

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:

ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 17:32:16

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заведующего кафедрой
физики, электротехники и электроэнергетики
Масютина Г.В.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по
дисциплине «Электроэнергетика»

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Направление подготовки	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль)	Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения
Квалификация выпускника	Бакалавр
Форма обучения	заочная
Год начала обучения	2021 г
Реализуется в 4 семестре	

Предисловие

1. Назначение фонда оценочных средств – комплекта методических материалов, нормирующих процедуры оценивания результатов обучения, т.е. установления соответствия учебных достижений запланированным результатам обучения и требованиям образовательных программ, рабочих программ дисциплин.

2. Фонд оценочных средств текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации разработан на основе рабочей программы дисциплины « Нормирование и снижение потерь электроэнергии в системах электроснабжения» и в соответствии с образовательной программой высшего образования по направлению подготовки 08.03.01 Строительство, утвержденной на заседании Учебно-методического совета СКФУ, протокол № от «__» _____ г.

3. Разработчик(и) Колесников Г. Ю. канд. тех. наук, доцент кафедры физики, электротехники и электроэнергетики.

4. ФОС рассмотрен и утвержден на заседании кафедры физики, электротехники и электроэнергетики, протокол № _____ от «__» _____ г.

5. Проведена экспертиза ФОС. Члены экспертной группы, проводившие внутреннюю экспертизу:

Председатель _____ (Ф.И.О., должность)

_____ (Ф.И.О., должность)

_____ (Ф.И.О., должность на предприятии).

Экспертное заключение _____

«__» _____ (подпись председателя)

«__» _____ (подпись представителя работодателя)

6. Срок действия ФОС _____

Паспорт фонда оценочных средств
для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

По дисциплине «Электрический привод»
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Направленность (профиль) Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения
 Квалификация выпускника бакалавр
 Форма обучения очная
 Год начала обучения 2016 г.
 Изучается в 7 семестре

Код оцениваемой компетенции (или её части)	Модуль, раздел, тема (в соответствии с Программой)	Тип контроля	Вид контроля	Компонент фонда оценочных средств	Количество элементов, шт.	
					Базовый	Повышенный
ПК-6	1-18	промежуточный	Устный	Вопросы к собеседованию	36	6
ПК-6	1-18	текущий	отчет	Задание к расчетно-графической работе	2	1

Составитель _____ Г.Ю. Колесников
 (подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Уровни сформированности компетенций	Индикаторы	Дескрипторы			
		2 балла	3 балла	4 балла	5 баллов
ПК-6					
Базовый	<p>Знает:</p> <p>– электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах и трансформаторах при различных режимах их работы; методику экспериментальных исследований процессов, происходящих в эксплуатируемом электромеханическом оборудовании</p>	<p>Отсутствуют знания – электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах и трансформаторах при различных режимах их работы; методику экспериментальных исследований процессов, происходящих в эксплуатируемом электромеханическом оборудовании</p>	<p>Демонстрирует уровень знаний, – электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах и трансформаторах при различных режимах их работы; методику экспериментальных исследований процессов, происходящих в эксплуатируемом электромеханическом оборудовании</p>	<p>Обладает базовыми знаниями – электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах и трансформаторах при различных режимах их работы; методику экспериментальных исследований процессов, происходящих в эксплуатируемом электромеханическом оборудовании</p>	
	<p>Умеет:</p> <p>– самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования; – выполнять</p>	<p>Демонстрирует уровень, недостаточный для умения - – самостоятельно определять и анализировать параметры</p>	<p>Демонстрирует уровень, достаточный для умения – самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования</p>	<p>Демонстрирует хороший уровень, достаточный для умения - – самостоятельно определять</p>	

<p>экспериментальные исследования электрических машин по заданной методике, обрабатывать результаты экспериментов</p>	<p>работающего электромеханического оборудования; – выполнять экспериментальные исследования электрических машин по заданной методике, обрабатывать результаты экспериментов</p>	<p>ческого оборудования; – выполнять экспериментальные исследования электрических машин по заданной методике, обрабатывать результаты экспериментов</p>	<p>и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования; – выполнять экспериментальные исследования электрических машин по заданной методике, обрабатывать результаты экспериментов</p>	
<p>Владеет: навыками расчета режимов работы электрических машин и трансформаторов; – навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования. – навыками экспериментального исследования режимов работы электрических машин</p>	<p>Отсутствуют навыки владения - навыками расчета режимов работы электрических машин и трансформаторов; – навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования . – навыками экспериментального исследования режимов работы электрических машин</p>	<p>Демонстрирует недостаточный уровень владения - навыками расчета режимов работы электрических машин и трансформаторов; – навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования. – навыками экспериментального исследования режимов работы электрических машин</p>	<p>Демонстрирует базовый уровень владения навыками расчета режимов работы электрических машин и трансформаторов; – навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования. – навыками экспериментального исследования режимов работы электрических</p>	

				их машин	
Повышен ный	<p>Знает: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах и трансформаторах при различных режимах их работы; методику экспериментальных исследований процессов, происходящих в эксплуатируемом электромеханическом оборудовании.</p>				<p>Демонстрирует уверенные знания</p> <p>- электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах и трансформаторах при различных режимах их работы; методику экспериментальных исследований процессов, происходящих в эксплуатируемом электромеханическом оборудовании.</p>
	<p>Умеет: - самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования; – выполнять экспериментальные исследования электрических машин по заданной методике, обрабатывать результаты экспериментов</p>				<p>Демонстрирует повышенный уровень для умения</p> <p>- самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования; – выполнять экспериментальные исследования электрических машин по</p>

					заданной методике, обрабатывать результаты экспериментов
	<p>Владеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками расчета режимов работы электрических машин и трансформаторов; - навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования. – навыками экспериментального исследования режимов работы электрических машин 				Уверенно владеет <ul style="list-style-type: none"> - навыками расчета режимов работы электрических машин и трансформаторов; – навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования. – навыками экспериментального исследования режимов работы электрических машин

Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным **55**. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ в г. Пятигорске

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой _____

«__» _____ 201_ г.

Вопросы для собеседования
по дисциплине «Электрический привод»

Базовый
знать

1. Основные уравнения движения электропривода.
2. Графическое решение уравнения электропривода.
3. Методы регулирования частоты вращения якоря двигателя постоянного тока.
4. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого и параллельного возбуждения в двигательном режиме при разных методах регулирования частоты вращения якоря.
5. Тормозной режим противовключением двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.
6. Динамическое торможение двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.
7. Рекуперативное торможение двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.
8. Особенности тормозных режимов для двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.
9. Механические характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения в двигательном режиме при разных методах регулирования частоты вращения якоря.

Уметь , владеть

1. Методы пуска в ход двигателей постоянного тока.
2. Графический метод расчета пусковых сопротивлений двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.
3. Аналитический метод расчета пусковых сопротивлений двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.
4. Графический метод расчета тормозных сопротивлений двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения при торможении противовключением.
5. Аналитический метод расчета тормозных сопротивлений постоянного двигателей постоянного независимого и параллельного возбуждения при торможении противовключением.
6. Методы расчета тормозных сопротивлений двигателей постоянного тока при динамическом торможении.
7. Методы регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей.
8. Методы пуска в ход асинхронных электродвигателей.
9. Методы торможения асинхронных электродвигателей.

10. Графический метод расчета пусковых сопротивлений асинхронных двигателей с фазным ротором.
11. Аналитический метод расчета пусковых сопротивлений асинхронных двигателей с фазным ротором.
12. Расчет тормозных сопротивлений асинхронных двигателей с фазным ротором при динамическом торможении.
13. Расчет тормозных сопротивлений асинхронного двигателя с фазным ротором при торможении противовключением.
14. Нагревание и охлаждение электродвигателей. Классификация режимов работы электродвигателей.
15. Построение нагрузочной диаграммы и определение режима работы электродвигателя.
16. Расчет мощности электродвигателя для длительного режима работы.
17. Расчет мощности двигателя для режима кратковременной нагрузки.
18. Расчет мощности двигателя для режима повторно-кратковременной нагрузки.

Повышенный уровень

1. Схема пуска асинхронного двигателя в функции времени и торможением противовключением в функции скорости.
2. Схеме реверсивного управления пуском и остановкой асинхронного двигателя с применением торможения противовключением в функции скорости.
3. Схема нереверсивного управления пуском и остановкой асинхронного двигателя с применением динамического торможения.
4. Схема управления, обеспечивающая пуск, динамическое торможение и регулирование скорости двигателя постоянного тока ослаблением магнитного потока.
5. Схема пуска асинхронного двигателя в одну ступень в функции тока и динамического торможения в функции скорости.
6. Схема пуска асинхронного двигателя в две ступени и динамическое торможение в функции времени.
7. Схема пуска двигателя постоянного тока в функции тока и динамическим торможением.
8. Схема пуска двигателя постоянного тока в функции времени, реверсом и торможением противовключением в функции скорости.
9. Схема пуска двигателя постоянного тока в две ступени в функции скорости и динамического торможения в функции времени.
10. Схема пуска двигателя постоянного тока в одну ступень в функции времени и динамического торможения в функции скорости.
11. Схема пуска двигателя постоянного тока в функции времени и торможения противовключением в функции скорости.
12. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором в функции тока.
13. Схема нереверсивного управления пуском трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.

Критерии оценивания компетенций

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он знает характеристики электрических нагрузок, устройство и конструктивное исполнение цеховых электрических сетей, комплектные распределительные устройства напряжением до 1000 В, способы уменьшения потребления реактивной мощности приемниками электроэнергии, схемы и основное электрооборудование главных понизительных подстанций, понятия о качестве электроэнергии и надежности электроснабжения, несинусоидальные режимы в системах промышленных электроснабжения. Умеет выбирать электрооборудование на основе полученных результатов расчетов, определять активное и реактивное сопротивление шинпровода и потери мощности и напряжения в шинпроводах,

При проведении экзамена студент показал наличие достаточных знаний по изучаемой проблематике; умение ориентироваться в информационном пространстве; использование и усвоение основной и знакомство с дополнительной литературой; грамотное изложение материала при ответе; попытки аргументировать собственную точку.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он знает характеристики электрических нагрузок, устройство и конструктивное исполнение цеховых электрических сетей, комплектные распределительные устройства напряжением до 1000 В, способы уменьшения потребления реактивной мощности приемниками электроэнергии, схемы и основное электрооборудование главных понизительных подстанций, понятия о качестве электроэнергии и надежности электроснабжения, несинусоидальные режимы в системах промышленных электроснабжения. Умеет выбирать электрооборудование на основе полученных результатов расчетов, определять активное и реактивное сопротивление шинпровода и потери мощности и напряжения в шинпроводах,

При проведении экзамена студент показал наличие достаточных знаний по изучаемой проблематике; умение ориентироваться в информационном пространстве; использование и усвоение основной литературой; грамотное изложение материала при ответе.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он демонстрирует низкий уровень знаний характеристик электрических нагрузок, устройств и конструктивных исполнений цеховых электрических сетей, комплектных распределительных устройств напряжением до 1000 В, способов уменьшения потребления реактивной мощности приемниками электроэнергии, схемы и основное электрооборудование главных понизительных подстанций, понятий о качестве электроэнергии и надежности электроснабжения, несинусоидальных режимов в системах промышленных электроснабжения. Умеет с трудом проводить выбирать электрооборудование на основе полученных результатов расчетов, определять активное и реактивное сопротивление шинпровода и потери мощности и напряжения в шинпроводах,

При проведении экзамена студент показал наличие поверхностных знаний по изучаемой проблематике; умение ориентироваться в информационном пространстве; использование и усвоение основной литературой; грамотное изложение материала при ответе с отдельными недочетами и ошибками; отсутствие умения в полной мере аргументировать собственную точку.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он не знает характеристики электрических нагрузок, устройство и конструктивное исполнение цеховых электрических сетей, комплектные распределительные устройства напряжением до 1000 В, способы уменьшения потребления реактивной мощности приемниками электроэнергии, схемы и основное электрооборудование главных понизительных подстанций, понятия о качестве электроэнергии и надежности электроснабжения, несинусоидальные режимы в системах промышленных электроснабжения. Не умеет выбирать электрооборудование на основе полученных результатов расчетов, определять активное и реактивное сопротивление шинпровода и потери мощности и напряжения в шинпроводах,

Описание шкалы оценивания

Промежуточная аттестация в форме экзамена предусматривает проведение обязательной экзаменационной процедуры и оценивается 40 баллами из 100. Минимальное количество баллов, необходимое для допуска к экзамену, составляет 33 балла. Положительный ответ студента на экзамене оценивается рейтинговыми баллами в диапазоне от **20** до **40** ($20 \leq S_{\text{ЭКЗ}} \leq 40$), оценка **меньше 20** баллов считается неудовлетворительной.

