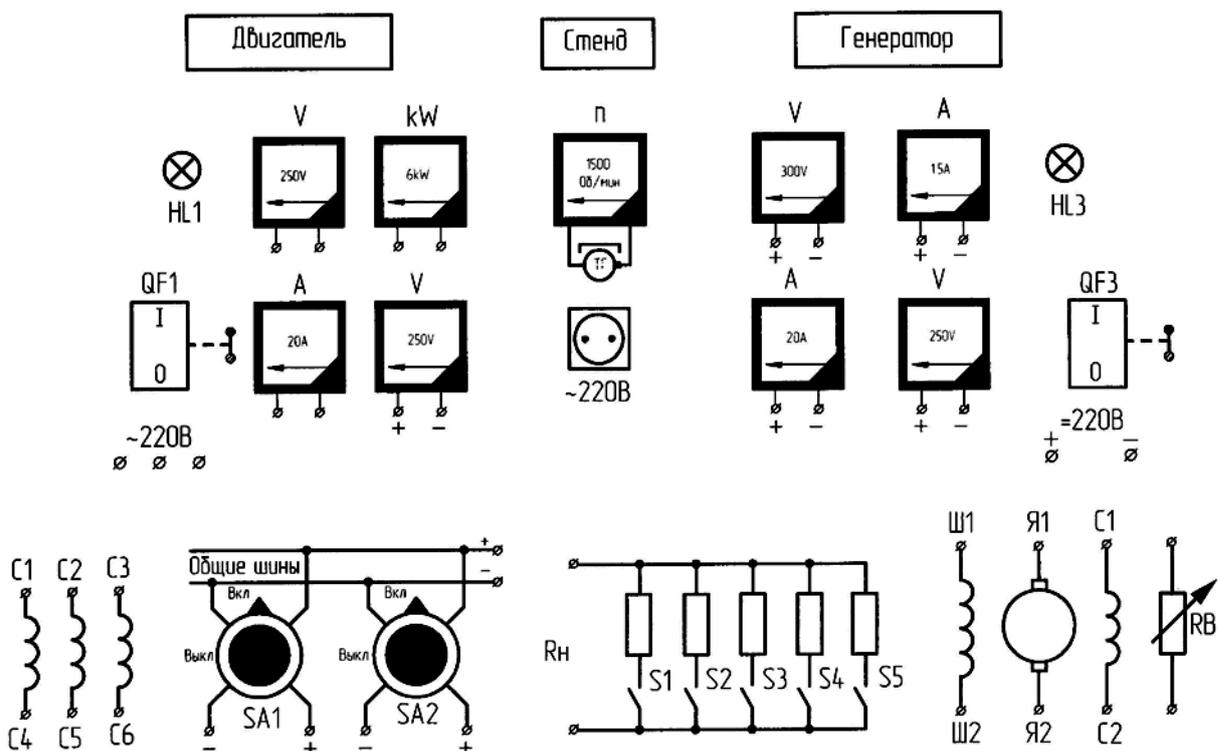


Рис. 7.3. Стенд испытания генератора постоянного тока

Для проведения испытаний используются два вида напряжений: переменное напряжение – 220 В, частотой 50 Гц для питания асинхронного двигателя (АД), постоянное напряжение – 220 В для питания обмотки возбуждения (ОВ) при питании ее от возбудителя. С целью удобства сборки схемы и безопасности проведения эксперимента пункты подключения снабжены сигнальными лампочками HL1, HL3, расположенных на наборном поле над автоматами QF1, QF3.

Там же размещены клеммы контрольно-измерительных приборов. Обмотки приводного асинхронного двигателя (М) С1, С2, С3, С4, С5, С6 и исследуемого генератора постоянного тока (G) Я1, Я2, Ш1, Ш2, С1 и С2 выведены на наборное поле. Реостат РСП, включаемый в цепь возбуждения, закреплен на УЛС, а зажимы RB выведены на наборное поле.

Для нагрузки генератора используется нагрузочное сопротивление $R_{нr}$, ступенчатый металлический реостат. Включение ступеней реостата осуществляется выключателями S1, S2, S3, S4, S5. Значение частоты вращения показывает прибор PS, подключенный к выходной обмотке тахогенератора (BR), присоединенного к валу исследуемого генератора G.

Полное снятие напряжения со стенда обеспечивается выключением автомата АП-50, расположенного против УЛС на стене.

Порядок выполнения:

Измерение сопротивлений обмоток.

Сопротивления обмоток электрических машин постоянного тока измеряют способом амперметра и вольтметра и приводят к температуре $75^{\circ}C$.

Так как сопротивления обмотки якоря и добавочных полюсов малы (см. рис. 7.4) то питание схемы следует производить от источника постоянного тока напряжением 3–5 В. Сопротивление регулировочного реостата R_p выбирают так, чтобы им можно было изменять ток в цепи в пределах от 10 до 20 % номинального значения тока обмоток:

$$r_{175^{\circ}} = r_1[1 + \alpha(75 + \Theta)],$$

где $\alpha = 0,004$ 1/град; Θ – температура окружающего воздуха, град; r_1 – сопротивления обмотки в холодном состоянии, Ом.

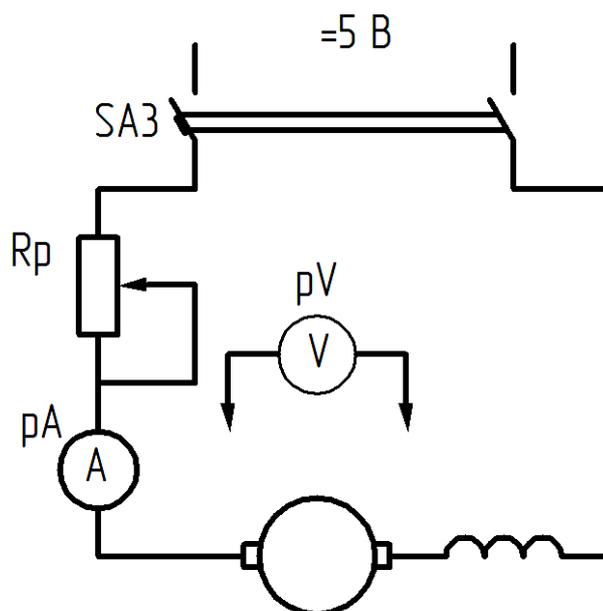


Рис. 7.4. Схема для измерения сопротивлений обмотки якоря и добавочных полюсов

Для измерения сопротивления обмотки якоря после включения и установки регулировочным реостатом выбранного значения тока наконечники щупов устанавливают на коллекторные пластины, находящиеся под серединой щеток разной полярности.

Примечание: п. 1 выполняется только по указанию преподавателя.

Сопротивления обмоток якорей машин постоянного тока, установленных в лаборатории на стендах, приводятся ниже:

ст. 1 ПН-45, $r_a = 1,76$ Ом;

ст. 2 П-42, $r_a = 2,2$ Ом;

ст. 3 ПН-45, $r_a = 1,85$ Ом;

ст. 4 П-41, $r_a = 1,75$ Ом;

ст. 6 П-42, $r_a = 1,63$ Ом;

ст. 11 ПБ-П, $r_a = 1,1$ Ом.

Характеристика холостого хода.

Согласно ГОСТ характеристика холостого хода представляет собой зависимость напряжения на якоре от тока возбуждения при номинальной скорости вращения и разомкнутой цепи нагрузки:

$$U = f(I_b) \text{ при } I = 0, n = \text{const.}$$

Обычно снимают нисходящую ветвь характеристики, которая получается при монотонном уменьшении тока возбуждения от наибольшего значения, соответствующего $U = 250$, до нуля (рис. 7.5).

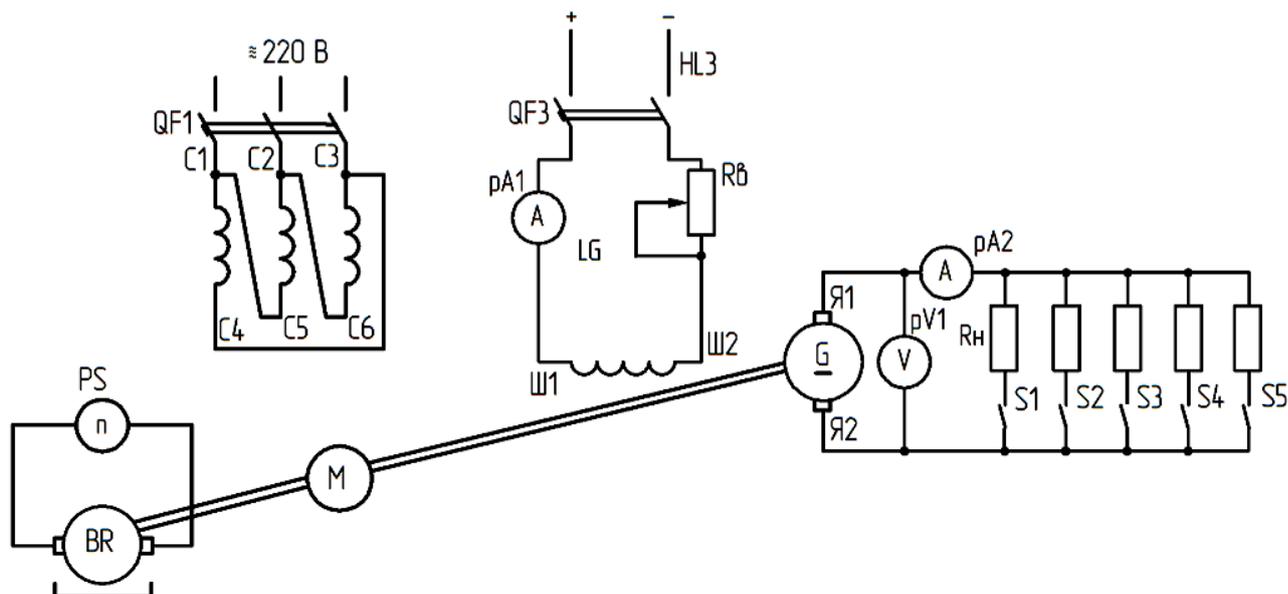


Рис. 7.5. Схема для испытания генератора постоянного тока независимого возбуждения

Если по каким-либо причинам монотонность изменения тока в процессе снятия характеристики нарушится, то необходимо эксперимент повторить сначала. Во время опыта должно быть снято 8–10 точек при примерно следующих значениях напряжения в процентах от номинального: 110, 105, 100, 95, 90, 85, 70, 50, 30 и 0. Здесь под символом 0 подразумевается напряжение, равное ЭДС от остаточного потока, соответствующего $I_b = 0$ (при разомкнутом выключателе QF3 в цепи обмотки возбуждения).

Результаты опыта записывают в табл. 7.1.

Таблица 7.1

U_0, B										$I_a = 0$
I_b, A										$n = \dots \text{об/мин.}$

Если при снятии характеристики холостого хода скорость вращения генератора не удается поддерживать постоянной, то следует одновременно с отсчетом показаний амперметра рА1 и вольтметра рV1 измерять и фиксировать также частоту вращения генератора n .

Полученные таким образом данные для снятия характеристики холостого хода, соответствующей номинальной скорости вращения машины, могут быть пересчитаны по формуле

$$U_0 = U \frac{n_n}{n},$$

где U – напряжение генератора при числе оборотов n ; U_0 – напряжение генератора при номинальном числе оборотов, В.

Нагрузочная характеристика.

Нагрузочная характеристика представляет собой зависимость

$$U = f(I_B) \text{ при } I = \frac{1}{2} I_n \text{ и } n = n_n.$$

Для выполнения испытаний необходимо запустить приводной двигатель при разомкнутых QF3 и S1...S5 (см. схему на рис. 7.5). Опыт целесообразно вести в определенной последовательности. При холостом ходе QF3 включен, в обмотке независимого возбуждения устанавливаются такой ток, при котором $U = (1,0-1,1)U_n$. Включив выключатели S1, S2 и изменяя ток в цепи возбуждения генератора реостатом RB, следует установить ток нагрузки $I = \frac{1}{2} I_n$.

Данные записать в табл. 7.2. Затем замкнуть S3 и реостатом RB снова установить $I = \frac{1}{2} I_n$ и т.д. Данные опыта заносят в табл. 7.2.

Таблица 7.2

U, B						
I_B, A						

Внешние характеристики.

Внешнюю характеристику генератора снимают дважды:

- 1) при увеличении нагрузки от холостого хода до номинальной;
- 2) при сбросе нагрузки от номинальной до холостого хода.

В обоих случаях в начале опыта напряжение генератора должно быть номинальным ($U = U_{ном}$). Эти характеристики снимают при различных токах возбуждения. Для второй кривой (при сбросе нагрузки) он будет больше, чем для первой, из-за необходимости скомпенсировать действие реакции якоря и внутреннее падение напряжения в якорной цепи при номинальном режиме ($U = U_{ном}$ и $I_a = I_{ан}$). Результаты эксперимента (4–5 точек) записывают в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Увеличение нагрузки	I_a, A							$I_{B0} = \dots A$
	U, B							
Сброс нагрузки	I_a, A							$I_B = I_{вн} = \dots A$
	U, B							

Регулировочные характеристики.

Регулировочная характеристика генератора представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки или полезной мощности при неизменном напряжении на зажимах якоря и постоянной скорости вращения:

$$I_b = f(I_a) \text{ при } U = U_{\text{ном}}, n = n_{\text{ном}} = \text{const}.$$

В учебных целях достаточно снять ветвь при увеличении нагрузки и рассматривать ее как регулировочную характеристику генератора. Снимают ее следующим образом: при холостом ходе устанавливают номинальное напряжение, изменяя ток возбуждения реостатом RB, а затем машину постепенно нагружают, записывая показания (4–5 точек). Скорость вращения генератора поддерживается постоянной. Записывают опытные данные в табл. 7.4.

Таблица 7.4

I_a, A	0					
I_b, A						$U = 200B$

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением.

Внешнюю характеристику при параллельном возбуждении в принципе снимают так же, как для генератора с независимым возбуждением, но при неизменном токе возбуждения, а при параллельном возбуждении с постоянным сопротивлением в цепи возбуждения (рис. 7.6) зависимость такова:

$$U = f(I_a) \text{ при } R_b = \text{const}, n = n_n = \text{const}.$$

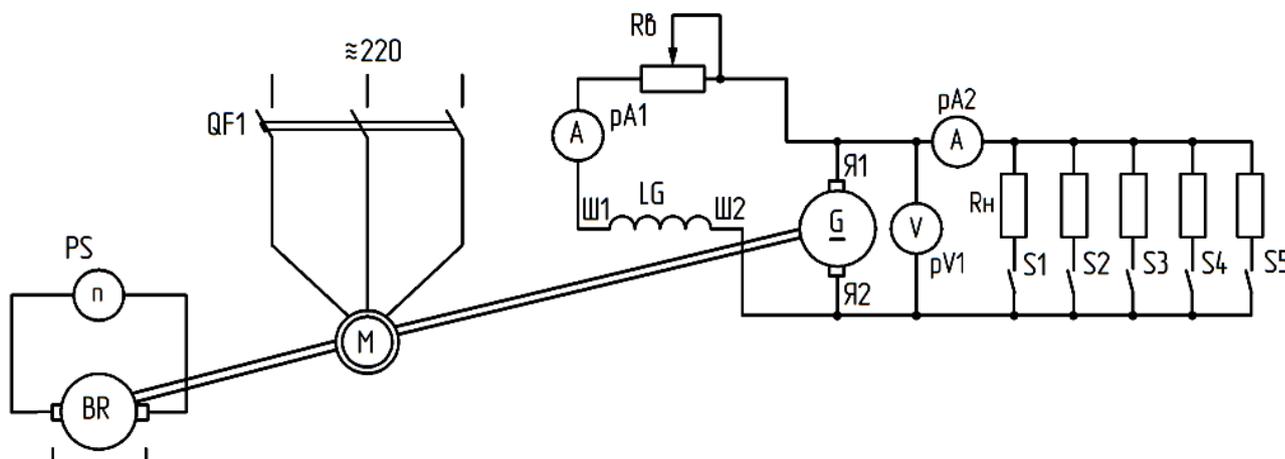


Рис. 7.6. Схема для испытания генератора постоянного тока параллельного возбуждения

В первом случае RB должно обеспечивать номинальное напряжение при холостом ходе ($I_a = 0$), а во втором – при номинальной нагрузке генератора ($I_a = I_{ан}$). Результаты записывают в таблицу 7.5.

Таблица 7.5

I_a, A	0					$R_b = \text{const}$ Увеличение нагрузки
U, B	230					
I_b, A						
I_a, A	I_n				0	$R_b = \text{const}$ Сброс нагрузки
U, B	230					
I_b, A						

Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения.

Регулировочную характеристику $I_B = f(I_a)$ при $U = \text{const}$, $n = \text{const}$ снимают так же, как и аналогичную характеристику генератора при независимом возбуждении. Запись опытных данных производится в табл. 7.4. Пункт 5.7 выполняется по указанию преподавателя.

Внешние характеристики генератора со смешанным возбуждением.

Как и при параллельном возбуждении, внешней характеристикой генератора со смешанным возбуждением является зависимость

$$U = f(I_a) \text{ при } R_B = \text{const}, n = \text{const}.$$

Процесс снятия внешней характеристики такой же, как и при параллельной схеме возбуждения. Для этого необходимо собрать схему (рис. 7.7). На холостом ходу установить значение тока возбуждения реостатом R_B , при котором напряжение генератора равно номинальному $U_0 = U_n$. При найденном значении тока возбуждения снимают характеристику, меняя сопротивления цепи нагрузки генератора $R_{нг}$, замыкая $S1-S5$. Затем по схеме рис. 7.7 меняют местами начало и конец серийной обмотки $C1, C2$. С целью выяснения влияния на характеристику последовательной обмотки при встречном включении рекомендуется снять несколько точек внешней характеристики при встречном включении. Уже при небольших токах нагрузки (около $0,2 - 0,5I_n$) напряжение резко упадет. В этот момент следует цепь нагрузки замкнуть накоротко и получить точку, соответствующую короткому замыканию, которая является последней точкой снимаемой кривой. Результаты экспериментов занести в табл. 7.6.

Таблица 7.6

I_a, A	0						$I_B = \dots A$ Согласное включение
U, B	230						
I_a, A	0						$I_B = \dots A$ Встречное включение
U, B	230						

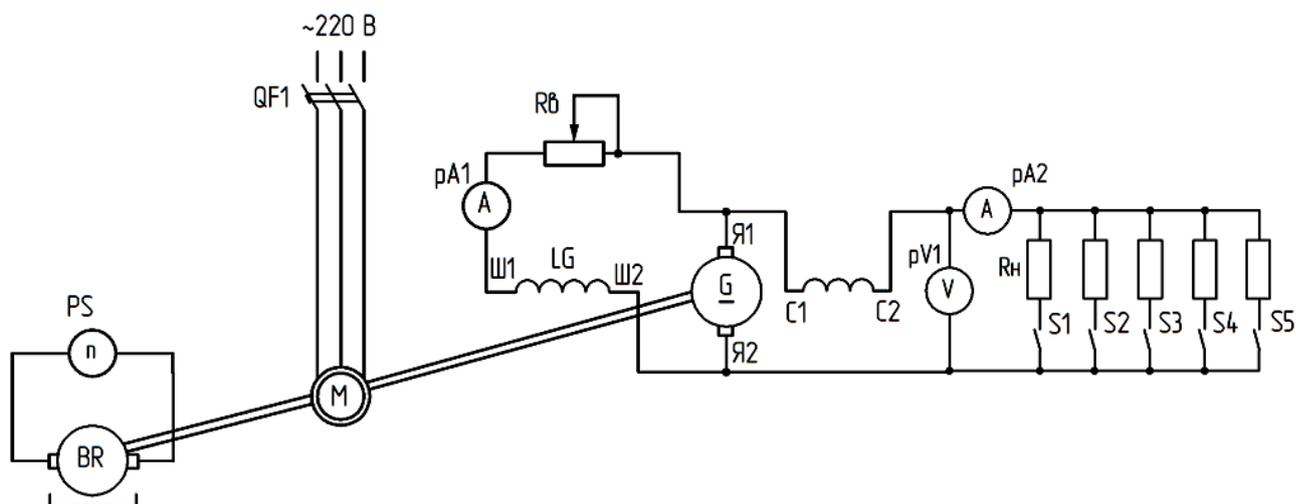


Рис. 7.7. Схема для испытания генератора постоянного тока смешанного возбуждения

Регулировочная характеристика генератора со смешанным возбуждением.

Регулировочную характеристику

$$I_B = f(I_a) \text{ при } U = \text{const}, n = \text{const}$$

снимают так же, как и аналогичную характеристику генератора при независимом возбуждении. Запись опытных данных производится в таблицу 7.4. Характеристику снимают при согласном включении обмоток – серийной и шунтовой.

Форма отчетности:

Характеристика холостого хода.

Характеристика холостого хода испытуемого генератора строится по данным табл. 7.1. Нелинейность характеристики холостого хода (кривая 1 на рис. 7.8) объясняется насыщением магнитной цепи машины с увеличением тока возбуждения. Из-за наличия потока остаточного намагничивания при $I_{\text{в}} = 0$ в обмотке якоря индуцируется ЭДС, т.е. $U_{\text{ост}}$, называемое остаточным напряжением. Обычно $U_{\text{ост}} = 2 - 5\% U_{\text{н}}$. По нисходящей ветви характеристики холостого хода определяется ток возбуждения $I_{\text{во}}$, соответствующий номинальному напряжению $U_{\text{н}}$ при холостом ходе. Используя х.х.х. для построения других характеристик, следует пользоваться приведенной характеристикой (кривая 2 на рис. 7.8), которая получается путем параллельного переноса нисходящей ветви опытной характеристики вдоль оси абсцисс на величину I_0 . По приведенной характеристике находят коэффициент магнитного насыщения генератора K_{μ} (рис. 7.8):

$$K_{\mu} = \frac{F_0}{F_{\delta}} = \frac{\overline{ac}}{ab},$$

где F_0 – н.с. всей магнитной цепи; F_{δ} – н.с. воздушного зазора.

Величины F_0 , F_{δ} определяются графически при помощи х.х.х. Для этого нужно продолжить прямолинейную часть х.х.х. до пересечения с прямой, параллельной оси абсцисс, проведенной через точку «с», которая соответствует ЭДС генератора при номинальной нагрузке:

$$E_{\text{н}} = U_{\text{н}} + I_{\text{н}} R_a + \Delta U_{\text{щ}}.$$

Для большинства генераторов нормального исполнения, имеющих среднюю степень насыщения магнитной системы, $K_{\mu} = 1,2 - 1,35$.

Нагрузочная характеристика.

По данным табл. 7.2 нагрузочная характеристика строится на одном графике с характеристикой холостого хода (кривая 3 на рис. 8). Нагрузочная характеристика располагается ниже характеристики холостого хода. Причиной тому является размагничивающее действие поперечной реакции якоря F_{qd} и внутреннее падение напряжения $I_{\text{ан}} R_a$.

Величина F_{qd} определяется путем построения т.н. реактивного треугольника ABC , вертикальный катет AB которого в масштабе напряжения равен внутреннему падению напряжения в якорной цепи генератора $I_a R_a$. Точка «А» соответствует номинальному напряжению генератора при его номинальной нагрузке. Из точки «В» проводим горизонтальную линию до пересечения ее с характеристикой холостого хода в точке «С». Горизонтальный катет BC треугольника ABC в масштабе тока возбуждения представляет собой размагничивающее действие поперечной реакции якоря F_{qd} .

По нагрузочной характеристике при $U = U_{\text{н}}$ можно определить номинальное значение тока возбуждения $I_{\text{вн}}$.

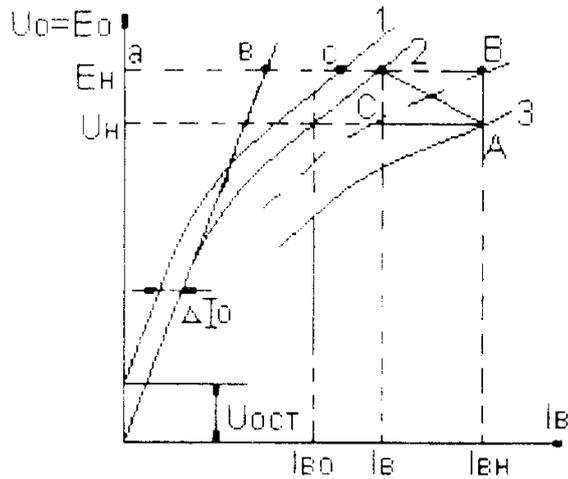


Рис. 7.8. Характеристика холостого хода и нагрузочная

Внешние характеристики.

По данным табл. 7.3, 7.5, 7.6 на одном графике строятся внешние характеристики генератора при различных схемах возбуждения (см. рис. 7.9): кривая 1 – при независимом возбуждении; кривая 2 – при параллельном; кривая 3 – при смешанном согласном; кривая 4 – при смешанном встречном.

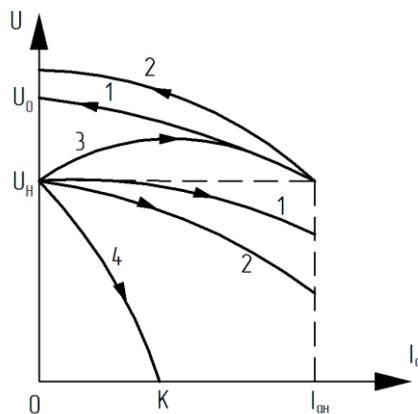


Рис. 7.9. Внешние характеристики генератора постоянного тока при различных схемах возбуждения

Процентное изменение напряжения генератора.

Согласно ГОСТ 10159–69 процентное изменение напряжения (U) определяется по внешней характеристике при сбросе нагрузки от номинального режима до холостого хода:

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100\% .$$

Величина процентного изменения нагрузки в сильной степени зависит от схемы возбуждения генератора (см. внешние характеристики на рис. 7.9).

Изменение напряжения генератора с нагрузкой может быть определено и по внешним характеристикам, снятым в режиме увеличения нагрузки по формуле

$$\Delta U' = \frac{U_n - U}{U} 100\% .$$

Напряжение на зажимах генератора изменяется благодаря одновременному действию трех факторов, снижающих напряжение с ростом нагрузки:

- 1) размагничивающее действие поперечной реакции якоря;
- 2) внутреннее падение напряжения в якорной цепи;

3) имеющая место зависимость тока возбуждения от напряжения на зажимах якоря генератора.

Регулировочные характеристики.

На рис. 7.10 представлены регулировочные характеристики генератора при различных схемах возбуждения:

- 1) при независимом и параллельном возбуждении;
- 2) смешанном согласном возбуждении.

По кривым 1 и 2 на рис. 7.10 можно определить соотношение МДС F_c последовательной (С1, С2) и параллельной F_n (Ш1, Ш2) обмоток возбуждения:

$$\frac{F_c}{F_n} = \frac{I_{вн} - I_{во}}{I_{вн}} = \frac{ae}{ac}.$$

МДС последовательной обмотки возбуждения значительно меньше МДС параллельной обмотки. Обычно это отношение лежит в пределах 0,1–0,2.

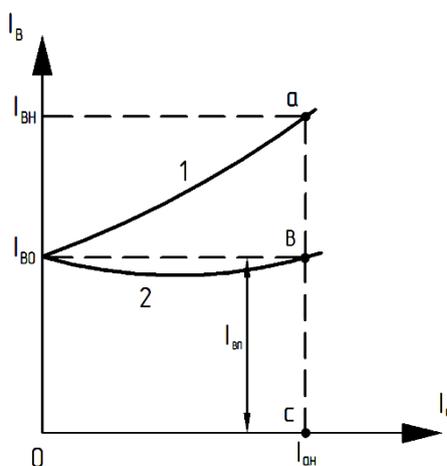


Рис. 7.10. Регулировочные характеристики генератора постоянного тока

Форма отчетности:

1. Оценивая результаты испытания генератора, необходимо указать его номинальные данные U_n , I_n , P_n , n_n и номинальные значения тока возбуждения $I_{вн}$ при независимом и смешанном возбуждении. Следует отметить также значение тока возбуждения $I_{во}$, необходимое для создания номинального напряжения при холостом ходе; величину напряжения от остаточного намагничивания $U_{ост}$ в вольтах и в процентах от U_n ; остаточную НС в масштабе тока возбуждения; I_0 в амперах и в процентах от $I_{во}$; значение коэффициента насыщения магнитной цепи машины K_μ .

2. По внешним и регулировочным характеристикам следует указать значения изменения напряжения ΔU и тока возбуждения и сопоставить их при различных способах возбуждения генератора.

3. Определить соотношение НС параллельной и последовательной обмоток.

4. Объяснить, как можно построить внешние и регулировочные характеристики ГПТ с помощью характеристических треугольников.

Основная литература:

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. — СПб.: Питер, 2008. — 320 с.

2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

3. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с.

Дополнительная литература:

1. Хвостов, В. С. Электрические машины. Машины постоянного тока: учебник для вузов / В. С. Хвостов; Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1988. - 335 с. - Б. ц.

2. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.

3. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1972 - Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы - 543 с.: ил. - Б. ц.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Назовите способы возбуждения генераторов постоянного тока и укажите их особенности. Нарисуйте схемы испытания генераторов при различных способах возбуждения.

2. Назовите характеристики генератора независимого возбуждения и условия их снятия. Покажите, какой вид имеют эти характеристики.

3. Какие имеются различия при снятии внешних и регулировочных характеристик генераторов независимого, параллельного и смешанного возбуждения?

4. Расскажите о порядке проведения опытов при снятии нагрузочной, внешней и других характеристик генератора.

5. Каковы причины изменения напряжения в генераторе независимого возбуждения при изменении тока нагрузки?

6. Почему при равных токах нагрузки напряжение в генераторе при параллельном возбуждении падает значительно, чем при независимом?

7. Назовите условия самовозбуждения генераторов параллельного возбуждения. Зависит ли величина критического сопротивления от частоты вращения якоря?

8. Как необходимо включать обмотки возбуждения генераторов смешанного возбуждения, чтобы уменьшить влияние тока нагрузки на напряжение генератора?

9. Назовите виды реакции якоря. Как влияет реакция якоря на работу генератора?

10. Укажите причины изменения величины магнитного потока при нагрузке генератора постоянного тока.

Лабораторная работа № 8

Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Цель работы: изучение рабочих свойств двигателя параллельного возбуждения и способов регулирования его скорости вращения.

Краткие теоретические сведения

Если цепи обмотки якоря и возбуждения машины постоянного тока подключены к источнику постоянного напряжения, то под действием последнего в этих цепях протекают токи, возбуждающие соответствующие магнитные потоки. В результате взаимодействия магнитных потоков создается вращающий момент, под влиянием которого якорь начинает вращаться. В этом случае машина работает в режиме двигателя, т.е. преобразует электрическую энергию в механическую. При вращении якоря в его обмотке индуцируется ЭДС. Направление ЭДС, определяемое правилом правой руки, противоположно

направлению тока в обмотке якоря. Поэтому она называется противоэлектродвижущей силой, а ее роль в двигателе постоянного тока сводится к ограничению величины силы тока в цепи обмотки якоря. Численно значение силы тока в цепи якоря можно вычислить по формуле

$$I_{\text{я}} = (U_{\text{д}} - E_{\text{я}}) / R_{\text{я}}.$$

Двигатели постоянного тока различаются по способу возбуждения – последовательного, смешанного и независимого.

Отношение полезной механической мощности P_2 к потребляемой электрической P_1 определяет коэффициент полезного действия (КПД) двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}, \quad (8.1)$$

где $\sum P$ – сумма потерь в двигателе.

У современных двигателей постоянного тока КПД очень высок и достигает у машин большой мощности – 98 %. С уменьшением номинальной мощности КПД двигателей падает до 20–40 % при мощностях порядка 10–25 Вт.

