

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И 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
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Б1.В.ДВ.11.01

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

13.03.02 Энергетика и электротехника

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ
Электроснабжение**

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ		Стр.
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		11
4.3 Лабораторные работы.....		72
4.4 Практические занятия.....		72
4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....		73
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ		74
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ		75
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....		75
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ		76
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....		76
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ практических работ		76
9.2. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....		89
10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ		90
11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ		91
Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....		92
Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины		101
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе		102

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

Вид деятельности выпускника

Дисциплина 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

Формирование у обучающихся знаний о современном электрическом приводе, умений регулирования координат электропривода и анализа его установившихся и переходных режимов для успешного решения теоретических и практических задач в их профессиональной деятельности.

Задачи дисциплины

Изучение сущности происходящих в электрических приводах процессов преобразования энергии, методов определения основных параметров и характеристик электропривода, оценки энергетических показателей работы и выбора двигателя.

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	Знать: - физические явления и процессы, лежащие в основе современных электромеханических преобразователей энергии Уметь: - использовать основные методы анализа и моделирования механической части электропривода и электродвигателей постоянного и переменного тока Владеть: - навыками теоретического и экспериментального исследования при решении задач управления электроприводом
ПК-5	готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности	Знать: - характеристики электроприводов с двигателями постоянного и переменного тока, преобразовательные устройства электроприводов и системы управления электроприводами Уметь: - определять параметры электропривода в установившихся и переходных режимах Владеть: - навыками выбора и проверки двигателя для различных режимов работы электропривода, оценки энергетических показателей работы электропривода

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.ДВ.11.01 Основы электропривода относится к дисциплинам по выбору.

Дисциплина Основы электропривода базируется на знаниях, полученных при изучении таких дисциплин, как Теоретические основы электротехники, Теоретическая механика, Прикладная механика, Электроника, Электрические машины, электрические и электронные аппараты, Электроснабжение, Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Основы электропривода представляет основу для изучения дисциплин: Б1.В.02 Типовой электропривод, Б1.В.09 Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах, Б1.В.ДВ.10.01 Автоматика в системах электроснабжения.

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						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	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	3	6	108	54	18	18	18	54	кр	Зачет
Заочная	4	-	108	18	6	6	6	86	кр	Зачет
Заочная (ускоренное обучение)	2	-	108	14	6	4	4	90	кр	Зачет

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
			6
1	2	3	4
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	54	20	54
Лекции (Лк)	18	10	18
Лабораторные работы (ЛР)	18	-	18
Практические занятия (ПЗ)	18	10	18
Групповые (индивидуальные) консультации	+	-	+

II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)	54	-	54
Подготовка к лабораторным работам	17	-	17
Выполнение контрольной работы	17		17
Подготовка к зачету	20	-	20
III. Промежуточная аттестация зачет	+	-	+
Общая трудоемкость дисциплины, час. зач. ед.	108	-	108
	3	-	3

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	Лабораторные работы	Практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Механика электропривода	17	3	-	4	10
1.1.	Определение электропривода	3	1	-		2
1.2.	Уравнение движения электропривода	3	1	-		2
1.3.	Расчетная схема механической части электропривода	4	-	-	2	2
1.4.	Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей.	3	1	-	-	2
1.5.	Установившийся режим работы электропривода. Условие устойчивости системы «Производственный механизм – электродвигатель».	4	-	-	2	2
2.	Характеристики и режимы работы двигателей	64	12	18	6	28
2.1.	Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	5	1	2	-	2
2.2.	Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	10	2	4	2	2
2.3.	Торможение двигателей постоянного тока независимого возбуждения	3	1	-	-	2
2.4.	Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока независимого возбуждения	3	1	-	-	2

2.5.	Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	3	1	-	-	2
2.6.	Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	4	-	-	2	2
2.7.	Торможение двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	2	-	-	-	2
2.8.	Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	2	-	-	-	2
2.9.	Схема включения и статические характеристики асинхронного двигателя.	7	1	4	-	2
2.10.	Регулирование скорости асинхронного двигателя.	12	2	6	2	2
2.11.	Торможение асинхронного двигателя.	3	1	-	-	2
2.12.	Ограничение тока при пуске асинхронного двигателя	5	1	2	-	2
2.13.	Схема включения и статические характеристики синхронного двигателя	3	1	-	-	2
2.14.	Регулирование скорости синхронного двигателя.	2	-	-	-	2
3.	Переходные процессы в электроприводе и энергетические показатели его работы	14	2	-	2	10
3.1.	Переходный процесс в электроприводах с двигателем постоянного тока	3	1	-	-	2
3.2.	Переходный процесс в электроприводах с асинхронным двигателем	5	1	-	2	2
3.3.	Потери мощности и энергии в установившемся и переходном режимах работы электропривода.	2	-	-	-	2
3.4.	Энергосбережение средствами электропривода	4	-	-	-	4
4.	Выбор электрических двигателей	13	1	-	6	6
4.1.	Общие требования, предъявляемые к электроприводу.	2	-	-	-	2
4.2.	Нагрев и охлаждение двигателей.	2	-	-	-	2
4.3.	Расчет мощности и выбор типа электродвигателя при продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном режимах работы.	9	1	-	6	2

	ИТОГО	108	18	18	18	54
--	--------------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------

- для заочной 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	Лабораторные работы	Практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Механика электропривода	18	2	-	-	16
1.1.	Определение электропривода	5	1	-	-	4
1.2.	Уравнение движения электропривода	4	-	-	-	4
1.3.	Расчетная схема механической части электропривода	2	-	-	-	2
1.4.	Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей.	5	1	-	-	4
1.5.	Установившийся режим работы электропривода. Условие устойчивости системы «Производственный механизм – электродвигатель».	2	-	-	-	2
2.	Характеристики и режимы работы двигателей	66	4	6	-	56
2.1.	Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	5	1	-	-	4
2.2.	Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	7	1	2	-	4
2.3.	Торможение двигателей постоянного тока независимого возбуждения	4	-	-	-	4
2.4.	Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока независимого возбуждения	4	-	-	-	4
2.5.	Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	4	-	-	-	4
2.6.	Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	4	-	-	-	4
2.7.	Торможение двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	4	-	-	-	4
2.8.	Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока последовательного и смешанного	4	-	-	-	4

	возбуждения					
2.9.	Схема включения и статические характеристики асинхронного двигателя.	5	1	-	-	4
2.10.	Регулирование скорости асинхронного двигателя.	9	1	4	-	4
2.11.	Торможение асинхронного двигателя.	4	-	-	-	4
2.12.	Ограничение тока при пуске асинхронного двигателя	4	-	-	-	4
2.13.	Схема включения и статические характеристики синхронного двигателя	4	-	-	-	4
2.14.	Регулирование скорости синхронного двигателя.	4	-	-	-	4
3.	Переходные процессы в электроприводе и энергетические показатели его работы	8	-	-	-	8
3.1.	Переходный процесс в электроприводах с двигателем постоянного тока	2	-	-	-	2
3.2.	Переходный процесс в электроприводах с асинхронным двигателем	2	-	-	-	2
3.3.	Потери мощности и энергии в установившемся и переходном режимах работы электропривода.	2	-	-	-	2
3.4.	Энергосбережение средствами электропривода	2	-	-	-	2
4.	Выбор электрических двигателей	12	-	-	6	6
4.1.	Общие требования, предъявляемые к электроприводу.	2	-	-	-	2
4.2.	Нагрев и охлаждение двигателей.	2	-	-	-	2
4.3.	Расчет мощности и выбор типа электродвигателя при продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном режимах работы.	8	-	-	6	2
	ИТОГО	104	6	6	6	86

- для заочной (ускоренной) 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	Лабораторные работы	Практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Механика электропривода	18	2	-	-	16
1.1.	Определение электропривода	5	1	-	-	4
1.2.	Уравнение движения электропривода	4	-	-	-	4
1.3.	Расчетная схема механической части электропривода	2	-	-	-	2
1.4.	Механические характеристики	5	1	-	-	4