Шкала соответствия рейтингового балла экзамена 5-балльной системе

Рейтинговый балл по дисциплине	Оценка по 5-балльной системе
35 – 40	Отлично
28 – 34	Хорошо
20 – 27	Удовлетворительно

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения экзамена осуществляется в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования в СКФУ.

В экзаменационный билет включаются два вопроса: по одному вопросу из категорий «знать и уметь, владеть».

Для подготовки по билету отводится 30 минут.

Составитель _____ Г.Ю. Колесников
(подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) в г.Пятигорске**

**Методические указания по выполнению
Контрольной работы по дисциплине
«Электроснабжение»
для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника**

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	15
1. ЗАДАНИЕ	15
2. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ	16
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ И КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ	19
3.1. ПОСТРОЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ ДИАГРАММЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ	19
3.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ПРОВЕРКА ЕГО ПО ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПУСКА	20
3.2.1. ДЛИТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ (S6)	20
3.2.2. КРАТКОВРЕМЕННАЯ НАГРУЗКА (S2)	22
3.2.3. ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННАЯ НАГРУЗКА (S3)	23
3.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО (ПАРАЛЛЕЛЬНОГО) ВОЗБУЖДЕНИЯ В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ	24
3.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ	40
3.5. РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ И ТОРМОЗНЫХ РЕЗИСТОРОВ	Ошибка! Закладка не определена.
3.5.1. РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ В ЦЕПИ ЯКОРЯ ДПТ ГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	Ошибка! Закладка не определена.
3.5.2. РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ	Ошибка! Закладка не определена.
3.5.3. РАСЧЕТ ТОРМОЗНЫХ РЕЗИСТОРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ТОРМОЖЕНИИ И ТОРМОЖЕНИИ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ	Ошибка! Закладка не определена.
3.5.4. РАСЧЕТ ТОРМОЗНЫХ РЕЗИСТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ТОРМОЖЕНИИ И ТОРМОЖЕНИИ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ	Ошибка! Закладка не определена.
4. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ	Ошибка! Закладка не определена.
4.1. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ	Ошибка! Закладка не определена.
4.1.1. СХЕМА ПУСКА АД В ОДНУ СТУПЕНЬ В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ И ТОРМОЖЕНИЕМ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ В ФУНКЦИИ СКОРОСТИ	Ошибка! Закладка не определена.
4.1.2. СХЕМА РЕВЕРСИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ И ОСТАНОВКОЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОРМОЖЕНИЯ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ В ФУНКЦИИ СКОРОСТИ	Ошибка! Закладка не определена.
4.1.3. СХЕМА НЕРЕВЕРСИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ И ОСТАНОВКОЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ	Ошибка! Закладка не определена.
4.1.4. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ ПУСК, ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОТОКА.	Ошибка! Закладка не определена.

- 4.1.5. СХЕМА ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ОДНУ СТУПЕНЬ В ФУНКЦИИ ТОКА И ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ В ФУНКЦИИ СКОРОСТИ **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.6. СХЕМА ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ДВЕ СТУПЕНИ И ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.7. СХЕМА ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ФУНКЦИИ ТОКА И ДИНАМИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.8. СХЕМА ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ, РЕВЕРСОМ И ТОРМОЖЕНИЕМ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ В ФУНКЦИИ Э.Д.С. (СКОРОСТИ) **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.9. СХЕМА ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ДВЕ СТУПЕНИ В ФУНКЦИИ СКОРОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.10. СХЕМА ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ОДНУ СТУПЕНЬ В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ И ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ В ФУНКЦИИ СКОРОСТИ **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.11. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ ДПТ В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ, РЕВЕРСОМ И ТОРМОЖЕНИЕМ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ В ФУНКЦИИ Э.Д.С. (СКОРОСТИ) **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.12. СХЕМА ПУСКА ДПТ В ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ И ТОРМОЖЕНИЯ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ В ФУНКЦИИ Э.Д.С. (СКОРОСТИ) **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.13. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ В ФУНКЦИИ ТОКА **Ошибка! Закладка не определена.**
- ПРИЛОЖЕНИЯ **Ошибка! Закладка не определена.**
- Литература **Ошибка! Закладка не определена.**

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение контрольной работы студентами направлению «Электроснабжение» дневной и заочной формы обучения является заключительным этапом изучения курса и служит закреплению полученных знаний и применению их к решению часто встречающихся практических задач по расчету параметров электроприводов. В контрольной работе на основании изучения нагрузочной диаграммы производственного механизма, принципов пуска и торможения двигателя решаются вопросы выбора мощности электродвигателя, расчета пусковых и тормозных сопротивлений, выбора аппаратов защиты и управления, выбора схемы управления.

1. ЗАДАНИЕ

Задание на контрольную работу содержит данные для построения нагрузочной диаграммы механизма, принципы пуска и способ торможения электродвигателя, тип двигателя (двигатель постоянного тока параллельного или последовательного возбуждения, асинхронный двигатель с фазным ротором). Работа состоит из расчетно-пояснительной записки и графической части. Записка в общем случае содержит следующие разделы:

1. Введение.
2. Построение нагрузочной диаграммы и определение режима работы электродвигателя.
 1. Предварительный выбор электродвигателя и проверка его по перегрузочной способности и по возможности пуска.
 2. Расчет пусковых и тормозных сопротивлений графоаналитическим методом.
 3. Составление релейно-контакторной схемы автоматизации пуска, реверса и торможения электродвигателя.
 4. Описание работы релейно-контакторной схемы управления и защиты.
 5. Спецификация на оборудование.
- Заключение.
- Список литературы.
- Приложение.

Расчетно-пояснительная записка оформляется на стандартных листах писчей бумаги с внутренней рамкой (см. рис. 2.1, прилож. 2). Листы записки нумеруются и сшиваются. Обложка пояснительной записки делается из плотной бумаги и оформляется как титульный лист по установленному в университете образцу. После титульного листа помещается бланк задания подписанный студентом, руководителем проекта и утвержденный заведующим кафедрой. На первом листе приводится содержание записки по разделам и основным параграфам разделов. На первых листах всех разделов, кроме «Введение» и «Заключение» должна быть основная надпись (штамп) (см. рис. 2.2, прилож. 2). Все последующие листы раздела выполняются со штампом рис. 2.3, прилож. 2.

На последнем листе - список литературы. Расчетно-пояснительная записка пишется вручную аккуратным почерком с соблюдением правил орфографии и синтаксиса.

В излагаемый материал обязательно включаются используемые методики расчета, основные допущения и обозначения. При использовании графиков, численных коэффициентов, формул и методик необходимо делать ссылки на соответствующие литературные источники. Не допускается сокращение слов, кроме общепринятых.

В тексте записки вначале записывается расчетная формула в общем виде, а затем с проставленными числовыми значениями. В конце каждой расчетной формулы обязательно указывается размерность полученных величин в системе СИ и при необходимости номер формулы. Результаты повторяющихся расчетов следует сводить в таблицы. Таблицы должны иметь наименование и нумерацию. Под буквенными обозначениями величин необходимо указывать размерность. При выборе электродвигателя и электрических аппаратов обязательно делать ссылки на соответствующие литературные источники.

Графическая часть должна содержать электрическую схему силовой части и схему управления. Графики для расчетов пусковых и тормозных сопротивлений выполняются на миллиметровой бумаге формата А4, которые подшиваются в расчетно-пояснительную записку по ходу расчета.

Листы должны иметь штамп (см. рис. 2.4 приложения 2).

Для защиты контрольной работы студенту рекомендуется подготовить доклад, в котором должно быть кратко и ясно изложено основное содержание работы, объяснены принятые технические решения, показана их целесообразность. Во время защиты студенту могут быть заданы по работе любые вопросы теоретического и практического характера.

2. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Для выполнения контрольной работы студентам предлагаются следующие темы:

1. Автоматизация пуска, реверса и торможения асинхронного двигателя с фазным ротором.

2. Автоматизация пуска, реверса и торможения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

В табл. 1 приведены исходные данные для построения нагрузочной диаграммы механизма. В данной таблице обозначены: P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 (M_1, M_2, M_3, M_4, M_5) - мощности (моменты) на отдельных временных отрезках t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 , которые создает механизм; t_0 - время паузы в работе механизма, после чего начинается новый цикл; ω_0 - угловая скорость, с которой вращается механизм.

В табл. 2 задается принцип управления пуском, способ торможения, тип двигателя. Здесь приняты следующие обозначения:

- принцип управления пуском (B - в функции времени, C - в функции скорости, T - в функции тока);
- способ торможения (D - динамическое, $П$ - противовключением).

Вариант задания состоит из четырех цифр: две первые берутся из табл. 1, а две последние - из табл. 2.

Таблица 1

№	P_1	M_1	P_2	M_2	P_3	M_3	P_4	M_4	P_5	M_5	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_0	ω_0
	кВт	Н·м	с	с	с	с	с	с	рад/с								
01	90	—	60	—	30	—	100	—	20	—	60	70	30	10	40	90	62.8
02	20	—	15	—	10	—	30	—	25	—	30	90	70	20	65	2500	104.
03	60	—	30	—	40	—	25	—	10	—	10	100	20	120	70	200	104.
04	10	—	60	—	55	—	90	—	10	—	60	70	20	90	60	5000	78.5
05	50	—	30	—	60	—	10	—	15	—	10	15	30	20	10	150	78.5
06	60	—	20	—	60	—	20	—	60	—	90	75	20	10	80	25	78.5
07	70	—	20	—	50	—	30	—	25	—	40	20	10	10	15	80	78.5
08	30	—	90	—	20	—	40	—	60	—	60	90	70	30	20	380	62.8
09	70	—	80	—	20	—	100	—	10	—	20	10	15	5	40	20	78.5
10	60	—	10	—	40	—	30	—	90	—	60	70	30	10	90	150	62.8
11	70	—	90	—	20	—	10	—	50	—	30	20	40	50	10	180	78.5
12	60	—	80	—	50	—	40	—	30	—	25	35	45	60	10	130	78.5
13	50	—	70	—	20	—	50	—	90	—	60	50	80	100	50	130	62.8
14	80	—	90	—	50	—	90	—	40	—	90	80	50	60	70	1300	62.8
15	70	—	20	—	30	—	50	—	20	—	10	15	20	15	30	410	104.
16	30	—	5	—	10	—	15	—	10	—	30	60	70	40	20	70	104.
17	10	—	20	—	10	—	20	—	10	—	60	30	40	50	60	430	104.
18	20	—	30	—	5	—	10	—	5	—	20	70	60	30	20	600	104.