Согласно ГОСТ 183–74 номинальной мощностью двигателя постоянного тока называется полезная механическая мощность на валу (выраженная в Вт, кВт или МВт), которую двигатель может длительно отдавать при номинальном режиме работы.

Полезная механическая мощность на валу двигателя определяет его полезный вращающий момент:

$$M_{\text{н}} = 0,95 \frac{P_2}{n_{\text{н}}}, \quad (8.2)$$

где P_2 – в Вт; $n_{\text{н}}$ – в об/мин; M – в Нм.

Электромагнитный момент двигателя:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{N}{a} \cdot I_{\text{а}} \Phi = C_{\text{м}} I_{\text{а}} \Phi, \quad (8.3)$$

где $C_{\text{м}}$ – постоянная величина; $I_{\text{а}}$ – ток якоря, А; Φ – результирующий магнитный поток, Вб.

В установившемся режиме приложенное к якорю двигателя напряжение:

$$U = E + I_{\text{а}} R_{\text{а}}. \quad (8.4)$$

Так как $E = \frac{P}{a} \cdot \frac{n}{60} N \Phi = C_{\text{е}} n \Phi,$

то

$$U = C_{\text{е}} n \Phi + I_{\text{а}} R_{\text{а}}, \quad (8.5)$$

а ток, потребляемый из сети, равен

$$I_{\text{а}} = \frac{U - C_{\text{е}} n \Phi}{R_{\text{а}}}. \quad (8.6)$$

Если между двигателем и сетью включено добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$, то напряжение сети

$$U_c = C_e n \Phi + I_a (R_a + R_d) \quad (8.7)$$

и ток, поступающий из сети в двигатель, равен

$$I_a = \frac{U_c - E}{R_a + R_d} = \frac{U_c - C_e n \Phi}{R_a + R_d}. \quad (8.8)$$

Скорость вращения двигателя определяют из (8.5) и (8.7):

- при прямом включении в сеть ($U = U_c$):

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}, \quad (8.9)$$

- при включении через реостат с сопротивлением R_d

$$n = (U - I_a (R_a + R_d)) / C_e \Phi. \quad (8.10)$$

Из (8.6) при $n = 0$ следует, что пусковой ток двигателя находится в зависимости от сопротивления R_a якорной цепи: $I_{ап} = U / R_a$. Поскольку сопротивление R_a у машин постоянного тока средней и большой мощности очень мало, то пусковой ток может достигать значительной величины (до 10–25 I_n). Поэтому прямой пуск возможен лишь для двигателей мощности до 1кВт, имеющих относительно большее сопротивление якорной цепи.

Как правило, двигатели постоянного тока пускают в ход с добавочным сопротивлением (пусковой реостат) между сетью и двигателем. При этом пусковой ток будет меньше:

$$I_{ан} = U / (R_a + R_n),$$

где R_n – дополнительное сопротивление, включаемое в цепь обмотки якоря, Ом.

Пусковой реостат предназначен лишь для кратковременного включения в цепь (якоря) двигателя на время пуска. Пользоваться этим реостатом в целях регулирования двигателя под нагрузкой не допускается.

Для того чтобы время пуска двигателя было меньше, следует обеспечить возможно больший момент на его валу. Из выражения (8.3) видно, что это может быть достигнуто при наибольшем магнитном потоке Φ машины. Практически это означает, что любой пуск двигателя постоянного тока должен производиться при максимальном токе возбуждения (при минимальном сопротивлении цепи возбуждения). Как правило, обмотка возбуждения включается на полное напряжение в сети. Наличие максимального потока при пуске, кроме сокращения его продолжительности, способствует быстрому спаданию величины пускового тока якоря (8.3) и (8.6).

При включенном пусковом реостате и минимальном сопротивлении цепи возбуждения максимальный пусковой ток для двигателей постоянного тока находится в пределах 2,0–2,5 I_n .

В процессе пуска сопротивление пускового реостата ступенями выводят до значения $R_n = 0$.

Если в (8.9) пренебречь небольшой величиной $R_a I_a$, то видно, что изменение направления вращения двигателя можно осуществить двумя способами: или изменением полярности питающего напряжения на зажимах якоря, или изменением направления потока (тока) возбуждения. В этих случаях изменяется направление действующего на валу момента двигателя.

Из выражения (8.10) следует, что имеются три возможных способа регулирования скорости вращения двигателя:

- 1) введение в цепь рабочего тока I_a добавочного реостата с сопротивлением R_a – «реостатное регулирование»;
- 2) изменение величины магнитного потока Φ (тока возбуждения) – «регулирование полем»;
- 3) изменение величины питающего напряжения (см. (8.9)) для случая $R_d = 0$ и $U_c = U$.

Рабочие свойства двигателей постоянного тока оцениваются по их электромеханическим или рабочим и регулировочным характеристикам, получаемым расчётным или опытным путём.

Порядок выполнения:

1. Ознакомиться с паспортными данными машины и занести их в протокол.
2. Снять и построить рабочие характеристики двигателя с включенной стабилизирующей обмоткой и без нее.
3. Определить величину номинального тока возбуждения при номинальной частоте вращения n_n и номинальном токе якоря со стабилизирующей обмоткой, включенной согласно, и без стабилизирующей обмотки.
4. Снять и построить скоростные характеристики двигателя при неизменном токе возбуждения для двух случаев:
 - а) без стабилизирующей обмотки;
 - б) с согласно включенной стабилизирующей обмоткой.
5. Осуществить регулирование скорости вращения двигателя изменением подводимого к якорю напряжения. Снять характеристики регулирования при постоянном моменте нагрузки и неизменном токе возбуждения.
6. Осуществить регулирование скорости вращения двигателя изменением тока возбуждения. Снять характеристики регулирования при постоянном моменте и неизменном напряжении питания, а также и регулировочную характеристику при постоянной скорости.
7. Осуществить регулирование скорости вращения двигателя введением в цепь якоря дополнительного сопротивления (реостатное регулирование). Снять реостатные характеристики.

Экспериментальная установка.

Исследование двигателя постоянного тока (ДПТ) проводится на универсальном рабочем стенде (УЛС) (рис. 8.1), состоящем из силового оборудования и пульта управления. Силовое оборудование: двигатель постоянного тока (ДПТ) и сочленённый с ним генератор постоянного тока (ГПТ) смешанного или параллельного возбуждения – размещено на отдельно стоящем фундаменте.

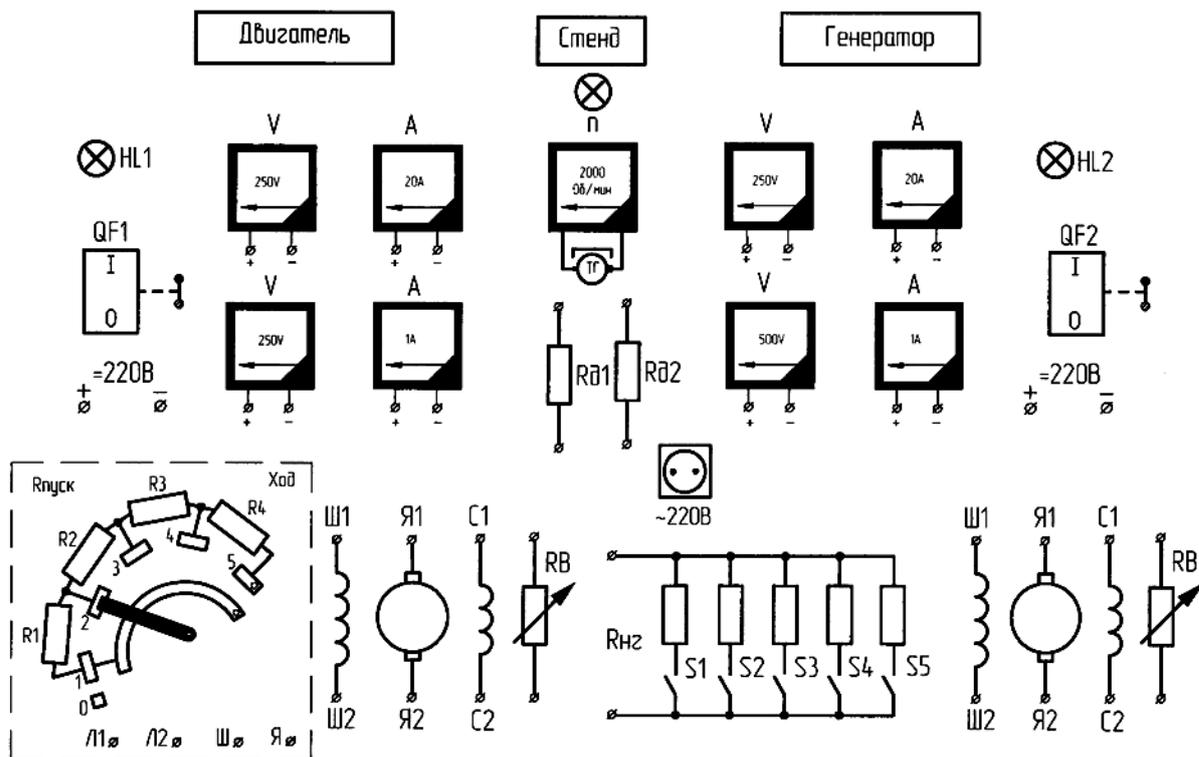


Рис. 8.1. Стенд испытания двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

На рис. 8.2 представлена схема установки для испытания двигателя параллельного возбуждения со стабилизирующей обмоткой.

Включение ДПТ на сеть осуществляется через пусковое сопротивление $R_{\text{пуск}}$, последовательно включенное в цепь обмотки якоря. После затухания пускового тока (поворот ручки пускового реостата в положение «ХОД» по часовой стрелке) обмотка якоря непосредственно подключается к источнику питания с напряжением U_c . Полезная мощность, развиваемая электродвигателем, изменяется с помощью нагрузочного устройства на валу электрической машины. В лаборатории в качестве нагрузочной машины используется генератор постоянного тока. Частота вращения агрегата измеряется с помощью тахометра, размещенного на одном валу с исследуемым двигателем. Показания о частоте вращения считываются с прибора, имеющегося на пульте УЛС. С целью удобства сборки схемы, ее проверки и безопасности проведения эксперимента пункты подключения снабжены сигнальными лампочками HL1 и HL2, расположенными на наборном поле над автоматами QF1, QF2. Там же размещены клеммы контрольно-измерительных приборов.

Обмотки двигателя постоянного тока и генератора Я1, Я2, Ш1, Ш2, C1, C2 выведены на наборное поле УЛС. Искусственные характеристики двигателя обеспечиваются введением в цепь обмотки якоря добавочного сопротивления, уменьшением тока возбуждения, увеличением сопротивления в цепи обмотки возбуждения. При регулировании напряжения на обмотке якоря обмотка возбуждения должна быть включена на полное напряжение сети. Сборку схемы двигателя целесообразно начинать с главной цепи, состоящей из элементов схемы, по которым проходит ток якоря двигателя. Затем необходимо собрать цепь обмотки возбуждения и подключить вольтметр. Соединение обмотки двигателя между собой и подключение их к пусковому реостату производится согласно схемам рис. 1 и 2.

Полное снятие напряжения со стенда осуществляется выключением автомата АП-50, расположенного на стене рядом с УЛС.

Проведение исследований.

1. Ознакомиться с расположением исследуемого двигателя и нагрузочного генератора постоянного тока в силовом агрегате лабораторного стенда и их мнемоническим

изображением на пульте управления. Записать в протокол паспортные данные машин. Выбрать приборы, соответствующие паспортным данным машины.

2. Снять рабочие характеристики двигателя с включенной стабилизирующей обмоткой.

Рабочие свойства электродвигателя исследуются на основании его рабочих характеристик, снимаемых опытным путем при неизменных значениях напряжения и тока возбуждения:

$$\eta, n, I_a, M, P_1, n = f(P_2) \text{ при } U = U_c, I_{\text{вн}} = I_{\text{н}},$$

где $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение двигателя; $I_{\text{вн}}$ – ток возбуждения, соответствующий нормальной скорости вращения при номинальной нагрузке и номинальном $U = U_{\text{н}}$ напряжении (должен быть установлен опытным путем).

Собрать схему (рис. 8.2). Выключатели QF1, QF2 должны быть выключены. Рукоятка пускового реостата $R_{\text{пуск}}$ должна находиться в пусковом (крайне левом) положении, обозначенном надписью «СТОП». Реостат RB в цепи возбуждения должен быть полностью выведен для получения наибольшей величины пускового момента. Добавочное сопротивление R_d в цепи обмотки якоря двигателя должно быть полностью выведено $R_d = 0$ (на рис. 8.1 его нет), а оба вольтметра в схеме двигателя – показывать одинаковое напряжение. После сборки и проверки схемы испытания двигателя можно приступить к ее опробованию.

Подают напряжение на стенд, при этом загораются сигнальные лампочки HL1 и HL2. Затем выключателем QF1 подается питание на схему двигателя, и рукоятка пускового реостата $R_{\text{пуск}}$ поворачивается по часовой стрелке до срабатывания реле, включающего пусковой реостат. В этот момент необходимо проверить наличие тока в обмотке возбуждения и правильность отклонения стрелок всех измерительных приборов.

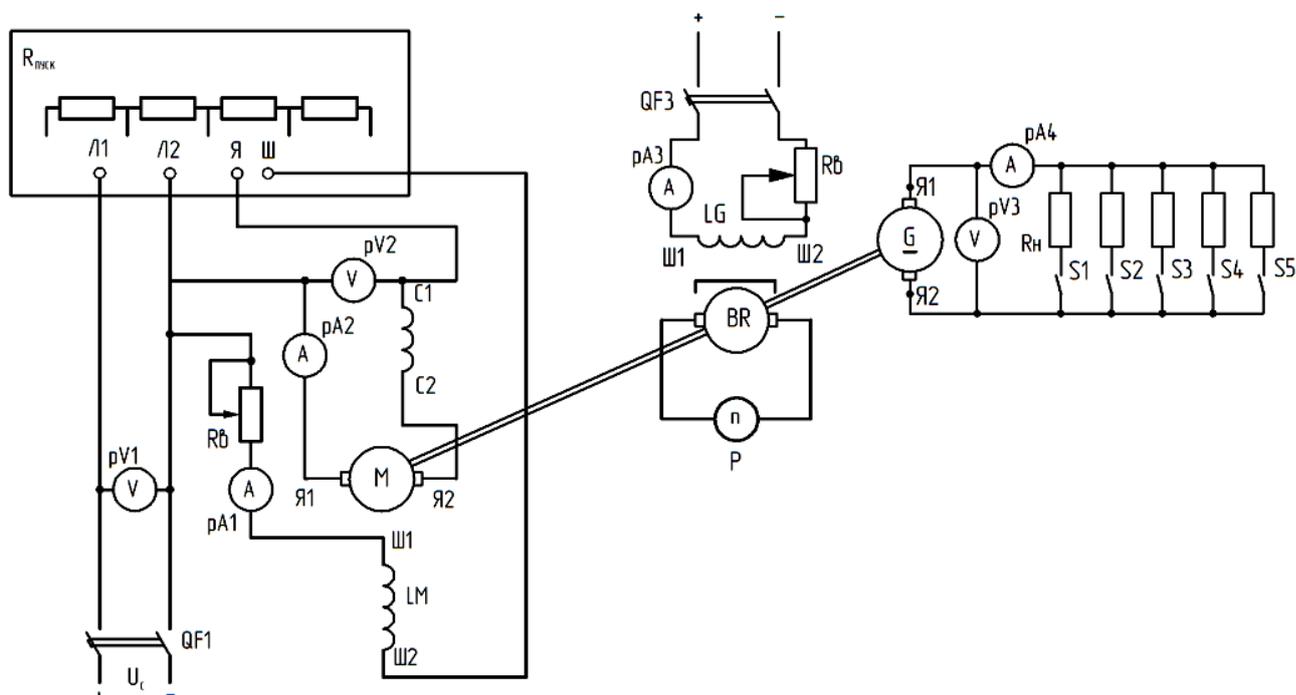


Рис. 8.2. Схема для испытания двигателя постоянного тока со стабилизирующей обмоткой

Процесс пуска ДПТ заканчивается полным выведением пускового сопротивления, когда рукоятка пускового реостата будет находиться в крайнем правом положении, обозначенном надписью «ХОД». Затем включают выключатель QF2 и возбуждают генератор постоянного тока. Изменяя величину нагрузочного момента, по приборам определяют частоту вращения n и ток якоря I_a . Ограничивающей величиной в опыте является ток якоря

(по ГОСТ 10159–69 ток якоря меняют – от тока холостого хода до 150 % номинального). В лаборатории максимальную величину тока определяет преподаватель.

Перед началом опытов следует рассчитать номинальный момент двигателя по формуле (8.2), используя паспортные данные машины.

Значения η , P_1 и P_2 рассчитывают для каждой опытной точки по формулам

$$P_1 = U_n (I_a + I_n); P_2 = 0,1047 M n; \eta = P_2 / P_1,$$

где M – в Нм; n – в об/мин; P – в Вт.

В ходе опыта примерно через равные интервалы по моменту делают 5–6 замеров соответствующих величин, поддерживая постоянными напряжение на зажимах якоря двигателя и его ток возбуждения.

Опытные и расчетные данные записывают в табл. 8.1.

Таблица 8.1

№ п/п	Опытные данные				Расчетные данные			$U = U_c = \dots B$ $I = I_{вн} = \dots A$
	I_{ar} , А	M , Нм	n , об/мин	I_{aq} , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η	

M^* – определяют по I_{ar} рис. 8.4, где I_{ar} – ток якоря.

Для того чтобы установить, как влияет на рабочие характеристики двигателя стабилизирующая обмотка, эти характеристики следует дополнительно снять при выключенной стабилизирующей обмотке. Изменение P_2 , как и раньше, производится путем изменения нагрузочного момента при $U = U_c$ и $I_n = I_{вн}$. Результаты эксперимента записывают в табл. 2.

Таблица 8.2

№ отсчетов	I_{ar} , А	M , Нм	n , об/мин	I_{aq} , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	$U = \dots B$ $I_b = I_{вн} = \dots A$

3. Определить номинальный ток возбуждения ДПТ со стабилизирующей обмоткой (рис. 8.2) и без стабилизирующей обмотки (схема на рис. 8.3).

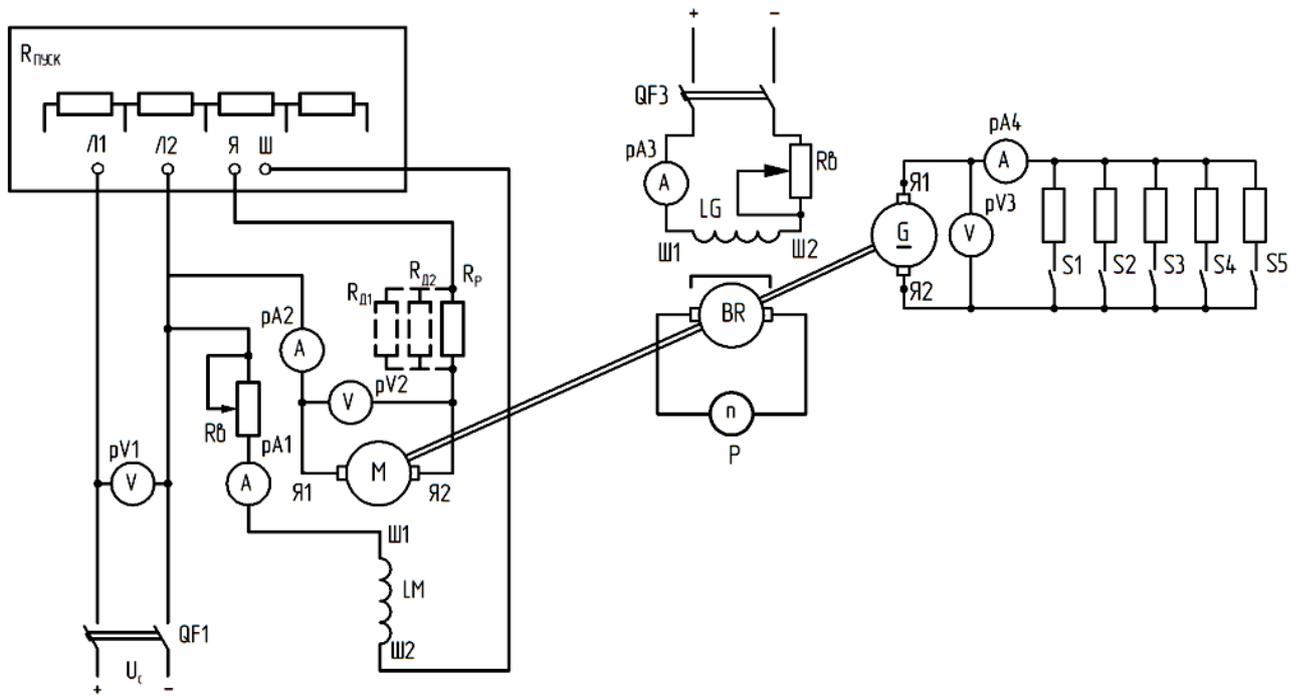


Рис. 8.3. Схема для испытания двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Изменяя момент нагрузки на валу и ток возбуждения, следует подобрать номинальный ток возбуждения $I_n = I_{вн}$, при котором частота вращения и ток обмотки якоря будут номинальными величинами: $n = n_n$ и $I_a = I_{ан}$.

Определение номинального значения тока возбуждения проводится при номинальном напряжении $U_c = U_n$ двигателя.

4. Снять и построить скоростные характеристики двигателя $n = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ и $I_b = \text{const}$ со стабилизирующей обмоткой и без стабилизирующей обмотки возбуждения.

При $U = U_c$ на холостом ходу устанавливают наибольший ток возбуждения (реостат полностью выведен) и измеряют частоту вращения и ток якоря двигателя (частота вращения в режиме холостого хода устанавливается $n_0 \leq (1,2 - 1,5)n_n$ или указывается преподавателем). Это будет первая точка скоростной характеристики. Нагружая двигатель, снимают характеристику при $I_b = \text{const}$, $U = U_c = \text{const}$, причем желательно ток якоря довести до $I_a = 1,2I_{ан}$. Результаты сводят в табл. 8.3.

Таблица 8.3

$n, \text{об/мин}$	
I_a, A	

5. Выполнить регулирование скорости вращения двигателя изменением подводимого к якорю напряжения.

Этот способ регулирования скорости вращения предполагает изменение напряжения сети, питающей якорь двигателя. Недостаток данного способа регулирования заключается в том, что каждый двигатель необходимо снабжать автономным источником напряжения (генератор постоянного тока, управляемый тиристорный преобразователь и др.).

Для исследования этого способа регулирования скорости вращения двигателя параллельного возбуждения снимают ряд характеристик:

$$n, I_a, \eta = f(U) \text{ при } M = \text{const и } I_n = I_{вн} = \text{const}.$$

При этом момент рекоменду M поддерживать в пределах $M = 0,5M_n$ (по току $I_{ат}$ который определяют по кривым при $I_{ат}$).

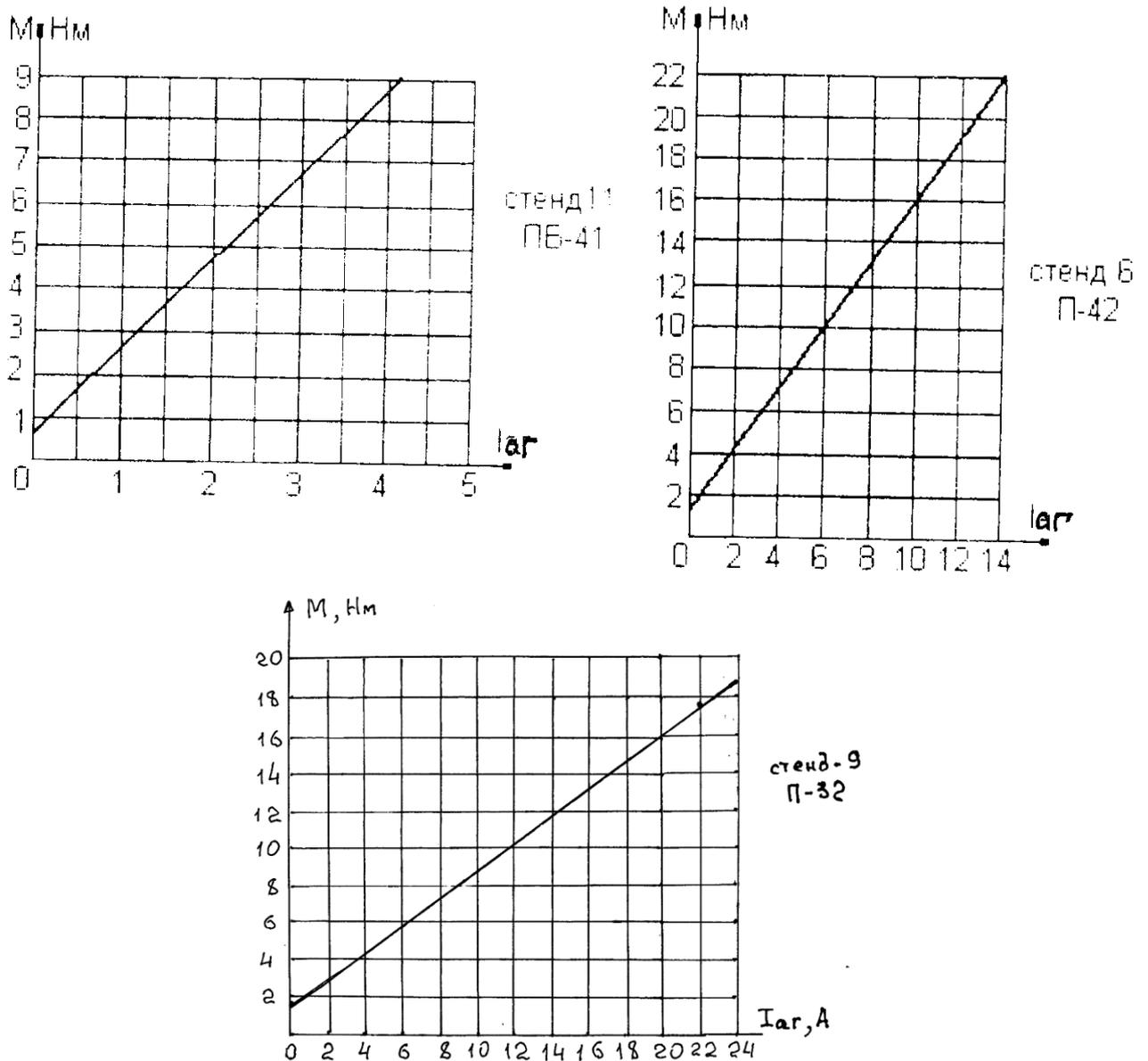


Рис. 8.4. Зависимость момента на валу двигателя от тока якоря генератора

При номинальном токе возбуждения двигатель нагружают до указанного момента, установив на якоре наибольшее напряжение. Затем это напряжение плавно снижают, поддерживая постоянный момент на валу. Ток возбуждения практически не будет изменяться, т.к. $U_c = \text{const}$. Делаются 3–4 отсчета измеряемых величин в диапазоне изменения напряжения U примерно от U_c до $0,25 U_n$. При неизменном напряжении сети U_c изменение U в указанных пределах осуществляется изменением сопротивления регулировочного реостата RP в цепи якоря (рис. 3).

Величину n , I_a и U определяют опытным путем. КПД рассчитывают по формуле

$$\eta = \frac{0,1047Mn}{U(I_a + I_B)}$$

Результаты опытов и расчетов записывают в табл. 4.

Таблица 8.4

№ п/п	Опытные данные				Расчетные данные		$M = \dots Hm$ $I_B = I_{BH} = \dots A$ $U_c = \dots B$ $I_{ar} = \dots A$
	$I_{ar},$ А	$U,$ В	$n,$ об/мин	$I_a,$ А	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	

6. Выполнить регулирование скорости вращения двигателя изменением тока возбуждения.

А. Для исследования этого способа регулирования следует получить зависимости $\eta, P_2, n, I_a = f(I_n)$ при $U = U_c$ и $M = \text{const}$.

Величины n, I_a и I_n определяют опытным путем, поддерживая неизменным момент ($M \approx 0,25M_n$) и изменяя ток возбуждения I_b , начиная от максимально возможного до его минимального значения, при котором $n \leq 1,5n_n$.

Значение P и η рассчитываются по известным формулам.

Результаты эксперимента и расчетов заносят в табл. 8.5.

Таблица 8.5

№ п/п	Опытные данные				Расчетные данные			$U = U_c = \dots B$ $M = \dots H_m$
	I_{ar} , А	I_b , А	n , об/мин	$I_{ад}$, А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η	

В. Регулировочная характеристика $I_b; P_1; I_a = f(M)$ при $U = \text{const}$ и $n = n_n = \text{const}$ представляет большой интерес с точки зрения настройки цепи возбуждения двигателя.

В учебных целях рекомендуется снять одну ветвь характеристики при изменении нагрузки от холостого хода до 120 % номинальной, изменяя ток возбуждения I_b так, чтобы скорость вращения двигателя оставалась постоянной. Отсчеты делаются для 4–5 точек. Результаты записывают в табл. 8.6.

Таблица 8.6

№ п/п	Опытные данные				Расчетные данные			$U = U_c = \dots B$ $n = n_n =$ $= \text{об/мин}$
	I_{ar} , А	M , Нм	I_b , А	I_a , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η	

7. Выполнить регулирование скорости вращения двигателя введением в цепь якоря дополнительного сопротивления.

А. Изучение этого способа регулирования скорости («реостатное регулирование») предлагается произвести, сняв и рассчитав следующие зависимости:

$$P_2, I_a, n = f(M) \text{ при } I_b = I_{вн} \text{ и } U = \text{const}.$$

Опыт провести для двух значений сопротивления R_d реостата, включаемого в цепь якоря (рис. 8.2), которые равны $R_{d1} = 2R_d$ и $R_{d2} = 4R_d$.

Сопротивления подобраны и установлены на наборном поле УЛС.

В. «Реостатные характеристики» $n = f(M)$ снимают следующим образом. С помощью регулировочного реостата RB устанавливают заданную скорость вращения при $I_B = I_{вн}$ и номинальном напряжении на схеме двигателя $U = U_n$, а момент – в режиме холостого хода $M_2 = 0$. Ток возбуждения поддерживается постоянным и равным номинальному. После этого, оставляя неизменным сопротивление $R_d (R_{d1}, R_{d2})$, изменяют нагрузочный момент в пределах от 0 до $M = 1,2M_n$ и записывают показания приборов для 4–5 точек. Опытные данные фиксируют в табл. 8.7.

Таблица 8.7

№ п/п	$R_d = 0$			$R_{d1} = \dots \text{Ом}$			$R_{d2} = \dots \text{Ом}$			$U_c = \dots B$ $I_B = I_{вн} = \dots A$
	$M, \text{Нм}$	$I_{ar}, \text{А}$	$n, \text{об/мин}$	$M, \text{Нм}$	$I_{ar}, \text{А}$	$n, \text{об/мин}$	$M, \text{Нм}$	$I_{ar}, \text{А}$	$n, \text{об/мин}$	

Первая колонка этой таблицы (при $R_d = 0$) заполняется по данным из табл. 8.1.

Примечание: Ток I_{ar} фиксировать при всех значениях R_d .

Момент определяется по кривым (рис. 8.4).

Анализ рабочих характеристик.

Рабочие характеристики исследуемого двигателя представлены на рис. 8.5 и построены по опытным данным табл. 8.1 и 8.2.

Скоростные характеристики $n = f(I_a)$ строятся по данным табл. 8.3.

Вид скоростной характеристики

$$n = \frac{U_a - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

определяется двумя факторами: падением напряжения в цепи обмотки якоря $I_a R_a$ и изменением результирующего продольного потока Φ_d :

$$\Phi_d = \lambda_d \Phi_d; F_d = F_{ш} - \Delta F_{aq} + F_c,$$

где ΔF_{aq} – МДС от размагничивающего действия поперечной реакции якоря; F_c – МДС стабилизирующей обмотки.