	производственных механизмов и электродвигателей.					
1.5.	Установившийся режим работы электропривода. Условие устойчивости системы «Производственный механизм – электродвигатель».	2	-	-	-	2
2.	Характеристики и режимы работы двигателей	66	4	4		58
2.1.	Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	6	1	-	-	5
2.2.	Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	8	1	2	-	5
2.3.	Торможение двигателей постоянного тока независимого возбуждения	4	-	-	-	4
2.4.	Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока независимого возбуждения	4	-	-	-	4
2.5.	Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	4	-	-	-	4
2.6.	Регулирование скорости двигателя постоянного тока 4 последовательного и смешанного возбуждения.	4	-	-	-	4
2.7.	Торможение двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	4	-	-	-	4
2.8.	Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	4	-	-	-	4
2.9.	Схема включения и статические характеристики асинхронного двигателя.	5	1	-	-	4
2.10.	Регулирование скорости асинхронного двигателя.	7	1	2	-	4
2.11.	Торможение асинхронного двигателя.	4	-	-	-	4
2.12.	Ограничение тока при пуске асинхронного двигателя	4	-	-	-	4
2.13.	Схема включения и статические характеристики синхронного двигателя	4	-	-	-	4
2.14.	Регулирование скорости синхронного двигателя.	4	-	-	-	4
3.	Переходные процессы в электроприводе и	8	-	-	-	8

	энергетические показатели его работы					
3.1.	Переходный процесс в электроприводах с двигателем постоянного тока	2	-	-	-	2
3.2.	Переходный процесс в электроприводах с асинхронным двигателем	2	-	-	-	2
3.3.	Потери мощности и энергии в установившемся и переходном режимах работы электропривода.	2	-	-	-	2
3.4.	Энергосбережение средствами электропривода	2	-	-	-	2
4.	Выбор электрических двигателей	12	-	-	4	8
4.1.	Общие требования, предъявляемые к электроприводу.	2	-	-	-	2
4.2.	Нагрев и охлаждение двигателей.	2	-	-	-	2
4.3.	Расчет мощности и выбор типа электродвигателя при продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном режимах работы.	8	-	-	4	4
	ИТОГО	104	6	4	4	90

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

РАЗДЕЛ 1: МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Определение электропривода

Электропривод – это электромеханическая система, состоящая из взаимодействующих электродвигательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительного органа производственного механизма и управления этим движением.

Электродвигательное устройство – АД, СД, ДПТ и т.п.

Для пояснения принципа работы электропривода обратимся к его блок-схеме (рис. 1.)

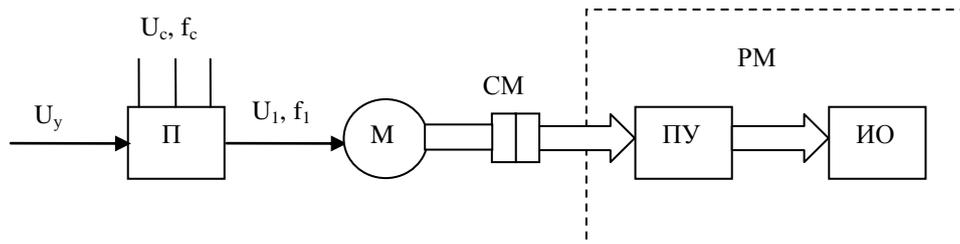


Рис. 1. Блок-схема электропривода

Управляющий электрический сигнал U_y подается на преобразователь Π , который в соответствии с сигналом U_y осуществляет преобразование и передачу электроэнергии из питающей сети с постоянными параметрами напряжения U_c и частоты f_c на вход электродвигателя \mathbf{M} с требуемыми значениями напряжения U_1, f_1 .

Электрическая энергия, поступившая в двигатель \mathbf{M} , преобразуется в механическую энергию вращения. Посредством соединительной механической муфты $\mathbf{СМ}$ вращательное движение вала двигателя передается рабочей машине $\mathbf{РМ}$. При этом

1. Вращательное движение проходит через механическое передаточное устройство $\mathbf{ПУ}$ для получения требуемых значений вращающего момента и частоты вращения или преобразования вращательного движения в поступательное
2. Механическая энергия подается на исполнительный орган $\mathbf{ИО}$ рабочей машины, выполняющей технологическую операцию.

В качестве механического $\mathbf{ПУ}$ обычно применяют механические передачи – ременную, зубчатую цилиндрическую, зубчатую коническую, червячную. Существуют электроприводы без механических $\mathbf{ПУ}$, например электропривод вентилятора, у которого вращение вала двигателя передается непосредственно на исполнительный орган.

Управление электроприводами осуществляется посредством устройств, составляющих аппаратуру управления: коммутационных, преобразовательных, измерительных. Будучи включенной по определенной схеме, эта аппаратура обеспечивает ручное или автоматизированное управление электроприводом.

В зависимости от способа передачи механической энергии от двигателя к передаточному устройству, а затем к исполнительному органу рабочей машины электроприводы разделяют на **групповые** и **индивидуальные**.

В групповом электроприводе одним двигателем посредством трансмиссии приводятся в действие несколько рабочих машин. В настоящее время имеет ограниченное применение. Недостатки – громоздкость и низкая надежность трансмиссии, сложность управления каждой из рабочих машин, входящих в групповой электропривод.

В индивидуальном электроприводе рабочая машина приводится в действие индивидуальным двигателем. Отсутствуют вышеперечисленные недостатки.

Многодвигательный электропривод предназначен для рабочих машин с несколькими исполнительными органами (например вращение и перемещение в токарном станке). В многодвигательном электроприводе каждый исполнительный орган рабочей машины имеет свой индивидуальный двигатель. Данный вид привода упрощает его автоматизацию за счет повышения управляемости отдельных элементов рабочей машины. Обычно применяют в сложных агрегатах – прокатные станы, подъемные краны, металлообрабатывающие станки.

Исполнительные органы рабочих машин совершают вращательное или поступательное движение. Однако преобладающим видом движения элементов электропривода является вращательное.

Для оценки скорости вращательного движения приняты понятия: угловая скорость вращения ω [рад/с] и частота вращения n [об/мин].

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

Работа электроприводов характеризуется рядом параметров, важнейшими из которых являются момент на валу двигателя M [Н·м], момент инерции J [кг·м²].

Момент на валу, или вращающий момент характеризует вращательное действие силы. Момент создается силой, приложенной к плечу (плечо – кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы). Например, к барабану грузоподъемной лебедки рис а, или парой сил, возникающих в электродвигателях вращательного движения рис б. $M = FR$



Рис. 2. Схемы формирования крутящего момента
Электрический двигатель вращательного движения является источником момента.

Момент инерции - величина, характеризующая распределения масс в теле. Момент инерции тела относительно оси вращения зависит от массы тела и от распределения этой массы. Чем больше масса тела и чем дальше она отстоит от воображаемой оси, тем большим моментом инерции обладает тело.

1.2. Уравнение движения электропривода

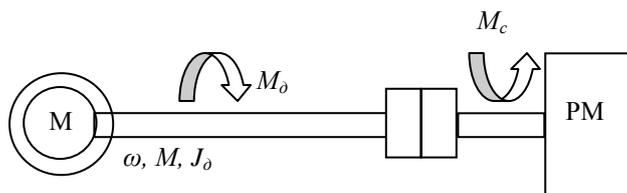


Рис. 3. Схема привода

Если система материальных точек, например электропривод, вращается с равномерной частотой, то движущий момент M_δ уравнивается статическим моментом сопротивления рабочего механизма M_c :

$$M_\delta = M_c$$

Если электропривод меняет свою скорость, то движущий момент M_δ преодолевает момент сопротивления M_c . На вал двигателя начинает действовать еще один момент, обусловленный силами инерции вращающихся масс двигателя и механизма - динамический момент M_j .

$$M_\delta = M_c + M_j,$$

$$M_\delta = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

где J - Момент инерции - величина, характеризующая распределения масс в теле. Чем больше масса тела и чем дальше она отстоит от оси вращения, тем большим моментом инерции обладает тело [кг·м²].

$\frac{d\omega}{dt}$ - угловое ускорение.

При установившемся режиме, когда $\omega = \text{const}$, $M_j = 0$.

Уравнение (1) – основное уравнение движения электропривода.

Из уравнения следует, что нагрузочные моменты, действующие на вал двигателя, разделяются на статический M_c и динамический M_j .

При нарастании угловой скорости вращения ($\frac{d\omega}{dt} > 0$) динамический момент M_j препятствует этому

нарастанию и он, суммируясь со статическим моментом сопротивления M_c , направлен против вращающего момента двигателя M_δ . При убывании наоборот.