Продолжение табл. 1

№	P_1	M_1	P_2	M_2	P_3	M_3	P_4	M_4	P_5	M_5	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_0	ω_0
	кВт	Н·м	с	с	с	с	с	с	рад/с								
19	—	300	—	400	—	800	—	500	—	600	20	10	30	40	50	50	78.5
20	—	500	—	600	—	900	—	300	—	900	60	80	90	60	100	90	62.8
21	—	900	—	800	—	100	—	500	—	600	90	80	20	10	60	120	62.8
22	—	600	—	120	—	800	—	900	—	100	100	150	60	80	120	510	62.8
23	—	150	—	100	—	120	—	900	—	600	60	80	70	30	90	370	62.8
24	—	900	—	300	—	700	—	800	—	900	80	70	60	20	80	500	78.5
25	—	800	—	700	—	600	—	1000	—	600	95	15	30	40	100	130	62.8
26	—	600	—	500	—	400	—	900	—	800	60	50	70	20	50	570	78.5
27	—	700	—	800	—	500	—	600	—	100	50	50	20	30	10	140	78.5
28	—	800	—	120	—	150	—	300	—	900	20	10	10	25	40	90	62.8
29	—	900	—	150	—	120	—	2000	—	250	60	80	90	20	70	160	62.8
30	—	300	—	800	—	700	—	200	—	800	25	35	40	55	10	60	78.5
31	—	120	—	100	—	900	—	600	—	150	30	60	50	20	80	50	62.8
32	—	900	—	800	—	600	—	1500	—	800	20	10	60	100	120	500	78.5

33	—	600	—	800	—	120	—	900	—	150	80	90	20	60	90	40	78.5
34	—	100	—	200	—	100	—	300	—	150	30	40	70	20	40	20	104.
35	—	300	—	100	—	200	—	50	—	150	60	70	20	40	40	300	104.
36	—	400	—	100	—	150	—	50	—	100	70	20	10	30	60	100	104.

Таблица 2

№	Принцип управления пуском	Число пусковых ступеней	Способ торможения	Электродвигатель переменного тока	Электродвигатель постоянного тока
		Шт			
01	В	2	Л	Х	
02	В	3	Л	Х	
03	В	4	Л	Х	
04	В	2	П	Х	
05	В	3	П	Х	
06	В	4	П	Х	
07	С	2	Л	Х	
08	С	3	Л	Х	
09	С	4	Л	Х	
10	С	2	П	Х	
11	С	3	П	Х	
12	С	4	П	Х	
13	Т	2	Л	Х	
14	Т	3	Л	Х	
15	Т	4	Л	Х	
16	Т	2	П	Х	
17	Т	3	П	Х	
18	Т	4	П	Х	
19	В	2	Л		Х
20	В	3	Л		Х
21	В	4	Л		Х
22	В	2	П		Х
23	В	3	П		Х
24	В	4	П		Х
25.	С	2	Л		Х
26	С	3	Л		Х
27	С	4	Л		Х
28	С	2	П		Х
29	С	3	П		Х
30	С	4	П		Х
31	Т	2	Л		Х
32	Т	3	Л		Х
33	Т	4	Л		Х
34	Т	2	П		Х
35	Т	3	П		Х
36	Т	4	П		Х

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ И КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

3.1. ПОСТРОЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ ДИАГРАММЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ

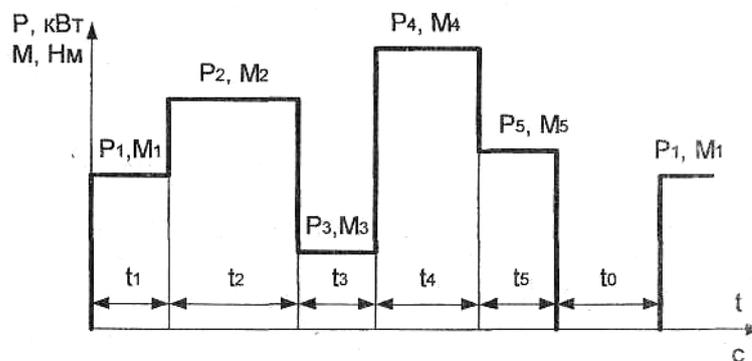


Рис.4. 1. Нагрузочная диаграмма механизма

В данном разделе вначале строится нагрузочная диаграмма механизма в произвольно выбранном масштабе по численным значениям своего варианта (рис.4.1) Режим работы электродвигателя определяется в зависимости от фактического значения продолжительности включения в процентном отношении

$$ПВ_{\phi\%} = \frac{\sum t_p}{\sum t_p + t_0} \cdot 100\% ,$$

где $\sum t_p = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$ - время работы электродвигателя;
 t_0 - время паузы.

Если численное значение $ПВ_{\phi\%}$ мало (0-8 %), то электродвигатель работает в режиме кратковременной нагрузки (S2). При больших значениях $ПВ_{\phi\%}$ (80-100 %) режим работы двигателя продолжительный при переменной нагрузке (S6). Когда $ПВ_{\phi\%}$ находится в пределах 8-80 %, имеет место повторно-кратковременный режим (S3).

3.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ПРОВЕРКА ЕГО ПО ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПУСКА

3.2.1. ДЛИТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ (S6)

Выбор двигателя по наибольшей мощности нагрузки вызовет его недоиспользование при остальных нагрузках, что приведет к снижению энергетических и экономических показателей (КПД, коэффициента мощ-

ности, удельного расхода электроэнергии). Выбор по минимальной нагрузке вызовет его перегрузку и быстрое изнашивание. Выбор мощности

двигателя по средней нагрузке $P_{cp} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_k \cdot t_k}{t_1 + t_2 + \dots + t_k}$ также неверен, т.к.

средняя ордината на нагрузочной диаграмме не учитывает квадратичную зависимость потерь мощности в двигателе от тока. Лишь при небольших колебаниях нагрузки (до 50 %) электродвигатель можно выбирать по средней мощности.

Метод средних потерь дает отличные результаты, однако не всегда возможно определить потери мощности для различных нагрузок P_1, P_2, \dots, P_k .

Метод эквивалентных величин (I, P, M) обычно применяют для проверки правильности выбора мощности электродвигателя. Однако этот метод может быть использован и для предварительного выбора. *Метод эквивалентного тока* основан на замене действительно изменяющегося тока в двигателе таким эквивалентным током, который вызывал бы такие же потери, что и действительный ток.

Общее выражение для эквивалентного тока имеет вид:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}},$$

где I_1, I_2, \dots, I_n - токи, соответственно, на 1, 2, ..., n участках;

t_1, t_2, \dots, t_n - продолжительность 1, 2, ..., n участков.

Если в рассматриваемый цикл работы входят пуск и торможение двигателя, то, учитывая ухудшение условий охлаждения для этих режимов, формула эквивалентного тока имеет вид:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{\beta_{II} t_1 + t_2 + \dots + \beta_T t_n + \beta_0 t_0}},$$

где t_1, t_n, \dots, t_0 - время, соответственно, пуска торможения, паузы (t_0 для этого режима мало и его можно не учитывать);

β_0 - коэффициент, учитывающий уменьшение теплоотдачи двигателя в неподвижном состоянии, который равен:

$\beta_0 = (0,9-1,0)$ - для электродвигателей закрытых, без наружного охлаждения или с принудительной вентиляцией;

$\beta_0 = (0,45-0,55)$ - для электродвигателей закрытых с наружным охлаждением от собственного вентилятора на валу;

$\beta_0 = (0,25-0,35)$ - для электродвигателей защищенных, с самовентиляцией;

$\beta_{II} = \beta_T = \frac{1 + \beta_0}{2}$ - коэффициенты, учитывающие ухудшение охлаждения

двигателя при пуске и торможении.

Двигатель выбирают из условия $I_{\text{нов}} \geq I_{\text{э}}$, а затем проверяют его по перегрузочной способности:

$$I_{\text{нов}} \geq \frac{I_{\text{наиб}}}{\lambda_1},$$

где $I_{\text{наиб}}$ - наибольший ток по нагрузочной диаграмме;
 λ_1 - перегрузочная способность двигателя по току.

Метод эквивалентного момента можно получить простым преобразованием метода эквивалентного тока. Если $M = k \cdot \Phi \cdot I$, то при постоянном магнитном потоке момент пропорционален току. Однако это справедливо для ДПТ параллельного возбуждения при отсутствии регулирования магнитного потока, и приблизительно справедливо для АД, за исключением пусковых и тормозных режимов короткозамкнутых двигателей. Следовательно, эквивалентный момент равен

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Правильно выбранный двигатель должен удовлетворять условию $M_{\text{нов}} \geq M_{\text{э}}$.

Метод эквивалентной мощности можно легко получить из метода эквивалентного момента. Если двигатель имеет жесткую характеристику ($n \approx \text{const}$), то мощность пропорциональна моменту $P = \omega \cdot M$. Следовательно эквивалентная мощность равна

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Правильность выбора проверяется из условия $P_{\text{нов}} \geq P_{\text{э}}$. Этот метод еще более ограничен, так как необходимо постоянство скорости.

3.2.2. КРАТКОВРЕМЕННАЯ НАГРУЗКА (S2)

Промышленность выпускает для данного режима специальные электродвигатели, имеющие большую перегрузочную способность и рассчитанные на работу со стандартным временем $t_{p,cm} = 15, 30, 60, 90$ минут. Если нагрузка в течении работы изменяется и время t_p отличается от $t_{p,cm}$, то рассчитываются эквивалентные величины, которые приводятся к стандартному значению продолжительности кратковременной работы $t_{p,cm}$, ближайшему к реальному значению t_p . При выборе электродвигателя должно соблюдаться одно из условий

$$M_{эt_{p,cm}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_{p1} + M_2^2 \cdot t_{p2} + \dots + M_n^2 \cdot t_{pn}}{t_{p,cm}}} \leq M_{н\delta\epsilon t_{p,cm}},$$

$$P_{эt_{p,cm}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_{p1} + P_2^2 \cdot t_{p2} + \dots + P_n^2 \cdot t_{pn}}{t_{p,cm}}} \leq P_{н\delta\epsilon t_{p,cm}},$$

где $M_{эt_{p,cm}}$, $P_{эt_{p,cm}}$ - эквивалентные значения момента и мощности за время работы t_p , приведенные к ближайшему стандартному значению $t_{p,cm}$; $M_{н\delta\epsilon t_{p,cm}}$, $P_{н\delta\epsilon t_{p,cm}}$ - номинальные значения момента и мощности двигателя, соответствующие продолжительности кратковременной работы $t_{p,cm}$.

Выбранный двигатель необходимо проверить по условиям пуска $M_{пуск} > M_1$, и перегрузочной способности $M_{кр} > M_{max}$.