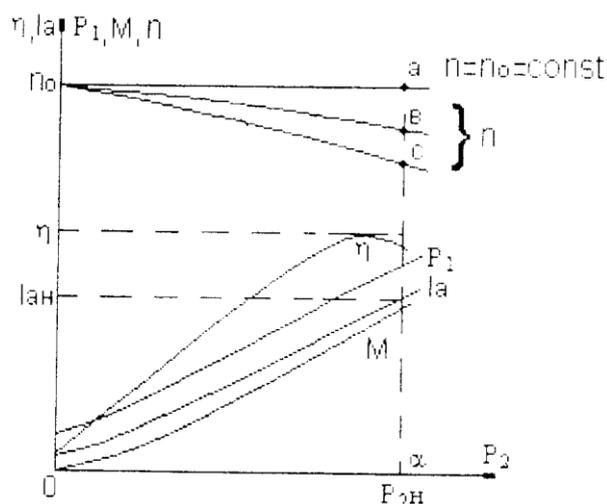


Рис. 8.5. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения со стабилизирующей обмоткой

Отключение стабилизирующей обмотки, а тем более ее встречное включение ослабляет результирующий магнитный поток, что приводит к менее устойчивой работе при резких изменениях нагрузки на валу двигателя. Правильность включения стабилизирующей обмотки следует определять по скоростным характеристикам, построенным по результатам опытов (рис. 8.6).

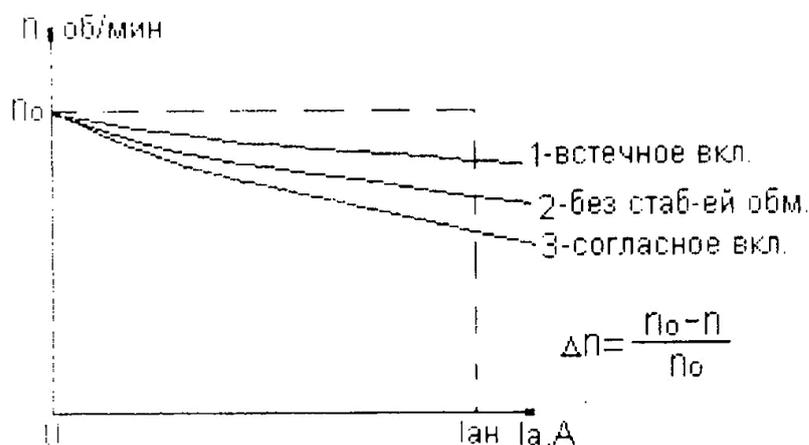


Рис. 8.6. Скоростные характеристики

Регулирование скорости вращения двигателя изменением подводимого к якорю напряжения.

Примерный вид зависимости n , I_a , $\eta = f(U)$ при постоянном моменте и токе возбуждения приведен на рис. 8.7.

Зависимость $I_a = f(U)$.

Скорость вращения якоря при $I_a = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$ изменяется в зависимости от напряжения линейно. Минимальное напряжение, при котором якорь начинает вращаться, равно некоторому пусковому напряжению (напряжению трогания) U_n при $n = 0$. Из формулы (8.9) при прямом включении в сеть имеем

$$\frac{U_n - I_a R_a}{C_e \Phi} = 0,$$

откуда $U_n = I_a R_a$, где I_a — ток, соответствующий моменту $M = I_a C_M \Phi$

Якорь двигателя придет во вращение, как только приложенное напряжение станет больше внутреннего падения напряжения в якорной цепи:

$$U > U_n = I_a R_a.$$

В диапазоне $U_n \leq U \leq +U$ двигатель оказывается нерегулируемым.

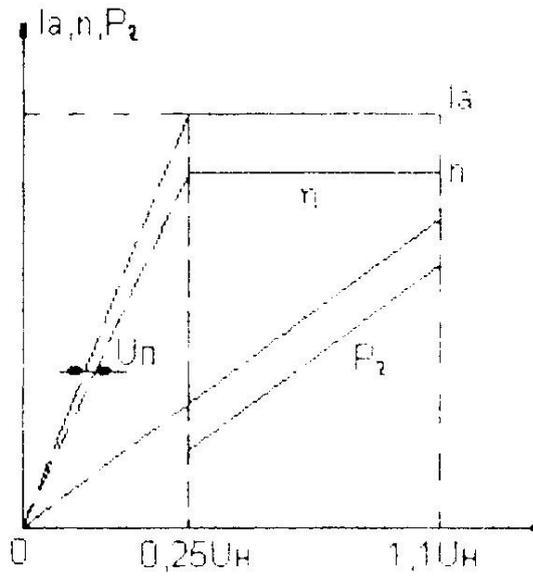


Рис. 8.7. Регулирование скорости вращения двигателя параллельного возбуждения подводимым к якорю напряжением при $M = \text{const}$ и $I_b = \text{const}$

Зависимость $\eta = f(U)$.

Рассмотренный способ регулирования осуществляется при практически неизменном значении КПД двигателя, так как

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \approx \frac{M_n}{I_a U} \approx \frac{MU}{I_a U} \approx \text{const}.$$

Зависимость $P_2 = f(U)$.

Полезная мощность P_2 изменяется при $M = \text{const}$ и практически похожа на зависимость $n = f(U)$.

Регулирование скорости вращения двигателя изменением тока возбуждения.

Полученные зависимости представлены на рис. 8.8.

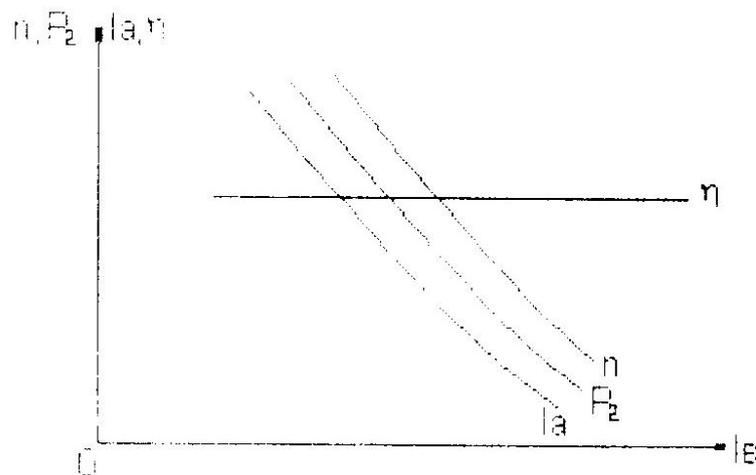


Рис. 8.8. Регулирование скорости вращения двигателя параллельного возбуждения изменением тока возбуждения при $U = U_n$ и $M = \text{const}$

Если допустить, что магнитная цепь машины не насыщена, то $\Phi \sim I_n$ и, следовательно,

$$I_a = \frac{M}{C_e \Phi} \approx \frac{1}{I_b};$$

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \Phi} \approx \frac{1}{I_B} - \frac{1}{I_B^2};$$

$$P_2 = 0,1047 M n \approx \frac{1}{I_B}.$$

Все эти зависимости при принятом допущении близки к гиперболам.

Регулирование скорости при принятых допущениях происходит при постоянном КПД: $\eta = \text{const}$.

Регулировочная характеристика двигателя.

Примерный вид полученных зависимостей приведен на рис. 8.9. При постоянной скорости вращения полезная мощность на валу изменяется пропорционально моменту. Ток якоря растет быстрее момента из-за ослабления поля в соответствии с выражением

$$I_a \approx \frac{M}{C_e \Phi}.$$

При увеличении момента на валу для поддержания $n = \text{const}$ ток возбуждения приходится изменять, т.к. с нагрузкой скорость двигателя падает.

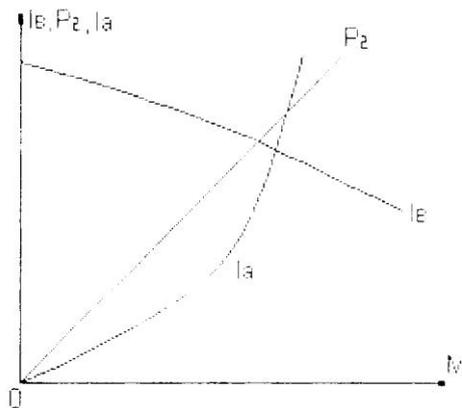


Рис. 8.9. Регулировочные характеристики двигателя параллельного возбуждения при $n = \text{const}$

Реостатные характеристики двигателя.

Реостатные характеристики имеют вид кривых, представленных на рис. 8.10.

Зависимость $n = f(M)$ при реостатном регулировании на основании формул (8.3) и (8.10) и с учетом того, что $\Phi = \Phi' - \Delta\Phi + \Phi_c$, имеет следующее аналитическое выражение:

$$n = \frac{U_c - I_a (R_a + R_d)}{C_e (\Phi' - \Delta\Phi + \Phi_c)} = n_0 - \frac{M (R_a + R_d)}{C_e C_T (\Phi' - \Delta\Phi + \Phi_c)} = n_0 - KM \Sigma R,$$

где $n_0 = \frac{U_c}{C_e (\Phi' - \Delta\Phi + \Phi_c)}$ – скорость холостого хода; $\Sigma R = R_a + R_d$ – суммарное сопротивление цепи рабочего тока двигателя.

Если пренебречь небольшим изменением магнитного потока вследствие реакции якоря, то $n = f(M)$ при различных сопротивлениях представляется в виде пучка прямых, выходящих из одной точки ($n = n_0$ при $M = 0$).

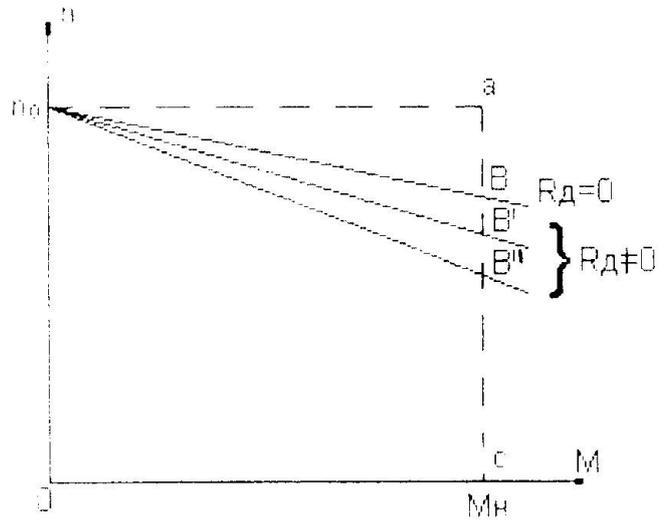


Рис. 8.10. Реостатные характеристики двигателя параллельного возбуждения

Включение последовательно с якорем сопротивления приводит к уменьшению жесткости механических характеристик. Для каждого сопротивления жесткость характеристики рассчитывают по формуле

$$\Lambda_n = \frac{\bar{a}\bar{b}}{\bar{a}\bar{c}}.$$

Положительным свойством «реостатного» регулирования является то, что оно может осуществляться в достаточно широких пределах и технически легко осуществимо. Однако следует иметь в виду, что при этом происходят большие потери энергии в реостате, включенном последовательно с якорем двигателя.

Форма отчетности:

1. Сопоставить опытные и щитковые данные двигателя при номинальном режиме работы. Результаты оформить в виде табл. 8.8.

Опытные данные должны быть взяты по соответствующим кривым рабочих характеристик двигателя; $P_{1н}$ и $M_{2н}$ определяются расчетом.

2. По рабочим характеристикам определить: относительное значение номинального тока возбуждения (в % от $I_{вн}$), а также частоты вращения двигателя при холостом ходе n_0 и номинальном изменении частоты вращения n_n ; значение P_2 (в относительных единицах), при котором оно достигается. Для режима холостого хода указать значение мощности P_{10} , потребляемой двигателем, и тока $I_{а0}$ в физических и относительных единицах.

Форма таблицы 8.8

Сопоставление опытных и щитковых данных двигателя при номинальном режиме работы

Наименование	U_n , В	P_n , кВт	$I_{вн}$, А	$I_{ан}$, А	I_n , А	$P_{1н}$, кВт	n , об/мин	$M_{2н}$, Нм	η_n , %

3. По скоростным характеристикам определить изменение скорости Δn и объяснить, какие факторы оказывают влияние на вид скоростной характеристики.

4. По регулировочным характеристикам отметить пределы регулирования. Для каждого типа характеристик в зависимости от диапазона изменения величины (U_a, I_b или R_d

) указать предел регулирования частоты вращения и изменения тока в якоре как для режимов нагрузки, так и для режима холостого хода. Для режимов нагрузки указать пределы изменения КПД и оценить экономичность способов регулирования частоты вращения двигателя.

Основная литература:

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.
3. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с.

Дополнительная литература:

1. Хвостов, В. С. Электрические машины. Машины постоянного тока: учебник для вузов / В. С. Хвостов; Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1988. - 335 с. - Б. ц.
2. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.
3. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1972 - Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы - 543 с.: ил. - Б. ц.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Назовите способы возбуждения двигателей постоянного тока.
2. Нарисуйте схему пуска двигателя параллельного возбуждения.
3. Почему необходим пусковой реостат при пуске двигателей постоянного тока?
4. Что произойдет, если при работе двигателя параллельного возбуждения оборвется цепь обмотки возбуждения? Как влияет на поведение двигателя в этом случае нагрузка на его валу?
5. Как изменить направление вращения двигателя?
6. Как проводится опыт при снятии регулировочных характеристик двигателя параллельного возбуждения?
7. Поясните, какой вид имеют механические характеристики двигателя параллельного возбуждения. Как влияет реакция якоря на эти характеристики?
8. Какие способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока вы знаете?
9. Какие потери возникают в двигателе параллельного возбуждения на холостом ходу?
10. Поясните вид рабочих характеристик двигателя параллельного возбуждения.

Практическое занятие 1

Решение типовой задачи по разделу «Трансформаторы»

Цель работы: расчет и нагрузочных характеристик трансформатора

Краткие теоретические сведения

Схема замещения трансформатора.

Силовой двухобмоточный трансформатор может быть представлен Т - образной схе-

мой замещения приведенного трансформатора (рис. П.1.1), на которой обозначены: r_1 - активное сопротивление первичной обмотки; x_1 - индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; r_2' - активное приведенное сопротивление вторичной обмотки; x_2' - индуктивное приведенное сопротивление рассеяния вторичной обмотки; x_m - индуктивное сопротивление взаимной индукции; r_m - активное сопротивление, обусловленное магнитными потерями в стали сердечника; I_1 - ток первичной обмотки; I_2' - приведенный ток вторичной обмотки; I_m - ток намагничивания (ток холостого хода); U_1 - первичное напряжение; U_2' - вторичное приведенное напряжение.

В приведенном трансформаторе вторичная обмотка имеет такое же число витков, как и первичная обмотка, поэтому ЭДС, наводимые основным магнитным потоком, будут одинаковы и, следовательно, можно электрически объединить обе обмотки. Связь между параметрами и величинами неприведенного и приведенного трансформатора осуществляется через коэффициент трансформации

$$k_T = W_1 / W_2 \approx U_{1\phi} / U_{2\phi}$$

следующими соотношениями

$$U_2' = U_2 / k_T; \quad I_2' = \frac{1}{k_T} I_2; \quad r_2' = r_2 / k_T^2; \quad x_2' = x_2 / k_T^2.$$

Для определения параметров схем замещения трансформатора можно воспользоваться его справочными данными. Обычно в справочниках приводятся:

- полная мощность, S_T , $\text{kB} \cdot \text{A}$;
- линейное напряжение ВН, U_1 , kB ;

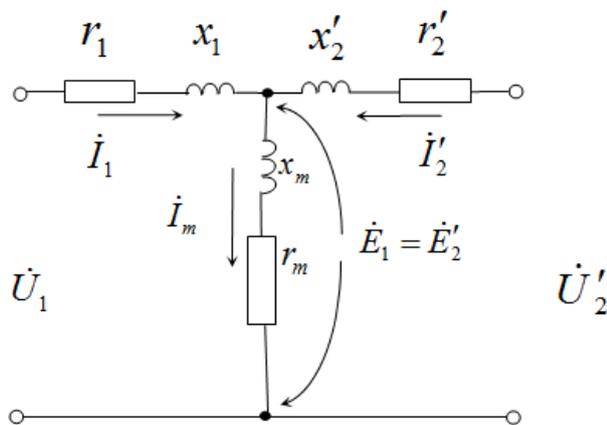


Рис. П.1.1. Т-образная схема замещения трансформатора

- линейное напряжение НН, U_2 , kB ;
- напряжение короткого замыкания, u_K , %;
- ток холостого хода, I_m , %;
- потери холостого хода, P_0 , kBt ;
- потери короткого замыкания, P_K , kBt ;
- схемы соединений обмоток ВН и НН.

В именованных единицах номинальные величины и параметры трансформатора определяются по следующим формулам:

1. Для схемы Δ : $U_{1\phi} = U_1$; $I_{1\phi} = I_1 / \sqrt{3}$;

для схемы: $U_{1\phi} = U_1 / \sqrt{3}; I_{1\phi} = I_1.$

Линейный первичный ток:

$$I_1 = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_1}; I_m[A] = \frac{I_m[\%] \cdot I_{1\phi}}{100}$$

2. Сопротивление намагничивающей ветви:

$$x_m = \frac{U_{1\phi} \cdot 1000}{I_m[A]}; r_m = \frac{P_0}{3 \cdot I_m^2[A]} \cdot 1000;$$

3. Сопротивление короткого замыкания:

$$x_K = x_1 + x'_2 = \frac{u_K[\%]}{100} \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{1\phi}} \cdot 1000; x_1 \approx x'_2 = \frac{x_K}{2};$$

$$r_K = r_1 + r'_2 = \frac{P_K}{3 \cdot I_{1\phi}^2} \cdot 1000; r_1 \approx r'_2 = \frac{r_K}{2}.$$

Для перевода параметров в относительные единицы необходимо найти базисные величины трансформатора

$$U_{\phi_r} = U_{1\phi}; I_{\phi_r} = I_{1\phi}; S_{\phi_r} = S_T; Z_{\phi_r} = \frac{U_{\phi_r}}{I_{\phi_r}}.$$

Векторная диаграмма трансформатора.

Полная схема замещения используется для детального анализа режима работы самого трансформатора. В соответствие с этой схемой установившийся режим трансформатора описывается системой трех уравнений

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_1 \dot{I}_1 + r_1 \dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jx'_2 \dot{I}'_2 + r'_2 \dot{I}'_2; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m, \end{cases}$$

которые наглядно можно представить в виде векторных диаграмм. На рис. П.1.2 изображена векторная диаграмма трансформатора при работе на активно-индуктивную (а) и активно-емкостную (б) нагрузку.

Для построения векторной диаграммы трансформатора в масштабе следует, прежде всего найти токи I_1, I'_2, I_m и их фазовые сдвиги.

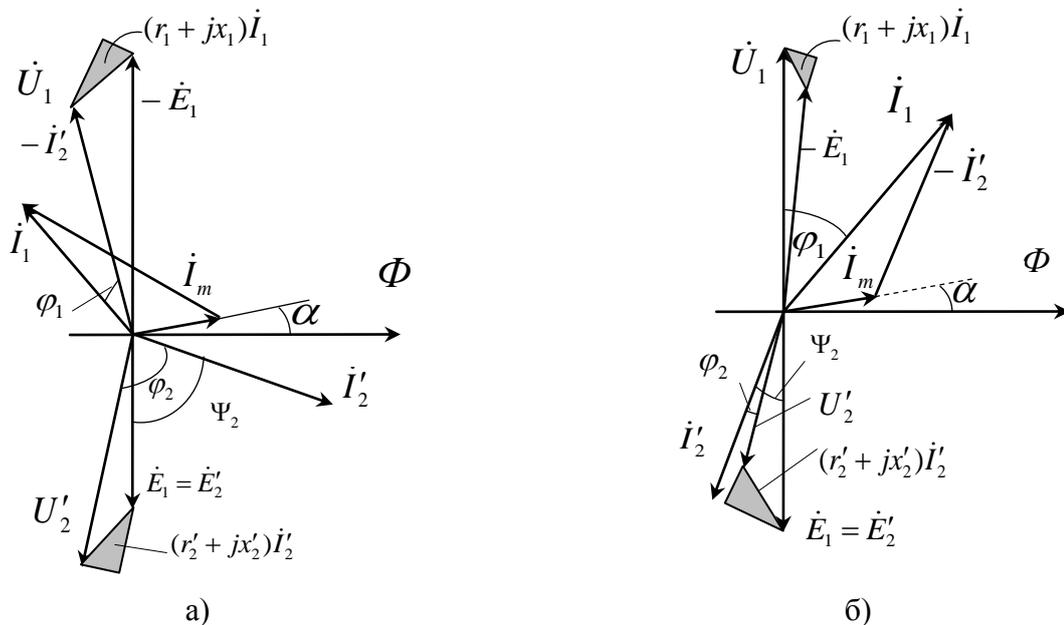


Рис. П.1.2. Векторная диаграмма приведенного трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузке

Основные характеристики трансформатора.

Внешняя характеристика.

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки

$$U_2 = f(I_2).$$

Ее определяют при номинальном первичном напряжении $U_1 = U_{1\text{ном}}$ и неизменном характере нагрузки $\varphi_2 = \text{const}$.

На рис. П.1.3 представлено семейство внешних характеристик при различном характере нагрузки. Как видно из него, вторичное напряжение с ростом нагрузки изменяется: при индуктивном характере нагрузки оно уменьшается, а при емкостном - увеличивается. Это также наглядно иллюстрируется векторными диаграммами (см. рис. П.1.2) Причиной изменения вторичного напряжения является падение напряжения ΔU на внутреннем сопротивлении трансформатора $Z_K = r_K + jx_K$.

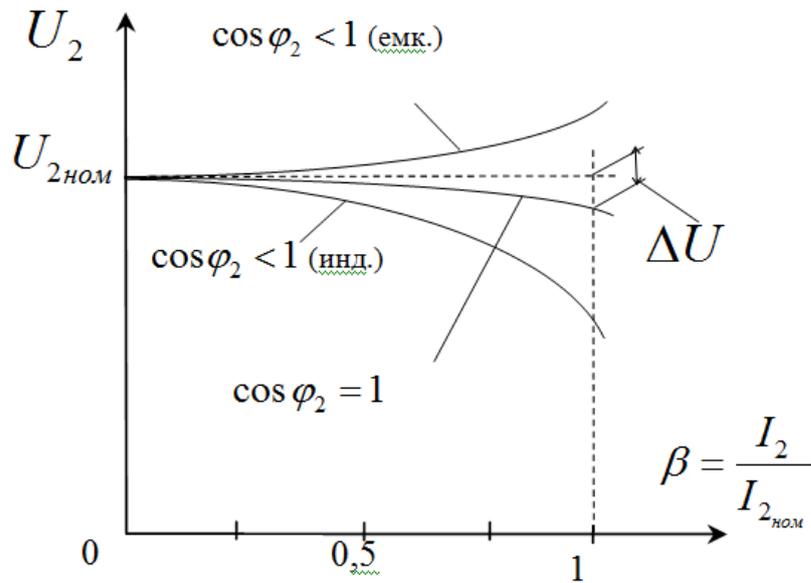


Рис. П.1.3. Внешние характеристики трансформатора

Изменение вторичного напряжения при заданной нагрузке можно приближенно определить по формуле

$$\Delta u = \beta \cdot (u_{K\alpha} \cos \varphi_2 + u_{Kr} \sin \varphi_2),$$

где $u_{K\alpha} = u_K \cos \varphi_K$ - активная составляющая напряжения короткого замыкания u_K ; $u_{Kr} = u_K \sin \varphi_K$ - реактивная составляющая напряжения короткого замыкания u_K ; $\beta = I_2 / I_{2н}$ - коэффициент нагрузки; $\varphi_K = \arctg \frac{x_K}{r_K}$ - угол, определяющий характер внутреннего сопротивления трансформатора x_K .

Подставив $u_{K\alpha}$ и u_{Kr} в Δu получим

$$U_2 = \beta u_K (\cos \varphi_K \cos \varphi_2 + \sin \varphi_K \sin \varphi_2) = \beta u_K \cos(\varphi_K - \varphi_2)$$

Считая, что на холостом ходу трансформатора вторичное напряжение U_{20} равно номинальному, можно окончательно записать выражение для определения вторичного напряжения при нагрузке в о.е.

$$U_2 = 1 - \Delta U = 1 - \beta u_K \cos(\varphi_K - \varphi_2)$$

и использовать его для построения внешних характеристик.

Коэффициент полезного действия трансформатора.

Коэффициентом полезного действия (КПД) трансформатора называют отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки P_2 (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки P_1 (подводимая мощность)

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Так как полезная мощность P_2 меньше подводимой P_1 на сумму потерь мощности $\sum P$, то

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

Потери в трансформаторе складываются из потерь в первичной и вторичной обмотках при протекании по ним тока ($P_{эл}$ - электрические потери), а также из потерь на перемагничивание магнитопровода и от вихревых токов при переменном магнитном потоке ($P_{МГ}$ - магнитные потери). Они непосредственно связаны с и потерями на короткого замыкания P_K и потерями холостого хода P_0 .

Учитывая, что полезная мощность равна

$$P_2 = \beta \cdot S_H \cos \varphi_2,$$

окончательно получим выражение для к.п.д. трансформатора

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta \cdot S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K}$$

Зависимость $\eta = f(\beta)$ иллюстрируется графиками, представленными на рис. П.1.4. Из них видно, что чем меньше коэффициент мощности ($\cos \varphi_2$), т.е. чем больше нагружен трансформатор реактивной мощностью Q_2 , тем ниже к.п.д. При некоторой нагрузке к.п.д. оказывается максимальным. Это происходит тогда, когда электрические потери в обмотках становятся равными магнитным потерям в сердечнике ($P_K = P_0$), что соответствует

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}.$$

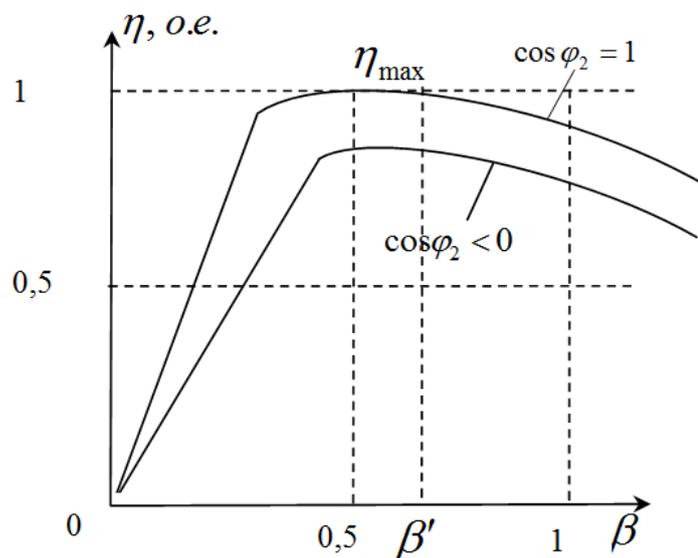


Рис. П.1.4. Зависимость к.п.д. трансформатора от коэффициента нагрузки

При выборе трансформатора стремятся к тому, чтобы β' был близок к средней нагрузке трансформатора. Обычно для большинства силовых трансформаторов β' находится в пределах от 0,4 до 0,7.

Полученные соотношения для к.п.д. трансформатора соответствуют его работе при номинальном напряжении. В реальных условиях первичное напряжение часто отличается от номинального. В этом случае магнитный поток в сердечнике магнитопровода также будет отличаться от номинального, что отразится на величине потерь холостого хода. Для расчета

к.п.д. при ненормальном первичном напряжении следует пользоваться скорректированной формулой

$$\eta = 1 - \frac{k_u^2 P_0 + \beta^2 P_K}{\beta k_u S_H \cos \varphi_2 + k_u^2 P_0 + \beta^2 P_K},$$

при этом $\beta' = k_u \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}$, где $k_u = \frac{U_1}{U_{1ном}}$.

Задание.

Трёхфазный двухобмоточный трёхстержневой трансформатор имеет данные приведённые в таблице П. 1.1.

- Тип трансформатора
- Номинальная мощность S_H , кВА;
- Номинальное напряжение первичной обмотки U_{1H} , кВ;
- Номинальное напряжение вторичной обмотки U_{2H} , кВ;
- Процентное значение напряжения короткого замыкания $u_{кз}$,
- Процентное значение тока холостого хода i_o , %;
- Потери холостого хода P_o , кВт;
- Потери короткого замыкания $P_{кз}$, кВт;
- Коэффициент мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$ (для всех вариантов);
- Схемы соединения обмоток Y/Y-0.

Требуется:

1. Определить номинальные токи в обмотках трансформаторов, фазные напряжения обмоток, коэффициент трансформации фазных напряжений и ток холостого хода в амперах.
2. Определить параметры схемы замещения трансформатора $r_1, x_1, r_2, x_2, r_m, x_m$ и вычертить «Т» образную схему замещения.
3. Построить зависимость КПД трансформатора от нагрузки при $\cos \varphi_2 = \text{const}$ и определить оптимальную загрузку его по току.
4. Построить график зависимости вторичного напряжения от тока нагрузки и внешнюю характеристику трансформатора при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$.
5. Установить распределение нагрузки между трансформаторами одинаковой мощности, если напряжение короткого замыкания второго трансформатора на 10% больше, чем первого (указанного в исходных данных), а нагрузка равна сумме номинальных мощностей обоих трансформаторов.
6. Построить упрощённую векторную диаграмму трансформатора. При решении задачи все характерные величины трёхфазного трансформатора определить для одной фазы.
7. Ответить на вопросы, номера которых указаны в табл. П.1.1.

Таблица П.1.1

Основные данные трансформаторов

№ п/п	Конт-рольные вопросы	Марка трансформатора	Номи-нальная мощность S ,кВА	Сочетание напряжений, кВ		Потери, кВт		$u_{кз}$ %	i_o %
				U_{1H}	U_{2H}	P_o	$P_{кз}$		
1	30,1	ТМ-25/10	25	6; 10	0,4	0,13	0,6	4,5	3,2
2	28,3	ТМ-40/10	40	6; 10	0,4	0,19	0,88	4,5	3,0
3	26,5	ТМ-63/10	63	6; 10	0,4	0,26	1,28	4,5	2,0

4	24,4	ТМ-100/10	100	6; 10	0,4	0,36	1,97	4,5	2,6
5	22,9	ТМ-160/10	160	6; 10	0,4; ,69	0,56	2,65	4,5	2,4
6	20,11	ТМ-250/10	250	6; 10	0,4; ,69	0,82	3,7	4,5	2,3
7	18,13	ТМ-400/10	400	6; 10	0,4; ,69	1,05	5,5	4,5	2,1
8	16,15	ТМ-630/10	630	6; 10	0,4; ,69	1,56	7,6	5	2
9	14,17	ТМ-1000/10	1000	6; 10	0,4; ,69	2,45	12,2	5	1,4
10	12,19	ТМС-1000/10	1000	3,15; 10,5	0,4; ,69	2,75	12,2	8	1,5
11	10,21	ТМ-1600/10	1600	6; 10	0,4; ,69	3,30	18	5,5	1,3
12	8,23	ТМ-2500/10	2500	6; 10	0,4; ,69	4,60	26	5,5	1
13	6,25	ТМ-4000/10	4000	6; 10	3,15;0,69	6,40	33,5	6,5	0,9
14	4,27	ТМ-6300/10	6300	10	3,15;0,69	9,0	46,5	6,5	0,8
15	2,29	ТДНС-25000/10	25000	10,5	6,3	25	115	9,5	0,5
16	4,17	ТМЗ-400/10	400	6; 10	0,4	1,08	5,5	5,5	4,5
17	6,19	ТМЗ-630/10	630	6; 10	0,4	1,68	7,6	6,5	3,2
18	8,21	ТМЗ-1000/10	1000	6; 10	0,4;0,69	2,45	11	5,5	1,4
19	10,23	ТМЗ-1600/10	1600	6; 10	0,4;0,69	3,30	16,5	5,5	1,3
20	12,25	ТМЗ-2500/10	2500	6; 10	0,4;0,69	4,60	24	5,3	1
21	14,27	ТНЗ-630/10	630	6; 10	0,4	1,68	7,6	5,5	3,2
22	16,29	ТНЗ-1600/10	1600	6; 10	0,4;0,69	3,3	16,5	5,5	1,3
23	18,15	ТНЗ-2500/10	2500	6; 10	0,4;0,69	4,6	24	5,5	1
24	20,13	ТМ-100/35	100	35	0,4	0,46	1,97	6,5	2,6
25	22,11	ТМ-160/35	160	35	0,4;0,69	0,7	2,65	6,5	2,6
26	24,9	ТМ-250/35	250	35	0,4;0,69	1	3,7	6,5	2,6
27	26,7	ТМ-400/35	400	35	0,4;0,69	1,35	5,5	6,5	3,5
28	28,5	ТМ-630/35	630	35	0,4;0,69	1,9	7,6	6,5	3
29	30,3	ТМ-1000/35	1000	20;35	0,4;10,5	2,75	12,2	6,5	1,5
30	2,15	ТМ-1600/35	1600	20;35	0,4;10,5	3,65	18	6,5	1,4

Примечание. Нечетный вариант выбирают меньшие значения напряжений $U_{1н}$ и $U_{2н}$, четный - большие значения.