1.3. Расчетная схема механической части электропривода

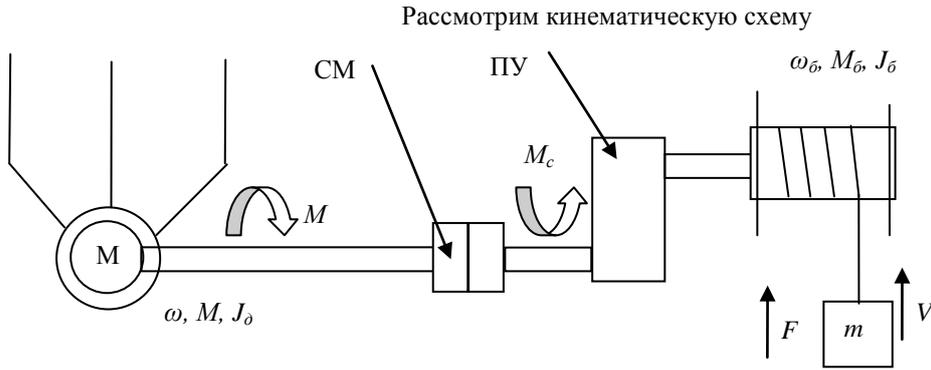


Рис. 5. Кинематическая схема электропривода

- М – двигатель;
- ω – частота вращения вала электродвигателя;
- M – электромагнитный момент Д;
- J_D – момент инерции ротора Д;
- M_c – момент сопротивления на валу Д;
- ω_δ – частота вращения барабана подъемной лебедки;
- M_δ – вращающий момент на валу лебедки;
- J_δ – момент инерции барабана лебедки.
- m – масса груза;
- V – скорость подъема.
- F – сила, действующая на груз со стороны барабана.

Механическая мощность P , передаваемая валом, вращающимся с угловой скоростью ω , пропорциональна моменту M на этом валу,

$$P = M\omega, \text{ или } M = \frac{P}{\omega}$$

Таким образом, при передаче мощности через ПУ (редуктор) при изменении угловой скорости вращения изменяется величина вращающего момента. Для привода с большим числом элементов это обстоятельство усложняет расчеты. Поэтому принято все статические моменты сопротивления и моменты инерции элементов электропривода приводить к одной угловой скорости вала двигателя.

Такое приведение представляет собой составление расчетной схемы.

Допущения: Учитываем лишь 3 массы: ротор, барабан, груз.

Представим схему в виде расчетной.

1. Приведение моментов и сил статического сопротивления к угловой скорости вала двигателя.

$$M_{npk} = \frac{M_k}{i_k \eta_k}; M_{npi} = \frac{F_i p_i}{\eta_i},$$

где M_k – момент, приложенный к k -му элементу, F_i – сила, приложенная к i -му элементу. η_k, η_i – КПД между соответственно k -м, i -м элементом и валом двигателя.

$i_k = \frac{\omega}{\omega_k}$, i – передаточное число кинематической цепи. ω – скорость вала двигателя, ω_k – скорость k -го элемента

$p = \frac{v_i}{\omega}$, p – радиус приведения, v_i – скорость движения i -го элемента.

В общем случае: при k элементов с вращательным движением и m элементов с поступательным движением

$$M_c = \sum_{k=1}^n M_{npk} + \sum_{i=1}^m M_{npi}$$

Для рассматриваемого примера:

$$M_{np-\delta} = \frac{M_\delta}{\eta_p i}, M_{np-m} = \frac{F p}{\eta_p \eta_\delta},$$

$$M_c = M_{np_b} + M_{np_m} = \frac{M_b}{\eta_p i} + \frac{F\rho}{\eta_p \eta_b} \quad (2)$$

2. Приведение моментов инерции и масс элементов к угловой скорости вала двигателя осуществляется по формулам:

$$J_{npk} = \frac{J_k}{i_k^2} \quad J_{npi} = m_i p_i^2$$

где J_k – момент инерции k -го вращающегося элемента, m_i – масса i -го поступательно движущегося элемента. J_{npk}, J_{npi} – приведенные моменты инерции.

В общем случае: при k элементов с вращательным движением и m элементов с поступательным движением

$$J = J_\delta + \sum_{k=1}^n J_{npk} + \sum_{i=1}^m J_{npi}$$

Для рассматриваемого примера:

$$J = J_\delta + J_{np_b} + J_{np_m} \quad (3)$$

$$J = J_\delta + J_b \frac{1}{i^2} + m\rho^2$$

Т.е. основное уравнение электропривода $M_\delta = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$ будет справедливо и для сложного привода.

1.4. Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей

Важным понятием при решении задач электропривода является понятие механических характеристик. Механические характеристики $\omega = f(M_\delta)$ и $\omega = f(M_c)$ или $n = f(M_\delta)$ и $n = f(M_c)$.

Механическая характеристика двигателя – зависимость его скорости от развиваемого момента.

Механическая характеристика исполнительного органа – зависимость скорости его движения от приложенного момента.

Основным параметром механической характеристики является ее жесткость, которая определяется:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$$

Чем больше β тем жестче характеристика. При $\beta = \infty$ абсолютно жесткая

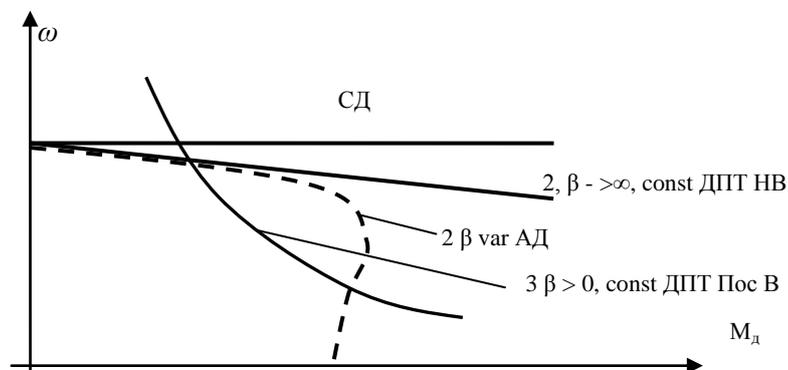


Рис. 1. Типы механических характеристик электродвигателей
Механические характеристики рабочих машин изображены на рис 2.

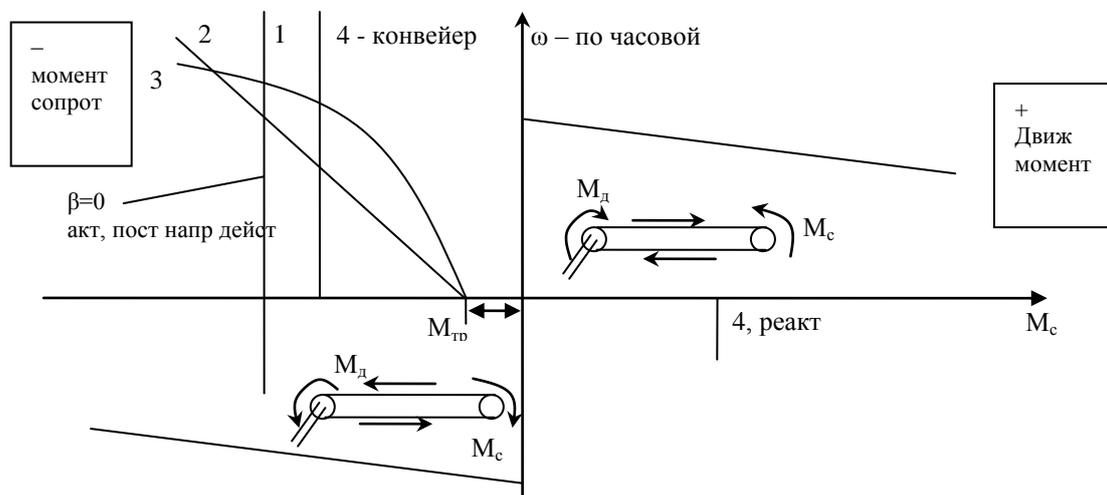


Рис 2. Типы механических характеристик рабочих машин

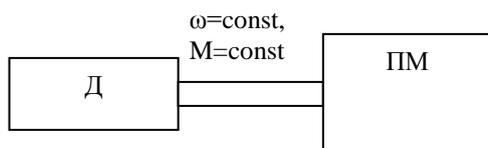
1) подъемник 2) ГПТ 3) центробежные насосы, вентиляторы. 4) конвейер, транспортер.

По характеру действия моменты делятся на активные и реактивные.

Реактивный момент всегда противодействует движению и поэтому изменяет свой знак с изменением направления скорости. Создается силами трения.