Для режима кратковременной нагрузки может быть выбран двигатель, предназначенный для длительного режима. В этом случае номинальная мощность электродвигателя выбирается из условия

$$P_{н\delta\epsilon} \geq \frac{P_k}{k} = \frac{P_k}{\sqrt{k_T}},$$

где P_k - мощность кратковременного режима;

k - коэффициент временно допустимой механической перегрузки;

k_T - коэффициент временно допустимой тепловой перегрузки.

Коэффициент k_T , в свою очередь, находят по формуле:

$$k_T = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T}}},$$

где t_k - длительность кратковременной работы;

T - постоянная времени нагрева.

Затем выбранный двигатель проверяют по пусковым условиям.

3.2.3. ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННАЯ НАГРУЗКА (S3)

Для данной нагрузки целесообразно выбирать электродвигатели специально предназначенные для этого режима и рассчитанные на стандартные ПВ 15, 25, 40 и 60 %. Продолжительность цикла не должна превышать 10 мин, в противном случае электродвигатель выбирают как для продолжительного режима.

При выборе двигателя по нагрузочной диаграмме определяют эквивалентную величину тока, момента, мощности за один цикл без учета паузы (см. ранее). Затем по нагрузочной диаграмме определяют фактическую

продолжительность включения $ПФ_{\phi\%} = \left(\frac{t_p}{t_p + t_0} \right) \cdot 100\%$ с учетом времени паузы

t_0 . Если $ПФ_{\phi\%}$ равна одной из стандартных $ПФ_{ст\%}$, то мощность электродвигателя выбирают по каталогу так, чтобы соблюдалось условие $P_{ндв} \geq P_{\mathcal{E}}$.

Если $ПФ_{\phi\%}$ отличается от $ПФ_{ст\%}$, то мощность электродвигателя необходимо выбирать по ближайшему стандартному значению, пересчитывая ее по формуле

$$P_{ст} = P_{\mathcal{E}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\phi\%}}{ПВ_{ст\%}}}$$

Выбирается двигатель из условия $P_{ндв} \geq P_{ст}$. Затем его проверяют по перегрузочной способности и условиям пуска так же, как при режиме Sб. Если механизм приводится двигателем, рассчитанным для длительного режима, при определении $I_{\mathcal{E}}$, $M_{\mathcal{E}}$, $P_{\mathcal{E}}$ необходимо учитывать время паузы t_0 , а также коэффициенты $\beta_{п}$, $\beta_{т}$, β_0 , учитывающие ухудшение охлаждения при разгоне, торможении и паузе.

3.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО (ПАРАЛЛЕЛЬНОГО)

ВОЗБУЖДЕНИЯ В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ

Обычная схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения представлена на рис. 4.2. Якорь двигателя M и его обмотка возбуждения $ОВ$ обычно получают питание от разных, независимых друг от друга источников (преобразователей) напряжения U

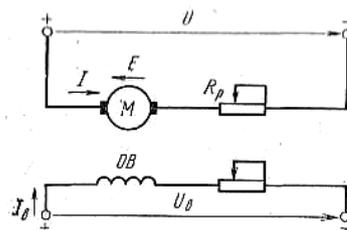


Рис. 4 .2. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

и U_B , что позволяет отдельно регулировать напряжение на якоре двигателя и на обмотке возбуждения и выполнять их на разное номинальное напряжение. Лишь при наличии сети постоянного тока или при нерегулируемом преобразователе в якорной цепи обмотка возбуждения питается от того же

источника напряжения, что и якорь двигателя. Но и в этом случае ток возбуждения I_B не зависит от тока I якоря двигателя.

Направления тока I и ЭДС вращения двигателя E , показанные на рис. 4.2, соответствуют двигательному режиму работы, когда электрическая энергия потребляется двигателем из сети (от источника напряжения U) и преобразуется в механическую энергию, мощность которой равна $P = M\omega$. Зависимость же между M и ω двигателя определяется его механической характеристикой.

Аналитическое выражение механической характеристики двигателя может быть получено из уравнения равновесия напряжений, составленного для якорной цепи схемы (рис. 4.2). При установившемся режиме работы двигателя приложенное напряжение U , B , уравновешивается падением напряжения в якорной цепи IR и наведенной в якоре ЭДС вращения E , B , т. е.

$$U = IR + E; \quad (4.2)$$

здесь I - ток в якорной цепи двигателя, А; R - суммарное сопротивление якорной цепи, Ом, включающее внешнее сопротивление резистора R_p и внутреннее сопротивление якоря двигателя $R_{я}$ (при наличии дополнительных полюсов учитывается и их сопротивление);

$$E = k\Phi\omega, \quad (4.3)$$

где k - коэффициент, зависящий от конструктивных данных двигателя, $k = pN/2\pi a$ (p - число пар полюсов двигателя; N - число активных проводников обмотки якоря; a - число пар параллельных ветвей обмотки якоря); Φ и ω - соответственно магнитный поток, Вб, и угловая скорость двигателя, рад/с.

Если в (4.2) вместо E подставим ее значение E из (4.3), то получим уравнение для скорости двигателя

$$\omega = (U - IR)/k\Phi. \quad (4.4)$$

Уравнение (4.4) представляет собой зависимость скорости двигателя от тока якоря. Такую зависимость $\omega = f(I)$ называют электромеханической характеристикой двигателя.

Для получения уравнения механической характеристики необходимо найти зависимость скорости от момента двигателя. Это легко сделать, если учесть, что момент, Н·м, развиваемый двигателем, связан с током якоря и магнитным потоком простой зависимостью, а именно:

$$M = k\Phi I. \quad (4.5)$$

Подставив в (4.4) значение тока I , найденное из (4.5), получим выражение для механической характеристики:

$$\omega = U / k\Phi - MR / k^2\Phi^2, \quad (4.6)$$

или

$$\omega = U / c - MR / c^2, \quad (4.7)$$

где

$$c = k\Phi. \quad (4.8)$$

Коэффициент c принимается постоянным, не зависящим от нагрузки, если у двигателя с независимым возбуждением имеется компенсационная обмотка. Он может считаться неизменным, если для обычных двигателей пренебречь реакцией якоря.

Механическая характеристика двигателя при неизменных параметрах U , Φ и R представляется прямой линией. Ниже показано, что, изменяя тот или иной параметр механической характеристики, можно при определенном моменте сопротивления на валу двигателя получать различные скорости двигателя, т.е. регулировать скорость электропривода.

Здесь же рассмотрим влияние лишь одного параметра, а именно сопротивления якорной цепи, поскольку это необходимо для выяснения основных определений, связанных с понятием о механической характеристике для различных режимов работы двигателя.

На рис. 4.3 представлены механические характеристики двигателя независимого возбуждения для различных сопротивлений якорной цепи. Как видно из рис. 4.3, при $M = 0$ все характеристики проходят через одну точку, лежащую на оси ординат. Угловая скорость в этой точке имеет вполне определенное значение, не зависящее от сопротивления якорной цепи. Эта скорость носит название скорости холостого хода и определяется выражением

$$\omega_0 = U / k\Phi. \quad (4.9)$$

При скорости идеального холостого хода, когда ток в якорной цепи равен нулю, ЭДС якоря, направленная навстречу приложенному напряжению, равна ему по абсолютному значению. Если двигатель до приложения нагрузки работал с угловой скоростью ω_0 , то при появлении на его валу момента сопротивления угловая скорость будет снижаться. Следствием этого будет уменьшение ЭДС вращения E согласно (4.3) и увеличение тока якоря и момента двигателя по (4.5).

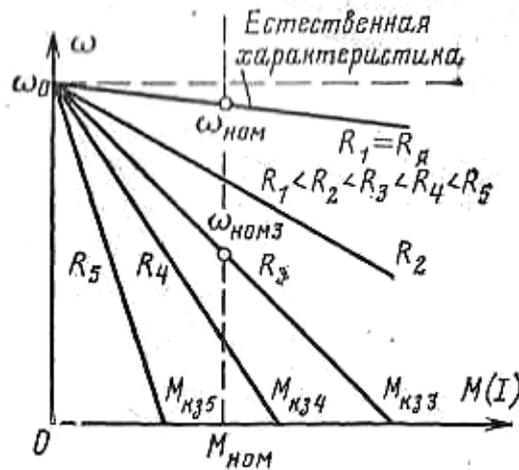


Рис. 4.3. Естественная характеристика и семейство реостатных механических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Угловая скорость будет снижаться до тех пор, пока момент двигателя не сравняется с моментом сопротивления. Разность значений установившихся скоростей электропривода до и после приложения заданной статической нагрузки называется статическим падением (перепадом) скорости электропривода.

Второй член (4.7) характеризует собой статическое падение угловой скорости (перепад) относительно угловой скорости идеального холостого хода:

$$\Delta_{\omega} = MR / k^2 \Phi^2. \quad (4.10)$$

Таким образом, уравнение для скорости двигателя может быть записано так:

$$\omega = \omega_0 - \Delta_{\omega}. \quad (4.11)$$

Верхняя характеристика из семейства, приведенного на рис. 4.3, носит название естественной.

Естественной характеристикой называется такая характеристика двигателя, которая получается при отсутствии внешних резисторов в якорной цепи и номинальных значениях напряжения и магнитного потока двигателя.

Жесткость естественной характеристики зависит от внутреннего сопротивления якорной цепи двигателя $R_{я}$. Внутреннее сопротивление якорной цепи включает собственное сопротивление якорной обмотки, сопротивление обмотки дополнительных полюсов, компенсационной обмотки и щеток. Соответственно перепад скорости для естественной характеристики

$$\Delta_{\omega} = MR_{я} / k^2 \Phi_{ном}^2.$$

По (4.10) определяется статическое падение скорости для любой из характеристик двигателя независимого возбуждения, представленных на рис. 4.3. Например, при дополнительно включенном реостате, имеющем сопротивление R_p , статическое падение скорости определится из соотношения

$$\Delta\omega = M(R_{\text{я}} + R_p) / k^2\Phi^2. \quad (4.12)$$

Разделив (4.11) на ω_0 , получим статическое падение скорости в относительных единицах:

$$\Delta\omega_* = \Delta\omega / \omega_0 = (\omega_0 - \omega) / \omega_0.$$

Статическое падение скорости в относительных единицах $\Delta\omega_*$ аналогично скольжению асинхронного двигателя, хотя скольжение для двигателей постоянного тока не имеет того физического смысла, как у асинхронных двигателей.

Если в якорную цепь двигателя включен дополнительный резистор (реостат), то механические характеристики, получаемые при этом, называются искусственными или реостатными. Эти характеристики пересекаются все в одной точке ω_0 . Реостатные характеристики так же линейны, как и естественная характеристика, но имеют значительно больший наклон к оси моментов, т.е. обладают меньшей жесткостью. Чем больше введенное в цепь якоря сопротивление резистора, тем круче идет характеристика, тем меньше ее жесткость.