Пример решения задачи.

Исходные данные:

Трехфазный силовой трансформатор имеет следующие данные:

Тип трансформатора: ТМН.

Соединение обмоток Y/Δ-11.

Номинальные данные: $S_n = 6300$ кВА; $U_{1н} = 10$ кВ; $U_{2н} = 6,3$ кВ; $u_{кз} = 7,5$ %; $i_0 = 0,8$ %; $P_0 = 7,4$ кВт; $P_{кз} = 46,5$ кВт; $\cos\varphi_2 = 0,8$.

Характер нагрузки активно-индуктивный.

1. Определить номинальные токи в обмотках трансформаторов, фазные напряжения обмоток, коэффициент трансформации фазных напряжений и ток холостого хода в амперах.

Номинальный ток первичной обмотки, А

$$I_{1н} = I_{1фн} = \frac{S_n}{3U_{1ф}} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{1н}};$$

$$I_{1н} = I_{1фн} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 10} = 364 \text{ A.}$$

Номинальный ток вторичной обмотки, А

$$I_{2н} = I_{2фн} = \frac{S_n}{3U_{2ф}} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{2н}};$$

$$I_{2н} = I_{2фн} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 578 \text{ A.}$$

Значения фазных токов и напряжений определяем на основе известных из курса ТОЭ соотношений между линейными и фазными величинами в трехфазной системе при соединении обмоток трансформатора в Y и Δ:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{3}};$$

$$U_{1фн} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.8 \text{ кВ};$$

$$I_{1н} = I_{1фн};$$

$$I_{1фн} = 364 \text{ A};$$

$$U_{2фн} = U_{2н};$$

$$U_{2фн} = 6.3 \text{ кВ};$$

$$I_{2фн} = \frac{I_{2н}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{2фн} = \frac{578}{\sqrt{3}} = 333 \text{ A.}$$

Коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_{1фн}}{U_{2фн}};$$

$$K = \frac{5800}{6300} = 0.92.$$

Величину тока холостого хода в амперах определяем из соотношения

$$I_m = \frac{I_{m\%}}{100} \cdot I_{1фн};$$

$$I_m = \frac{0,8}{100} \cdot 364 = 2.912 \text{ A.}$$

Параметры холостого хода

$$x_m = \frac{U_{1фн} \cdot 1000}{I_m};$$

$$x_m = \frac{5,8 \cdot 1000}{2,912} = 1,992 \text{ кОм}$$

$$x_m \approx 2 \text{ кОм};$$

$$r_m = \frac{P_0}{3I_m^2};$$

$$r_m = \frac{2500}{3 \cdot 2,912^2} = 0,295 \text{ кОм};$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{0\phi}}{U_{1н\phi} \cdot I_m};$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{2500}{5800 \cdot 2,912} = 0,15;$$

$$\varphi_0 = \arccos \left(\frac{P_{0\phi}}{U_{1н\phi} \cdot I_m} \right);$$

$$\varphi_0 = \arccos 0,15 = 81,5^0.$$

2. Определение параметров схемы замещения, приведенных к первичной обмотке, а также активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания.

$$U_{1к\phi} = \frac{u_{к\%} \cdot U_{1н\phi}}{100};$$

$$U_{1к\phi} = \frac{7,5 \cdot 5800}{100} = 435 \text{ В};$$

$$x_k = x_1 + x_2' = \frac{u_{к\%} \cdot U_{1н\phi}}{100 \cdot I_{1н\phi}} 1000;$$

$$x_k = \frac{7,5 \cdot 5800}{100 \cdot 364} = 1,195 \text{ Ом};$$

$$r_k = r_1 + r_2' = \frac{P_k}{3 \cdot I_{1н\phi}^2} 1000;$$

$$r_k = \frac{46500}{3 \cdot 364^2} = 0,12 \text{ Ом};$$

$$r_1 \approx r_2' = \frac{r_k}{2};$$

$$r_1 \approx r_2' = \frac{0,12}{2} = 0,06 \text{ Ом};$$

$$U_{к\alpha\%} = \frac{I_{1н\phi} \cdot r_k}{U_{1н\phi}} 100;$$

$$U_{ка\%} = \frac{364 \cdot 0.12}{5800} 100 = 0.753 \%;$$

$$U_{кр\%} = \frac{I_{1нф} \cdot x_k}{U_{1нф}} 100;$$

$$U_{кр\%} = \frac{364 \cdot 1.195}{5800} 100 = 7.499 \%;$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{x_k}{r_k};$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{1.195}{0.12} = 84.26^\circ.$$

На основе выполненных расчетов вычерчиваем Т-образную схему замещения трансформатора и указываем на ней величины соответствующих сопротивлений (рис. П.1.5).

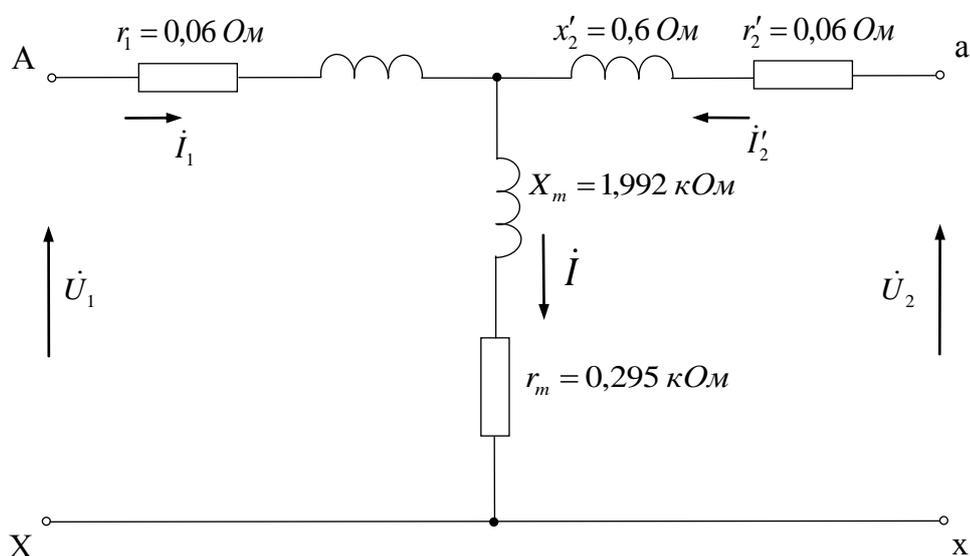


Рис. П.1.5. Т-образная схема замещения трансформатора

3. Построение характеристики $U_2 = f(\beta)$ и $\Delta U_{\%} = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 0.8$ и $\cos \varphi_2 = 1$.

Таблица П.1.2

Результаты вычислений $\Delta U_{\%}$ и $U_2 = f(\beta)$:

β	0,1	0,25	0,5	0,75	1,01	1,25	Пример
$\Delta U_{\%}$	0,067	0,169	0,338	0,507	0,684	0,847	$\cos \varphi_2 = 1$
$\Delta U_{\%}$	0,501	1,260	2,530	3,809	5,151	6,398	$\cos \varphi_2 = 0,8$
U_2	6296	6299	6279	6268	6257	6247	$\cos \varphi_2 = 1$
U_2	6268	6221	6141	6060	5975	5897	$\cos \varphi_2 = 0,8$

По данным таблицы П.1.2 на рис. П.1.6 и П.1.7 строим зависимости $\Delta U_{\%}$ и $U_2 = f(\beta)$ и $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$

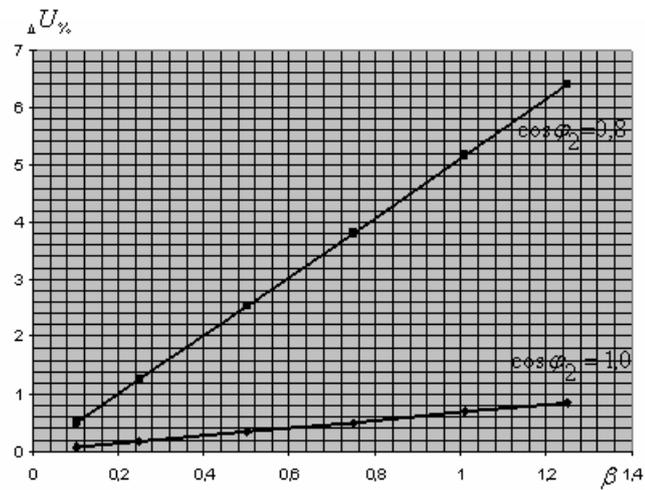


Рис. П.1.6. График зависимости $\Delta U_{\%} = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 1$

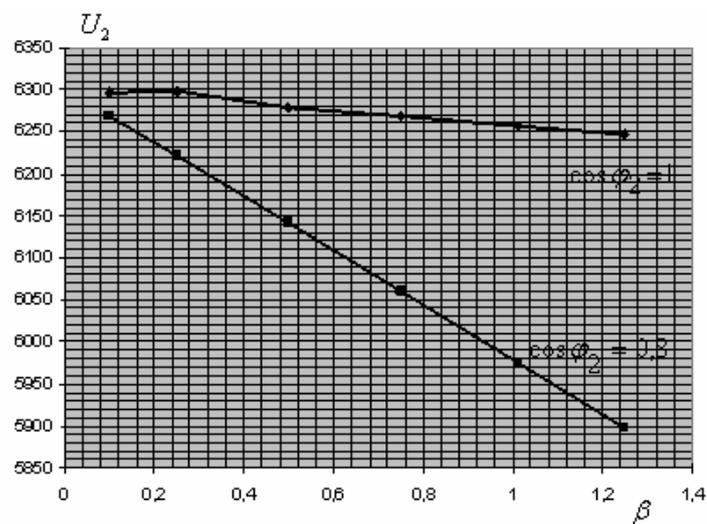


Рис. П.1.7. График зависимости $U_2 = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 1$

Изменения напряжения при нагрузке трансформатора зависит от характера нагрузки (коэффициента мощности $\cos \varphi_2$) и может быть определено по формуле:

$$\Delta U_{\%} = \beta(U_{K\alpha\%} \cos \varphi_2 + U_{KP\%} \sin \varphi_2).$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора определяем по формуле:

$$U_2 = U_{нн} \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right), \text{В}$$

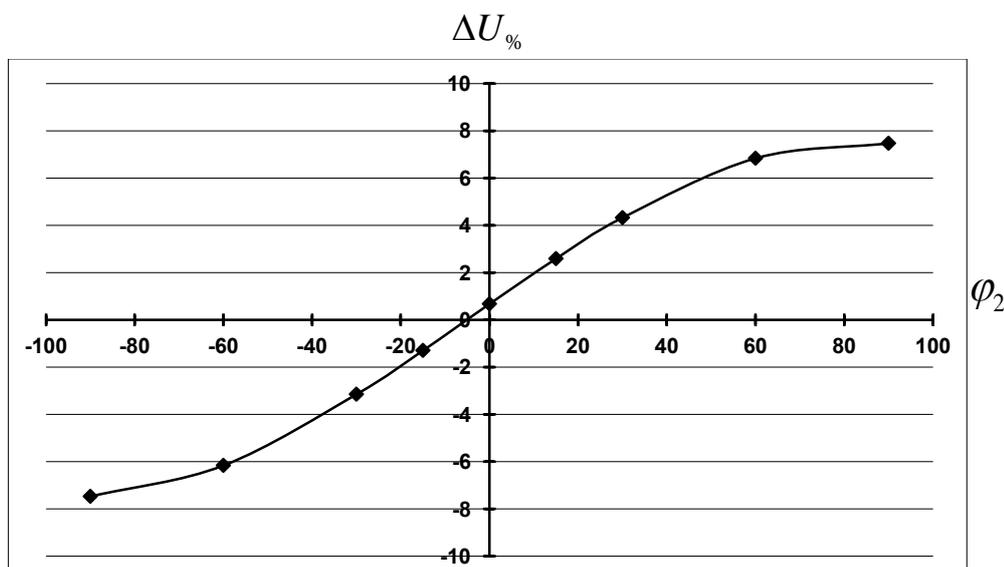
3 Расчет и построение кривой процентного изменения напряжения в зависимости от угла φ_2 при номинальном токе.

$$\Delta U_{\%} = \beta(U_{K\alpha\%} \cos \varphi_2 + U_{KP\%} \sin \varphi_2), \text{ где } \beta = 1$$

Результаты вычислений $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$

φ_2 , град.	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$\Delta U_{\%}$
90^0	0	1	7,469
60^0	0,5	0,87	6,835
30^0	0,87	0,5	4,322
15^0	0,96	0,26	2,589
0^0	1	0	0,675
-15^0	0,96	-0,26	-1,294
-30^0	0,87	-0,5	-3,147
-60^0	0,5	-0,87	-6,16
-90^0	0	-1	-7,469

По данным табл. П. 1.3 строим график зависимости $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$ на рис. П.1.8

Рис. П.1.8. График зависимости $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$

4. Коэффициент полезного действия трансформатора.

Коэффициентом полезного действия (к.п.д.) трансформатора называют отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки P_2 (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки P_1 (подводимая мощность)

$$\eta = P_2 / P_1.$$

При некоторой нагрузке к.п.д. оказывается максимальным. Это происходит тогда, когда электрические потери в обмотках становятся равными магнитным потерям в сердечнике ($P_K = P_0$), что соответствует

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}$$

При выборе трансформатора стремятся к тому, чтобы β' был близок к средней нагрузке трансформатора. Обычно для большинства силовых трансформаторов β'

находится в пределах от 0,4 до 0,7.

Учитывая, что полезная мощность равна

$$P_2 = \beta \cdot S_H \cos \varphi_2,$$

окончательно получим выражение для к.п.д. трансформатора

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta \cdot S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K}$$

Зависимость $\eta = f(\beta)$ иллюстрируется графиками, представленными на рис. П.1.9. Из них видно, что чем меньше коэффициент мощности ($\cos \varphi_2$), т.е. чем больше нагружен трансформатор реактивной мощностью Q_2 , тем ниже к.п.д.

Для построения зависимости $\eta = f(\beta)$ в выражение КПД подставляем значения $\beta = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25$ и находим соответствующие им значения η . Результаты расчета сводим в табл. П. 1.4

Таблица П.1.4

Расчет КПД η

β	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25	Пример
η	98,70	99,30	99,39	99,29	99,14	98,99	$\cos \varphi_2 = 1$
η	98,46	99,19	99,25	99,12	98,93	98,74	$\cos \varphi_2 = 0,8$

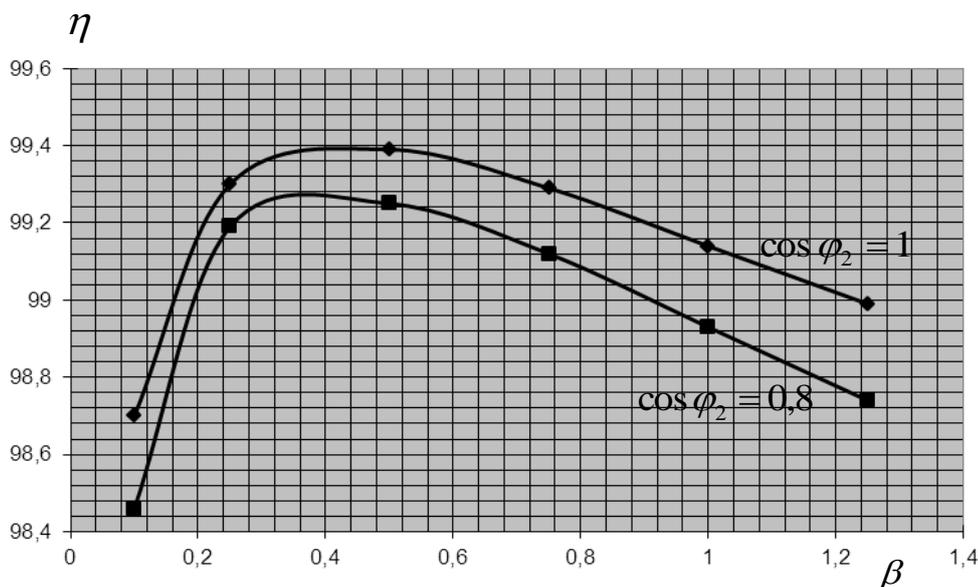


Рис. П.1.9. График зависимости $\eta = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 1$

5 Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания.

Различие в значениях напряжения короткого замыкания трансформаторов обуславливает распределение между ними общей нагрузки пропорционально номинальным мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания:

$$S = S_1' + S_2' = \left[\frac{S_{1ном}}{U_{1кз}} + \frac{S_{2ном}}{U_{2кз}} \right] \cdot U_{кз}'$$

где S – общая нагрузка; S'_1 и S'_2 – реальные нагрузки трансформаторов; $U_{кз1}$ и $U_{кз2}$ – напряжения КЗ трансформаторов; $U'_{кз}$ – эквивалентное напряжение КЗ параллельно включенных трансформаторов.

$$U'_{кз} = \frac{S}{S_{1н.м.}/U_{кз1} + S_{2н.м.}/U_{кз2}};$$

$$U'_{кз} = \frac{12600}{6300/7.5 + 6300/9} = 8.18\%;$$

где, $U_{кз2} = 1.2 U_{кз}$,

$$U_{кз2} = 1.2 \cdot 7.5 = 9\%$$

Определим реальные нагрузки трансформаторов

$$S'_1 = \frac{S_{н.м.1}}{U_{кз1}} \cdot U'_{кз};$$

$$S'_1 = \frac{6300}{7.5} \cdot 8.18 = 6871.2 \text{ кВт};$$

$$S'_2 = \frac{S_{н.м.2}}{U_{кз2}} \cdot U'_{кз};$$

$$S'_2 = \frac{6300}{9} \cdot 8.18 = 5726 \text{ кВт}.$$

Определим на сколько процентов перегружен один трансформатор и недогружен другой и на сколько процентов пришлось снизить общую нагрузку:

$$\eta_1 = \frac{S'_1 - S_{н.м.1}}{S_{н.м.1}} 100;$$

$$\eta_1 = \frac{6871.2 - 6300}{6300} 100 = 9.1\%;$$

$$\eta_2 = \frac{S_{н.м.2} - S'_2}{S_{н.м.2}} 100;$$

$$\eta_2 = \frac{6300 - 5726}{6300} 100 = 9.1\%.$$

По результатам расчета видно, что первый трансформатор перегружен на 9.1% , а второй недогружен на 9.1%.

Наилучшее использование установленной мощности трансформаторов может быть только при равенстве напряжений КЗ.

6. Упрощенную векторную диаграмму трансформатора строим следующим образом. На листе бумаги строим горизонтально вектор номинального вторичного тока $\vec{I}_{2н}$ в произвольном масштабе. Под углом $\varphi_2 = \arccos(\cos\varphi_2) = \arccos(0.8) = 36^\circ$ в сторону опережения от $\vec{I}_{2н}$ строим вектор вторичного номинального напряжения $\vec{U}_{2н}$ длиной 100 мм (отрезок ОА). С конца вектора $\vec{U}_{2н}$ параллельно вектору $\vec{I}_{2н}$ строим вектор $\vec{U}_{Ка}$, по модулю равный $U_{Ка}\%$ (отрезок АВ). От точки В перпендикулярно к вектору $\vec{I}_{2н}$ откладываем вектор $\vec{U}_{Кр}$, по модулю равный $U_{Кр}\%$, и получаем точку С. Соединив точки А и С, получаем прямоугольный

треугольник короткого замыкания трансформатора. Отрезок СО характеризует величину подведенного к трансформатору напряжения $U_{1н}$ (рис. П.1.10).

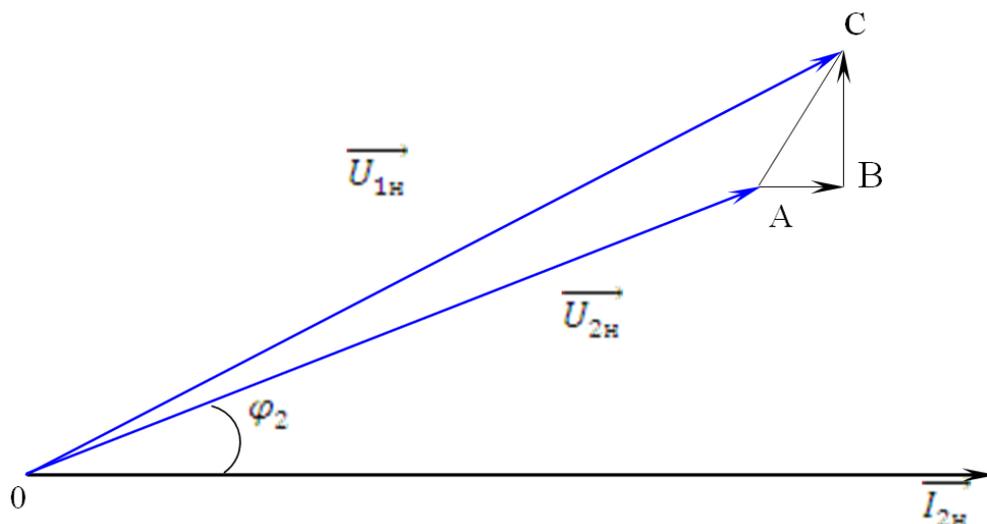


Рис. П.1.10. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора

Форма отчетности:

1. Схема замещения и расчет номинальных величин заданного трансформатора.
2. Графическая зависимость КПД трансформатора от нагрузки при $\cos\varphi_2 = \text{const}$, зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки и внешняя характеристика трансформатора при $U_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi_2 = \text{const}$.
4. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора для одной фазы.

Основная литература:

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

Дополнительная литература:

1. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.
2. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1972 - Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы - 543 с.: ил. - Б. ц.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Каково назначение силовых трансформаторов в системе передачи и распределения электрической энергии?
2. Объясните устройство и принцип действия трансформатора.
3. Из каких частей состоит активная часть трансформатора? Каково их назначение и конструкция?
4. Сечение сердечника однофазного трансформатора 50 см^2 , индукция в сердечнике 10000 Тл. Сколько витков надо намотать для первичной и вторичной обмоток, чтобы получить трансформатор, понижающий напряжение с 6000 до 400В? Частота тока 50 Гц.

5. От каких физических величин зависят ЭДС, наводимые в обмотках трансформатора?
6. При полной нагрузке ток в первичной обмотке трансформатора равен 600 А. Определить приближенную величину тока холостого тока.
7. Почему при увеличении нагрузки вторичной обмотки увеличивается ток, потребляемый трансформатором из сети? Какова здесь роль противо-ЭДС в первичной обмотке?
8. Какие потери имеют место в трансформации при нагрузке и при холостом ходе?
9. Почему коэффициент полезного действия при увеличении нагрузки сначала возрастает быстро, а потом рост его замедляется?
10. Как работает трансформатор под нагрузкой?
11. Объясните режим короткого замыкания трансформатора.
12. К чему приведет увеличение приложенного к трансформатору напряжения сверх номинального?
13. Что называется напряжением короткого замыкания? Первичное напряжение трансформатора 6000 В. Напряжение короткого замыкания 5 %. Какое напряжение нужно подвести к первичной обмотке, чтобы в обеих обмотках протекали номинальные токи при коротком замыкании вторичной обмотки?
14. На что расходуется активная мощность, потребляемая трансформатором при опыте холостого хода и короткого замыкания?
15. Что такое группа соединения трансформатора и как она обозначается?
16. Как из основной группы соединения можно получить производную?
17. К трансформатору номинальной мощности 320 кВА присоединена нагрузка с коэффициентом мощности 0,85. Какую активную мощность отдаст трансформатор, если он загружен на 60%.
18. К трехфазному трансформатору напряжением $U_1/U_2 = 10\ 000/380$ В, подключены осветительные электроприёмники ($\cos\varphi=1$) общей мощностью $P=100$ кВт. Трансформатор соединен по схеме Y/Y. КПД трансформатора $\eta=0,8$. Определить первичный и вторичный токи трансформатора. Показать схему подключения приемников.
19. Обозначение типа трансформатора. В паспорте трансформатора указано ТДНС-10 000/35. Что это за трансформатор?
20. Какие условия необходимо соблюдать при включении трансформаторов на параллельную работу?
21. Как произвести маркировку трансформатора и определить группу соединения?
22. Что такое фазировка трансформаторов и как она выполняется?
23. Объясните регулирование вторичного напряжения трансформатора.
Регулирование с ПБВ и РПН.
24. В каких случаях применение автотрансформатора более выгодно по сравнению с обычным трансформатором?
25. Трансформаторы специального назначения (Умножители частоты, линейные ТР, сварочные).
26. Как опытным путем определить напряжение короткого замыкания трансформатора?
27. К какой обмотке целесообразно подводить напряжение при опыте холостого хода, а к какой – при опыте короткого замыкания? Объясните почему.
28. Изменится ли основной магнитный поток и ток холостого хода, если трансформатор включать в сеть с частотой выше или ниже номинальной?
29. Объясните принцип регулирования напряжения под нагрузкой.
30. Каков порядок переключения контактов переключающего устройства при регулировании напряжения под нагрузкой?

Практическое занятие 2

Решение типовой задачи по разделу «Асинхронные двигатели»

Цель работы: расчет механических характеристик асинхронного двигателя.

Краткие теоретические сведения.

Схема замещения асинхронного двигателя.

Асинхронный двигатель, так же как и трансформатор, представляется «Т»-образной схемой замещения, только в качестве эквивалентной механической нагрузки в схему введено добавочное сопротивление $R_{доб} = r'_2 \cdot (1-s)/s$, зависящее от скольжения s (рис.П.2.1, а).

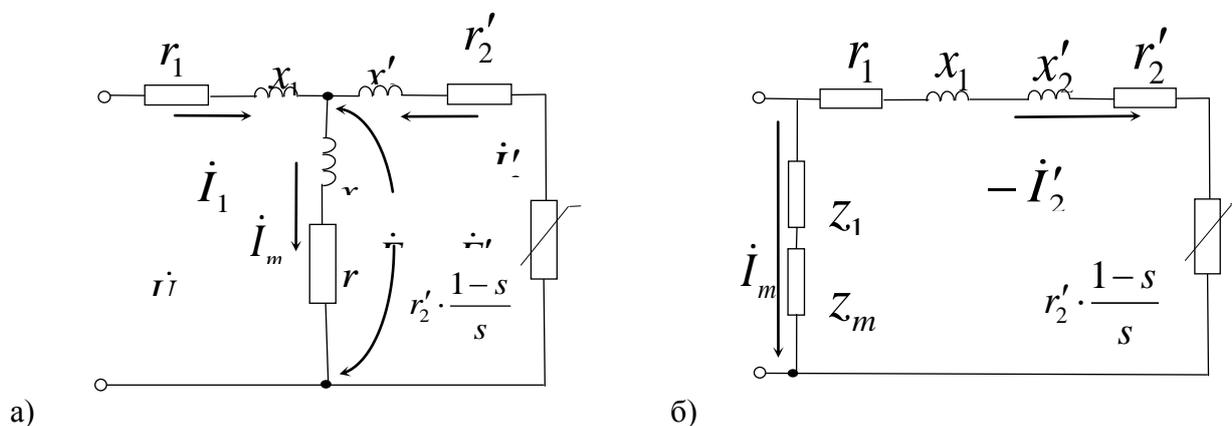


Рис. П.2.1. Схемы замещения асинхронного двигателя а) Т-образная, б) Г-образная

Активная мощность, выделяемая на этом сопротивлении эквивалента механической мощности на валу двигателя.

В соответствии с этой схемой установившийся режим работы двигателя описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_1\dot{I}_1 + r_1\dot{I}_1; \\ 0 = \dot{E}'_2 - jx'_2\dot{I}'_2 - r'_2\dot{I}'_2 - r'_2 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot \dot{I}'_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m \end{cases}$$

и векторной диаграммой (рис. П.2.2).

Скольжение двигателя определяется по формуле

$$s = \frac{n_1 - n_p}{n_1},$$

где $n_1 = 60 f_1 / p$ - синхронная частота вращения магнитного поля, об/мин; f_1 - частота сети, Гц; p - число пар полюсов; n_p - частота вращения ротора, об/мин.

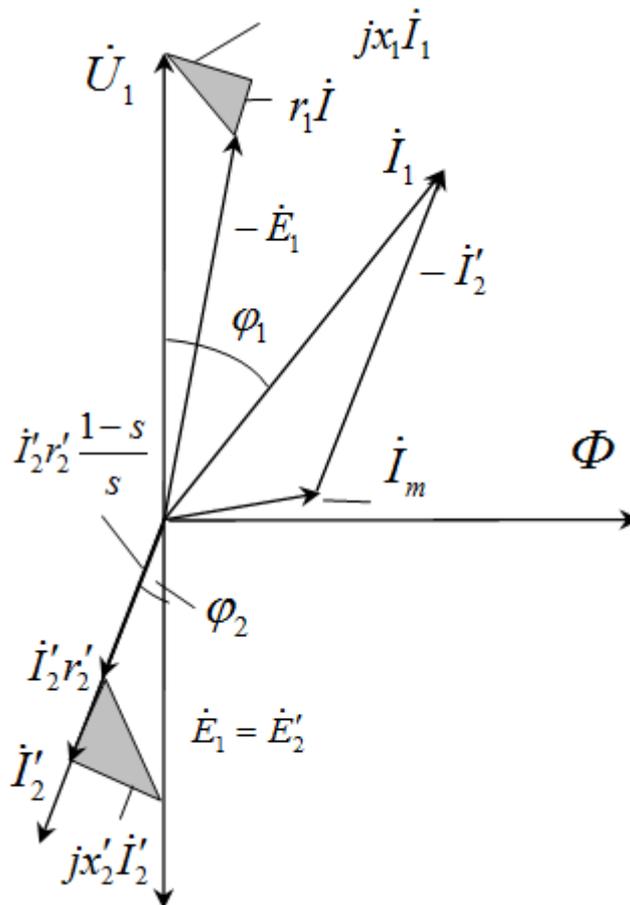


Рис. П.2.2. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Особенностью асинхронного двигателя является большой ток намагничивания \dot{I}_m , составляющий от 20% до 50% номинального тока и обуславливающий низкий $\cos \varphi$ двигателя. Поэтому пренебрегать намагничивающим контуром $z_m = r_m + jx_m$ нельзя. При анализе электромагнитных процессов часто пользуются упрощенной «Г»-образной схемой замещения с вынесенным намагничивающим контуром (рис. П.2.1, б). Эта схема дает удовлетворительные результаты при расчете рабочих режимов.