Активные моменты имеют постоянное направление своего действия, не зависящее от значения и направления скорости (1). Может противодействовать или помогать движению. Создается силами притяжения Земли.

1.5. Установившийся режим работы электропривода. Условие устойчивости системы «Производственный механизм – электродвигатель».



Установившимся режимом работы ЭП называется его работа при неизменных значениях частоты вращения и момента. Тогда, если рассмотреть основное уравнение движения ЭП:

$$M_{\delta} = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \text{ при } \omega = \text{const} \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0, \text{ или } M_{\delta} = M_c.$$

$M_{\delta} = M_c$ – условие установившегося движения ЭП.

Введенное понятие механических характеристик позволяет графически выполнить проверку условия установившегося движения и найти его параметры. Для этого в одном и том же квадранте совмещаются характеристики двигателя и производственного механизма. Точки пересечения характеристик ($M_{\delta} = M_c$) соответствуют установившемуся режиму. Возможно аналитическое решение, когда M_{δ} и M_c представлены уравнениями.

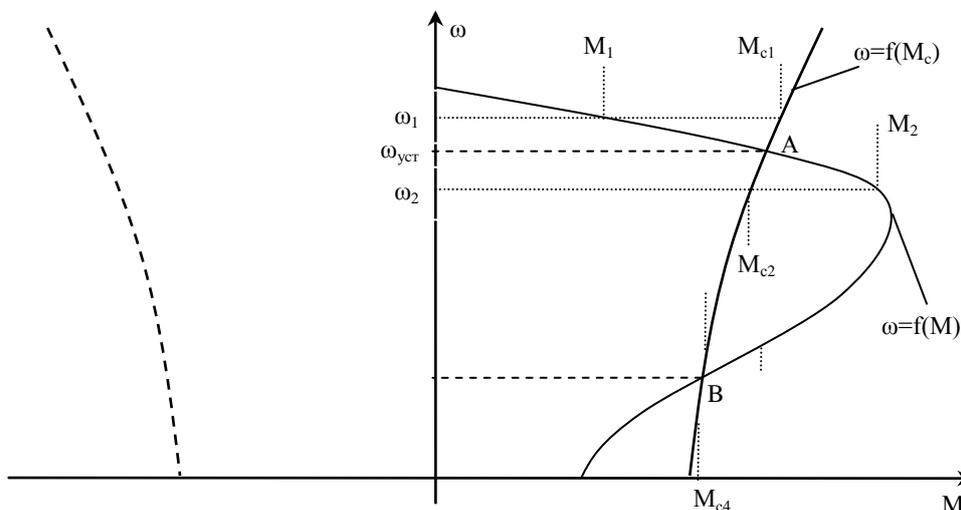


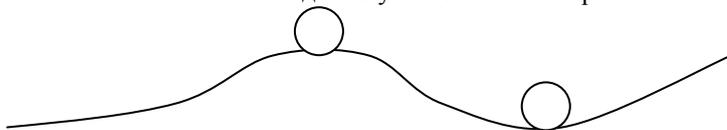
Рис.3. К понятию устойчивости системы «двигатель–исполнительный мех-м»

Точки пересечения характеристик, т.е. в $M_c = M$, точка А, В – точки установившегося режима.

Неустановившийся режим ЭП имеет место, когда моменты двигателя и нагрузки отличаются друг от друга.

$M_d > M_c$, тогда $M_j < 0$ и происходит увеличение или снижение скорости движения. Наиболее типичными примерами неустановившегося движения являются пуск, торможение, реверс двигателя, переходы с одной скорости на другую при регулировании.

Работа ЭП в установившемся режиме может быть устойчивой или неустойчивой. Если работа устойчива, она возможна для длительного промежутка времени. Если неустойчива, то при малейшем изменении параметров системы – система выйдет из установившегося режима.



Два установившихся режима.
Один устойчив, другой нет.

Рассмотрим способ определения устойчивости движения с помощью механических характеристик.

Под устойчивостью понимается свойство системы «Двигатель-производственный механизм» поддерживать движение со скоростью $\omega_{уст}$ или с минимально возможными отклонениями при различных возмущениях.

Возможно два установившихся режима, в точке А, в точке В.

Рассмотрим точку А.

Предположим, что по какой-то причине скорость ЭП повысилась до уровня ω_1 . Выясним, что будет происходить со скоростью, если вызвавшая ее изменение причина исчезнет. Из характеристик видно, что при скорости ω_1 момент нагрузки M_{c1} больше момента двигателя M_1 , т.е. $M_1 < M_c$.

Тогда в соответствии с основным уравнением движения

$$M_d = M_c + J \frac{d\omega}{dt},$$

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt} < 0$$

Начинает действовать отрицательный динамический момент, начинается процесс торможения, который заканчивается скоростью $\omega_{уст}$.

Пусть в результате кратковременного возмущения скорость снизилась до уровня $\omega_2 < \omega_{уст}$. В этом случае $M_2 > M_{c2}$ и под действием положительного динамического момента скорость начинает возрастать до уровня $\omega_{уст}$.

Рассуждая аналогично в точке В работа системы неустойчива.

Итак, при увеличении скорости ($\Delta\omega > 0$) момент двигателя должен быть меньше момента сопротивления ($\Delta(M_d - M_c) < 0$), а при уменьшении скорости ($\Delta\omega < 0$), момент двигателя больше момента сопротивления ($\Delta(M_d - M_c) > 0$)

Таким образом, условие устойчивой работы:
$$\frac{\Delta(M_d - M_c)}{\Delta\omega} < 0$$

Переходя к бесконечно малым приращениям:

$$\frac{d(M_d - M_c)}{d\omega} < 0$$

РАЗДЕЛ 2: ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.1. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

ДПТ до недавнего времени являлся основой регулируемого электропривода, до сих пор широко применяется во всех областях техники. В ДПТ НВ обмотка возбуждения имеет независимое питание, поэтому изменение тока в обмотке якоря непосредственно не влияет на ток в обмотке возбуждения.

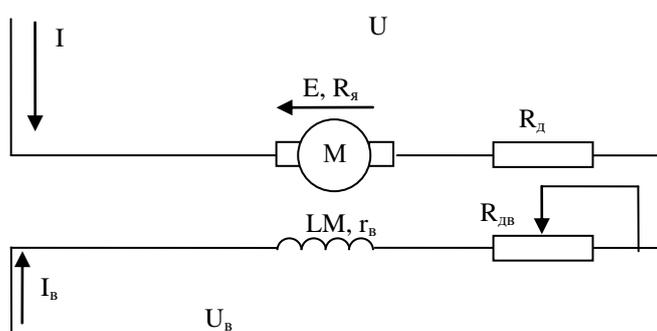


Рис. 2.1. Схема включения ДПТ НВ

M – обмотка якоря двигателя (на роторе)

LM – обмотка возбуждения (на статоре)

R – сопротивление цепи ОЯ, $R=R_я+R_д$

$R_д$ – добавочное сопротивление цепи ОЯ, для регулирования координат

$R_в$ – сопротивление цепи ОВ, $R_в=r_в+R_дв$

$r_в$ – внутреннее сопротивление ОВ, $R_дв$ – добавочное сопротивление ОВ для регулирования координат

U, E, I – напряжение, ЭДС, ток ОЯ

$U_в, I_в$ – напряжение, ток ОВ.

Уравнение для напряжения ОЯ можно записать:

$$U = E + IR \quad (1)$$

где $R = R_я + R_д$, Ом – полное сопротивление цепи ОЯ;

U – подводимое к якорю напряжение;

Из курса электромеханики, ЭДС ОЯ, электромагнитный момент определяются:

$$E = k\Phi\omega \quad (2)$$

$$M = k\Phi I \quad (3)$$

$$k = \frac{pN}{2\pi a}$$

где k – конструктивный коэффициент двигателя,

p – число пар полюсов; N – число активных проводников обмотки якоря;

a – число параллельных ветвей обмотки якоря. Φ – магнитный поток, Вб;

Из (1) и (2) получим $\omega = f(I)$:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi} \quad (4)$$

- электромеханическая характеристика ДПТ НВ.