Построение механических характеристик двигателя независимого возбуждения

Для построения механической характеристики двигателя независимого возбуждения, естественной или реостатной, достаточно знать лишь две ее точки, поскольку все механические характеристики теоретически представляют собой прямые линии (рис. 4.3). Эти две точки для каждой характеристики могут быть любыми, однако построение естественной механической характеристики удобно производить по точкам, одна из которых соответствует номинальному электромагнитному моменту двигателя и номинальной скорости ($M = M_{\text{ном}}$ и $\omega = \omega_{\text{ном}}$), а другая - скорости идеального холостого хода ($M = 0$ и $\omega = 0$). Номинальная скорость двигателя определяется по паспортным данным. Номинальный электромагнитный момент вычисляется по формуле

$$M_{\text{ном}} = c_{\text{ном}} I_{\text{ном}}.$$

Скорость идеального холостого хода для естественной характеристики может быть получена из (4.9), если числитель и знаменатель ее умножить на $\omega_{ном}$ и учесть, что

$$E_{ном} = k\Phi_{ном}\omega_{ном} = U_{ном} - I_{ном}R_{я},$$

тогда

$$\omega_0 = U_{ном}\omega_{ном}/(U_{ном} - I_{ном}R_{я}). \quad (4.13)$$

Так как в каталогах внутреннее сопротивление якоря $R_{я}$ обычно не указывается, то его ориентировочно определяют, принимая, что половина всех потерь в двигателе при номинальной нагрузке связана с потерями в меди якоря. Поэтому $I_{ном}^2 R_{я} \approx 0,5(1 - \eta_{ном})I_{ном}U_{ном}$.

Отсюда

$$R_{я} \approx 0,5(1 - \eta_{ном})I_{ном}/U_{ном}. \quad (4.14)$$

Пользуясь естественной механической характеристикой, легко построить и реостатную характеристику при любом сопротивлении реостата R_p . Она также строится по двум точкам: угловой скорости идеального холостого хода $\omega = \omega_0$ (при $M = 0$) и угловой скорости, соответствующей номинальному моменту при заданном сопротивлении резистора R_p , т. е. $\omega = \omega_{ном,p}$ (при $M = M_{ном}$). Угловая скорость $\omega_{ном,p}$ определяется по формуле

$$\omega_{ном,p} = \omega_0 [1 - I_{ном}(R_{я} + R_p)/U_{ном}]. \quad (4.15)$$

Механическая характеристика может быть построена также по точке идеального холостого хода и точке, соответствующей режиму короткого замыкания где $M = M_{к,з}$, а скорость $\omega = 0$. Угловую скорость ω_0 определяем по (4.13), а момент $M_{к,з}$, пренебрегая реакцией якоря, - по формуле

$$M_{к,з} = M_{ном}I_{к,з}/I_{ном}, \quad (4.16)$$

где $I_{к,з} = U/R$ - ток короткого замыкания.

Сопротивление якорной цепи $R = R_{я} + R_p$ может быть различным в зависимости от сопротивления внешнего резистора. В соответствии с этим будут различными для различных реостатных характеристик и токи короткого замыкания $I_{к,з}$ и моменты короткого замыкания $M_{к,з}$.

Для естественной механической характеристики значение момента короткого замыкания $M_{к,з}$ является наибольшим, так как при этом ток короткого замыкания ограничивается лишь внутренним сопротивлением обмоток якоря двигателя.

С учетом сказанного уравнение механической характеристики представляется в следующем виде:

$$\omega = \omega_0(1 - M/M_{к,з}). \quad (4.17)$$

Согласно (4.17) при $M = 0$ скорость $\omega = \omega_0$. Если в (4.17) положить $M = M_{к,з}$, то скорость $\omega = 0$. Это будут (при различных реостатных характеристиках) точки, лежащие на оси абсцисс (рис. 4.3) и определяемые в конечном счете сопротивлениями, ограничивающими ток и момент короткого замыкания. Так, если у нескольких двигателей механические характеристики обладают одинаковой жесткостью, то указанные характеристики, выраженные в относительных единицах, будут для всех этих двигателей представлены одной и той же прямой.

Уравнение характеристики двигателя независимого возбуждения в относительных единицах легко может быть получено из (4.4), если выразить его следующим образом:

$$\omega = \omega_0(1 - IR/U). \quad (4.18)$$

Разделив затем левую и правую части (4.18) на ω_0 получим:

$$\omega_* = 1 - IR/U; \quad (4.19)$$

после преобразований

$$\omega_* = 1 - I_*R_* \quad (4.20)$$

или соответственно (при $\Phi = \Phi_{ном} = const$)

$$\omega_* = 1 - M_*R_*, \quad (4.21)$$

где $\omega_* = \omega/\omega_0$; $I_* = I/I_{ном}$; $M_* = M/M_{ном}$ - соответственно угловая скорость, ток и момент двигателя в относительных единицах; $R_* = R/R_{ном}$ - сопротивление в относительных единицах; $R_{ном} = U_{ном}/I_{ном}$ - номинальное сопротивление двигателя.

Номинальным сопротивлением двигателя постоянного тока называется такое сопротивление, которое при неподвижном якоре и номинальном напряжении ограничивает ток в якоре до номинального значения.

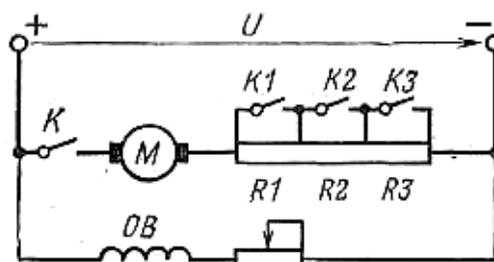


Рис. 4.4. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при пуске.

В (4.20) и (4.21) второй член правой части представляет собой перепад (статическое падение) угловой скорости, выраженный в относительных единицах и равный:

$$\Delta\omega_* = I_* R_* = M_* R_* \quad (4.22)$$

Последнее равенство позволяет при известных условиях значительно упростить расчет механических характеристик. Действительно, если рассматривать точки механических характеристик, отвечающие номинальному моменту, то для них

$$I_* = 1 \quad \text{и} \quad M_* = 1$$

последовательно, равенство (4.22) принимает вид:

$$\Delta\omega_* = R_* \quad (4.23)$$

Это означает, что при номинальном моменте относительный перепад угловой скорости двигателя численно равен относительному сопротивлению якорной цепи двигателя.

Произведем теперь в качестве примера построение механических характеристик двигателя независимого возбуждения, схема включения которого представлена на рис. 4.4. Процесс пуска двигателя состоит в том, что вначале замыкается выключатель K , затем через некоторые промежутки времени по мере увеличения угловой скорости замыкаются последовательно выключатели $K1$, $K2$ и $K3$. Когда же все контакты замкнутся и пусковой резистор окажется полностью зашунтированным, двигатель начнет работать с определенной угловой скоростью на естественной механической характеристике.

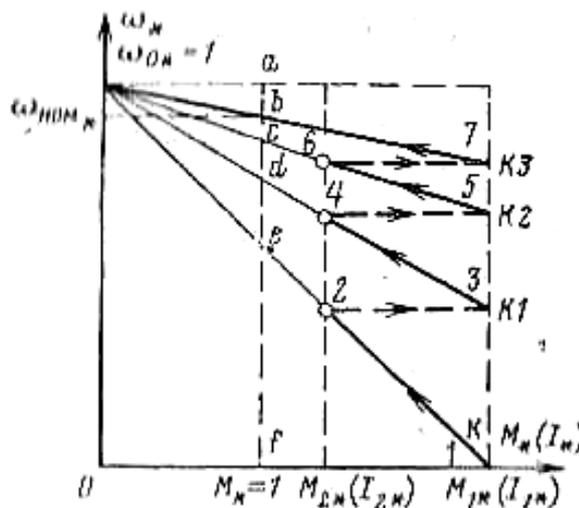


Рис. 4.5. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в относительных единицах.

Естественная характеристика в относительных единицах легко может быть построена, если принять согласно (4.21) и (4.23)

$$\omega_* = \omega_{0*} = 1 \text{ и } \Delta\omega_* = R_* \text{ при } M_* = 1.$$

Координаты одной точки характеристики:

$$\omega_* = 1, \quad M_* = 0;$$

другой

$$\omega_{ном*} = 1 - \Delta\omega_{ном*}, \quad M_* = 1$$

Проведенная через эти две точки прямая и будет естественной механической характеристикой. Указанное построение произведено на рис. 4.5. Там же дано построение реостатных характеристик и графическое определение сопротивлений.

Построение реостатных характеристик и расчет сопротивлений резисторов имеют значение при проектировании схем автоматизированного пуска двигателя. Для построения реостатных характеристик принято, что момент и ток двигателя при пуске изменяются в пределах от M_{1*} до M_{2*} и от I_{1*} до I_{2*} . Значение $M_{1*}(I_{1*})$ при номинальном потоке двигателя обычно принимается по условиям коммутации равным 2-2,5. Что касается значения $M_{2*}(I_{2*})$ то его нужно принять по крайней мере на 10-20 % больше момента сопротивления механизма;

В соответствии с характеристикой 1-2 двигатель увеличивает угловую скорость до значения, определяемого положением точки 2, затем должна быть зашунтирована первая ступень резистора (замыкается выключатель $K1$ схемы на рис. 4.5.). Угловая скорость двигателя из-за инерционности электропривода не может измениться сразу, а момент, если пренебречь индуктивностью якоря, возрастает мгновенно до значения M_{1*} , поэтому переход на новую характеристику осуществляется по линии 2-3, параллельной оси абсцисс.

Далее двигатель будет увеличивать угловую скорость соответственно прямой 3-4 до точки 4, и когда замкнется выключатель $K2$, произойдет переход на следующую характеристику. После замыкания выключателя $K3$ наступает переход на естественную характеристику (6-7). Если при пуске нагрузка на валу двигателя соответствует номинальному моменту, то двигатель по окончании пуска работает на естественной характеристике со скоростью, соответствующей $\omega_{ном*}$.

Согласно (4.23) вертикальные отрезки на линии, проведенной через точку $M_* = 1$, соответствуют отдельным ступеням сопротивления якорной цепи в относительных единицах (рис. 4.5). Ордината af в относительных единицах равна номинальному сопротивлению, т. е. $R_{ном*} = 1$. Ординаты ae , ad , ac , ab

равны соответственно относительным сопротивлениям отдельных ступеней якорной цепи двигателя. Если из указанных относительных величин вычесть относительное внутреннее сопротивление двигателя, отмеченное отрезком ab , то получатся относительные сопротивления отдельных ступеней реостата (соответствующие ординатам be , bd и bc). Отдельные секции реостата R1, R2 и R3 (рис. 4.5) имеют относительные сопротивления R_{1*} , R_{2*} и R_{3*} соответствующие отрезкам de , cd и be (рис. 4.5).

Для перехода от сопротивлений, выраженных в относительных единицах, к значениям сопротивлений в Омах, производится соответствующий пересчет по равенству $R_i = R_{i*} R_{ном}$.

Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в тормозных режимах

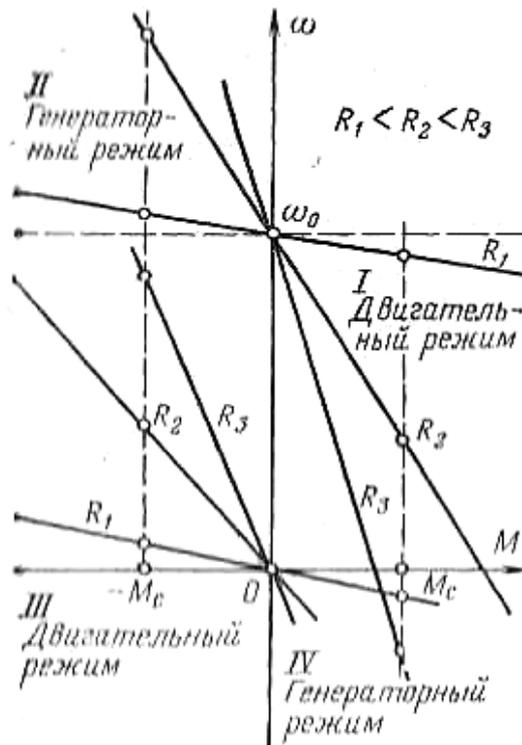


Рис. 4.6. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных режимах работы.