Механическая характеристика асинхронного двигателя.

Для определения величины скольжения s необходимо найти точку механического равновесия между электромагнитным моментом M , развиваемым двигателем, и внешним моментом нагрузки M_{BH} . С этой целью предварительно рассчитываются *механические характеристики* двигателя $M = f(s)$ и рабочего механизма $M_{BH} = f(s)$. Электромагнитный момент двигателя связан с электромагнитной мощностью $P_{ЭМ}$ простым соотношением

$$M = \frac{P_{ЭМ}}{\Omega_1} = \frac{60}{2\pi n_1} \cdot P_{ЭМ},$$

где $P_{ЭМ} = \frac{m_1 I_2'^2}{s} r_2'$; $\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi}{60} n_1$ - угловая частота вращения магнитного поля статора; m_1 - число фаз двигателя.

Если подставить в формулу для момента выражение для тока I_2' , определенное по схеме рис. П.2.1, б, то получим

$$M = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

На рис. П.2.3 изображена зависимость этого момента от скольжения. К особой точке механической характеристики относится точка максимального момента M_{\max} , соответствующая критическому скольжению $s_{кр} = r_2' / x_k$.

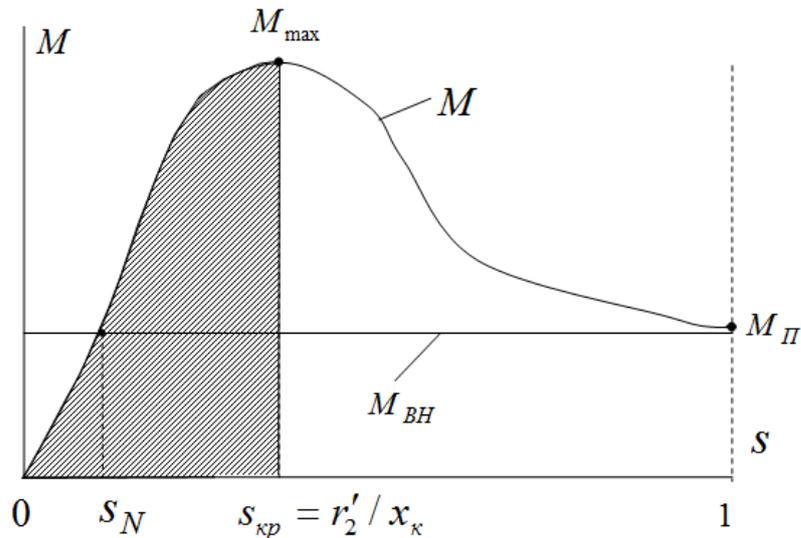


Рис. П.2.3. Механические характеристики двигателя и рабочего механизма

$$M_{\max} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2 x_k}{(r_1 + x_k)^2 + x_k^2}$$

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, то выражение для M_{\max} упростится и будет зависеть от единственного параметра x_k

$$M_{\max} = \frac{m_1 p}{4\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{x_k}$$

Важность этой точки для установившегося режима заключается в том, что она определяет устойчивую зону работы двигателя в диапазоне скольжения от нуля до $s_{кр}$. При скольжении больше критического двигатель «прокидывается».

Внешний момент рабочего механизма, если в его качестве выступает подъемное устройство, не зависит от скольжения и его можно принять постоянным. При номинальном внешнем моменте, равным

$$M_{ВН} = \frac{P_2}{\Omega_1} = \frac{S_{НОМ} \eta_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ}}{2\pi f_1} p,$$

ему будет соответствовать номинальное скольжение s_N . Здесь $S_{НОМ}$, $\eta_{НОМ}$, $\cos \varphi_{НОМ}$ - номинальные полная мощность, к.п.д. и коэффициент мощности двигателя.

При упрощенных расчетах механическая $M(s)$ характеристика АД может быть построена по данным каталога с использованием формулы Клосса:

$$\frac{M}{M_{\max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}},$$

где $M_{\max} = K_M \cdot M_{\text{НОМ}}$ - максимальный электромагнитный момент двигателя; $s_{\text{кр}}$ - критическое скольжение.

Из формулы Клосса

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}).$$

У машин нормального исполнения кратность максимального момента

$$K_M = M_{\max} / M_{\text{НОМ}} = 1,7 \div 3,0; \quad s_{\text{кр}} = 0,06 \div 0,15.$$

Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя

Для приближенного расчета параметров схемы замещения АД, удовлетворяющих рабочему режиму, можно использовать справочные данные о кратности максимального момента и величины номинального скольжения. С целью дальнейшего упрощения этой задачи будем считать активные сопротивления и индуктивные сопротивления рассеяния статорной и роторной обмотки равными между собой, то есть $r_1 = r_2'$ и $x_1 = x_2'$, а намагничивающий ток чисто реактивным.

Параметры ветви намагничивания Γ – образной схемы замещения на рис. П.2.1, б определяются по данным режима холостого хода.

$$z_0 = U_1 / I_{10}; \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3U_{1\phi} \cdot I_{10}};$$

$$r_0 = z_0 \cos \varphi_0; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Параметры рабочей ветви схемы замещения асинхронного двигателя определяются по данным пускового режима соответствующему режиму короткого замыкания при номинальном напряжении:

полное сопротивление короткого замыкания

$$z_K = U_{1\phi} / I_{\text{ПУСК}}; = U_{1\phi} / (K_I \cdot I_{\text{НОМ}}),$$

где $I_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / (3U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H)$ - фазный ток в обмотке статора; K_I - кратность пускового тока к номинальному, $K_I = \frac{I_{\text{ПУСК}}}{I_{\text{НОМ}}}$

активное и реактивное сопротивление короткого замыкания рис. 11, б.

$$r_K = z_K \cos \varphi_K; \quad \cos \varphi_K = P_K / m_1 U_K I_K;$$

$$x_K = z_K \sin \varphi_K; \quad r_1 = r_2' = r_K / 2;$$

$$x_1 = x_2' = x_K / 2.$$

Задача 1.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором питается от трехфазной сети с линейным напряжением U_l , частотой 50 Гц. Величины, характеризующие номинальный режим двигателя: мощность на валу $P_{ном}$; частота вращения $n_{ном}$; коэффициенты мощности $\cos \varphi_n$ и полезного действия η_n ; кратности критического k_m и пускового моментов k_n , кратность пускового тока i_n приведены в табл. П.2.1.

Задание:

1. В зависимости от линейного напряжения сети U_l и номинального напряжения двигателя определить схему соединения обмоток статора.
2. Для номинального режима двигателя рассчитать: 1) момент на его валу $M_{ном}$; 2) активную мощность $P_{Iном}$, потребляемую из сети; 3) линейный ток $I_{Iном}$; 4) частоту вращения магнитного поля n_0 ; 5) частоту ЭДС и тока в роторе $f_{2ном}$.
3. Построить естественную механическую характеристику и определить по ней частоту вращения n ротора, если момент нагрузки на валу двигателя в установившемся режиме $M_{ст}=0,8 \cdot M_{max}$. Указать три характерные точки механической характеристики двигателя.
4. Рассчитать пусковой момент при номинальном напряжении и снижении его на 10%.
5. Рассчитать пусковой ток двигателя.
6. Ответить на вопросы, номера которых указаны во 2 графе табл. П.2.1.

Таблица П.2.1

Технические данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором напряжением 220/380 В

Порядковый номер студента	Контрольные вопросы	Технические данные двигателя							
		$P_{ном}$ кВт	η_n %	$\cos \varphi_n$	$K_m = \frac{M_m}{M_n}$	U_l В	$n_{ном}$ об/мин	$\frac{I_{jn}}{I_{1n}}$	$\frac{M_n}{M_n}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,14	0,09	60	0,70	2,2	220	720	5	2
2	3,12	0,12	63	0,70	2,2	220	945	5	2
3	5,10	0,18	66	0,76	2,2	220	2925	5	2,2
4	7,8	0,28	66	0,77	2,2	220	1420	5	2,3
5	9,6	0,37	70	0,86	2,2	380	730	4,5	2
6	11,4	0,55	73	0,86	2,2	380	940	4,5	2
7	13,2	0,76	77	0,87	2,2	380	1450	5	2,2
8	15,16	1,1	77,5	0,87	2,2	220	2940	6	2,1
9	17,18	1,5	81	0,85	2,2	220	1470	5	2
10	21,20	2,2	83	0,87	2,2	380	720	6	1,8
11	23,30	3,0	84,5	0,88	2,2	380	940	6	2
12	25,28	4,0	86,5	0,89	2,2	220	1370	6	2
13	27,24	5,5	87,5	0,91	2,2	220	1450	7	2
14	29,22	7,5	87,5	0,88	2,2	380	2920	7,5	2
15	2,27	11,0	88	0,9	2,2	380	720	6	1,6
16	4,25	15,0	88	0,91	2,2	380	1440	7	1,4
17	6,23	18,5	88,5	0,92	2,2	220	1420	7	1,4
18	8,21	22,0	88,5	0,91	2,2	380	940	6,5	1,6
19	10,19	30	90	0,92	2,2	380	970	6,5	1,6
20	12,17	37	90	0,89	2,2	220	2915	7	1,6
21	14,15	45	91	0,9	2,2	380	1435	7	1,4

22	16,13	55	91	0,92	2,2	380	1470	7	1,2
23	15,11	75	91	0,89	2,2	380	1370	7	1,2
24	20,9	90	92	0,9	2,2	220	720	7	1,2
25	22,7	110	91	0,89	2,2	380	730	6	1,1
26	24,5	132	91,5	0,89	2,2	380	940	6,5	1,4
27	26,3	160	92	0,9	1,9	380	720	6,5	1,2
28	26,1	200	94,5	0,9	1,9	380	945	7	1,6
29	30,4	250	92,5	0,9	1,9	380	1470	7	1
30	19,2	315	93,5	0,91	1,9	380	720	6,5	1,2

Пример решения задачи

Пример 1. Номинальная мощность трехфазного АД с короткозамкнутым ротором $P_{ном} = 22$ кВт, номинальное напряжение $U_{ном} = 380$ В, номинальная частота вращения $n_n = 2900$ мин⁻¹, номинальный КПД $\eta_{ном} = 89\%$, номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,88$. Кратность пускового тока $I_{1п} / I_{1ном} = 7$, а перегрузочная способность $K_M = M_{max} / M_{ном} = 2,2$.

Определить для номинального режима работы двигателя:

- 1) полезный вращающий момент на валу;
- 2) электромагнитный момент, действующий на ротор;
- 3) мощность и ток, потребляемые из сети;
- 4) частоту вращения поля, частоту тока и ЭДС в роторе.

Решение:

1. Вращающий момент на валу

$$M_{ном} = (9550 \cdot P_{ном}) / n_{ном};$$

$$M_{ном} = (9550 \cdot 22) / 2900 = 72,45 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Электромагнитный момент больше момента на валу

$$M_{эл.ном} = 9550 (P_{ном} + \Delta P_{мех}) / n_{ном}$$

где $\Delta P_{мех}$ - мощность механических потерь, определяемая обычно по универсальным кривым (рис. П.2.4),

$$\Delta P^*_{мех. ном} = \Delta P_{мех. ном} / P_{ном} = 0,8\%.$$

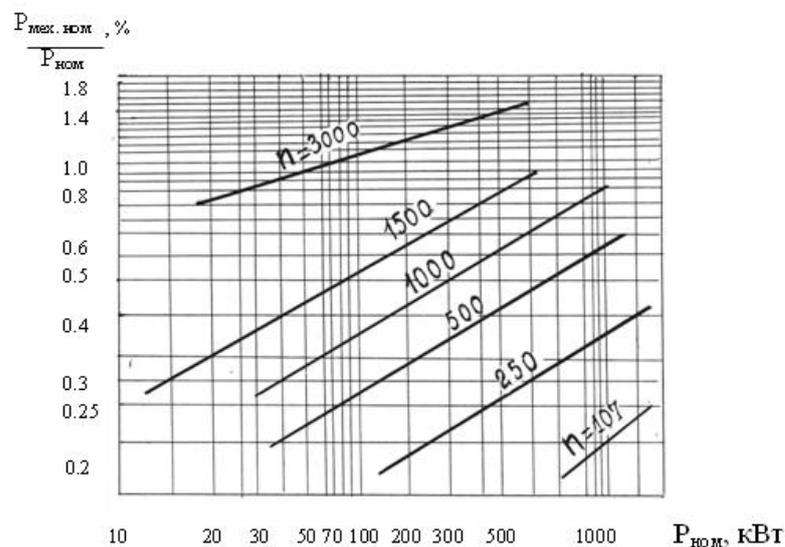


Рис. П.2.4. Универсальные кривые

Отсюда мощность механических потерь в номинальном режиме

$$\Delta P_{\text{мех. ном}} = 0,008 \cdot 22 = 0,176 \text{ кВт.}$$

Номинальный электромагнитный момент

$$M_{\text{эм. ном}} = 9550 (22 + 0,176) / 2900 = 73,03 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Из сопоставления величин $M_{\text{ном}}$ и $M_{\text{эм. ном}}$ видно, что они очень близки по значению. Это позволяет при построении механических характеристик двигателя использовать в расчетах величину $M_{\text{ном}}$ вместо $M_{\text{эм. ном}}$, что значительно упрощает расчет.

3. Потребляемая мощность

$$P_{I \text{ ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}};$$

$$P_{I \text{ ном}} = 22 / 0,89 = 24,72 \text{ кВт.}$$

Номинальный ток

$$I_{I \text{ ном}} = \frac{P_{I \text{ ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}};$$

$$I_{I \text{ ном}} = \frac{24,72 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,88} = 42,68 \text{ А.}$$

4. Частота вращения поля $n_0 = 60 f_1 / p$ где p – число пар полюсов. При $f_1 = 50$ Гц возможные соотношения между p и n_0 представлены в таблице П.2.2.

Таблица П.2.2

Таблица соотношений между p и n_0

p	1	2	3	4	5
n_0 , мин ⁻¹	3000	1500	1000	750	600

Поскольку известно, что ротор АД в номинальном режиме вращается с частотой $n_{\text{ном}}$, близкой к частоте n_0 , находим по таблице 10 частоту вращения поля как ближайшую большую по отношению к заданной в условии $n_{\text{ном}} = 2900$ мин⁻¹. Таким образом, $n_0 = 3000$ мин⁻¹.

Скольжение:

$$s_{\text{ном}} = (n_0 - n_{\text{ном}}) / n_0;$$

$$s_{\text{ном}} = (3000 - 2900) / 3000 = 0,033.$$

Частота ЭДС и тока в роторе:

$$f_2 = f_1 \cdot s_{\text{ном}};$$

$$f_2 = 50 \cdot 0,033 = 1,65 \text{ Гц.}$$

Пример 2. По каталожным данным двигателя, приведенным в условии примера 1, построить естественную механическую характеристику.

Решение:

Механические характеристики АД с точностью, достаточной для практики, строятся по упрощенной формуле Клосса по каталожным данным двигателя

$$M = \frac{2M_{max}}{s/s_{кр} + s_{кр}/s},$$

где $M_{max} = K_M \cdot M_{ном}$ - максимальный электромагнитный момент двигателя; $s_{кр}$ – критическое скольжение.

Из формулы Клосса

$$s_{кр1,2} = s_{ном} (K_M \pm \sqrt{K_M^2 - 1}).$$

С учетом значения $s_{ном}$, найденного в примере 1, получим

$$s_{кр1} = 0,033 (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,137;$$

$$n_{кр.1} = n_0 (1 - s_{кр1});$$

$$n_{кр.1} = 3000 (1 - 0,137) = 2589 \text{ мин}^{-1}.$$

Второй корень $s_{кр2} \leq s_{ном}$ отбрасывается как противоречащий принципу работы АД.

Расчетные данные для характерных и ряда промежуточных значений скольжения приведены в табл. П.2.3.

Таблица П.2.3

Таблица данных для характерных и ряда промежуточных значений скольжения

s	0	0,033	0,05	0,1	0,137	0,2	0,4	0,7	1,0
n, мин ⁻¹	3000	2900	2850	2700	2589	2400	1800	900	0
M, Н·м	0	72,45	102,6	151,8	159,4	148,6	97,7	60,0	42,9

Естественная механическая характеристика построена на рис. П.2.5.

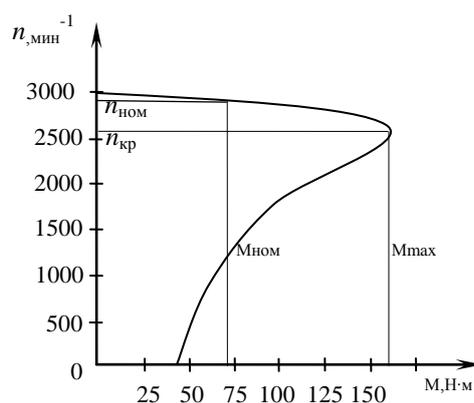


Рис. П.2.5. Естественная механическая характеристика

Пусковой момент при номинальном напряжении и скольжении $s = 1,0$ (табл. П.2.3) равен 42,9 Нм, а при снижении напряжения питания на 10% определяется из соотношения

$$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}} = \frac{0,9U_H}{U_H}$$

откуда

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{н}} \cdot 0,9^2;$$

$$M_{\text{пуск}} = 42,9 \cdot 0,9^2 = 34,75 \text{ Нм.}$$

Пусковой ток двигателя

$$I_{\text{пуск}} = K_I \cdot I_{\text{ном}};$$

$$I_{\text{пуск}} = 7 \cdot 42,68 = 298,76 \text{ А.}$$

Задача №2

К трехфазной сети линейным напряжением $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ и частотой $f = 50 \text{ Гц}$ подключен асинхронный двигатель с фазным ротором (АД) номинальным напряжением $U_{\text{ном}} = 220/380 \text{ В}$. Технические характеристики двигателя приведены в табл. П.2.4.

Задание:

1. В зависимости от линейного напряжения сети $U_{\text{л}}$ и номинального напряжения двигателя определить схему соединения обмоток статора.

2. Для АД с фазным ротором (табл. П.2.4) составить Г-образную схему замещения и определить ее параметры. В номинальном режиме его работы рассчитать: 1) момент на валу $M_{\text{ном}}$; 2) линейный ток $I_{\text{л ном}}$; 3) приведенное сопротивление R'_p в цепи ротора, при котором пусковой момент станет равным максимальному; 4) пусковые токи при включении двигателя без реостата $I_{\text{лн}}$ и с реостатом R'_p в цепи ротора – $I_{\text{лн.р}}$. Определить кратность $I_{\text{лн}} / I_{\text{л ном}}$; $I_{\text{лн.р}} / I_{\text{л ном}}$.

3. По упрощенной формуле Клосса построить естественную механическую характеристику двигателя.

4. Рассчитать механические характеристики двигателя для трех значений добавочных сопротивлений в цепи ротора: $R_{\text{д}} = 0$; $R_{\text{д}} = R_p / 2$; $R_{\text{д}} = R_p$.

5. Ответить на вопросы, номера которых указаны в табл. П.2.4.

Пример решения задачи

Пример 1. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором питается от сети линейным напряжением

$U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$. Технические данные двигателя: напряжение

$U_{\text{ном}} = 220 / 380 \text{ В}$; $P_{\text{ном}} = 16 \text{ кВт}$; $n_{\text{ном}} = 685 \text{ мин}^{-1}$;

$\eta_{\text{ном}} = 84\%$; $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,75$; $K_M = M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}} = 2,8$; ток холостого хода $I_0 = 30 \text{ А}$; коэффициент мощности в режиме холостого хода $\cos\varphi_0 = 0,08$; кратность пускового тока при пуске без реостата $K_I = I_{\text{лн}} / I_{\text{л ном}} = 6,5$; коэффициент мощности при пуске $\cos\varphi_{\text{пуск}} = 0,3$.

Определить:

1) схему соединения обмотки статора;

2) параметры Г-образной схемы замещения двигателя;

3) приведенное сопротивление реостата R'_p в цепи ротора, при котором пусковой момент равен максимальному; 4) пусковые линейные токи при включении двигателя без реостата в цепи ротора и с реостатом R'_p .

Технические данные асинхронных двигателей с фазным ротором напряжением 220/380 В

Порядковый номер	Контрольные вопросы	Асинхронные электродвигатели АОК2 (АК2)								
		$P_{ном}$ кВт	$\eta_{ном}$ %	$\cos \varphi_{ном}$	$\cos \varphi_n$	$K_M = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$K_I = \frac{I_n}{I_{ном}}$	I_0 , А	$\cos \varphi_0$	$n_{ном}$ об/ мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	30,1	22	87,5	0,79	0,35	2,7	6,5	37	0,07	720
2	28,3	7,5	82,0	0,84	0,34	2,5	7	14,2	0,01	950
3	26,5	10	83,5	0,85	0,33	2,4	7	16,1	0,09	960
4	24,4	13	84,5	0,86	0,32	2,5	7	19,2	0,08	960
5	22,9	17	84,5	0,80	0,37	2,8	6,5	28	0,08	965
6	20,11	30	87,0	0,82	0,35	2,7	6,5	46	0,07	1460
7	18,13	40	87,0	0,81	0,31	2,8	5,5	59	0,07	1470
8	16,15	55	88,5	0,82	0,36	2,7	5,5	68	0,06	965
9	14,17	75	90,0	0,88	0,34	2,6	6,5	110	0,06	970
10	12,19	100	90,5	0,88	0,33	2,5	6,5	180	0,053	964
11	10,21	1,4	69	0,74	0,30	2,3	7	3,7	0,13	1475
12	8,23	2,2	87,5	0,76	0,23	2,3	7	4,6	0,13	1470
13	6,25	3,5	79	0,75	0,25	2,3	7	7,25	0,13	1460
14	4,27	5,0	82	0,75	0,27	2,5	7	9,7	0,1	1470
15	2,29	11,0	79	0,76	0,29	2,8	7	17,8	0,09	1430
16	4,17	16,0	83	0,78	0,31	2,8	6,5	21,7	0,075	710
17	6,19	38	78	0,75	0,33	2,9	6,0	57	0,07	720
18	8,21	50	82	0,77	0,31	2,8	5,5	66	0,06	730
19	10,23	60	81	0,77	0,33	2,9	5,5	73,6	0,06	930
20	12,25	63	79	0,74	0,35	2,9	6,5	80	0,06	970
21	14,27	80	78	0,72	0,35	3,0	6,5	120	0,056	960
22	16,29	125	78	0,73	0,36	2,9	6,5	230	0,045	950
23	18,15	160	84	0,72	0,37	2,9	6,5	285	0,04	730
24	20,13	22	87,5	0,79	0,32	2,0	6,0	33	0,065	740
25	22,11	30	87,5	0,79	0,31	1,9	5,5	49	0,06	750
26	24,9	40	87,5	0,81	0,33	2,4	6,5	59	0,063	1470
27	26,7	55	90	0,81	0,35	2,2	6,0	72	0,055	1430
28	28,5	10	85	0,82	0,28	2,0	6,5	15	0,09	1490
29	30,3	7,5	84	0,82	0,25	2,4	7,0	12	0,11	1450
30	2,15	10	85	0,83	0,27	2,1	7,0	16,5	0,1	1420

Решение:

1. Если в паспортных данных двигателя указано напряжение 220/380 В, то это означает, что каждая фаза обмотки статора рассчитана на напряжение $U_{1\phi} = 220$ В. Обмотку необходимо включать по схеме “треугольник”, если линейное напряжение сети $U_L = 220$ В, и по схеме “звезда”, если $U_L = 380$ В. В условиях данного примера обмотку статора следует включить по схеме “звезда”.

2. Г-образная схема замещения АД приведена на рис. П.2.6. Параметры ветви намагничивания схемы замещения определяются по данным режима холостого хода.

$$z_0 = U_{1\phi} / I_0 ;$$

$$z_0 = 220 / 30 = 7,33 \text{ Ом};$$

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

$$r_0 = 7,33 \cdot 0,08 = 0,586 \text{ Ом};$$

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

$$x_0 = \sqrt{7,33^2 - 0,586^2} = 7,306 \text{ Ом}.$$

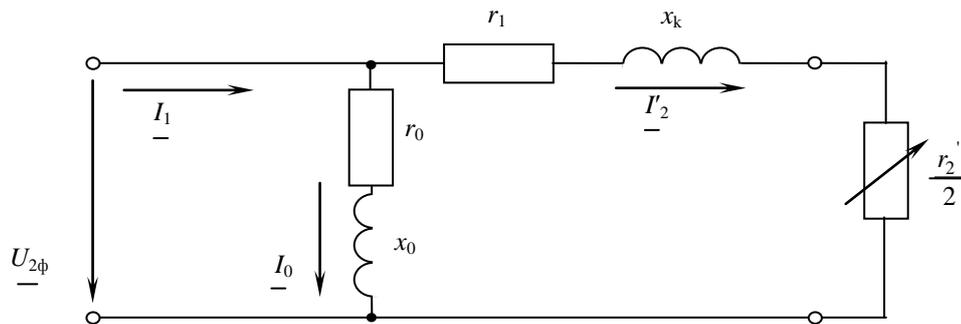


Рис. П.2.6. Г-образная схема замещения АД

Параметры рабочей ветви схемы замещения АД определяются по данным пускового режима:

полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = U_{1\phi} / I_{1n} = U_{1\phi} / (K_I \cdot I_{1ном});$$

$$z_k = 220 / (6,5 \cdot 38,5) = 0,879 \text{ Ом};$$

где

$$I_{1ном} = P_{ном} / (3 U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot \eta_{ном});$$

$$I_{1ном} = 16000 / (3 \cdot 220 \cdot 0,84 \cdot 0,75) = 38,5 \text{ А}.$$

I_{1n} - фазный ток в обмотке статора.

Активное и реактивное сопротивления короткого замыкания

$$r_k = z_k \cdot \cos \varphi_n;$$

$$r_k = 0,879 \cdot 0,3 = 0,264 \text{ Ом};$$

$$x_k = z_k \cdot \sin \varphi_n;$$

$$x_k = 0,879 \cdot 0,954 = 0,835 \text{ Ом}.$$

Воспользовавшись допущением, что $r_1 = r_2' = r_k / 2$ и $x_1 = x_2' = x_k / 2$, найдем параметры рабочей ветви схемы замещения

$$r_1 = r_2' = 0,132 \text{ Ом}; \quad x_1 = x_2' = 0,417 \text{ Ом}.$$

Условие, соответствующее случаю, когда пусковой момент равен максимальному электромагнитному моменту двигателя:

$$s_{кр} = (r'_2 + r'_p) / \sqrt{r_1^2 + x_k^2} = 1,$$

из которого найдем

$$r'_p = \sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r_2;$$

$$r'_p = \sqrt{0,132^2 + 0,835^2} - 0,132 = 0,691 \text{ Ом.}$$

3. Пусковой линейный ток при пуске двигателя с реостатом

$$I_{\text{пуск}}(p) = I_{\text{пуск}} = U_{1\phi} / z_{\text{пуск}};$$

$$I_{\text{пуск}}(p) = 220 / 1,27 = 173,2 \text{ A};$$

где

$$z_{\text{пуск}} = \sqrt{(r_k^2 + r_p)^2 + x_k^2};$$

$$z_{\text{пуск}} = \sqrt{(0,264 + 0,691)^2 + 0,835^2} = 1,27 \text{ Ом.}$$

Пусковой ток при пуске без реостата

$$I_{\text{пуск}} = K_I \cdot I_{\text{ном}};$$

$$I_{\text{пуск}} = 6,5 \cdot 38,5 = 250,25 \text{ A.}$$

4. Расчет механической характеристики при различных $R_{\text{доб}}$ сопротивлениях в цепи ротора.

При расчете механической характеристики рекомендуется использовать упрощенную формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{s / s_{кр} + s_{кр} / s};$$

причем значения $s_{кр}$ различны для каждой механической характеристики.

4.1 Расчет для режима естественной механической характеристики при $R_{\text{доб}} = 0$.

1) Вращающий момент на валу

$$M_{\text{ном}} = (9550 \cdot P_{\text{ном}}) / n_{\text{ном}};$$

$$M_{\text{ном}} = (9550 \cdot 16) / 685 = 223,06 \text{ Нм.}$$

2) Номинальное скольжение

$$s_{\text{ном}} = (n_1 - n_n) / n_1;$$

$$s_{\text{ном}} = (750 - 685) / 750 = 0,086 \text{ о.е.}$$

3) Критическое скольжение

$$s_{кр} = r'_2 / x_k;$$

$$s_{кр} = 0,132/0,835=0,158.$$

4) Максимальный момент определяем по каталожным данным

$$M_{max} = K_M \cdot M_{ном};$$

$$M_{max} = 2,8 \cdot 223,06 = 624,57 \text{ Нм}.$$

Расчет естественной характеристики $M=f(s)$ при $r_{доб} = 0$ сведены в табл. П.2.5

Таблица П.2.5

Результаты расчета механической характеристики при $r_{доб} = 0$

S								
	0,005	0,086	0,158	0,3	0,5	0,75	0,875	1,0
$\frac{s}{s_k}$	0,316	0,544	1,0	1,84	3,16	4,75	5,54	6,33
$\frac{s_k}{s}$	3,16	1,84	1,0	0,526	0,316	0,21	0,18	0,158
$\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}$	3,476	2,38	2,0	2,36	3,48	4,96	5,72	6,49
M, Нм	359,4	524,8	624,5	529,3	358,9	252	218,4	192,5

4.2 Расчет механической характеристики при изменении активного сопротивления обмотки ротора.

Из анализа выражений

$$s_{кр} = c_1 r'_2 / (x_1 + c_1 x'_2);$$

и максимального вращающего момента асинхронного двигателя.

$$M_{max} = p \cdot m \cdot U_{\phi}^2 / (4\pi \cdot f_1 \cdot x_1);$$

следует, что величина максимального момента АД M_{max} не зависит от активного сопротивления ротора r'_2 . В тоже время величина критического скольжения $s_{кр}$, при котором момент достигает максимальной величины, прямопропорциональна активному сопротивлению r'_2 , т.е. $s_{кр} \propto r'_2$.

Это значит, что с увеличением r'_2 механическая характеристика двигателя смещается в сторону больших скольжений. При этом с изменением r'_2 до определенной величины будет увеличиваться начальный пусковой момент.

Определяем величину $r_{доб}$ по условию задачи.

$$r_{доб1}=0;$$

$$r_{доб2}=0,5 r'_2=0,066 \text{ Ом};$$

$$r_{доб3} = r'_2=0,132 \text{ Ом}.$$

При этом величина сопротивлений ротора $r'_{2I}, r'_{2II}, r'_{2III}$ критического скольжения $s_{крI}$, $s_{крII}$ и $s_{крIII}$

$$r'_{2I} = r'_2 = 0,132 \text{ Ом};$$

$$r'_{2II} = r'_2 + r_{дооб2};$$

$$r'_{2II} = 0,132 + 0,066 = 0,198 \text{ Ом};$$

$$r'_{2III} = r'_2 + r_{дооб3};$$

$$r'_{2III} = 0,132 + 0,132 = 0,264 \text{ Ом};$$

$$s_{крI} = \frac{r'_2}{x_k};$$

$$s_{крI} = \frac{0,132}{0,835} = 0,158 \text{ о.е.}$$

$$s_{крII} = \frac{r'_{2II}}{x_k};$$

$$s_{крII} = \frac{0,198}{0,835} = 0,237 \text{ о.е.}$$

$$s_{крIII} = \frac{r'_{2III}}{x_k};$$

$$s_{крIII} = \frac{0,246}{0,835} = 0,316 \text{ о.е.}$$

По формуле Клосса производим расчет механических характеристик $M=f(s)$ для трех значений добавочных сопротивлений $r_{дооб}$ и сводим их в табл. П.2.6.