Из (4) с помощью (3) получим формулу для механической характеристики ДПТНВ $\omega = f(M)$:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{k^2\Phi^2} \quad (5)$$

Если двигатель во всех режимах работает с постоянным потоком возбуждения (пренебрегают влиянием реакции якоря), то величину $k\Phi$, считают постоянной. Тогда характеристики $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$ - линейны. ($y=kx+b$)

Электромеханические, механические характеристики ДПТНВ (рис. 2.1)

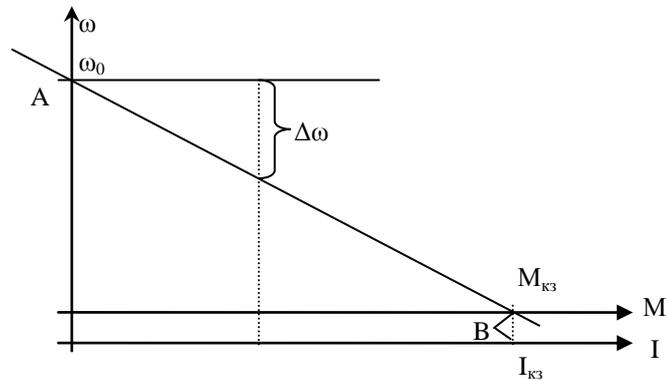


Рис. 2.2. Электромеханическая и механическая характеристика ДПТ НВ

Уравнения (4), (5) можно записать в сокращенной форме:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi} \quad \Rightarrow \quad \omega = \omega_0 - \Delta\omega,$$

где $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ - скорость идеального холостого хода двигателя;

$$\Delta\omega = \frac{IR}{k\Phi} = \frac{MR}{k^2\Phi^2} - \text{изменение угловой скорости относительно скорости идеального холостого хода}$$

ω_0 .

Характерными точками являются точка А - идеального ХХ, в которой ($\omega = \omega_0, I = M = 0$), и точка В - КЗ, где ($\omega = 0$, а $I = I_{кз}, M = M_{кз}$).

Режим КЗ для электрической машины соответствует неподвижному состоянию якоря при поданном напряжении (Например, при пуске).

Электромеханические и механические характеристики двигателя, полученные при $U_H, \Phi_H, R_d=0$, называются естественными, иначе искусственными.

2.2. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 часа).

Возможно механическое регулирование. Используются: коробка передач, вариаторы. (Ненадежно, неэкономично, сложность автоматизации).

При электрическом регулировании производится воздействие на двигатель. Большие регулировочные возможности, простота, удобство автоматизации.

Для ДПТНВ возможно три основных способа регулирования скорости: изменением сопротивления в цепи якоря, изменение потока возбуждения и изменение напряжения, подводимого к якорю. Это видно из уравнения

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi} \quad (1)$$

Регулирование скорости ДПТ изменением сопротивления в цепи ОЯ

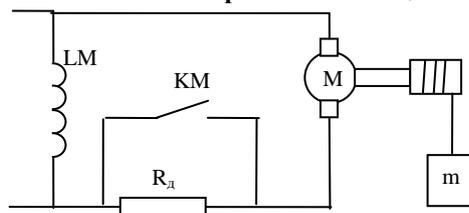


Рис. Введение дополнительного сопротивления в ОЯ

При введении сопротивления в цепь якоря увеличивается наклон характеристики двигателя

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi}, \text{ и при том же моменте сопротивления } M_c \text{ скорость будет уменьшаться. Рассмотрим на рис}$$

2.4

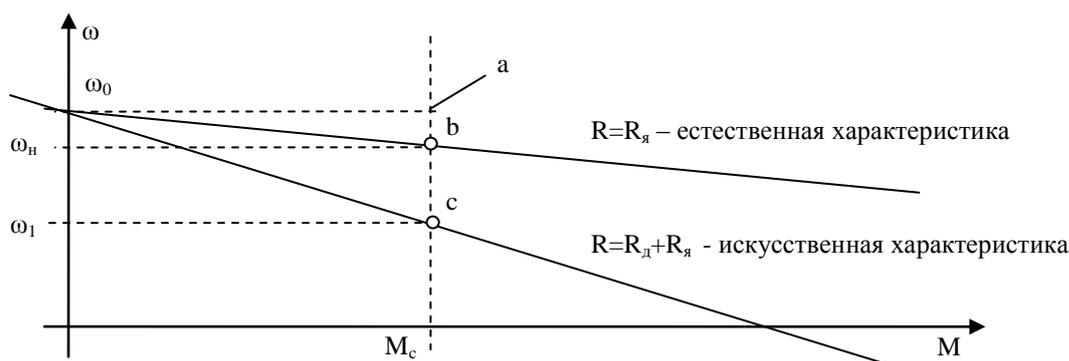


Рис. Механические характеристики при различных сопротивлениях в ОЯ

Из (1) видно, что ω_0 не зависит от сопротивления ОЯ.

Из электромеханической характеристики: $\Delta\omega = \frac{IR}{k\Phi}$

Тогда $ab = \frac{IR_{я}}{k\Phi}$, $ac = \frac{I(R_{я} + R_{д})}{k\Phi}$

$$bc = ac - ab = \frac{IR_{д}}{k\Phi}$$

$$\frac{ab}{bc} = \frac{R_{я}}{R_{д}} \Rightarrow R_{д} = R_{я} \frac{bc}{ab} = R_{я} \frac{\omega_n - \omega_1}{\omega_0 - \omega_n}$$

Для того чтобы определить $R_{д}$, нужно знать $R_{я}$ – паспортные данные, или

$$R_{я} = 0,5 \frac{U_n}{I_n} (1 - \eta_n). \quad \omega_0 = \frac{U}{k\Phi}, \quad \omega_n = \omega_0 - \frac{I_n R_{я}}{k\Phi} \quad (!!!)$$

Способ регулирования характеризуется:

- 1) возможно только регулирование в сторону снижения скорости;
 - 2) характеристика двигателя делается мягкой
 - 3) Из-за сопротивления $R_{д}$ возникают дополнительные потери энергии.
- Прост в реализации, но в силу недостатков применяется редко.

Регулирование скорости изменением магнитного потока ОВ

Так как нормальные машины изготавливаются всегда с некоторым насыщением магнитной цепи, регулирование этим способом осуществляется в сторону уменьшением Φ . Т.е., в соответствии с

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi}, \quad \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{k^2\Phi^2}$$

в сторону увеличения скорости вращения.

Изменение магнитного потока влияет и на ω_0 , и на $\Delta\omega$ (жесткость).



Рис. Электромеханические характеристики при различных Φ .

$I_{кз} = \frac{U}{R}$ не зависит от Φ , $M_{кз} = kI_{кз}\Phi$, зависит от Φ

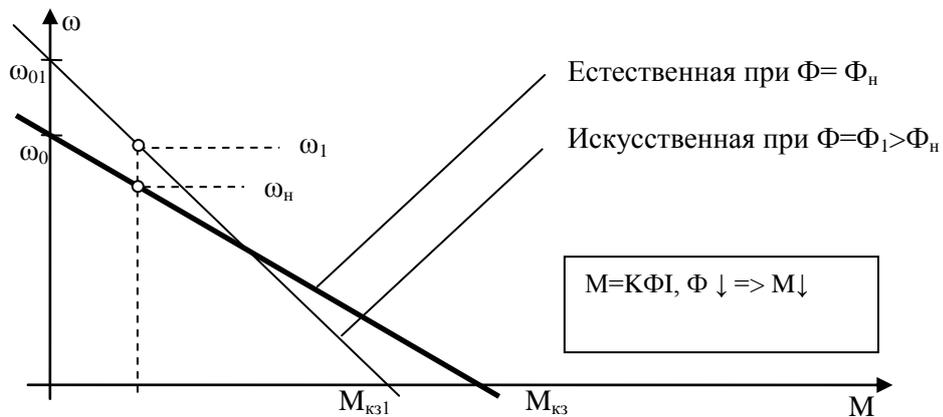


Рис. Механические характеристики при различных магнитных потоках.

Обычно двигатели можно регулировать вверх только на 25-30% выше номинальной скорости из соображений механической прочности.

Этот способ регулирования скорости имеет следующие особенности:

- 1) регулирование скорости в сторону повышения от номинальной.
- 2) Для изменения потока вводят дополнительные сопротивления. При этом существенных потерь энергии нет, так как ток возбуждения составляет всего 2-3% общего тока.
- 3) Прост в реализации

Регулирование скорости изменением напряжения ОЯ

При этом способе регулирования скорости ОЯ и ОВ должны получать питание от отдельных источников. ОЯ от преобразователя напряжения.