Выше была рассмотрена работа двигателя независимого возбуждения в двигательном режиме, чему соответствовали механические характеристики, представленные на рис. 4.3 и расположенные в первом квадранте координат осей. Однако этим не исчерпываются возможные режимы работы электродвигателя и его механические характеристики.

Весьма часто в современных электроприводах необходимо быстро и точно остановить механизм или изменить направление его движения. Быстрота и точность, с какой будут проделаны эти операции, во многих случаях определяют производительность механизма, а иногда и качество вырабатываемого продукта. Во время торможения или перемены направления движения (реверса) электродвигатель работает в тормозном режиме на одной из механических характеристик, соответствующих осуществляемому способу торможения. Графическое изображение механических характеристик двигателя независимого возбуждения для разных режимов работы, представлено на рис. 4.6. Здесь, кроме участка характеристик, соответствующих двигательному режиму (квадрант I), показаны участки характеристик в квадрантах II и IV, характеризующие три возможных способа генераторного электрического торможения, а именно:

1. Торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное).
2. Динамическое торможение.
3. Торможение противовключением.

Каждый тормозной режим является генераторным, так как энергия поступает в машину с вала, преобразуется в электрическую и либо отдается в сеть, либо затрачивается на нагрев элементов якорной цепи, обладающих активным сопротивлением, и рассеивается в окружающую среду.

Рассмотрим подробнее особенности механических характеристик при указанных способах торможения.

1. Торможение с отдачей энергии в сеть (генераторный режим работы параллельно с сетью) осуществляется в том случае, когда скорость двигателя оказывается выше скорости идеального холостого хода и его ЭДС E больше приложенного напряжения U . Двигатель здесь работает в режиме генератора параллельно с сетью, которой он отдает электрическую энергию, ток при этом изменяет свое направление. Последнее очевидно из равенства

$$I = (U - E) / R = -(E - U) / R, \quad (4.24)$$

следовательно, изменяет знак и момент двигателя, т. е. он становится тормозным $M = -k\Phi I$. Если обозначить тормозной момент через $M_T = -M$, то уравнение (4.6) при $\omega > \omega_0$ примет следующий вид:

$$\omega = U / k\Phi + M_T R / k^2 \Phi^2. \quad (4.25)$$

Первый член в правой части уравнения показывает, что механическая характеристика двигателя независимого возбуждения в этом генераторном режиме при $M = 0$ проходит через точку, соответствующую угловой скорости идеального холостого хода, как и в случае двигательного режима.

Наклон (жесткость) механической характеристики определяется сомножителем второго члена уравнения $R / k^2 \Phi^2$, который по абсолютному значению (при заданном сопротивлении R) остается неизменным.

Следовательно, наклон механической характеристики в рассматриваемом генераторном режиме будет таким же, как и в двигательном. Поэтому графически механические характеристики двигателя в режиме торможения с отдачей энергии в сеть являются продолжением характеристик двигательного режима в область квадранта II (рис. 4.6). Этот способ торможения возможен, например, в приводах транспортных и подъемных механизмов при спуске груза и при некоторых способах регулирования скорости, когда двигатель, переходя к низшим скоростям, проходит значения $\omega > \omega_0$. Такое торможение является весьма экономичным, поскольку оно сопровождается отдачей в сеть электрической энергии (за вычетом потерь в двигателе), которую двигатель преобразует из механической, поступающей к нему с вала. Но торможение этим способом может быть осуществлено в ограниченных пределах, так как не во всех приводах возможно соблюдение условия

$$\omega > \omega_0.$$

Необходимо отметить, что чем больше сопротивление в якорной цепи двигателя, тем выше его угловая скорость в генераторном режиме работы параллельно с сетью при том же тормозном моменте (рис. 4.6).

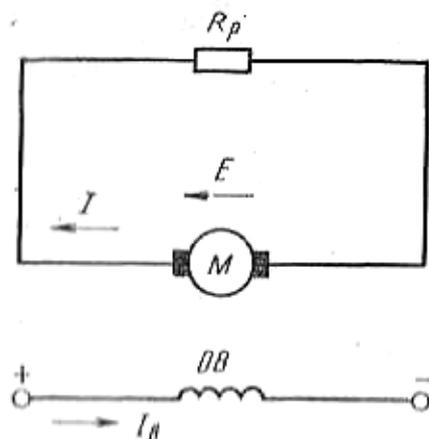


Рис. 4.7. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при динамическом торможении.

2. *Динамическое торможение* происходит при отключении якоря двигателя от сети и замыкании его на резистор, поэтому иногда его называют реостатным торможением. Обмотка возбуждения при этом должна оставаться присоединенной к сети. Режим динамического торможения также соответствует работе машины в качестве генератора. Однако этот режим отличается от описанного выше торможения с отдачей энергии в сеть. При динамическом торможении, так же как и в предыдущем случае, механическая энергия, поступающая с вала, например, в виде кинетической энергии, запасенной в двигателе и в движущихся элементах приводимого им механизма, преобразуется в электрическую. Однако эта энергия не отдается в сеть, а выделяется в виде теплоты в сопротивлениях цепи якоря. Вследствие того, что ЭДС двигателя сохраняет при торможении такой же знак, как и в двигательном режиме, а напряжение извне к якорю не прикладывается, ток якоря определяется по формуле

$$I = -E/R, \quad (4.26)$$

где R - сопротивление якорной цепи;

Тормозной момент при динамическом торможении, если пренебречь реакцией якоря, может быть выражен равенством

$$-M_T = k\Phi I = -k^2\Phi^2\omega/R. \quad (4.27)$$

При $\Phi = const$ получим:

$$\omega = M_T R / c^2.$$

При динамическом торможении механическая характеристика двигателя, как это видно из (4.27), представляет собой прямую, проходящую через начало координат. Семейство характеристик динамического торможения при различных сопротивлениях R якорной цепи показано в квадранте II на рис. 4.6. Как видно из этого рисунка, жесткость характеристик уменьшается с увеличением сопротивления якорной цепи.

Динамическое торможение широко используется для останова привода при отключениях его от сети (особенно при реактивном характере момента), при спуске грузов и подъемных механизмах. Оно достаточно экономично, хотя и уступает в этом отношении торможению с отдачей энергии в сеть.

3. Торможение противовключением (генераторный режим работы последовательно с сетью) осуществляется в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь двигателя под воздействием внешнего момента или сил инерции вращается в противоположную сторону. Это может происходить, например, в приводе подъемника, когда двигатель включен на подъем, а момент, развиваемый грузом, заставляет привод вращаться в сторону спуска груза. Такой же режим получается и при переключении обмотки якоря (или обмотки возбуждения) двигателя для быстрой остановки или для изменения направления вращения на противоположное.

Графическое изображение механической характеристики для торможения противовключением, когда имеет место, например, так называемый тормозной спуск груза, приведено на рис. 4.8. Как видно из этого рисунка, а также из рис. 4.6, механическая характеристика при торможении противовключением является продолжением характеристики двигательного режима в область квадранта IV. Последнее вытекает из уравнения механической характеристики двигателя, если полагать момент большим момента короткого замыкания и положительным по знаку.

При включении обмоток двигателя для подъема двигатель может быть пущен в ход лишь тогда, когда момент сопротивления груза M_{cl} будет меньше момента $M_{к,з}$ (рис. 4.8). В этом случае после включения двигателя в сеть угловая скорость его увеличивается и достигает установившегося значения (точка А)

При этом ток в якоре, как обычно в двигательном режиме, определяется по формуле

$$I = (U - E) / R.$$

С увеличением момента груза угловая скорость двигателя уменьшается соответственно характеристике АВ, и если момент груза будет равен $M_{к,з}$, двигатель остановится. В этом состоянии при $\omega = 0$ ЭДС двигателя равна нулю, поэтому ток определяется равенством

$$I = I_{к,з} = U / R.$$

Когда момент сопротивления при дальнейшем увеличении груза превысит момент двигателя в неподвижном

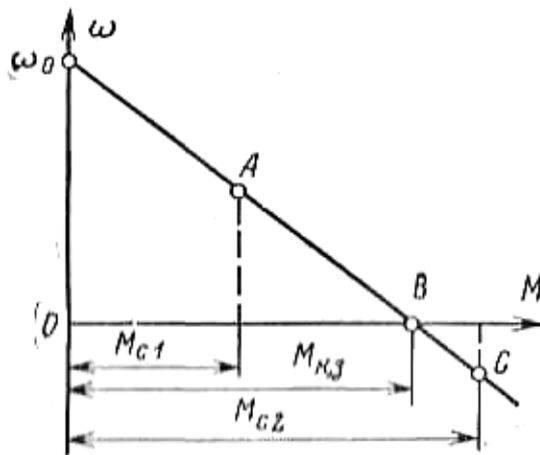


Рис. 4.8. Механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения при торможении противовключением в случае тормозного спуска.

состоянии, последний начнет вращаться в противоположном направлении и груз станет опускаться. При моменте, равном M_{c2} , будет достигнута установившаяся скорость спуска, соответствующая точке C на приведенной характеристике. Поскольку якорь теперь вращается в обратную сторону, а направление магнитного потока не изменилось, ЭДС двигателя изменит направление на обратное. Ток, определяемый уравнением

$$I = (U + E) / R,$$

будет больше, чем в двигательном режиме, и соответственно момент, развиваемый двигателем при торможении противовключением, тоже возрастет.

В таблице на рис. 4.9 стрелками показаны направления напряжения, ЭДС и падения напряжения, а также даны соотношения для токов якоря в случае двигательного режима, короткого замыкания и торможения противовключением при одном и том же значении сопротивления якорной цепи. Для ограничения тока и момента при торможении противовключением приходится включать дополнительный резистор.

Рассмотренное торможение противовключением при установившейся скорости используется, например, в подъемных устройствах при спуске груза G (рис. 4.9). Как видно из таблицы на рис. 4.9, при торможении противовключением ЭДС двигателя направлена последовательно согласно с напряжением сети, т.е. двигатель работает в генераторном режиме последовательно с сетью, получая механическую энергию с вала и преобразуя ее в электрическую энергию. Потребляется электрическая энергия и из сети. Вырабатываемая двигателем и потребляемая из сети энергия выделяется в виде теплоты в сопротивлениях цепи якоря, поэтому торможение противовключением не экономично, требует больших затрат энергии.