Электромагнитный момент $M_{max} = 624,6 \text{ Нм}$.

Таблица П.2.6

Таблица расчета механических характеристик $M=f(s)$

r	M	S								$S_{кр}$
		0,05	0,086	0,158	0,237	0,316	0,5	0,75	1,0	
r'_{2I}	M_0	359,4	524,8	624,6	606,4	499,6	359	252	192,5	0,158
r'_{2II}	M_{01}	252	402	578,3	624,6	600	486	357	284	0,237
r'_{2III}	M_{02}	193	320	499,6	600	624,6	568	446	359	0,316

По данным табл. П.2.6 строим механические характеристики.

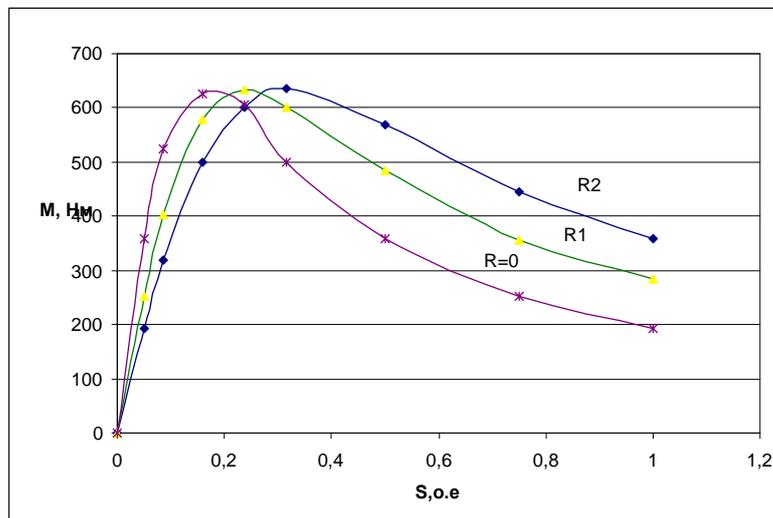


Рис. П.2.7. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных сопротивлениях: $R_0 - r'_{2I}$; $R_1 - r'_{2II}$; $R_2 - r'_{2III}$

Форма отчетности:

1. Схема замещения и расчет номинальных величин заданного асинхронного двигателя.
2. Построить механическую характеристику асинхронного двигателя.
3. Показать расчеты по заданию.

Основная литература:

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Санкт-Петербург: Питер, 2008. - 350 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. - 8-е изд., стереотип. - М.: Академия, 2008. - 496 с.

Дополнительная литература:

1. Радин, В. И. Электрические машины: Асинхронные машины: [Учебник для вузов] / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович. - М.: Высшая школа, 1988. - 327 с.: ил.
2. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.
3. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1973 - Ч.2. Машины переменного тока. - 648 с.: ил. - Б. ц.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Докажите, что векторы намагничивающих сил статора и вращающегося ротора неподвижны относительно друг друга.
2. Покажите, каким образом рабочий режим асинхронного двигателя может быть приведен к режиму трансформатора с активной нагрузкой.
3. Почему в момент пуска двигателя ток статора имеет максимальное значение? Чему при этом равны скольжение s и частота тока ротора f_2 ?
4. С какой целью вводится добавочное сопротивление реостата R_p в цепь ротора двигателя с фазным ротором? Постройте качественные механические характеристики при $R_p = 0$; $R_p \neq 0$.
5. Начертите искусственные механические характеристики при регулировании частоты вращения посредством изменения частоты питающей сети.

6. Почему намагничивающий ток АД составляет $(25...50\%)I_{ном}$, а у трансформатора он составляет $(3...10\%)I_{ном}$?
7. В каком режиме ток обмотки короткозамкнутого ротора имеет максимальное значение? Чему при этом равно скольжение? Постройте качественные зависимости $I_1(S)$ и $I_2(S)$.
8. Чему равна частота тока ротора в момент пуска? Постройте зависимость $f_2(S)$.
9. Как влияет на процесс пуска двигателя момент нагрузки?
10. Как повлияет переключение обмотки статора с Δ на Y на величину пускового момента?
11. Почему пусковые свойства двигателя с фазным ротором лучше, чем у двигателя с короткозамкнутым ротором?
12. Каким образом можно уменьшить пусковой ток двигателя с короткозамкнутым ротором?
13. Зависит ли пусковой момент асинхронного двигателя от величины напряжения сети? Постройте качественные механические характеристики двигателя при $U_c = U_{ном}$ и $U_c = 0,9U_{ном}$.
14. Как зависит ЭДС ротора E_2 от частоты его вращения n_2 ? Когда в роторе наводится максимальное ЭДС?
15. Во сколько раз изменится максимальное значение момента M_{max} , если напряжение снизится на 10%?
16. Начертите рабочие характеристики АД и поясните их характер.
17. Поясните вид механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя.
18. Как изменится величина максимального момента M_{max} и критического скольжения $S_{кр}$ при введении пускового реостата в цепь ротора двигателя с фазным ротором? Покажите на графиках $M(S)$.
19. Как изменится естественная механическая характеристика двигателя с фазным ротором: а) при пониженном напряжении сети; б) при введении в цепь ротора добавочного сопротивления?
20. Как изменятся величина тока статора, $\cos \varphi$ и частота тока ротора f_2 при уменьшении противодействующего момента на валу двигателя?
21. Напишите уравнения намагничивающих сил и электрического состояния цепей ротора и статора АД.
22. Почему при введении реостата в цепь ротора АД с фазным ротором пусковой ток уменьшается, а пусковой момент увеличивается?
23. Каковы основные достоинства асинхронного двигателя? Начертите искусственные механические характеристики АД при регулировании частоты вращения изменением числа пар полюсов.
24. Как изменяется величина критического скольжения $s_{кр}$ с изменением величины добавочного сопротивления, введенного в цепь ротора?
25. Во сколько раз ЭДС ротора в момент пуска E_{20} больше ЭДС номинального режима для рассчитываемого двигателя?
26. Перечислите способы регулирования частоты вращения АД и указать наиболее экономичные из них.
27. Каким отрезком круговой диаграммы определяется активная и реактивная мощность, потребляемая двигателем из сети?
28. В каких пределах изменения скольжения круговая диаграмма дает достаточно точные результаты и почему?
29. Из каких соображений выбирается тот или другой способ пуска асинхронного двигателя?
30. Каков наиболее распространенный способ регулирования частоты вращения АД с фазным ротором? Нарисуйте качественную диаграмму пуска двигателя, снабженного трехступенчатым пусковым реостатом.

Решение типовой задачи по разделу «Синхронные машины»

Цель работы: расчет характеристик синхронной машины.

Краткие теоретические сведения.

Схема замещения синхронного неявнополюсного генератора

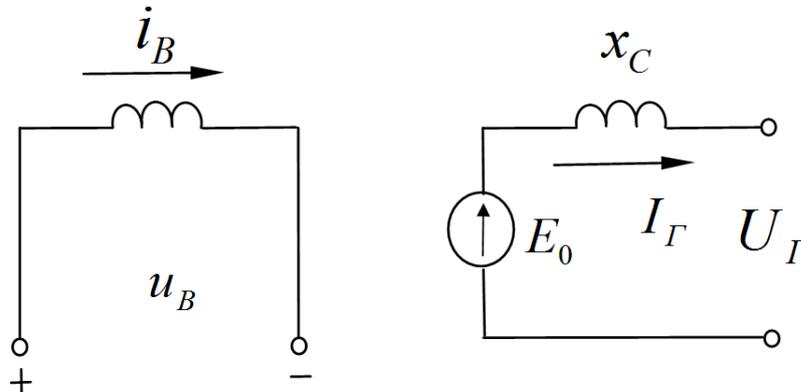


Рис. П.3.1. Схема замещения синхронного генератора в установившемся режиме

Неявнополюсный синхронный генератор (турбогенератор) применяется для питания автономной нагрузки, конструкция ротора турбогенератора является неявно полюсной с равномерным воздушным зазором между статором и ротором. Эта конструктивная особенность позволяет представить генератор весьма простой электрической схемой, состоящей из источника ЭДС E_0 и внутреннего синхронного сопротивления x_C (рис. П.3.1).

ЭДС E_0 создается током возбуждения i_B синхронной машины и связана с ним характеристикой холостого хода (рис. П.3.2). На холостом ходу связь между E_0 и i_B носит нелинейный характер из-за насыщения стали, однако при нагрузке, вследствие влияния поля реакции якоря, степень насыщения остается практически постоянной и близкой к точке i_{B_0} соответствующей номинальному напряжению U_H . Поэтому можно с достаточной для инженерной практики точностью считать, что связь между E_0 и i_B под нагрузкой линейна. Такой подход позволит определить по векторной диаграмме ток возбуждения под нагрузкой генератора.

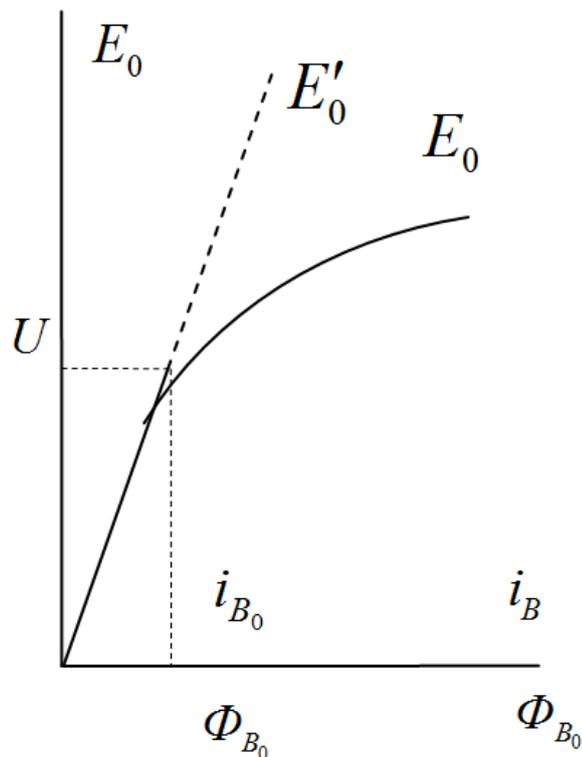


Рис. П.3.2. Характеристика холостого хода

Для построения векторной диаграммы запишем уравнение электрического равновесия для статорной цепи $\dot{U}_Г = \dot{E}_0 - jx_c \dot{I}_Г$ и для случая активно-индуктивной нагрузки построим векторную диаграмму напряжений и магнитных потоков (рис. П.3.3).

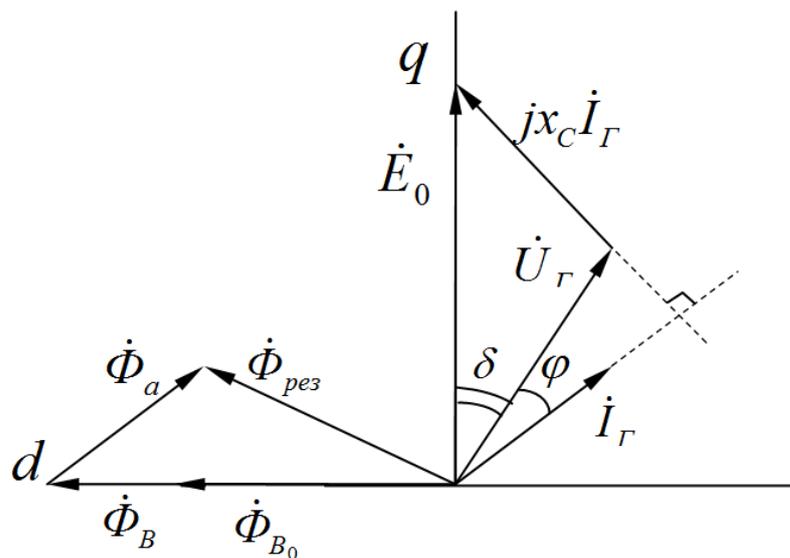


Рис. П.3.3. Векторная диаграмма неявнополюсного генератора

Как видно из рис. 20, несмотря на то, что магнитный поток Φ_B , соответствующий величине E_0 и пропорциональный току возбуждения, оказывается значительно большим, чем Φ_{B_0} , результирующий поток $\Phi_{рез}$ намного меньше Φ_B и близок к Φ_{B_0} из-за размагничивания потоком реакции якоря Φ_a . Из подобия векторных треугольников магнитных потоков и напряжений можно записать следующие соотношения

$$\frac{\Phi_B}{\Phi_{рез}} = \frac{E_0}{U_\Gamma} = \frac{i_B}{i_{B_0}},$$

из которых легко определяется ток возбуждения генератора при нагрузке по известному току возбуждения на холостом ходу $i_B = i_{B_0} \cdot E_0 / U_G$.

Схема замещения и векторная диаграмма синхронного явнополюсного двигателя

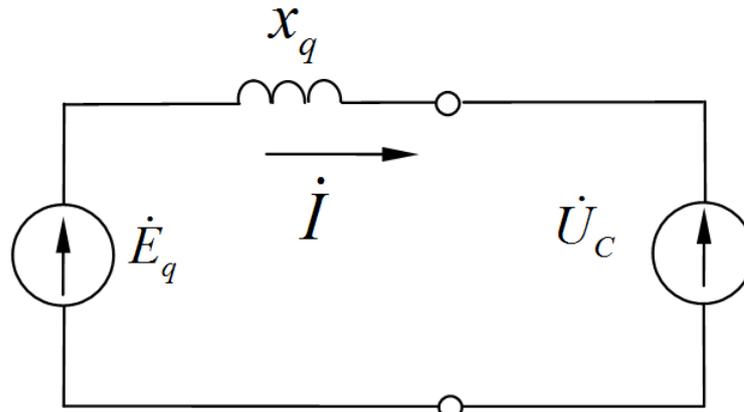


Рис. П.3.4. Схема замещения синхронного явнополюсного двигателя

Синхронные машины (СМ) с явновыраженными полюсами имеют неодинаковый воздушный зазор - под полюсами он в несколько раз меньше, чем в межполюсном пространстве. Это вносит определенные трудности при создании расчетных моделей явнополюсных машин, прежде всего из-за того, что внутреннее сопротивление машины зависит от характера нагрузки. Одним из путей преодоления этих трудностей является использование принципа двух реакций, заключающегося в разложении магнитного поля реакции якоря на продольную d и поперечную q оси ротора. В этом случае уравнение электрического равновесия при работе СМ от сети имеет вид:

$$\dot{U}_C = -\dot{E}_0 + jx_d \dot{I}_d + jx_q \dot{I}_q,$$

где \dot{U}_C - вектор напряжения сети; \dot{E}_0 - вектор ЭДС холостого хода; \dot{I}_d, \dot{I}_q - проекции вектора тока статора \dot{I} на продольную и поперечную оси; x_d - продольное индуктивное сопротивление; x_q - поперечное индуктивное сопротивление.

Подставив в уравнение электрического равновесия выражение для тока $\dot{I}_q = \dot{I} - \dot{I}_d$, и обозначив через $\dot{E}_q = \dot{E}_0 - j(x_d - x_q)\dot{I}_d$ получим уравнение вида $\dot{U}_C = -\dot{E}_q + jx_q \dot{I}$. Данному виду соответствует схема замещения явнополюсной синхронной машины и векторная диаграмма, представленные на рис. П.3.4, П.3.5 соответственно. Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ пропорционален величине напряжения сети, а поток возбуждения Φ_B - ЭДС холостого хода E_0 . Соотношения между потоками реакции якоря по продольной и поперечной осям подчиняются приближенно следующему соотношению

$$\frac{\Phi_d}{\Phi_q} = \frac{I_d x_d}{I_q x_q}.$$

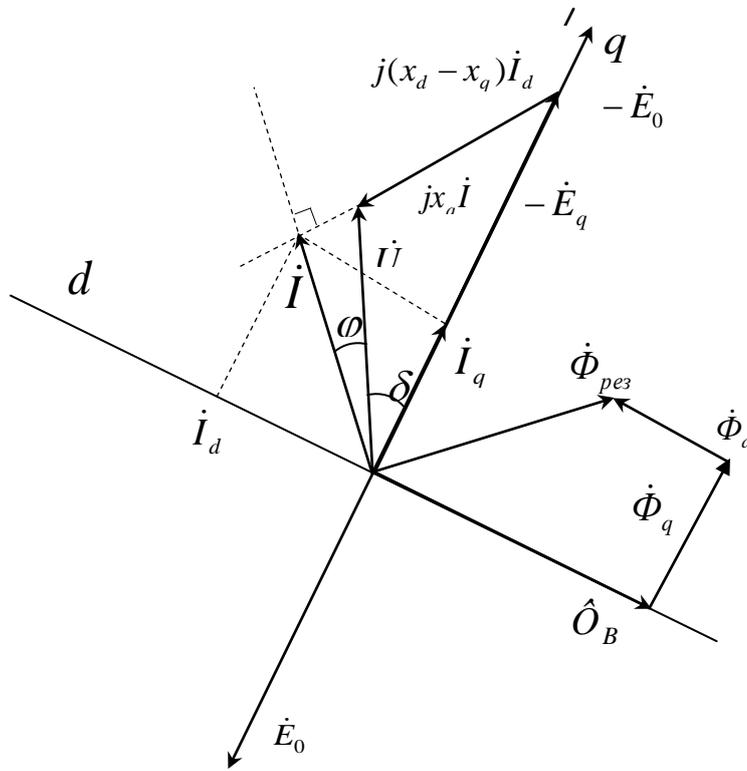


Рис. П.3.5. Векторная диаграмма синхронного явнополюсного двигателя

Векторная диаграмма строится следующим образом:

- по заданным вектору тока \dot{I} , вектору напряжения \dot{U}_C и углу сдвига между ними φ с учетом падения напряжения $jx_q \dot{I}$ определяют вектор \dot{E}_q и положение осей q и d ;
- находят проекцию вектора тока \dot{I}_d на ось d ;
- прибавляя к вектору \dot{E}_q падение напряжения $j(x_d - x_q) \dot{I}_d$, определяют вектор \dot{E}_0 .

Основные характеристики синхронного двигателя

Поведение и свойства синхронного двигателя оцениваются с помощью угловых характеристик активной и реактивной мощностей и U -образных характеристик.

Угловыми характеристиками называются зависимости $P = f(\delta)$ и $Q = f(\delta)$, определяемые при $U_C = U_{ном}$ и $i_B = const$. Угол δ является рабочим углом двигателя и отсчитывается от вектора E_0 к вектору U_C против направления движения часовой стрелки. Этот угол фактически определяет положение ротора относительно результирующего магнитного потока. Аналитические выражения, связывающие активную и реактивную мощности с углом δ , были получены ранее. Однако они справедливы лишь для неявнополюсной синхронной машины. Для явнополюсной синхронной машины, у которой $x_d \neq x_q$, угловые характеристики определяются следующим уравнением

$$\begin{cases} P = \frac{U_C E_0}{x_d} \sin \delta + \frac{U_C^2}{x_q} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta \\ Q = \frac{U_C E_0}{x_d} \cos \delta + U_C^2 \left(\frac{\sin^2 \delta}{x_q} + \frac{\cos^2 \delta}{x_d} \right) \end{cases}$$

При получении этих уравнений не учитывалось активное сопротивление статорной обмотки, т.к. оно на несколько порядков меньше индуктивного. Можно также считать, что

синхронная машина при работе от сети, находится практически в ненасыщенном состоянии, поскольку результирующий магнитный поток, определяемый величиной напряжения, остается неизменным при любой нагрузке и соответствует по характеристике холостого хода току i_{B_0} .

Для синхронного двигателя вместо активной мощности иногда удобнее использовать электромагнитный момент. При расчете угловой характеристики в о.е. $P = M$, поэтому первое уравнение системы остается без изменения. По нему можно определить рабочий угол δ . Для этого необходимо построить угловую характеристику $M = f(\delta)$ и сопоставить ее с внешним моментом, номинальная величина которого равна номинальному $\cos \varphi$:

$$M_{BH_{НОМ}} = \cos \varphi_{НОМ} \cdot$$

Устойчивой рабочей частью угловой характеристики является начальная часть характеристики до угла $\delta = \delta_{кр}$, который соответствует максимальному электромагнитному моменту M_m (рис. П.3.6).

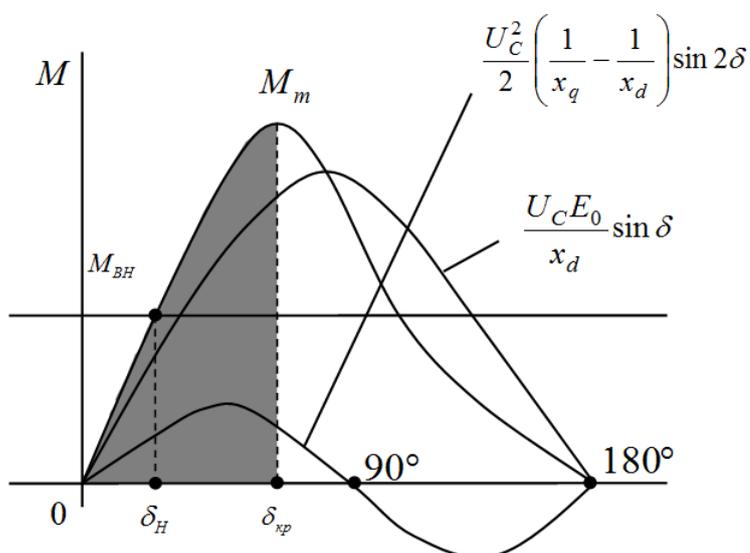


Рис. П.3.6. Угловая характеристика синхронного явнополюсного двигателя

Если внешний момент нагрузки превысит его, то двигатель выйдет из синхронизма и перейдет в асинхронный режим или даже остановится.

Задача 1.

Трехфазный синхронный двигатель, номинальные данные которого приведены в табл. П.3.1, служит для привода компрессора и во время работы развивает на валу мощность, равную номинальной. Обмотка статора соединена звездой. Частота напряжения питающей сети - 50 Гц. Ток в обмотке возбуждения ротора установлен таким, что ЭДС фазы статора $E_0 = 1,4U_{\phi}$, где U_{ϕ} – фазное напряжение статора.

Задание:

1. Определить число пар полюсов ротора и номинальный ток в фазе статора.
2. Пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора, построить векторную диаграмму фазы синхронного двигателя.
3. По векторной диаграмме определить величину угла рассогласования θ между векторами напряжения U_{ϕ} и ЭДС E_0 и значение синхронного реактивного сопротивления машины.

4. Рассчитать коэффициент мощности промышленного предприятия, если суммарная активная мощность электроприемников предприятия без учета синхронного двигателя $P_{пр}$ дана в табл. П.3.2

5. Ответить на вопросы, указанные в табл. П.3.2.

Указания к выбору варианта:

1. Порядковый номер студента в журнале группы определяет выбор числовых данных в табл. П.3.2.

2. Номер группы определяет значения коэффициентов мощности синхронного двигателя $\cos\varphi_{ном}$ и предприятия $\cos\varphi_{пр}$ без учета синхронного двигателя (табл. П.3.1).

Таблица П.3.1

Таблица определения значения коэффициента мощности

Номер группы	1	2	3	4
$\cos\varphi_{ном}$	0,9	0,85	0,85	0,9
$\cos\varphi_{пр}$	0,75	0,7	0,8	0,75

Таблица П.3.2

Основные технические данные синхронных двигателей

Порядковый номер студента	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, мин⁻¹	$\eta_{ном}$, %	$U_{ном}$, В	$P_{пр}$, кВт	Контрольные вопросы
1	75	1500	90,0	380	150	1
2	75	1000	90,5	660	200	2
3	125	500	90,0	380	250	3
4	125	600	90,5	660	175	4
5	160	500	90,5	660	300	5
6	160	600	91,0	3000	350	6
7	200	750	90,5	660	500	7
8	200	600	91,0	3000	375	8
9	250	1000	91,0	660	500	9
10	250	750	91,5	3000	550	10
11	320	1000	91,5	3000	600	11
12	320	750	92,0	6000	750	12
13	400	1000	92,0	3000	800	13
14	400	750	92,5	6000	700	14
15	500	750	92,5	3000	1000	15
16	500	600	93,0	6000	900	16
17	630	750	93,0	3000	1200	17
18	630	600	93,5	6000	1400	18
19	800	600	93,5	3000	1600	19
20	800	500	94,0	6000	1400	20
21	1000	750	94,0	3000	2000	21
22	1000	600	94,5	6000	2250	22
23	1250	500	94,5	3000	2500	23
24	1250	600	95,0	6000	2600	24
25	1600	500	95,0	3000	3000	25
26	1600	375	95,0	6000	3500	26
27	2000	500	95,5	6000	4000	27
28	2000	375	95,0	3000	5500	28
29	3200	500	96,0	6000	6000	29
30	3200	375	95,5	3000	5000	30

Пример решения задачи

Пример1. Трехфазный синхронный двигатель характеризуется номинальными величинами: $P_{ном} = 320$ кВт; частота вращения $n_{ном} = 1500$ мин⁻¹; КПД $\eta_{ном} = 0,93$; коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном} = 0,9$ ($\varphi < 0$, режим перевозбуждения). Обмотка статора соединена звездой. Электродвигатель присоединен к сети с линейным напряжением $U_{л} = 3000$ В, частотой $f = 50$ Гц и жестко соединен с валом компрессора, развивая при этом мощность, равную номинальной. Индуцированная потоком возбуждения ЭДС E_0 на 40 % превышает фазное напряжение обмотки статора.

Задание:

1. Определить число пар полюсов ротора и номинальный ток фазы статора.
2. Построить для заданного режима работы синхронного двигателя векторную диаграмму, пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора.
3. По диаграмме определить угол θ между векторами напряжения U_{ϕ} и ЭДС E_0 , падение напряжения в обмотке статора и ее синхронное реактивное сопротивление.

Решение:

1. Для синхронного двигателя частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля статора и остается постоянной независимо от нагрузки на его валу $n = 60 f / p$. Отсюда число пар полюсов ротора

$$p = \frac{60 \cdot f}{n};$$

$$p = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

Так как потребляемая двигателем мощность из сети

$$P_1 = P_{ном} / \eta = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi_{ном},$$

то номинальный ток фазы статора

$$I_{ном} = I_{я} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos \varphi_{ном}};$$

$$I_{ном} = I_{я} = \frac{320000}{0,93 \cdot 1,732 \cdot 3000 \cdot 0,9} = 73,6 \text{ А}.$$

2. Фазное напряжение статора

$$U_{\phi} = U_{л} / \sqrt{3};$$

$$U_{\phi} = 3000 / \sqrt{3} = 1732 \text{ В}.$$

ЭДС, индуцированная в фазной обмотке статора,

$$E_0 = 1,4 \cdot U_{\phi};$$

$$E_0 = 1,4 \cdot 1732 = 2424,87 \text{ В}.$$

Для построения векторной диаграммы задаемся масштабом

$$m_U = 300 \text{ В / см} , m_I = 20 \text{ А / см} .$$

Откладываем вектор фазного напряжения (рис. П.3.7). Вектор тока $\underline{I}_{\text{ном}}$ в обмотке статора опережает $\underline{U}_{\text{тм}}$ на угол $\varphi_{\text{ном}} = 25^\circ 50'$. Дальнейшее построение выполняем согласно уравнению напряжений фазы статора $\underline{U}_{\phi} = \underline{E}_0 + jx \cdot \underline{I}_{\text{ном}}$: с конца \underline{U}_{ϕ} под углом 90° к $\underline{I}_{\text{ном}}$ проводим линию ab , затем из точки O циркулем откладываем отрезок длиной E_0 до пересечения с линией ab . Получаем вектор падения напряжения $x \cdot I_{\text{ном}} = 1110 \text{ В}$, затем

$$x = \frac{x \cdot I_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} ;$$

$$x = \frac{1110}{73,6} = 15,06 \text{ Ом} .$$

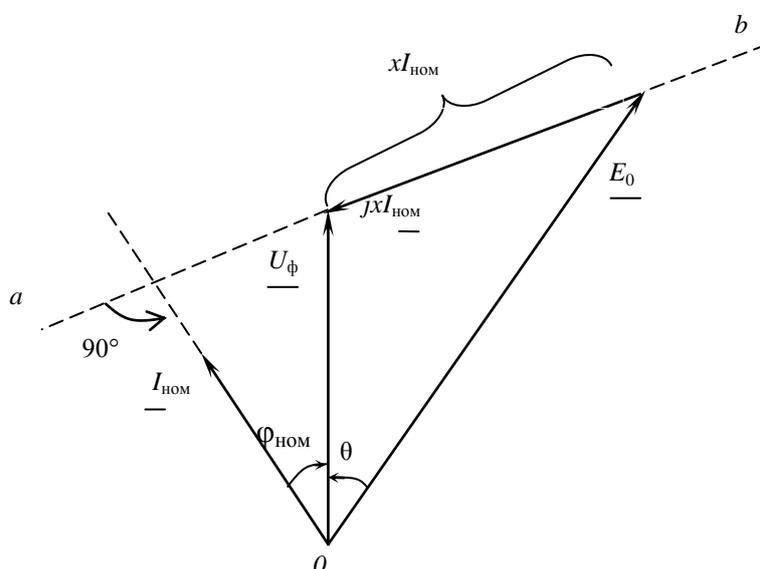


Рис. П.3.7 Векторная диаграмма синхронного двигателя

Угол между векторами \underline{E}_0 и \underline{U}_{ϕ} является искомым углом $\theta = 24^\circ$.

Пример 2 Определить коэффициент мощности промышленного предприятия после установки на нем синхронного двигателя, параметры которого заданы в предыдущем примере, если до установки двигателя суммарная активная мощность электроприемников предприятия $P_{\text{пр}} = 700 \text{ кВт}$, а их коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{пр}} = 0,75$.

Решение:

Синхронный двигатель, установленный на промышленном предприятии, для питающей сети является активно-емкостной нагрузкой (при опережающем токе).

Реактивная мощность, вырабатываемая синхронным двигателем,

$$Q_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot \text{tg} \varphi_{\text{ном}} ;$$

$$Q_{\text{ном}} = 320 \cdot (-0,484) = -155 \text{ квар} ,$$

где: $\text{tg} \varphi_{\text{ном}} = \text{tg} 25^\circ 50' = -0,484$.

Суммарная реактивная мощность электроприемников предприятия

$$Q_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{пр}} ;$$

$$Q_{\text{пр}} = 700 \cdot 0,822 = 617,34 \text{ квар},$$

где: $\operatorname{tg} \varphi_{\text{пр}} = \operatorname{tg} 41^{\circ}25' = 0,822$.

Суммарная мощность всей нагрузки после установки синхронного двигателя

$$P = P_{\text{пр}} + P_{\text{ном}};$$

$$P = 700 + 320 = 1020 \text{ кВт};$$

$$Q = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{ном}};$$

$$Q = 617,34 - 155 = 462,34 \text{ квар} .$$

Коэффициент мощности промышленного предприятия

$$\cos \varphi = P / \sqrt{P^2 + Q^2};$$

$$\cos \varphi = 1020 / \sqrt{1020^2 + 462,32^2} = 0,911.$$

Форма отчетности:

1. Схема замещения и расчет номинальных величин заданного синхронного двигателя.
2. Построить механическую характеристику асинхронного двигателя.
3. Показать расчеты по заданию.

Основная литература:

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - Санкт-Петербург: Питер, 2008. - 350 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. - 8-е изд., стереотип. - М.: Академия, 2008. - 496 с.

Дополнительная литература:

1. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.
2. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1973 - Ч.2. Машины переменного тока. - 648 с.: ил. - Б. ц.
3. Осин, И. Л. Электрические машины. Синхронные машины: учебное пособие / Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1990. - 303 с.: ил.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Каковы устройство и принцип действия синхронного двигателя?
2. Какие типы роторов используются в турбо- и гидрогенераторах и почему?