Изменить напряжение можно только в сторону уменьшения. Значительное повышение напряжения нарушит условия коммутации, вызовет искрение на коллекторе и может быть опасно для изоляции двигателя.

$$\text{Из } \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{k^2\Phi^2} = \omega_0 - \Delta\omega,$$

следует, что со снижением напряжения U пограничная частота ω_0 уменьшится. Перепад частоты вращения $\Delta\omega$ не меняется (Жесткость постоянна).

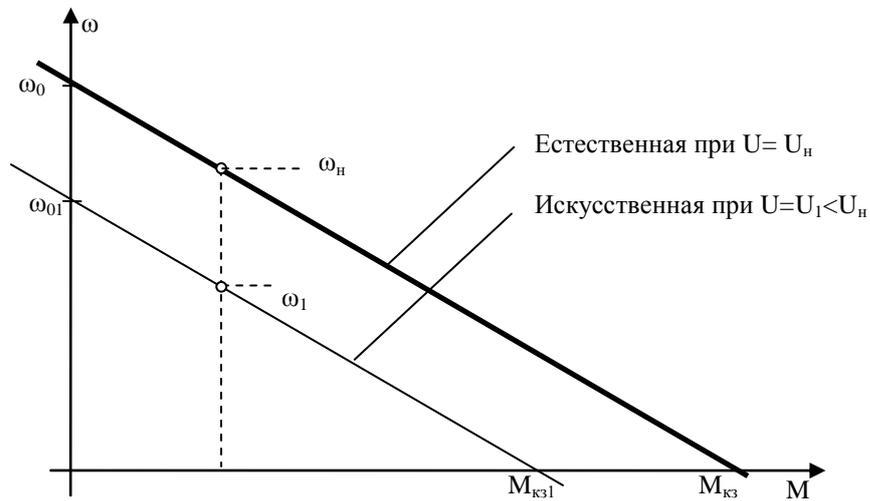


Рис. Механические характеристики при изменении подводимого к ОЯ напряжения

Этот способ регулирования скорости имеет следующие особенности:

- 1) Регулирование возможно только «вниз».
- 2) Жесткость постоянна
- 3) Возможно плавное регулирование
- 4) Для осуществления регулирования необходим преобразователь.

Управление ДПТ с использованием регулируемых преобразователей получил широкое применение. Такой ЭП обеспечивает не только регулирование частоты вращения, но и «мягкий» пуск двигателей без пусковых реостатов. Часто применяется со способом «изменением магнитного потока ОВ».

2.3. Торможение двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Необходимость в тормозных режимах возникает, когда после отключения двигателя от сети необходима быстрая остановка вала. Например, когда требуется быстрое реверсирование.

Существует три электрических способа торможения для ДПТ НВ.

Рекуперативное торможение. Для осуществления рекуперативного торможения необходимо, чтобы скорость якоря превысила скорость идеального ХХ ω_0 .

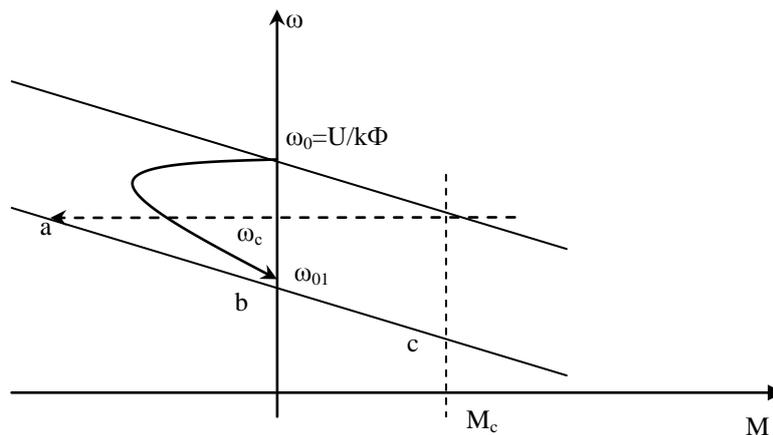


Рис К вопросу о рекуперативном торможении

На практике для применения рекуперативного торможения добиваются снижения ω_0 (до ω_{01}), например, уменьшением напряжения. При этом скорость в первый момент времени в силу инерции остается равной ω_c (Переход в т. а).

В соответствии с основным уравнением движения электропривода $M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$, или

$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c < 0$. Поэтому на участке a-b-c осуществляется торможение.

а) На участке ab $E=k\Phi\omega > U$, $I = \frac{U - E}{R} < 0 \Rightarrow M < 0$, ток и момент меняют знак. ЭДС машины больше

напряжения сети, т.е. двигатель переходит в генераторный режим и отдает энергию в сеть,

б) На участке bc происходит торможение с потреблением энергии.

Рекуперативное торможение – наиболее экономичный вид торможения, так как он сопровождается возвратом энергии в сеть. Является эффективным энергосберегающим средством. Но применим для механизмов с большой инерцией, поскольку только в этом случае возврат энергии является значимым.

Динамическое торможение. Для осуществления динамического торможения обмотку якоря отключают от сети, замыкая на резистор r_r . При этом обмотка возбуждения должна оставаться под напряжением. Двигатель лишается источника питания, но вращаясь по инерции некоторое время сохраняет ЭДС, $E=k\Phi\omega$.

$$I = \frac{U - E}{R}; \quad I = \frac{0 - E}{R}; \quad < 0 \Rightarrow M < 0 \text{ ток, момент становятся отрицательными, двигатель}$$

переходит в генераторный режим. Вырабатываемая при этом электроэнергия не поступает обратно в сеть, а рассеивается на сопротивлении.

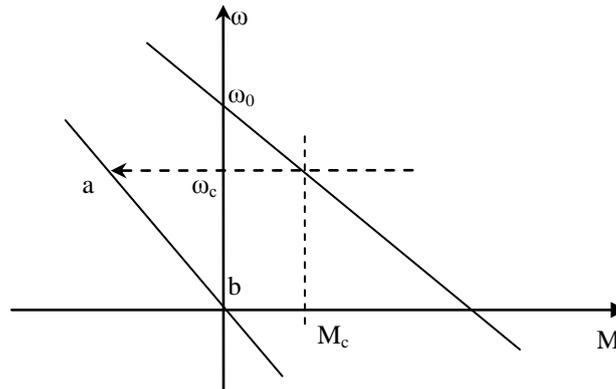


Рис Механическая характеристика при динамическом торможении

Наклон механической характеристики, получающейся при динамическом торможении, сильнее, поскольку сопротивление ОЯ увеличено на r_r .

Частота вращения в начале торможения (а) определяется частотой вращения в конце двигательного режима. Торможение продолжается до полной остановки двигателя (точка b).

При динамическом торможении возникают достаточно большие токи, поэтому необходимо проводить расчет сопротивления, на которое замыкается обмотка якоря, чтобы $I < I_{доп}$.

$$I = \frac{U - E}{R} \Rightarrow I = \frac{-E}{R} \Rightarrow I_{доп} = \frac{-E}{R_я + r_m} \Rightarrow r_m = \frac{E}{I_{доп}} - R_я \approx \frac{U_n}{I_{доп}} - R_я$$

$$I_{доп} = (2 - 2,5)I_{ном}$$

$$E = c\Phi\omega_c = \frac{M_c}{I_c}\omega_c - M, \quad I, \omega - \text{ перед торможением (могут быть } M, I, \omega_{ном}).$$

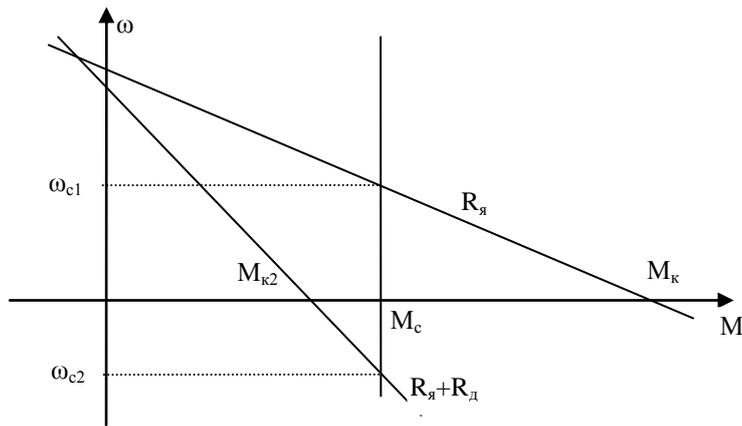
Торможение противовключением.

Торможение противовключением может осуществляться двумя способами:

1) Если активный момент сопротивления превысит пусковой момент, вал двигателя начнет вращение против создаваемого двигателем момента.