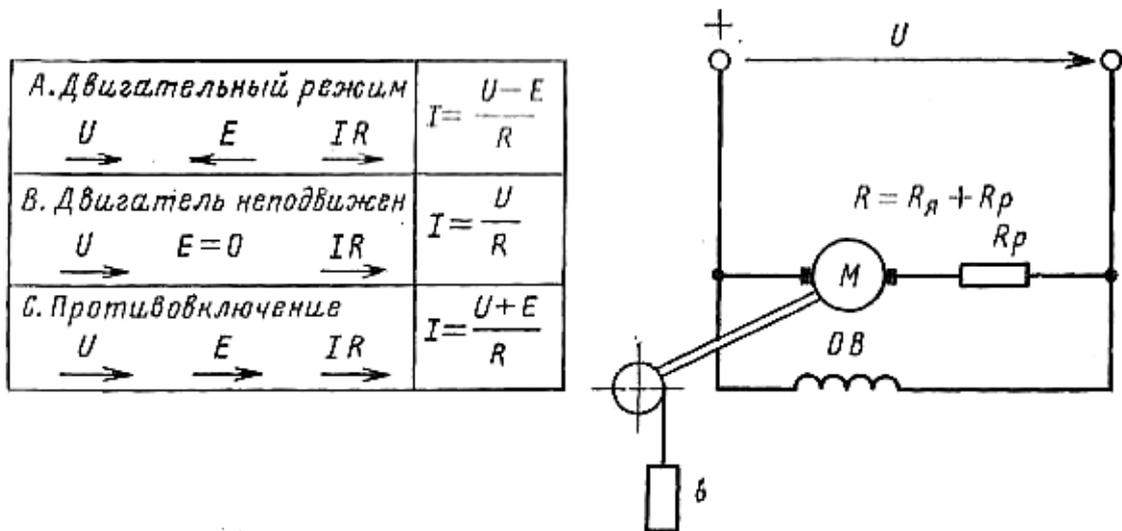


Рис. 4.9. Иллюстрация возможных режимов работы двигателя при подъеме и спуске груза.

Значительно чаще, чем за счет груза, торможение противовключением получают, изменяя полярность напряжения, подводимого к якорю двигателя при его вращении. В этом случае, так же как и в предыдущем (при спуске груза), ЭДС направлена согласно с напряжением сети, а момент двигателя направлен против вращения якоря. Как было сказано выше, в режиме противовключения необходимо включать дополнительный резистор в якорную цепь для ограничения тока и момента. При этом механические характеристики будут иметь большой наклон к оси абсцисс.

На рис. 4.10 представлены механические характеристики при торможении противовключением. Здесь при изменении полярности напряжения, подводимого к якорю, двигатель, работавший до этого со скоростью, соответствующей точке *A* квадранта *I*, переходит на работу по характеристике *BC* (индуктивностью якорной цепи пренебрегаем) в точку *B* квадранта *II*. Сохранение неизменной скорости в первый момент переключения двигателя обуславливается механической инерцией электропривода. Под влиянием тормозного момента скорость двигателя уменьшается соответственно характеристике *BC* до нулевого значения. При скорости, равной нулю (точка *C*, рис. 4.10), двигатель в случае торможения для останова, а не реверса, должен быть отключен от сети. Если такого отключения не произойдет, скорость двигателя начнет увеличиваться в обратном направлении (характеристика *CD* квадранта *III*). Вместе с изменением направления вращения изменяет направление ЭДС якоря, которая снова в двигательном режиме направлена встречно напряжению сети. Теперь привод вновь работает в двигательном режиме с постоянной угловой скоростью, будучи переведенным на естественную характеристику при противоположном направлении вращения (точка *F* характеристики *FE*).

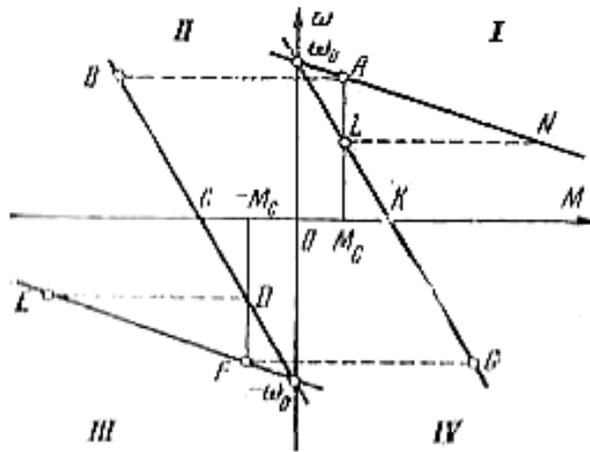


Рис. 4.10. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при торможении противовключением.

Если еще раз изменить полярность напряжения на выводах якоря, то двигатель вновь перейдет в режим противовключения. Торможение и последующее увеличение угловой скорости двигателя в обратном направлении происходят по характеристике GKL .

Изменение направления вращения двигателя может быть осуществлено двояко. Чтобы получить режим противовключения, можно переключить либо обмотку якоря, либо обмотку возбуждения. Однако переключение обмотки возбуждения практикуется реже, так как вследствие значительной ее индуктивности время торможения возрастает по сравнению с временем торможения при переключении обмотки якоря.

Электрическое торможение получило в настоящее время широкое применение, особенно в часто пускаемых приводах. Для обеспечения необходимого времени торможения и требуемой точности остановки в практике чаще всего применяется динамическое торможение или торможение противовключением. Для нереверсивных приводов чаще применяют динамическое торможение, так как оно осуществляется по более простой схеме. Для реверсивных приводов, где торможение и пуск двигателя в обратном направлении представляют собой единый процесс, целесообразно применять торможение противовключением, которое дает выигрыш во времени.

3.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ

Асинхронные двигатели получили в промышленности весьма широкое применение благодаря ряду существенных преимуществ по сравнению с другими типами двигателей. Асинхронный двигатель прост и надежен в

эксплуатации, так как не имеет коллектора; асинхронные двигатели дешевле и значительно легче двигателей постоянного тока.

Для вывода уравнения механической характеристики асинхронного двигателя можно воспользоваться упрощенной схемой замещения, приведенной на рис. 4.11, где приняты следующие обозначения:

U_ϕ - первичное фазное напряжение; I_1 - фазный ток статора; I'_2 - приведенный ток ротора; X_1 и X'_2 - первичное и вторичное приведенные реактивные сопротивления рассеяния; R_0 и X_0 - активное и реактивное сопротивления контура намагничивания; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ - скольжение двигателя; $\omega_0 = 2\pi n_0 / 60$ - синхронная угловая скорость двигателя; $\omega = 2\pi f_1 / p$; R_1 и R'_2 - первичное и вторичное приведенные активные сопротивления; f_1 - частота сети; p - число пар полюсов.

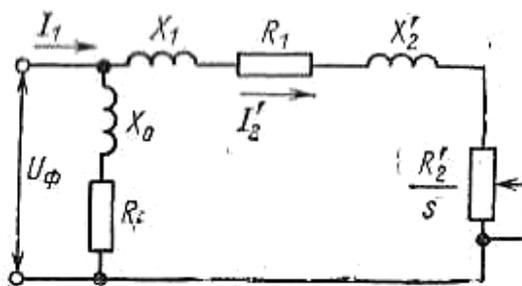


Рис. 4.11. Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя.

В соответствии с приведенной схемой замещения можно получить выражение для вторичного тока

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (4.28)$$

Момент асинхронного двигателя может быть определен из выражения потерь $M\omega_0 s = 3(I'_2)^2 R'_2$, откуда

$$M = 3(I'_2)^2 R'_2 / \omega_0 s. \quad (4.29)$$

Подставляя значение тока I'_2 в (4.29), получаем:

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 [(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2] s}. \quad (4.30)$$

Кривая момента $M = f(s)$ имеет два максимума: один - в генераторном режиме, другой - в двигательном.

Приравняв $dM/ds = 0$, определяем значение критического скольжения s_k , при котором двигатель развивает максимальный (критический), момент

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (4.31)$$

Подставляя значение s_k в (4.30), находим выражение для максимального момента

$$M_K = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (4.32)$$

Знак «+» в равенствах (4.31) и (4.32) относится к двигательному режиму (или торможению противовключением), «-» - к генераторному режиму работы параллельно с сетью (при $\omega > \omega_0$).

Если выражение (4.30) разделить на (4.32) и произвести соответствующие преобразования, то можно получить:

$$M = \frac{2M_K(1+as_K)}{s/s + s_K/s + 2as_K}, \quad (4.33)$$

где M_K - максимальный момент двигателя; s_K - критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту; $a = R_1/R_2'$.

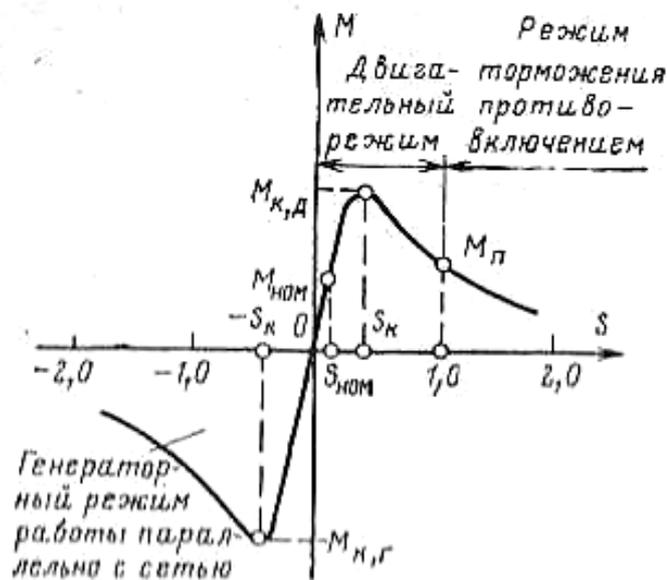


Рис 4.12. Механические характеристики асинхронного двигателя.

Здесь следует подчеркнуть весьма важное для практики обстоятельство - влияние изменения напряжения сети на механические характеристики асинхронного двигателя. Как видно из (4.30), при данном скольжении момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, поэтому двигатель этого типа чувствителен к колебаниям напряжения сети.

Критическое скольжение и угловая скорость идеального холостого хода не зависят от напряжения.

На рис. 4.12 приведена механическая характеристика асинхронного двигателя. Ее характерные точки:

- 1) $s = 0$; $M = 0$, при этом скорость двигателя равна синхронной;
- 2) $s = s_{ном}$; $M = M_{ном}$, что соответствует номинальной скорости и номинальному моменту;
- 3) $s = s_K$; $M = M_{K,Д}$ - максимальный момент в двигательном режиме;

4) $s = 1.0$; $M = M_{\Pi} = \frac{2M_K(1+as_K)s_K}{1+s_K^2(1+2a)}$ - начальный пусковой момент;

5) $s = -s_K$; $M = -M_{K,Г}$ - максимальный момент в генераторном режиме работы параллельно с сетью.

При $s > 1.0$ двигатель работает в режиме торможения противовключением, при $s < 0$ имеет место генераторный режим работы параллельно с сетью.

Необходимо подчеркнуть, что абсолютные значения s_K в двигательном и генераторном параллельно с сетью режимах одинаковы.

Однако из (4.33) следует, что максимальные моменты в двигательном и генераторном режимах различны. В генераторном режиме работы параллельно с сетью максимальный момент по абсолютному значению больше, что следует из соотношения

$$M_{K,Г} = M_{K,Д} \frac{R_1 + \sqrt{R_2^1 + X_K^2}}{R_1 - \sqrt{R_2^1 + X_K^2}},$$

где $X_K = X_1 + X_2'$.

Если в уравнении (4.33) пренебречь активным сопротивлением статора, то получится формула, более удобная для расчетов (формула Клосса):

$$M = \frac{2M_K}{s/s_K + s_K/s}; \quad (4.34)$$

здесь $s_K = \pm R_2' / X_K$; $M_K = 3U_{\Phi}^2 / 2\omega_0 X_K$.