3. Что называется угловой характеристикой синхронной машины и какое значение она имеет для оценки статической устойчивости машины при параллельной работе с сетью?
4. Что является обязательным условием преобразования энергии в синхронной машине?
5. При каких условиях синхронный двигатель представляет собой активно-емкостную нагрузку?
6. Как отражается на режиме работы элементов электропередачи уменьшение мощности потребителя?
7. Почему не разрешается работа потребителей электрической энергии с малым коэффициентом мощности?
8. Как используются синхронные двигатели для улучшения коэффициента мощности предприятий?
9. Как изменяется угол между током статора и напряжением на зажимах ненагруженного синхронного двигателя при регулировании тока возбуждения I_B ?
10. Как образуется вращающий электромагнитный момент синхронных двигателей?
11. Как влияет регулирование тока возбуждения I_B синхронного двигателя на изменение угла θ ?
12. Как реагирует синхронный двигатель на увеличение нагрузки на его валу?
13. Какой ток возбуждения синхронного двигателя называется нормальным; исходя из каких соображений выбирается его величина?
14. Как осуществляется пуск синхронных двигателей?
15. Почему при пуске синхронных двигателей обмотка возбуждения ротора замыкается на внешнее активное сопротивление?
16. Почему синхронный двигатель не может развернуться самостоятельно?
17. В каких условиях и почему применяется синхронный электропривод?
18. Как осуществляется быстрая остановка синхронных двигателей?
19. Какое влияние оказывает пусковая обмотка синхронного двигателя на его рабочий режим?
20. В каких условиях и где синхронный двигатель работает в качестве синхронного компенсатора?
21. Сравните свойства, конструкцию и характеристики синхронного и асинхронного двигателей.
22. Как влияет на механическую характеристику синхронного двигателя снижение питающего напряжения?
23. Каковы устройство и принцип действия реактивного синхронного двигателя?
24. Каковы устройство и принцип действия гистерезисного синхронного двигателя?
25. Перечислите условия и порядок включения синхронных машин на параллельную работу с трехфазной системой.
26. Какие явления сопровождают выпадение синхронных машин из синхронизма?
27. Как избежать выпадения из синхронизма синхронных машин?
28. Как осуществляется регулирование реактивной мощности синхронных машин?
29. Возможна ли работа синхронного двигателя с $\cos\varphi = 1$? (Ответ пояснить векторной диаграммой).
30. Почему трехфазная обмотка переменного тока располагается на статоре, электромагниты постоянного тока – на роторе, а не наоборот?

Практическое занятие 4

Решение типовой задачи по разделу «Машины постоянного тока»

Цель работы: расчет механических характеристик машин постоянного тока.

Краткие теоретические сведения.

Механические характеристики и регулирование скорости ДПТ

Двигатели постоянного тока позволяют осуществить плавное и экономичное регулирование частоты вращения в широком диапазоне. Поэтому они получили большое распространение в регулируемом электроприводе.

Свойства двигателей постоянного тока во многом определяются способом их возбуждения. Как и генераторы, двигатели постоянного тока выполняются с независимым, параллельным, смешанным и последовательным возбуждением.

В двигательном режиме ток якоря $I_{я}$ и электромагнитный момент M меняют знак по сравнению с генераторным режимом, но для удобства анализа их принимают положительными, поэтому уравнения напряжений и моментов записывают в виде

$$\left. \begin{aligned} U &= E + I_{я} R_{я}; \\ M - M_{вн} &= \frac{2\pi J}{60} \frac{dn}{dt}. \end{aligned} \right\}$$

Уравнения совместно с выражениями для ЭДС $E = C_e n \Phi$ и для электромагнитного момента $M = C_m \Phi I_{я}$ позволяют выполнить анализ основных рабочих режимов двигателей постоянного тока.

Электромагнитный момент двигателя

$$M = C_m \Phi I_{я}.$$

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_δ моменты

$$M = M_C \pm M_\delta.$$

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

$$M_\delta = J \frac{d\omega}{dt},$$

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

Уравнения ЭДС и напряжения на зажимах двигателя

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

позволяют получить уравнение скоростной характеристики

$$n = \frac{U - IR}{C_E \Phi}.$$

Подставив в последнее выражение тока из формулы момента, получим формулу механической характеристики

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

Механические характеристики – это зависимость $n = f(M)$ при $U = const$, $I_B = const$, $R_d = const$. Механическая характеристика, соответствующая условиям рабочей характеристики ($U = U_H$, $i_B = i_{вн}$, $R_o = 0$), называется естественной. Вид механической характеристики зависит от способа возбуждения двигателя.

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. П.4.1 б). При уменьшении напряжения механическая характеристика 2 идет ниже естественной характеристики 1 (рис. П.4.1 а).

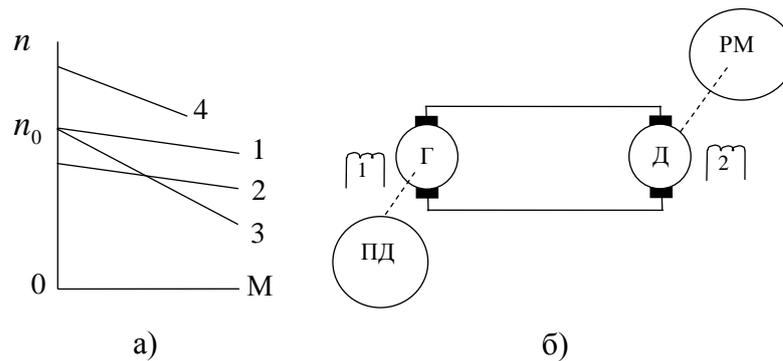


Рис. П.4.1. Семейство механических характеристик ДПТ (а); Система «генератор-двигатель» (б)

При включении добавочного сопротивления R_d в цепь якоря характеристика 3 увеличивает свой наклон.

При уменьшении тока возбуждения с помощью реостата в цепи возбуждения частота вращения двигателя возрастает (характеристика 4).

Рассчитать и построить по двум точкам (холостой ход и нагрузка номинальным моментом) естественную механическую и три искусственные характеристики для следующих случаев:

- напряжение на якоре меньше номинального на 20%;
- добавочное сопротивление в цепи якоря составляет $R'_{р\dot{я}} = 4R_{р\dot{я}}$;
- магнитный поток меньше номинального на 10 %.

Расчет и построение естественной механической характеристики

Естественная механическая характеристика ДПТ $n = f(M)$ (прямая линия) строится по двум точкам: 1) в режиме холостого хода при $M = 0$ частота вращения:

$$n_0 = \frac{U_{НОМ}}{(C_E \cdot \Phi_{НОМ})} = \frac{U_{НОМ}}{E_{НОМ}} n_H, \text{ об/мин.}$$

2) при номинальной нагрузке $M = M_{НОМ}$ частота вращения $n = n_{НОМ}$. Результаты расчёта заносим в таблицу и выбрав масштабы, строим зависимость $n = f(M)$.

Расчёт и построение трёх искусственных характеристик:

1 вариант. Напряжение на якоре меньше номинального на 20%, т.е. $U = 0,8U_H$, $\Phi = \Phi_H$, $R_{р\dot{я}} = 0$. Вращающий момент двигателя при номинальном режиме:

$$M_H = C_M \cdot \Phi \cdot I_{ЯH},$$

и при пониженном напряжении:

$$M_1 = C_M \cdot \Phi_1 \cdot I_{Я1},$$

т.к. по условию $M_H = M_1$, $\Phi = \Phi_1$, $I_{Я1} = I_{ЯH}$.

Номинальная скорость вращения n_H и n_1 при пониженном напряжении:

$$n_H = \frac{U_H - (I_{ЯH} R_{75^\circ} + 2)}{C_E \cdot \Phi} \quad \text{и} \quad n_1 = \frac{U_1 - (I_{ЯH} R_{75^\circ} + 2)}{C_E \cdot \Phi_1},$$

где $\Phi = \Phi_1$; $\Delta U_{ш} = 2$ В.

Разделив одно уравнение на другое, получим:

$$n_1 = n_H \frac{U_1 - (I_{ЯH} R_{75^\circ} + 2)}{U_H - (I_{ЯH} R_{75^\circ} + 2)}.$$

При $M = 0$, $n = n_0$; $M = M_H$; $n = n_1$.

2 вариант. В цепь якоря включили добавочное сопротивление $R'_{рЯ} = 4R_{рЯ}$; $U = U_{НОО}$; $\Phi = \Phi_{НОМ}$.

Нагрузке на валу $M_{НОМ}$ соответствует ток в цепи якоря $I_{ЯH}$ и скорость вращения при отсутствии дополнительного сопротивления:

$$n_H = \frac{U_H - I_{ЯH} R_{Я75^\circ}}{C_E \Phi}.$$

Если при нагрузке на валу $M = M_H$ включить в цепь якоря сопротивление $R_{доб} = 4R_{Я75^\circ}$, то ток в цепи якоря не изменится, а скорость вращения определится по формуле:

$$n_1 = \frac{U_H - I_{ЯH} (R_{Я75^\circ} + 4R_{Я75^\circ})}{C_E \cdot \Phi_1},$$

т.к. $C_E \Phi = C_E \Phi_1$, то

$$n_1 = n_H \frac{U_H - 5I_{ЯH} R_{75^\circ}}{U_H - I_{ЯH} R_{75^\circ}}.$$

При $M = 0$, $n = n_0$; $M = M_H$; $n = n_1$.

По данным точкам строим зависимость $n = f(M)$.

3 вариант. Магнитный поток меньше номинального на 10%.

$$\Phi = 0,9\Phi_H; U = U_H; R_{рЯ} = 0.$$

Составляем уравнение скорости для нормального режима:

$$n_H = \frac{U_H - I_{яH} R_{я75^\circ}}{C_E \Phi},$$

и для режима с ослабленным на 10%:

$$n_1 = \frac{U_H - I_{яH} R_{я75^\circ}}{0,9 C_E \Phi}.$$

Разделим одно уравнение на другое, получим:

$$n_1 = n_H \frac{(U_H - I_{яH} R_{я75^\circ})}{0,9(U_H - I_{яH} R_{я75^\circ})}.$$

По полученным данным строим искусственную механическую характеристику по двум точкам.

При $M = 0$, $n = n_0$; $M = M_H$; $\Phi = 0,9\Phi_H$; $n = n_1$.

Пуск двигателей постоянного тока

Существует три способа пуска двигателей постоянного тока: прямой пуск, пуск с помощью пускового реостата и пуск от источника регулируемого напряжения.

Прямой пуск от сети применяется иногда для двигателей мощностью до 1 кВт, пусковой ток которых не превышает $(5 \div 10)I_{яH}$. В начальный момент прямого пуска при $n = 0$ и $E = 0$ пусковой ток определяется напряжением сети и внутренним сопротивлением

якоря $I_{яH} = \frac{U_C}{R_я}$.

В машинах средней и большой мощности сопротивления $R_я$ небольшое, поэтому ток при пуске может достигать $(50 \div 100)I_{яH}$. Такие токи недопустимы по условиям коммутации и могут вызвать «круговой огонь» на коллекторе. Для снижения пусковых токов подключение двигателей средней и большой мощности к сети осуществляется через пусковой реостат (рис. П.4.2).

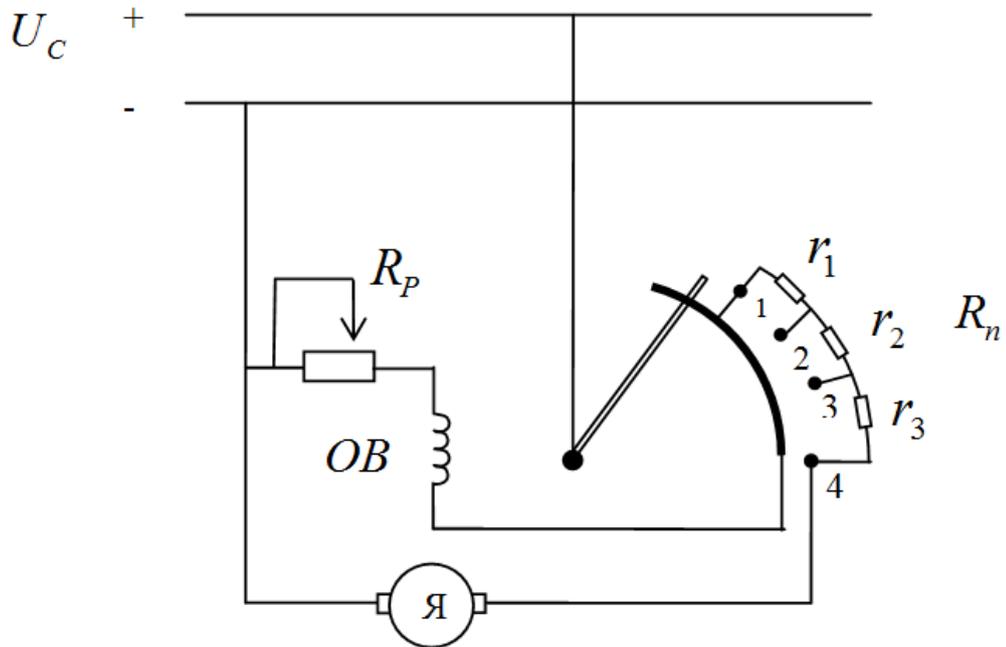


Рис. П.4.2. Схема включения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

В первый момент пуска подвижный контакт реостата устанавливается на клемму 1, и в цепь якоря вводится полное сопротивление реостата

$$R_n = r_1 + r_2 + r_3,$$

а обмотка возбуждения включается в сеть, минуя пусковой реостат. Сопротивление R_n подбирается так, чтобы пусковой ток

$$I_{яn} = \frac{U_c}{R_я + R_n}$$

не превышал $(1,4 \div 2,5)I_{яn}$.

По мере разгона двигателя пусковой реостат выводится. В конце пуска подвижный контакт соединяется с клеммой 4 и якорь подключается к сети напрямую. Сопротивление пускового реостата изменяется ступенями, поэтому ток якоря при пуске пульсирует (рис. П.4.3) согласно выражению

$$I_{яn} = \frac{U_c - E}{R_я + R_n} = \frac{U_c - C_e n \Phi}{R_я + R_n}.$$

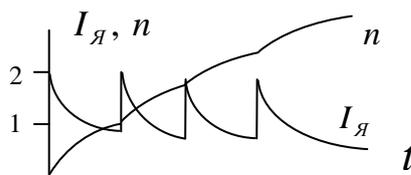


Рис. П.4.3. Изменение тока якоря и скорости при пуске двигателя.

Такой же характер имеет и кривая электромагнитного момента

$$M_e = C_m I_я \Phi.$$

Для повышения электромагнитного момента при заданном пусковом токе и сокращения времени пуска необходимо стремиться к тому, чтобы поток Φ был максимален. Это условие выполняется при полностью выведенном регулировочном реостате ($R_p = 0$).

Наиболее благоприятные пусковые характеристики могут быть получены при пуске двигателя от источника регулируемого напряжения. В качестве источника регулируемого напряжения используются либо генератор постоянного тока (рис. П.4.4, а), либо полупроводниковый выпрямитель (рис. П.4.4, б).

Такие схемы применяются одновременно и для регулирования частоты вращения двигателя, так как только в этом случае высокая стоимость источника питания окупается за счет эффекта от регулирования частоты вращения.

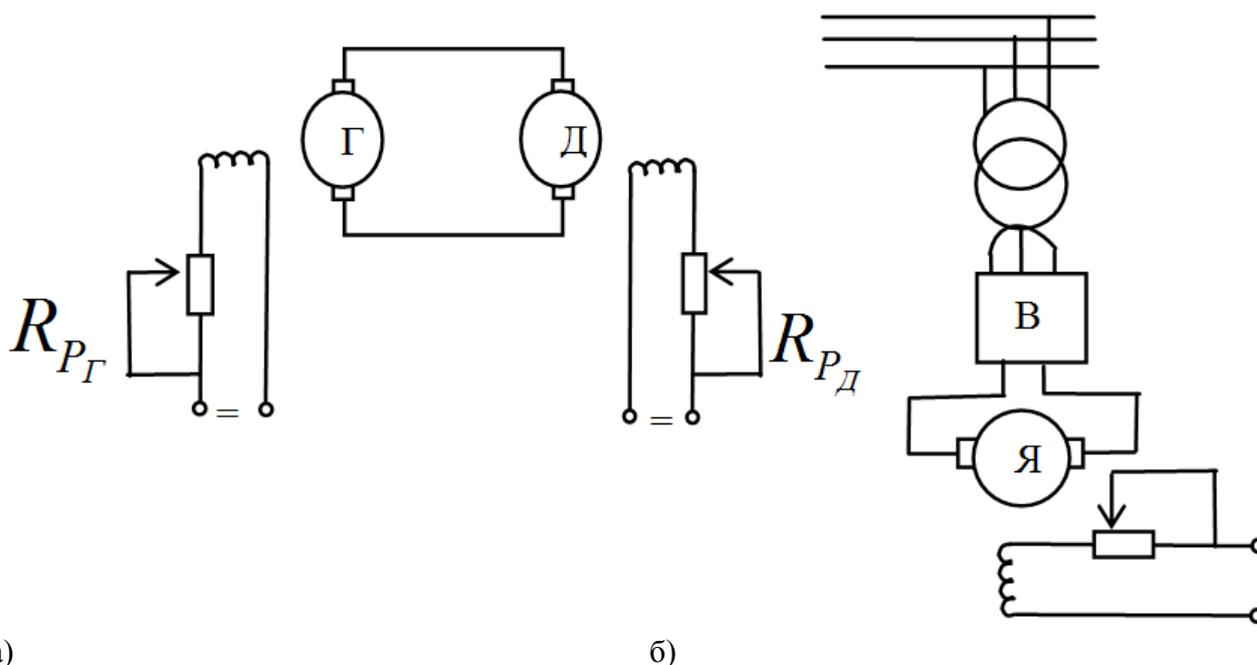


Рис. П.4.4 Схемы включения двигателя: а) от источника регулируемого напряжения; б) от полупроводникового выпрямителя

Задача №1

Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, технические данные которого приведены в табл. П.4.1 при напряжении питающей сети $U = 220$ В:

Таблица П.4.1

Таблица технических данных серийных ДПТ ПВ

№ пп	Контрольные Вопросы	Кратность пускового тока K_I	Технические данные двигателя				
			$P_{ном}, кВт$	$n_{ном}, мин^{-1}$	$R_{я}, Ом$	$R_{\phi}, Ом$	$I_{ном}, А$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,30	2,5	1,5	3000	1,9	600	9
2	3,28	2,4	1,5	1500	2,45	470	8,7
3	5,26	2,3	2,2	1500	1,205	358	12
4	7,24	2,2	2,2	3000	1,03	712	12,5
5	9,22	2,1	3,2	3000	0,642	285	17,5
6	11,20	2,0	4,5	1000	0,632	184	25,2
7	13,18	1,9	4,5	1500	0,78	228	25,4
8	15,16	1,8	4,5	3000	0,352	270	24,3
9	17,14	1,9	6	1500	0,472	132	33,2

10	19,12	2,0	6	1000	0,494	158	32,6
11	21,10	2,1	6,2	3000	0,36	280	33
12	23,8	2,2	6,6	2200	0,303	368	35
13	25,6	2,3	8	1000	0,328	136	43
14	27,4	2,4	9	1500	0,240	282	48
15	29,2	2,5	10	1000	0,300	85	63
16	4,15	2,4	10	750	0,357	92,5	58
17	6,17	2,3	12,5	1000	0,237	108	76
18	8,20	2,2	14	750	0,244	92	79
19	17,8	1,7	17	750	0,157	73,3	93
20	19,6	1,9	19	600	0,198	44	106
21	21,2	2,1	20,5	970	0,086	115	110
22	10,17	1,8	25	750	0,102	44	136
23	12,15	2,0	25	600	0,111	48,4	136
24	14,13	2,1	32	750	0,102	44	136
25	16,11	2,2	42	600	0,111	48,4	136
26	18,9	2,3	55	600	0,036	32,5	287
27	20,7	2,4	70	600	0,0202	24	361
28	22,17	2,2	3,2	1500	1,03	198	18,4
29	24,15	2,1	12,0	740	0,20	94	65
30	26,13	2,0	24,0	1060	0,05	70	124

1. Начертить электрическую схему с пусковым реостатом в цепи якоря и регулировочным реостатом в цепи возбуждения.

2. Определить величину сопротивления регулировочного реостата R_p , обеспечивающего ослабление магнитного потока до величины $\Phi = 0,75 \Phi_{\text{ном}}$.

3. Определить величину сопротивления пускового реостата при кратности пускового тока якоря $K_I = I_n / I_{\text{я ном}}$, заданной в табл. П.4.1.

4. Построить на одном графике естественную механическую характеристику и искусственную при $\Phi' = 0,75\Phi_{\text{ном}}$ и $R_n = 0$ (воспользоваться данными табл. П.4.2).

5. Построить на одном графике естественную механическую характеристику и искусственную при $\Phi_{\text{ном}}$ и введенном сопротивлении пускового реостата R_n .

6. Ответить на вопросы, указанные в табл. П.4.1.

Пример решения задачи

Пример 1. Двигатель параллельного возбуждения подключен к сети с напряжением $U_{\text{ном}} = 220$ В. Заданы следующие номинальные величины двигателя: $P_{\text{ном}} = 12$ кВт; $n_{\text{ном}} = 685$ мин⁻¹; $I_{\text{ном}} = 64$ А; $I_{\text{в.ном}} = 1,75$ А; $R_{\text{я}} = 0,281$ Ом. В цепи якоря и обмотки возбуждения включены реостаты.

Задание:

1) рассчитать сопротивление R_p регулировочного реостата в цепи возбуждения для ослабления магнитного потока до величины $\Phi' = 0,78 \Phi_{\text{ном}}$;

2) построить естественную механическую характеристику и искусственную при $\Phi' = 0,78 \Phi_{\text{ном}}$ и $R_n = 0$. Реакцией якоря пренебречь.

Решение:

1. Сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / I_{\text{в.ном}} = 220 / 1,75 = 125,7$ Ом. Для расчета сопротивления R_p регулировочного реостата найдем сначала ток в обмотке возбуждения,

соответствующий ослабленному магнитному потоку $\Phi' = 0,78\Phi_{\text{ном}}$. С этой целью обычно используют универсальную кривую намагничивания двигателей постоянного тока, заданную табл. П.4.2.

Таблица П.4.2

Таблица универсальных кривых намагничивания ДПТ

$I_B / I_{B,\text{ном}}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$\Phi / \Phi_{\text{ном}}$	0	0,2	0,4	0,55	0,67	0,75	0,81	0,87	0,92	0,94	1,0	1,04	1,08

Интерполяцией находим, что при $\Phi' / \Phi_{\text{ном}} = 0,78$ отношение $I_B / I_{B,\text{ном}} = 0,55$.
Тогда

$$I_B = 0,55 I_{B,\text{ном}};$$

$$I_B = 0,55 \cdot 1,75 = 0,962 \text{ А.}$$

Общее сопротивление цепи возбуждения

$$R_B + R_p = U_{\text{ном}} / I_B;$$

$$R_B + R_p = 220 / 0,962 = 228,3 \text{ Ом.}$$

Сопротивление регулировочного реостата в цепи возбуждения

$$R_p = (U_{\text{ном}} / I_B) - R_B;$$

$$R_p = 228,3 - 125,7 = 102,6 \text{ Ом.}$$

Для номинального режима работы двигателя найдем следующие величины:
ток в цепи якоря

$$I_{\text{я.ном}} = I_{\text{ном}} - I_{B,\text{ном}};$$

$$I_{\text{я.ном}} = 64 - 1,75 = 62,25 \text{ А;}$$

ЭДС якоря

$$E_{\text{я.ном}} = U_{\text{ном}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я.ном}};$$

$$E_{\text{я.ном}} = 220 - 0,281 \cdot 62,25 = 202,5 \text{ В.}$$

Момент

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot (P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}});$$

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot (12 / 685) = 167,3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением представляют собой линейные зависимости и строятся по двум точкам.

Рассчитаем координаты двух точек для естественной характеристики:

1. в режиме холостого хода при $M=0$ частота вращения

$$n_0 = U_{\text{НОМ}} / (C_e \cdot \Phi_{\text{НОМ}}) = (U_{\text{НОМ}} / E_{\text{я.НОМ}}) \cdot n_{\text{НОМ}} ;$$

$$n_0 = (220/202,5) \cdot 685 = 744 \text{ МИН}^{-1}.$$

2. при номинальной нагрузке

$$M = M_{\text{НОМ}} , n = n_{\text{НОМ}} .$$

Естественная характеристика построена на рис. П.4.5 в виде сплошной прямой.

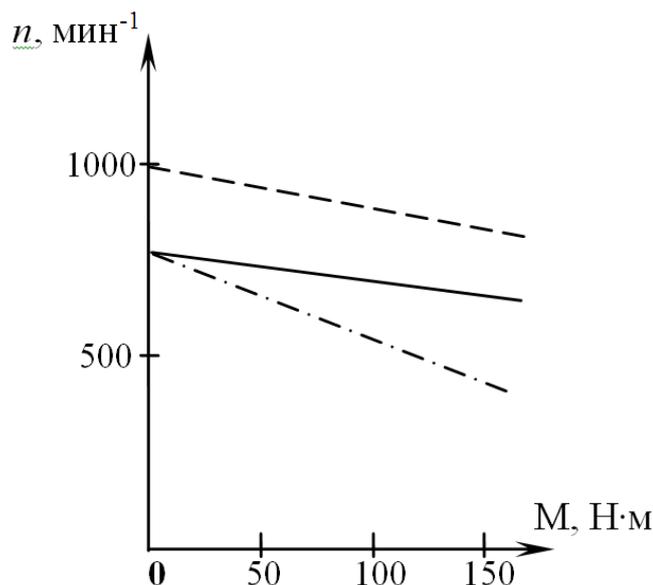


Рис.П.4.5. Механические характеристики ДПТ параллельного возбуждения

Рассчитаем координаты двух точек для построения искусственной характеристики:

1. в режиме холостого хода при $M=0$ частота вращения якоря при ослабленном магнитном потоке $\Phi' = 0,78 \Phi_{\text{НОМ}}$

$$n'_0 = U_{\text{НОМ}} / (C_e \cdot \Phi') = U_{\text{НОМ}} / (0,78 \cdot C_e \cdot \Phi_{\text{НОМ}}) = n_0 / 0,78 ;$$

$$n'_0 = 744 / 0,78 = 955 \text{ МИН}^{-1};$$

2. при номинальной нагрузке $M = M_{\text{НОМ}}$

$$n' = E_{\text{я}} / (0,78 \cdot C_e \cdot \Phi_{\text{НОМ}}) = [(U_{\text{НОМ}} - R_{\text{я}} \cdot I'_{\text{я}}) / (0,78 \cdot E_{\text{я.НОМ}})] \cdot n_{\text{НОМ}} ;$$

$$n' = [(220 - 0,281 \cdot 80) / (0,78 \cdot 202,5)] \cdot 685 = 856 \text{ МИН}^{-1},$$

где

$$I'_{\text{я}} = M_{\text{НОМ}} / (0,78 \cdot C_m \cdot \Phi_{\text{НОМ}}) = I_{\text{я.НОМ}} / 0,78;$$

$$I'_{\text{я}} = 62,25 / 0,78 = 80 \text{ А}.$$

Искусственная характеристика построена на рис. П.4.6 штриховой линией.

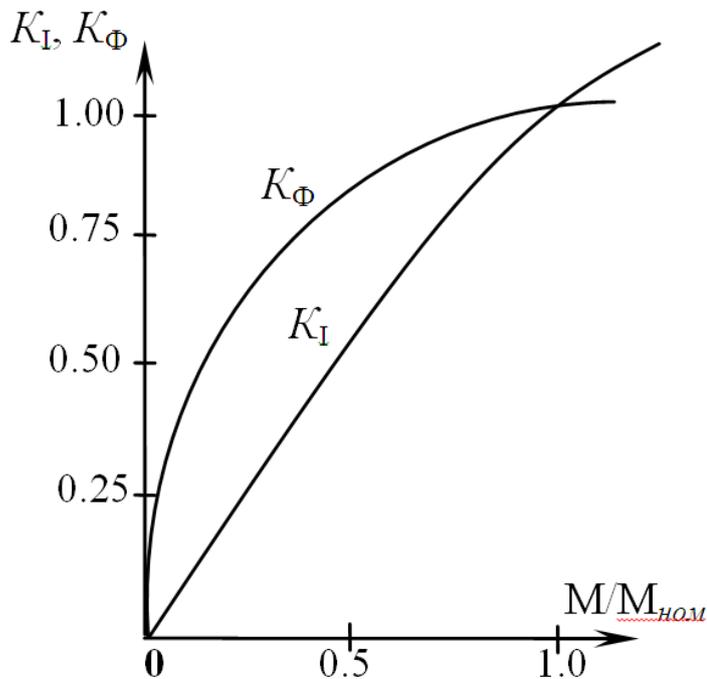


Рис. П.4.6. Зависимости $K_I (M / M_{\text{ном}})$ и $K_\Phi (M / M_{\text{ном}})$

Пример 2. Для двигателя с техническими данными, приведенными в условии примера 1, требуется: 1) рассчитать пусковой ток без реостата в цепи якоря, а также сопротивление R_n пускового реостата для ограничения пускового тока до $I_n = 2,1 I_{\text{я.ном}}$; 2) построить искусственную механическую характеристику при $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ и сопротивлении пускового реостата R_n .

Решение:

1. Так как в момент пуска ЭДС якоря $E_{\text{я}} = 0$, то пусковой ток

$$I_n = U_{\text{ном}} / R_{\text{я}};$$

$$I_n = 220 / 0,281 = 783 \text{ А.}$$

Сопротивление пускового реостата определяется из равенства

$$I_n = K_I I_{\text{я.ном}} = U_{\text{ном}} / (R_{\text{я}} + R_n).$$

Отсюда

$$R_n = [U_{\text{ном}} / (K_I I_{\text{я.ном}})] - R_{\text{я}};$$

$$R_n = [220 / (2,1 \cdot 62,25)] - 0,281 = 1,4 \text{ Ом.}$$

2. Искусственную механическую характеристику также строим по двум точкам:

1) в режиме холостого хода при $M=0$ частота вращения

$$n_0 = U_{\text{ном}} / (C_e \cdot \Phi_{\text{ном}}) = 744 \text{ мин}^{-1}.$$

(см. пример 1)

2) при номинальной нагрузке $M = M_{\text{ном}}$ частота вращения

$$n = E_{\text{я}} / (C_e \cdot \Phi_{\text{ном}}) = n_{\text{ном}} [U_{\text{ном}} - (R_{\text{я}} + R_n) \cdot I_{\text{я.ном}}] / E_{\text{я.ном}};$$

$$n = 685 \cdot [220 - (0,281 + 1,4) \cdot 62,25] / 202,5 = 390 \text{ мин}^{-1}.$$

Характеристика построена на рис. П.4.5 штрихпунктирной линией.

Задача №2

Для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, технические данные которого приведены в табл. 19, при напряжении питающей сети $U = 220$ В.

1. Начертить электрическую схему с пусковым реостатом в цепи якоря, регулировочным реостатом в цепи возбуждения.

2. Определить мощность $P_{\text{ном}}$ и ток якоря $I_{\text{я.ном}}$, потребляемые из сети, а также момент $M_{\text{ном}}$ на его валу.

3. Определить частоту вращения якоря при значениях тока 0,25; 0,5; 0,75 и 1,25 $I_{\text{я.ном}}$.

4. Определить суммарные потери ΔP_{Σ} , КПД двигателя η и момент на его валу при тех же значениях тока, полагая, что мощность механических и магнитных потерь постоянна.

5. Рассчитать величину пускового реостата R_n при заданной кратности пускового тока $K_I = I_{\text{я}} / I_{\text{я.ном}}$ (табл. П.4.1).