(работа в IV квадранте);

Например, включение добавочного сопротивления привело к тому, что M_c стал превышать $M_{кз}$. Скорость с ω_{c1} уменьшится до нуля, затем произойдет реверсирование и новая скорость ω_{c2} будет другого направления.



Способ может использоваться для подъема, спуска груза.

2) Торможение противовключением можно осуществить изменением полярности напряжения на якоре.

Поскольку по инерции якорь продолжит вращение в прежнем направлении, то ЭДС $E=k\Phi\omega$ не изменится, а напряжение станет отрицательным.

$$I = \frac{-U - E}{R}, \text{ т.е. ток, а значит и момент становятся отрицательными.}$$

При этом для уменьшения тормозного тока необходимо вводить добавочное сопротивление (характеристика увеличивает наклон).

В начале торможения скорость вращения равна ω_c . (Точка а)

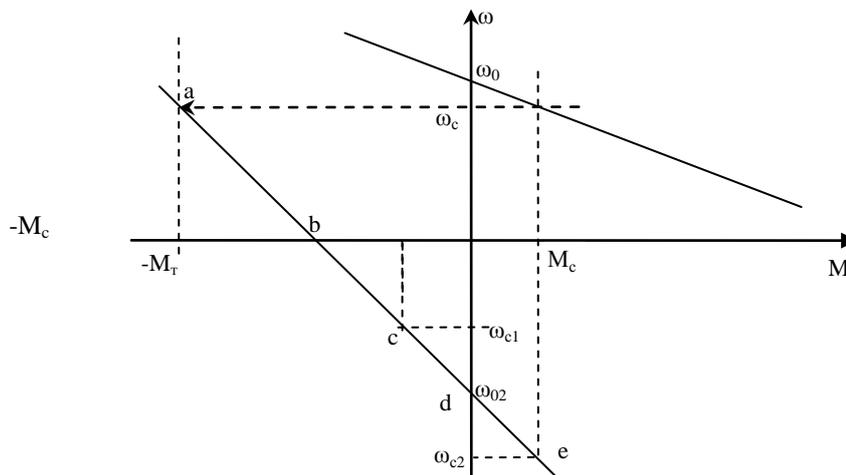


Рис Механические характеристики торможения противовключения.

Частота вращения якоря уменьшается до нуля (а-б).

Если при снижении скорости до нуля (в точке б) цепь якоря не отключить от сети, произойдет реверсирование ДПТ и его якорь продолжит вращение в противоположную сторону, перейдя в двигательный режим (участок bd).

После реверса новый установившийся режим установится на пересечении моментов сопротивления и двигателя. Возможно два варианта:

а) Если момент сопротивления реактивный (создавался силами трения), то он изменит знак, точка пересечения – с, скорость $\omega_{с1}$.

б) Если момент сопротивления активный (создаваемый силами притяжения), то момент не изменит знак, будет помогать вращению, точка пересечения – е, скорость $\omega_{с2}$.

Чтобы избежать реверсирования операцию торможения автоматизируют, и при нулевом значении частоты вращения цепь якоря отключалась от сети.

Сопротивление резистора r_t на которое надо замкнуть цепь якоря при торможении противовключением определяется выражением

$$I = \frac{-U - E}{R} \Rightarrow I = \frac{U + E}{R} \Rightarrow I_{дон} = \frac{U + E}{R_я + r_m} \Rightarrow r_m = \frac{U + E}{I_{дон}} - R_я$$

2.4. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

При включении в сеть ДПТ в начальный момент якорь неподвижен. В этих условиях $E = k\Phi\omega = 0$. Ток якоря (начальный пусковой ток), определяется:

$$I = \frac{U - E}{R} = \frac{U}{R} \quad (*)$$

Величина R невелика, поэтому начальный пусковой ток двигателя в 10-40 раз превышает номинальное значение. Это недопустимо, так как ведет к разрушению коллекторного узла.

При установке добавочного резистора R_{∂} , выбранное сопротивление удовлетворит лишь началу пуска. Как только якорь начнет вращение, в обмотке якоря будет индуцироваться $E = k\Phi\omega$, которая ограничит величину тока якоря.

$$I = \frac{U - E}{R}$$

Чтобы поддержать пусковой ток, а следовательно и пусковой момент на прежнем уровне, необходимо уменьшать сопротивление резистора R_{∂} .

С этой целью в цепь якоря включают пусковой реостат. Переключение ступеней пускового реостата осуществляется посредством контакторов, которые своими контактами KM_1, KM_2, KM_3 шунтируют резисторы пускового реостата.

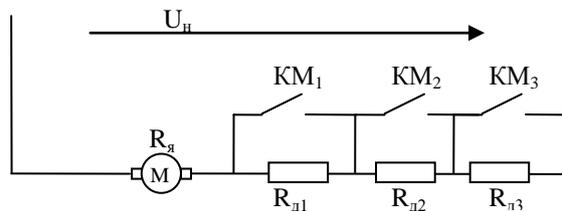


Рис. Включение пусковых резисторов

В процессе пуска сила тока якоря двигателя изменяется от значения I_1 , называемого начальным пусковым током, до значения I_2 – тока переключения.

Значения пусковых токов обычно принимают равными:

$$\begin{aligned} I_1 &= (1,3 \sim 2,5)I_{ном} \\ I_2 &= (1 \sim 1,3)I_{ном}. \end{aligned} \quad (**)$$

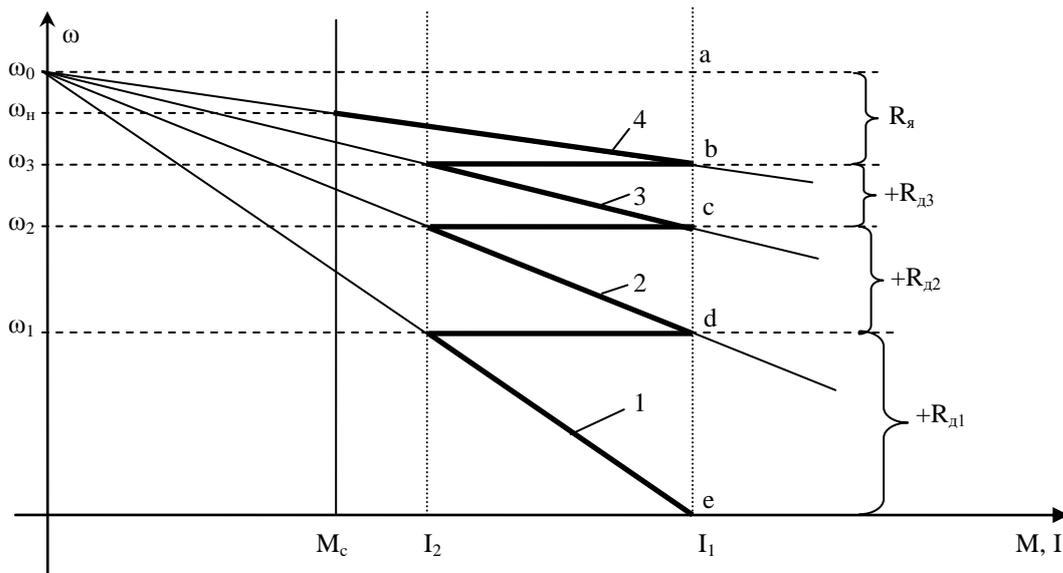


Рис. Пусковая диаграмма ДПТ НВ

Пуск начинается с первой ступени пускового реостата при всех введенных резисторах (линия 1). При этом сопротивление якорной цепи

$$R_1 = R_{я} + R_{\partial 1} + R_{\partial 2} + R_{\partial 3}$$

Якорь двигателя разгоняется, а пусковой ток (момент) убывает.

$$E = k\Phi\omega, I = \frac{U - E}{R}$$

При достижении частоты вращения ω_1 ток уменьшается до значения переключений I_2 , при этом срабатывает контактор КМ1 и своими контактами шунтирует резистор $R_{д1}$. Сопротивление пускового реостата уменьшается

$$R_2 = R_{я} + R_{\partial 2} + R_{\partial 3}$$

а ток увеличивается до значения I_1 . Пуск продолжается по механической характеристике 2. И так аналогично до выхода на естественную характеристику 4. Полученная система графиков называется *пусковой диаграммой*.

Эта диаграмма позволяет рассчитывать сопротивления резисторов пускового реостата графическим способом.