Подставив в выражение (4.34) вместо текущих значений M и s их номинальные значения и обозначив кратность максимального момента $M_K / M_{ном}$ через λ , получим:

$$s_K = s_{ном} (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1})$$

В последнем выражении перед корнем следует брать знак «+».

Анализ формулы (4.34) показывает, что при $s > s_K$ (нерабочая часть характеристики) получится уравнение гиперболы, если в этом случае пренебречь вторым членом знаменателя в уравнении (4.34), т. е.

$$M = 2M_K \frac{s_K}{s},$$

или

$$M = A/s,$$

где

$$A = 2M_K s_K.$$

Эта часть характеристики практически соответствует лишь пусковым и тормозным режимам.

При малых значениях скольжения ($s > s_K$) для $M = f(s)$ получится уравнение прямой, если пренебречь первым членом в знаменателе (4.34):

$$M = 2M_K \frac{s}{s_K},$$

или

$$M = Bs;$$

здесь

$$B = 2M_k / s_k.$$

Эта линейная часть характеристики является ее рабочей частью, на которой двигатель обычно работает в установившемся режиме. На этой же части характеристики находятся точки, соответствующие номинальным данным

двигателя: $M_{ном}$, $I_{ном}$, $n_{ном}$, $s_{ном}$.

Статическое падение (перепад) скорости в относительных единицах на естественной механической характеристике асинхронного двигателя при номинальном моменте определяется его номинальным скольжением. Номинальное скольжение зависит от сопротивления ротора. Наименьшим номинальным скольжением при одинаковой мощности и числе полюсов обладают обычно двигатели с короткозамкнутым ротором нормального исполнения. У этих двигателей в силу конструктивных особенностей сопротивление ротора имеет относительно небольшое значение, что ведет к уменьшению значений критического скольжения s_k (4.31) и номинального скольжения $s_{ном}$. По тем же причинам при увеличении мощности двигателя уменьшается его номинальное скольжение и растет жесткость естественной характеристики. Последнее иллюстрируется кривой рис. 4.13, построенной по средним данным для двигателей разной мощности.

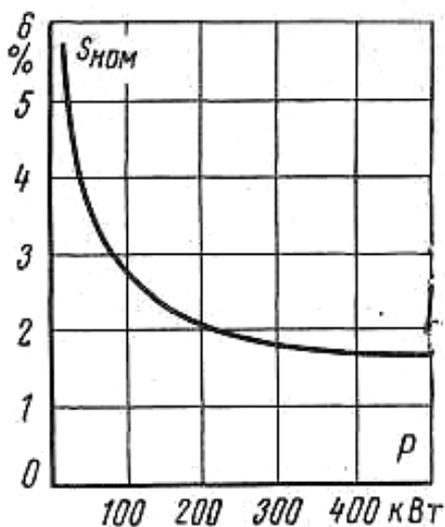


Рис. 4.13. Кривая номинального скольжения для асинхронных двигателей разной мощности.

Максимальный момент, как это видно из (4.32), не зависит от активного сопротивления ротора R_2 ; критическое же скольжение согласно (4.31) увеличивается по мере увеличения сопротивления ротора. Вследствие этого у двигателей с фазным ротором при введении резисторов в цепь ротора максимум кривой момента смещается в сторону больших скольжений. Значение сопротивления R_2 , необходимое для построения естественной и реостатных характеристик двигателя с фазным ротором, определяется из выражения

$$R_2 = s_{ном} E_{2K} / \sqrt{3I_{2ном}},$$

где E_{2K} , $I_{2ном}$ - линейное напряжение при неподвижном роторе и номинальный ток ротора.

На рис. 4.14 приведено семейство реостатных характеристик в двигательном режиме в координатных осях M и ω для различных значений сопротивлений роторной цепи. С известным приближением реостатные характеристики в рабочей их части могут быть приняты линейными. Это дает возможность при расчете сопротивлений резисторов, включаемых в роторную цепь асинхронного двигателя, пользоваться методами, аналогичными методам, применяемым

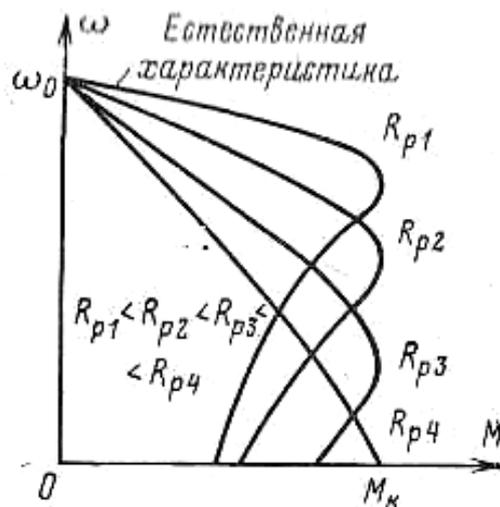


Рис. 4.14. Естественная и реостатные механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.

для расчета сопротивления цепи якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Некоторая неточность в определении сопротивления резистора вносится при этом за счет того, что характеристика асинхронного двигателя на участке графика от $M = 0$ до максимального момента при пуске считается линейной.

Более точным является метод, когда спрямление характеристик производится на меньшем участке. Кратность максимального момента $\lambda = M_{к,д} / M_{ном}$

должна быть у двигателей нормального исполнения с фазным ротором не ниже 1,8, а у двигателей с короткозамкнутым ротором не ниже 1,7. Крановые двигатели отличаются более высокой кратностью максимального момента.

Например, для двигателей с короткозамкнутым ротором серии МТК $\lambda = 2,3 \div 3,4$. Двигатели с фазным ротором упомянутых серий имеют приблизительно те же величины λ .

Для двигателей с короткозамкнутым ротором существенное значение с точки зрения электропривода имеют кратности начального пускового момента и начального пускового тока.

На рис. 4.15 представлены примерные естественные характеристики двигателя с нормальным короткозамкнутым ротором, имеющим круглые пазы. Эти характеристики показывают, что двигатель с короткозамкнутым ротором, потребляя из сети весьма большой ток, имеет сравнительно низкий начальный пусковой момент. Кратность начального пускового момента двигателей

$$k_{\Pi} = M_{\Pi} / M_{ном} = 1 \div 1,8,$$

а для крановых двигателей

$$k_{\Pi} \geq 1,7.$$

Кратность пускового тока

$$k_I = I_{\Pi} / I_{ном} = 5 \div 7.$$

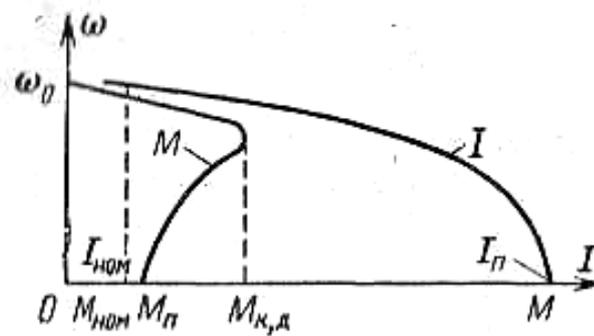


Рис. 4.15. Характеристики $\omega = f(M)$ и $\omega = f_1(I)$ для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с круглыми пазами.

Отсутствие пропорциональности между моментом двигателя и током статора во время пуска (рис. 4.15) объясняется значительным снижением магнитного потока двигателя, а также уменьшением коэффициента мощности вторичной цепи при пуске.

Момент асинхронного двигателя, как и любой электрической машины, пропорционален магнитному потоку Φ и активной составляющей вторичного тока

$$M = k' \Phi I_2' \cos \psi_2, \quad (4.35)$$

где k' - конструктивная постоянная асинхронного двигателя; ψ - угол сдвига между ЭДС и током ротора;

$$\cos \Psi_2 = \frac{R_2'}{\sqrt{(R_2')^2 + (X_2')^2 s^2}}. \quad (4.36)$$

При увеличении скольжения растет ЭДС ротора $E_2 = E_{2к} s$, возрастает ток ротора I_2 в соответствии с (4.28), асимптотически стремясь к некоторому предельному значению, а $\cos \psi_2$ с ростом s уменьшается (на рабочем участке характеристики очень мало), асимптотически стремясь к нулю при $s \rightarrow \infty$. Поток двигателя также не остается неизменным, уменьшаясь при возрастании тока из-за падения напряжения на сопротивлениях обмотки

статора. Все это и обуславливает отсутствие пропорциональности между током и моментом двигателя.

Для повышения начального пускового момента и снижения пускового тока применяются двигатели с короткозамкнутым ротором специальных конструкций. Роторы электродвигателей имеют две клетки, расположенные концентрически, или глубокие пазы с высокими и узкими стержнями.

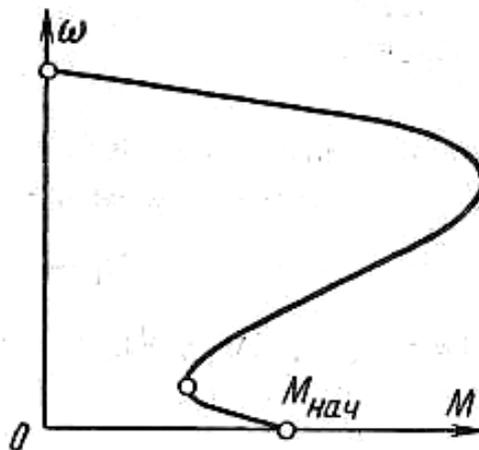


Рис. 4.16. Механические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с провалом при малых угловых скоростях.

Сопротивление ротора этих двигателей в пусковой период значительно больше, чем при номинальной скорости, вследствие поверхностного эффекта, обусловленного повышенной частотой тока в роторе при больших скольжениях. Поэтому при переходе к двигателям с глубоким пазом или двойной обмоткой ротора существенно увеличивается кратность пускового момента (увеличивается $\cos\psi_2$ и поток) и снижается кратность пускового тока. Правда, в этом случае несколько уменьшаются коэффициент мощности и КПД, соответствующие номинальной нагрузке.

Необходимо отметить, что у двигателей с короткозамкнутым ротором пусковой момент практически не всегда является наименьшим значением момента в области двигательного режима. Как видно из рис. 4.16, механическая характеристика двигателя с короткозамкнутым ротором иногда при малых угловых скоростях имеет провал, вызванный влиянием высших гармоник зубцовых полей. Это обстоятельство следует учитывать при пуске двигателя под нагрузкой.

У двигателей с фазным ротором начальный пусковой момент увеличивается по мере возрастания до известных пределов сопротивления резистора (рис. 4.14), а пусковой ток при увеличении сопротивления уменьшается. Начальный пусковой момент может быть доведен до максимального момента. С дальнейшим ростом сопротивления роторной цепи увеличение $\cos\psi_2$ уже не компенсирует уменьшения тока ротора и пусковой момент уменьшается.

1. Дементьев, Ю. Н. Электрический привод : учебное пособие / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. — Томск : Томский политехнический университет, 2013. — 224 с. — ISBN 978-5-4387-0194-1. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/34739.html>

1. Компоненты приводов мехатронных устройств : учебное пособие / С.В. Пономарев, А.Г. Дивин, Г.В. Мозгова, и др. ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет». — Тамбов : , 2014. — 295 с. : ил., табл., схем. — Режим доступа: по подписке. — URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277916>