6. Построить естественную механическую характеристику, считая, что момент двигателя изменяется от $M_{\text{мин}} = 0,2 M_{\text{ном}}$ до $M_{\text{мак}} = 1,5 M_{\text{ном}}$.

7. Построить в общей системе координат зависимости $M(I_{\text{я}})$, $n(I_{\text{я}})$ и $\eta(I_{\text{я}})$ в соответствии с расчетами пп.3 и 4, а также определить частоту вращения n и ток $I_{\text{я}}$ при моменте нагрузки $M_{\text{ст}} = 0,6 M_{\text{ном}}$.

8. Ответить на вопросы, указанные в табл. П.4.3.

Таблица П.4.3

Таблица технических данных ДПТ последовательного возбуждения

№ п/п	Контрольные вопросы	Кратность пускового тока K_I	Технические данные двигателя					
			$P_{\text{ном}},$ кВт	$I_{\text{я.ном}},$ А	$n_{\text{ном}},$ мин ⁻¹	$R_{\text{я}},$ Ом	$R_{\text{в}},$ Ом	$\eta,$ %
1	26,19	1,7	19	106	600	0,198	0,00407	81,5
2	24,17	1,8	10	58	750	0,357	0,02	78,5
3	22,15	1,9	4,5	25,2	1000	0,632	0,0326	81,0
4	20,13	2,0	1,5	8,7	1500	2,45	0,212	78,5
5	18,11	2,1	1,5	9	3000	1,99	0,2	76,0
6	16,9	2,2	25	136	600	0,111	0,0048	83,5
7	14,7	2,3	14	79	750	0,244	0,01	80,5
8	10,5	2,2	6	32,6	1000	0,494	0,009	83,5
9	8,3	2,1	2,2	12	1500	1,205	0,092	83,5
10	6,8	2,0	2,2	12,5	3000	1,03	0,06	80,0
11	14,21	1,9	42	223	600	0,017	0,00061	85,5
12	2,23	1,8	17	93	750	0,157	0,0088	83,0
13	28,25	1,7	8	43	1000	0,328	0,007	85,0
14	30,27	2,3	3,2	18,4	1500	1,03	0,033	79,0
15	12,29	2,1	3,2	17,5	3000	0,642	0,044	83,0
16	1,16	2,0	55	287	600	0,036	0,002	87,0
17	2,17	1,9	25	136	750	0,102	0,004	83,5
18	3,18	1,8	10	63	1000	0,30	0,0105	79,5
19	4,19	1,7	4,5	25,4	1500	0,78	0,004	80,5
20	5,20	1,8	4,5	24,3	3000	0,352	0,022	84,0
21	6,21	1,9	70	361	600	0,0262	0,0012	88,0
22	7,22	2,0	32	169	750	0,020	0,041	86,0

23	8,23	2,1	12,5	78	1000	0,237	0,011	81,0
24	9,24	2,2	6	33,2	1500	0,472	0,0074	82,0
25	10,25	2,3	6	33	3000	0,36	0,007	82,5
26	11,26	2,4	6	33,6	1000	0,51	0,008	81,0
27	12,27	2,3	8	43,6	3000	0,44	0,006	83,5
28	13,28	2,1	11	59,5	1500	0,31	0,008	84,0
29	14,29	2,0	14	73,6	1500	0,29	0,06	86,5
30	15,30	1,9	19	102	1500	0,16	0,005	84,5

Пример 1. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения, подключенный к сети напряжением 220 В, в номинальном режиме имеет следующие технические данные:

$$P_{\text{ном}}=3,3\text{кВт}; n_{\text{ном}}=3000\text{мин}^{-1}; \eta_{\text{ном}}=0,83; R_{\text{я}}=1,08\text{ Ом}; R_{\text{в}}=0,09\text{ Ом}.$$

Определить:

- 1) момент на валу $M_{\text{ном}}$; мощность $P_{1\text{ном}}$ и ток $I_{\text{я.ном}}$, потребляемые из сети в номинальном режиме;
- 2) момент на валу M и частоту вращения n якоря при токе двигателя, равном $0,25 I_{\text{я.ном}}$;
- 3) суммарные потери мощности ΔP_{Σ} и КПД η двигателя при $I_{\text{я}}=0,25I_{\text{я.ном}}$;
- 4) построить естественную механическую характеристику двигателя, приняв, что момент двигателя изменяется в пределах от $M_{\text{мин}} = 0,25 M_{\text{ном}}$ до $M_{\text{мах}} = 1,5 M_{\text{ном}}$.

Решение:

1. Мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_{1\text{ ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} ;$$

$$P_{1\text{ ном}} = 3,2 / 0,83 = 3,855 \text{ кВт}.$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{я. ном}} = P_{1\text{ ном}} / U_{\text{ном}} ;$$

$$I_{\text{я. ном}} = 3855 / 220 = 17, 52 \text{ А}..$$

Момент на валу двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9550 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} ;$$

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot 3,2 / 3000 = 10,19 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

2. В двигателях последовательного возбуждения ток якоря является током возбуждения, поэтому изменение нагрузки двигателя приводит к изменению тока якоря и его магнитного потока. Связь между величинами момента, тока и магнитного потока двигателя в номинальном режиме и режиме, отличном от номинального, определяется выражением

$$(I_{\text{я}} / I_{\text{я. ном}}) \cdot (\Phi / \Phi_{\text{ном}}) = M / M_{\text{ном}}.$$

Зависимость между током якоря и магнитным потоком описывается универсальной кривой намагничивания, приведенной в табл. П.4.4. Для отношения тока $K_I = I_{\text{я}} / I_{\text{я.ном}}$ находится интерполяцией по табл. П.4.4 отношение $K_{\Phi} = \Phi / \Phi_{\text{ном}}$.

Таблица П.4.4.

Таблица результатов расчетов построения естественной механической характеристики

$M / M_{\text{НОМ}}$	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
K_I	0,38	0,6	0,8	1,0	1,14
K_{Φ}	0,63	0,82	0,91	1,0	1,06
$n / n_{\text{НОМ}}$	1,69	1,27	1,12	1,0	0,93

Частота вращения якоря при номинальной нагрузке

$$n_{\text{НОМ}} = [U_{\text{НОМ}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) \cdot I_{\text{я.НОМ}}] / C_e \cdot \Phi_{\text{НОМ}},$$

а при нагрузке, отличной от номинальной,

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_{\text{НОМ}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) \cdot I_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U_{\text{НОМ}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) \cdot \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{я.НОМ}}} \cdot I_{\text{я.НОМ}}}{\frac{C_e \cdot \Phi}{\Phi_{\text{НОМ}}} \cdot \Phi_{\text{НОМ}}} = \\ &= \frac{U_{\text{НОМ}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) \cdot K_I \cdot I_{\text{я.НОМ}}}{K_{\Phi} \cdot E_{\text{я.НОМ}}} \cdot n_{\text{НОМ}}, \end{aligned}$$

где $E_{\text{я.НОМ}} = U_{\text{НОМ}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) \cdot I_{\text{я.НОМ}}$.

Для заданного в условии значения $K_I = 0,25$ найдем в соответствии с вышеизложенным

$$K_{\Phi} = 0,475; M = 1,21 \text{ Н}\cdot\text{м}; n = 6802 \text{ мин}^{-1}.$$

3. Суммарные потери в номинальном режиме

$$\Delta P_{\Sigma \text{НОМ}} = P_{1 \text{НОМ}} - P_{\text{НОМ}};$$

$$\Delta P_{\Sigma \text{НОМ}} = 3855 - 3200 = 655 \text{ Вт}.$$

При этом потери в обмотках якоря и возбуждения

$$\Delta P_{\text{я.НОМ}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я.НОМ}}^2;$$

$$\Delta P_{\text{я.НОМ}} = 1,08 \cdot 17,52^2 = 331,5 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{\text{в.НОМ}} = R_{\text{в}} \cdot I_{\text{я.НОМ}}^2;$$

$$\Delta P_{\text{в.НОМ}} = 0,09 \cdot 17,52^2 = 27,6 \text{ Вт}.$$

Тогда магнитные и механические потери

$$\Delta P_{\text{м.НОМ}} + \Delta P_{\text{мех.НОМ}} = \Delta P_{\Sigma \text{НОМ}} - (\Delta P_{\text{я.НОМ}} + \Delta P_{\text{в.НОМ}});$$

$$\Delta P_{\text{м.НОМ}} + \Delta P_{\text{мех.НОМ}} = 655 - (331,5 + 27,6) = 295,9 \text{ Вт}.$$

Потери $\Delta P_{\text{я}}$ и $\Delta P_{\text{в}}$ при $I_{\text{я}} = 0,25 I_{\text{я.ном}}$ равны:

$$\Delta P_{\text{я}} = 0,25^2 \cdot \Delta P_{\text{я.ном}} = 20,7 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{\text{в}} = 0,25^2 \cdot \Delta P_{\text{в.ном}} = 1,72 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери, если принять допущение, что магнитные и механические потери не зависят от частоты вращения якоря,

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мех}};$$

$$\Delta P_{\Sigma} = 20,7 + 1,72 + 295,9 = 318,32 \text{ Вт}.$$

Мощность, потребляемая из сети,

$$P_1 = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я}};$$

$$P_1 = 220 \cdot 0,25 \cdot 17,52 = 963,6 \text{ Вт}.$$

Величина КПД

$$\eta = (P_1 - \Delta P_{\Sigma}) / P_1;$$

$$\eta = (963,6 - 318,32) / 963,6 = 0,67.$$

4. Для ряда значений K_I по выражению $M / M_{\text{ном}} = K_I \cdot K_{\Phi}$ рассчитываем аналогично п.2 соответствующие значения K_{Φ} и $M / M_{\text{ном}}$. Результаты расчетов для $K_I = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$ представлены в табл. П.4.5, по которой на рис. П.4.7 построены зависимости $K_I (M / M_{\text{ном}})$ и $K_{\Phi} (M / M_{\text{ном}})$.

Таблица П.4.5

Таблица ряда значений K_I

K_I	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
K_{Φ}	0,475	0,75	0,895	1,0	1,1
$M / M_{\text{ном}}$	0,119	0,375	0,671	1,0	1,375

Для построения механической характеристики, задав произвольный ряд значений $M / M_{\text{ном}}$ в диапазоне, указанном в условии задачи, найдем по кривым рис. П.4.7 величины K_I, K_{Φ} , а по выражению

$$\frac{n}{n_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{ном}} - K_I \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) \cdot I_{\text{я.ном}}}{K_{\Phi} \cdot E_{\text{я.ном}}};$$

$$\frac{n}{n_{\text{ном}}} = \frac{220 - K_I \cdot 20,54}{K_{\Phi} \cdot 199,5};$$

определим значения частоты вращения якоря.

По результатам расчетов (табл.П.4.4) построена естественная механическая характеристика (рис. П.4.7).

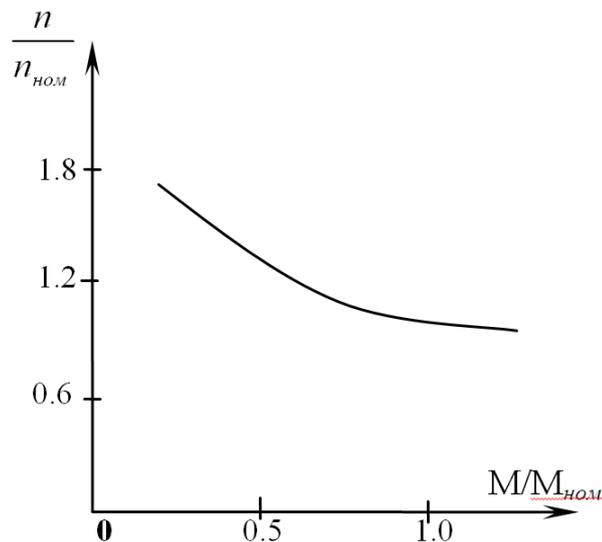


Рис. П.4.7. Естественная механическая характеристика ДПТ ПВ

Форма отчетности:

1. Схема замещения и расчет номинальных величин машины постоянного тока.
2. Механическая характеристика двигателя постоянного тока.
3. Показать расчеты по заданию.

Основная литература:

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

Дополнительная литература:

1. Хвостов, В. С. Электрические машины. Машины постоянного тока: учебник для вузов / В. С. Хвостов; Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1988. - 335 с. - Б. ц.
2. Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 2000. - 607 с.
3. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч.: учебник для вузов / М. П. Костенко, Ленинград М. Петровский. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1972 - Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы - 543 с.: ил. - Б. ц.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение дополнительных полюсов и компенсационной обмотки машины постоянного тока?
2. Какие условия нужно выполнить, чтобы произошло самовозбуждение генератора постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения?
3. Для чего в цепи обмотки якоря при пуске двигателя необходимо включать дополнительные сопротивления?
4. Почему нельзя включать в сеть двигатель последовательного возбуждения без нагрузки? Каким при этом должно быть соединение двигателя с рабочим механизмом?
5. Назовите основные части машины постоянного тока и поясните их конструкцию.
6. Каково назначение коллектора у генератора и двигателя?
7. Каким образом можно регулировать ЭДС генератора?

8. Объясните влияние реакции якоря на величину ЭДС машины постоянного тока.
9. Поясните сущность коммутации машины постоянного тока.
10. Как уменьшить вредное влияние реакции якоря на работу машины постоянного тока?
11. Чем определяется конечное напряжение, до которого самовозбуждается генератор с параллельным возбуждением?
12. Каковы достоинства и недостатки генератора с последовательным возбуждением?
13. Каковы особенности внешней характеристики генератора с параллельным возбуждением?
14. Какой вид имеет внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением при согласном и встречном включении обмоток возбуждения?
15. Поясните, как осуществляется регулирование частоты вращения двигателя с параллельным возбуждением.
16. Как осуществляется регулирование частоты вращения двигателя с последовательным возбуждением?
17. Зачем необходим реостат в цепи якоря двигателя постоянного тока при его запуске?
18. Поясните, почему с увеличением нагрузки частота вращения двигателя последовательного возбуждения уменьшается, а с уменьшением нагрузки – увеличивается.
19. От чего зависит частота вращения двигателя и как ее можно регулировать?
20. От каких факторов зависит ЭДС генератора смешанного возбуждения?
21. Почему реакция якоря может вызвать искрение под щетками?
22. Почему ток короткого замыкания генератора параллельного возбуждения очень быстро снижается до величин, меньших номинального тока?
23. Что произойдет при обрыве обмотки возбуждения двигателя с параллельным возбуждением, если он работал с номинальным моментом на валу?
24. То же, но в условиях, когда двигатель работал в режиме холостого хода.
25. Какова распространенная ошибка при подключении двигателя с параллельным возбуждением к сети? К чему она приводит?
26. Как изменяется частота вращения двигателя с параллельным возбуждением при увеличении нагрузки?
27. Приведите схему реостатного пуска двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, если используется трехступенчатый пусковой реостат.
28. Как скажется снижение напряжения питающей сети на частоте вращения и токе якоря при неизменной нагрузке на валу двигателя параллельного возбуждения?
29. Как скажется снижение напряжения питающей сети на частоте вращения и токе якоря при неизменной нагрузке на валу двигателя последовательного возбуждения?
30. Как зависит пусковой ток двигателя от нагрузки на валу и момента инерции устройства, приводимого во вращение?

9.2. Методические указания по выполнению контрольной работы

Выполнение контрольной работы является важнейшей формой учебной работы и способствует закреплению и углублению знаний, полученных обучающимися на лекциях и практических занятиях, воспитывает навыки самостоятельной творческой работы и ведения инженерных расчетов.

Данные методические указания призваны помочь обучающимся выполнить расчет и выбрать тип электродвигательного устройства переменного тока для рабочего механизма, работающего в заданном режиме. Конкретные решения обучающийся принимает самостоятельно, основываясь на своих знаниях дисциплины.

В приложении даны все необходимые для выполнения работы справочные данные.

Методические указания по выполнению контрольной работы можно найти:

1. Сыровешкин, А. М. Электрические машины. Трансформаторы. Расчет и конструирование трансформаторов: учебное пособие / А. М. Сыровешкин. - Братск: БрГТУ, 2003. - 149 с.

2. Сыровешкин А. М. Электрические машины: учебное пособие / А. М. Сыровешкин, М. А. Федорова. – Братск: БрГУ, 2009. – 180 с.

3. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 496 с.

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. ОС Windows 7 Professional;
2. Microsoft Imagine Premium;
3. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level;
4. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security;
5. ПО "Антиплагиат";
6. OpenOffice;
7. Adobe Reader.

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия (Лк, ЛР, ПЗ, КР, СР)</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ Лк, ЛР, ПЗ</i>
1	2	3	4
Лк	Лекционная аудитория	-	№ 1-18
ЛР	Лаборатория электрических машин	МФУ Canon LB MF3110; Монитор TFT 17" LG Flatron; Системный блок Celeron 2,66; Лабораторный стенд ЭМП1-Н-Р (Электрические машины); Лабораторный стенд ЭМ1-Н-Р (Электрические машины); Лабораторный стенд ИАД (Исследование асинхронного двигателя); Лабораторный стенд ИДПТ-У (Исследование двигателя постоянного тока); Универсальные лабораторные стенды (УЛС) собственной разработки «Трансформаторы»;	№ 1-4

		<p>Универсальные лабораторные стенды (УЛС) собственной разработки «Синхронный генератор»;</p> <p>Универсальные лабораторные стенды (УЛС) собственной разработки</p> <p>«Асинхронный двигатель»;</p> <p>Универсальные лабораторные стенды (УЛС) собственной разработки «Универсальные лабораторные стенды (УЛС) собственной разработки «Машины постоянного тока»;</p> <p>Измерительный комплект К-50;</p> <p>Измерительный комплект К-51;</p> <p>Осциллограф ОСУ-20;</p> <p>Вольтметр В7-26;</p> <p>Мост МО-62;</p>	
ПЗ	Лаборатория электрических машин	-	№1-4
кр	Читальный зал №3	<p>Оборудование 15-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);</p> <p>принтер HP LaserJet P3005</p> <p>Microsoft Imagine Premium (Windows 10 Windows 8.1)</p>	-
СР	Читальный зал №3		

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	ФОС
ОПК-2	способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1. Электрические машины	<i>Вопросы экзамену 1.1-1.3</i> к
		2. Трансформаторы	<i>Вопросы экзамену 2.1-2.10</i> к
ПК-1	способность участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике	3. Асинхронные машины	<i>Вопросы экзамену 3.1-3.7</i> к
		4. Синхронные машины	<i>Вопросы зачету 4.1-4.10</i> к
ПК-2	способность обрабатывать результаты экспериментов	5. Машины постоянного тока	<i>Вопросы зачету/экзамену 5.1-5.11</i> к

2. Экзаменационные вопросы (вопросы к зачету)

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ (ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ)	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1.	ОПК-2	способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1.1. Поясните классификацию электрических машин. 1.2. Какова роль электрических машин и трансформаторов в электрификации народного хозяйства? 1.3. На каких законах основана работа электрических машин? 2.1. Параллельная работа трансформаторов. Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами. 2.2. Принцип действия и конструкция силового масляного трансформатора. Назначение и устройство отдельных элементов конструкции, определение параметров схемы замещения тр-ра из опытов х.х. и к.з. 2.3. Обозначение типа трансформатора. Фазировка трансформаторов. 2.4. Схемы и группы соединения обмоток трансформаторов. Маркировка	1. Электрические машины 2. Трансформаторы

			<p>обмоток трёхфазного трансформатора. Проверка основных групп соединения.</p> <p>2.5. Автотрансформаторы. Какие потери имеют место, в трансформаторе при нагрузке и холостом ходе?</p> <p>2.6. Регулирование вторичного напряжения трансформаторов. Регулирование с ПБВ и с РПН.</p> <p>2.7. Внешняя характеристика трансформатора, энергетическая диаграмма. Потери мощности и КПД трансформатора.</p> <p>2.8. Холостой ход трансформатора: физические процессы, уравнения электрического состояния обмоток, составляющие тока холостого хода, действующее значение ЭДС обмоток, коэффициент трансформации, векторная диаграмма, схема замещения.</p> <p>2.9. Понятие приведённого трансформатора, коэффициенты приведения, схема замещения трансформатора, уравнения приведённого трансформатора, векторная диаграмма.</p> <p>2.10. Режим короткого замыкания трансформатора: опыт к.з., физические процессы; уравнения и векторная диаграмма трансформатора в режиме к.з., треугольник z_k трансформатора, физический смысл u_k трансформатора?</p>	
2.	ПК-1	<p>способность участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике</p>	<p>3.1. Асинхронный двигатель с фазным и короткозамкнутым ротором. Устройство, принцип действия, понятие скольжения.</p> <p>3.2. Схема замещения асинхронного двигателя. Механические характеристики.</p> <p>3.3. Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, способы регулирования частоты вращения ротора.</p> <p>3.4. Потери мощности и КПД асинхронного двигателя.</p> <p>3.5. Круговая векторная диаграмма асинхронного двигателя: обоснование, построение, возможные режимы работы, характерные точки и определение рабочих характеристик асинхронного двигателя.</p> <p>3.6. Опыты х.х. и к.з. асинхронного двигателя, определение параметров схемы замещения асинхронного</p>	3. Асинхронные машины

		<p>двигателя.</p> <p>3.7. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя, физический смысл потерь мощности.</p>	
		<p>4.1. Конструкция и принцип действия явнополюсного синхронного генератора. Особенность работы и реакция якоря при различных характерах нагрузки.</p> <p>4.2. Физический смысл сторон характеристического треугольника синхронного генератора и его построение по характеристикам холостого хода и короткого замыкания.</p> <p>4.3. Объясните устройство и назначение обмотки возбуждения, обмотки якоря и успокоительной (демпферной) обмотки в синхронном генераторе. Как осуществляется возбуждение синхронных машин?</p> <p>4.4. Как определить частоту ЭДС (тока) синхронного генератора, если известна скорость вращения ротора и число полюсов машины?</p> <p>4.5. Какая характеристика называется «характеристикой холостого хода» (х.х.х.) синхронного генератора? Как ее снять на исследуемой машине? Объясните форму кривой х.х.х.</p> <p>4.6. Какая характеристика синхронного генератора называется «индукционной нагрузочной»? Как ее снять на исследуемой машине? Как определить точку пересечения этой характеристики с осью абсцисс?</p> <p>4.7. Объясните взаимное расположение х.х.х. в индукционной нагрузочной характеристики синхронного генератора.</p> <p>4.8. Соблюдение каких условий требуется при включении синхронного генератора на параллельную работу по способу точной синхронизации? Как проверяется соблюдение этих условий при помощи лампового синхроскопа, по каким схемам он включается? В чем состоит сущность метода самосинхронизации?</p> <p>4.9. Что представляют собой U-образные кривые синхронного генератора, как объяснить их характер?</p> <p>4.10. Объясните устройство и принцип действия синхронного двигателя. Каковы преимущества и недостатки</p>	<p>4. Синхронные машины</p>

			синхронного двигателя?	
3.	ПК-2	способность обрабатывать результаты экспериментов	<p>5.1. Принцип действия и устройство генератора постоянного тока? Характеристический треугольник.</p> <p>5.2. Сравните между собой различные схемы возбуждения генератора постоянного тока.</p> <p>5.3. От чего зависит величина напряжения на зажимах генератора при холостом ходе?</p> <p>5.4. Каково назначение обмотки последовательного возбуждения в генераторе со смешанным возбуждением?</p> <p>5.5. Что такое внешняя характеристика генераторов постоянного тока? Как она получается опытным путем?</p> <p>5.6. Каково назначение последовательной обмотки возбуждения в генераторе смешанного возбуждения?</p> <p>5.7. Что называется реакцией якоря машиной постоянного тока и каковы их вредные действия для генераторов постоянного тока?</p> <p>5.8. В чем заключается принцип самовозбуждения машин постоянного тока? Какие условия необходимы для этого?</p> <p>5.9. Почему двигатели с последовательным возбуждением находят применение в тяговых установках?</p> <p>5.10. Как по паспортным данным двигателя рассчитать его номинальный момент?</p> <p>5.11. Способы регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока.</p>	5. Машины постоянного тока

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - соответствующий физико-математический аппарат; - методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач; <p>(ПК-1):</p>	отлично	<p>Оценка «5» («отлично») выставляется обучающимся, показавшим всестороннее знание теоретических основ дисциплины, в частности знание основных методов и приемов использования современных информационных технологий, программ и методик проведения исследований;</p>

<p>- нормативные документы по планированию, подготовке и выполнению типовых экспериментальных исследований; (ПК-2):</p> <p>- методику обработки результатов эксперимента; Уметь: (ОПК-2):</p> <p>- применять физико-математический аппарат;</p> <p>- применять методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования; (ПК-1):</p> <p>- пользоваться методикой по подготовке и выполнению экспериментальных исследований; (ПК-2):</p> <p>- пользоваться методикой по обработке данных экспериментов; Владеть: (ОПК-2):</p> <p>- навыками использования физико-математического аппарата;</p> <p>- методами анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач; (ПК-1):</p> <p>- элементами экспериментального анализа по заданной методике; (ПК-2):</p> <p>- необходимыми элементами по обработке результатов экспериментов.</p>		<p>умение самостоятельно выбирать методы и приемы использования различных информационных технологий, использовать полученные знания в научной деятельности, а также систематизировать информацию и представлять ее в виде научных публикаций и докладов;</p>
	хорошо	<p>Оценка «4» («хорошо») выставляется обучающимся, показавшим систематический характер знаний по теоретическим основам дисциплины, в частности: умение использовать элементы информационных технологий применительно к задачам электромашинного преобразования электрической энергии.</p>
	удовлетворительно	<p>Оценка «3» («удовлетворительно») выставляется обучающимся, умеющим применять современные методы информационных технологий в области электромашинного преобразования электрической энергии.</p>
	неудовлетворительно	<p>Оценка «2» («неудовлетворительно») выставляется обучающимся, допустившему значительные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий</p>
	зачтено	<p>Выполнены все требования к раскрытию зачетных вопросов, методически верно раскрыта проблематика изучаемого вопроса. Тема раскрыта полностью.</p>
не зачтено	<p>Вопрос по зачету не раскрыт, обнаруживается существенное непонимание теоретических основ изучаемой дисциплины.</p>	

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина «Электрические машины» направлена на ознакомление обучающихся с

основами теории и эксплуатационными характеристиками электрических машин и трансформаторов, а также формирования прочной теоретической и практической базой знаний в области электромеханического и статического преобразования энергии, принципа действия основных видов электрических машин, трансформаторов и особенностей их применения.

Дисциплина «Электрические машины» охватывает круг вопросов, относящихся к научно-исследовательскому, производственно-технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Изучение дисциплины «Электрические машины» предусматривает:

- лекции;
- лабораторные работы;
- практические занятия;
- контрольная работа;
- самостоятельные работы;
- экзамен;
- зачет.

С целью определения уровня овладения компетенциями, закрепленными за дисциплиной, в заданные преподавателем сроки проводится текущий контроль знаний, умений и навыков каждого обучающегося, выполнение курсовой работы и аттестация по итогам освоения дисциплины. Текущий контроль проводится на аудиторных занятиях с целью определения качества усвоения материала по окончании изучения очередной учебной темы в следующих формах: письменный опрос, контрольная работа, тестирование. Руководитель контрольной работы оценивает правильность решения, ответы на заданные вопросы.

Аттестация по итогам освоения дисциплины.

Для контроля усвоения данной дисциплины учебным планом предусмотрен экзамен и зачет. На экзамене обучающимся предлагается ответить на два вопроса билета, составленного из вопросов, примеры которых приведены в приложении 1 табл.2. На подготовку к ответу на билет студентам выделяется от 30 до 40 минут. На все вопросы студент готовит письменный конспективный ответ, который затем докладывает преподавателю.

На зачете обучающийся отвечает на два вопроса, состоящих из двух различных разделов. Оценивается полнота изложения, теоретическая грамотность, знание фундаментальных основ дисциплины.

В процессе проведения практических занятий происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков реализации представления о метрологии, стандартизации, сертификации продукции и услуг.

Самостоятельную работу необходимо начинать с проработки теоретического материала по пройденной теме.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

АННОТАЦИЯ
рабочей программы дисциплины
Электрические машины

1. Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является: ознакомление обучающихся с основами теории и эксплуатационными характеристиками электрических машин и трансформаторов, а также формирования прочной теоретической и практической базой знаний в области электромеханического и статического преобразования энергии, принципа действия основных видов электрических машин, трансформаторов и особенностей их применения.

Задачей изучения дисциплины является: получение фундаментальных теоретических и практических знаний в области работы электрических машин; ознакомление с основными процессами, протекающими в электрических машинах.

2. Структура дисциплины

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебной работы, включая самостоятельную работу: Лк – 35 час., ЛР - 52 час., ПЗ - 53 час., СР - 112 час.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 216 часов, 6 зачетных единиц.

2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Электрические машины.
2. Трансформаторы.
3. Асинхронные машины.
4. Синхронные машины.
5. Машины постоянного тока.

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-2 – способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач;

ПК-1 – способность участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике;

ПК-2 – способность обрабатывать результаты экспериментов.

4. Вид промежуточной аттестации: экзамен, зачет.

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20__-20__ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры № _____ от « ____ » _____ 20 ____ г.,
(разработчик)

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

(Ф.И.О.)

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	ФОС
ОПК-2	Способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1. Электрические машины	-
		2. Трансформаторы	Вопросы по ЛР. Отчеты по ЛР. Защита К.
ПК-1	способность участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике	3. Асинхронные машины	Вопросы по ЛР. Отчеты по ЛР.
		4. Синхронные машины	Вопросы по ЛР. Отчеты по ЛР. Вопросы для ПЗ Отчет по ПЗ.
ПК-2	способность обрабатывать результаты экспериментов	5. Машины постоянного тока	Вопросы по ЛР. Отчеты по ЛР. Вопросы для ПЗ. Отчет по ПЗ.

2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - соответствующий физико-математический аппарат; - методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач; <p>(ПК-1):</p> <ul style="list-style-type: none"> - нормативные документы по планированию, подготовке и выполнению типовых экспериментальных исследований; <p>(ПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - методику обработки результатов эксперимента; <p>Уметь: (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - применять физико-математический аппарат; 	зачтено	Обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически его излагает, умеет находить взаимосвязь теории с практикой, не затрудняется с ответом при видоизменении вопроса, владеет специальной терминологией, демонстрирует общую эрудицию в предметной области, использует при ответе ссылки на материал специализированных источников.
	не зачтено	Обучающийся имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, не знает значительной части программного материала, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении теоретического материала, не владеет специальной термино-

<p>- применять методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования; (ПК-1):</p> <p>- пользоваться методикой по подготовке и выполнению экспериментальных исследований; (ПК-2):</p> <p>- пользоваться методикой по обработке данных экспериментов; Владеть: (ОПК-2):</p> <p>- навыками использования физико-математического аппарата;</p> <p>- методами анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач; (ПК-1):</p> <p>- элементами экспериментального анализа по заданной методике; (ПК-2):</p> <p>- необходимыми элементами по обработке результатов экспериментов.</p>		<p>логией, допускает существенные ошибки при ответе.</p>
---	--	--

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 электроэнергетика и электротехника от «03» сентября 2015 г. № 955

для набора 2018 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018г. №130, заочной формы обучения от «12» марта 2018г. №130

Программу составили:

Плотников М.П., доцент кафедры ЭиЭ, к.т.н. _____

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ЭиЭ

от «__» __декабря__ 2018 г., протокол № _____

Заведующий кафедрой ЭиЭ _____ Ю.Н. Булатов

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой _____ Ю.Н.Булатов

Директор библиотеки _____ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией ФЭиА

от «__» __декабря__ 2018 г., протокол № _____

Председатель методической комиссии ФЭиА _____ А.Д. Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник
учебно-методического управления _____ Г.П. Нежевец

Регистрационный № _____