Допустим, сопротивление R вызывает наклон характеристики.

$$\omega = \frac{U_n}{k\Phi} - \frac{I_n R}{k\Phi} = \frac{U_n}{k\Phi} \left(1 - \frac{I_n R}{U_n}\right) = \omega_0 \left(1 - \frac{R}{R_n}\right) = \omega_0 - \omega_0 \frac{R}{R_n} \Rightarrow \frac{R}{R_n} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$$

R_n – нет такого сопротивления. Для сокращения записи.

Тогда можно получить:

$$R_{\partial 1} = R_{ном} \frac{\omega_1 - 0}{\omega_0} = R_{ном} \frac{de}{ae}, R_{\partial 2} = R_{ном} \frac{\omega_2 - \omega_1}{ae} = R_{ном} \frac{cd}{ae}, R_{\partial 3} = R_{ном} \frac{bc}{ae}$$

2.5. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.

В двигателе ПВ ОВ и ОЯ соединяются последовательно.

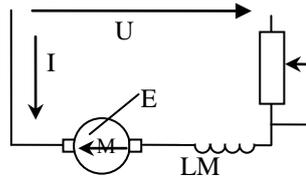


Рис. Схема включения ДПТ ПВ

В ДПТНВ поток создавался независимой обмоткой возбуждения. В ДПТПВ магнитный поток создается током, который проходит через якорь, следовательно, поток Φ зависит от нагрузки двигателя $I_a = I$.

Выведенное ранее уравнение для ДПТ НВ: $\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi}$ остается в силе, но магнитный поток Φ

будет не постоянной величиной, а функцией тока I , определяемой кривой намагничивания двигателя.

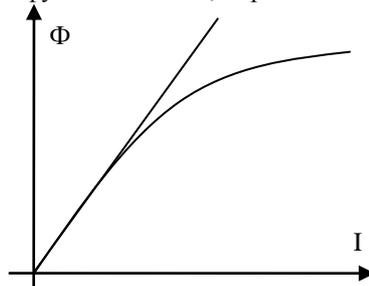


Рис. Кривая намагничивания

Так как зависимость $\Phi = f(I)$ не имеет точного аналитического выражения, невозможно получить точное уравнение механической характеристики ДПТПВ.

Для анализа выведем приближенные уравнения, сделав допущение $\Phi = \alpha I$, т.е. заменить кривую намагничивания прямой линией.

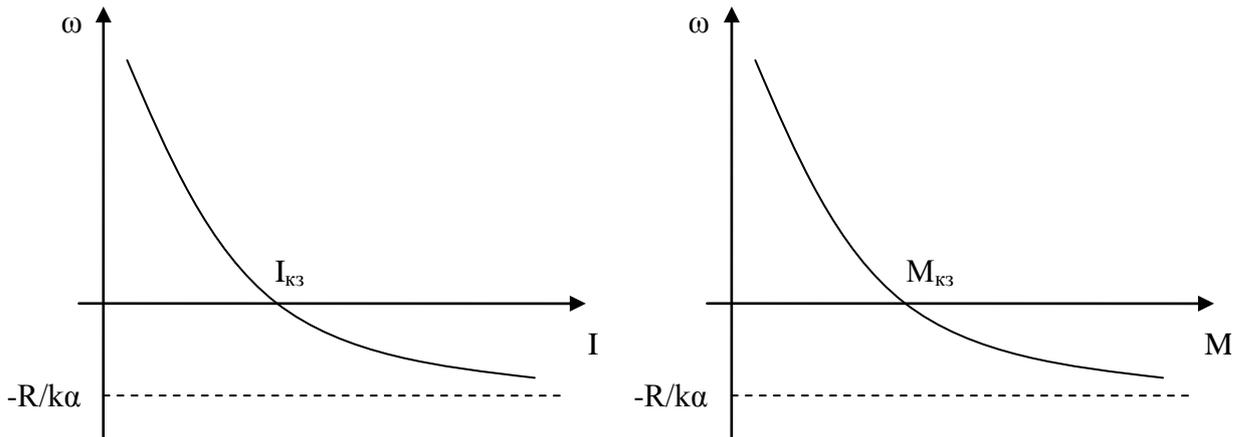
$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{IR}{k\alpha I} = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha} = \frac{A}{I} - B \text{ - э/мех характеристика}$$

Т.е. уравнение имеет вид гиперболы, опущенной по оси Y на B.

Для получения механической характеристики воспользуемся $M = k\Phi I = k\alpha I^2$.

$$\text{Тогда } I = \sqrt{\frac{M}{k\alpha}} \text{ и получим уравнение механической характеристики} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{IR}{k\alpha I} = \frac{U\sqrt{k\alpha}}{k\alpha\sqrt{M}} - \frac{R}{k\alpha} = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha} = \frac{A'}{\sqrt{M}} - B \quad (2)$$



Учтем насыщение магнитной цепи, $\Phi = \alpha I$. При наличии насыщения поток Φ увеличивается все меньше при росте тока. Т.е. α уменьшается с ростом тока.

Тогда приблизительный вид характеристик.

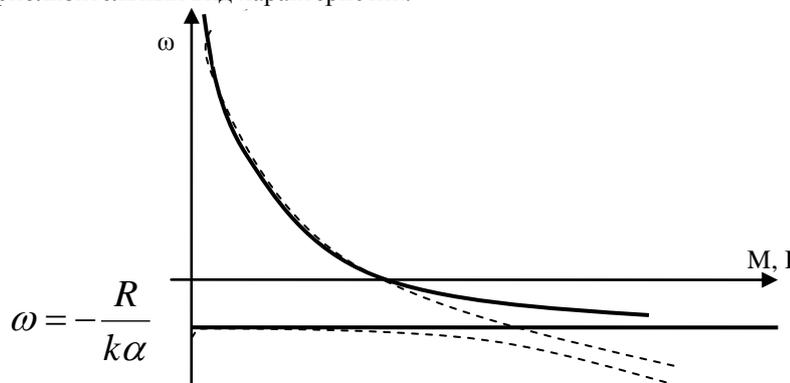


Рис. Механическая характеристика ДПТ ПВ.

Из уравнений видно, что характеристики получаются «мягкими», скорость резко падает с увеличением нагрузки. При малых нагрузках (токах) скорость резко повышается, что создает опасность «разноса» двигателя. Поэтому работа двигателя при малых нагрузках, а тем более на ХХ недопустима.

Полученные уравнения характеристик являются приближенными. Поэтому в инженерных расчетах используют универсальные характеристики ДПТ ПВ.

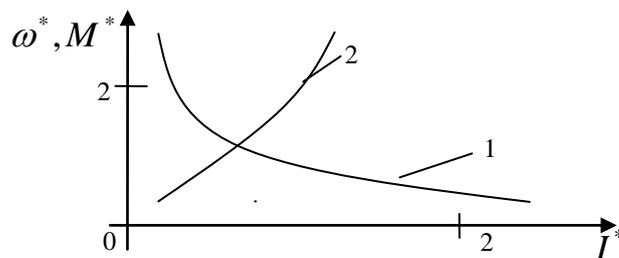


Рис. Естественные универсальные характеристики ДПТ ПВ

Кривые представляют собой зависимости относительных скоростей $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_{ном}}$ (кривая 1) и момента

$$M^* = \frac{M}{M_{ном}} \quad (\text{кривая 2}) \quad \text{от относительного тока} \quad I^* = \frac{I}{I_{ном}}.$$

Задаются значением I , определяют I^* . По I^* определяют значения M^* , ω^* .

А по последним M и ω .

Режимы работы ДПТ ПВ

Для ДПТ ПВ не существует режима ХХ и режима рекуперативного торможения, так как характеристики во втором квадранте не проходят. Физически это объясняется так: для отдачи энергии в сеть необходимо, чтобы ЭДС двигателя была больше напряжения в сети. $E > U$.

$E = k\Phi\omega$. Т.е. необходимо увеличивать скорость, снижая нагрузку.

В этом же двигателе при снижении нагрузки, снижается и магнитный поток,

который зависит от тока. $\Phi = \alpha I$.

Поэтому ЭДС $E = k\Phi\omega$ не может достигнуть значительной величины. Остальные режимы аналогичны режимам ДПТ НВ.

Выражение потребляемой мощности двигателем с учетом (1):

$$P = UI = U \sqrt{\frac{M}{k\alpha}} = D\sqrt{M}$$

где D – постоянный коэффициент пропорциональности.

Т.е. у ДПТ ПВ при изменении момента нагрузки потребляемая мощность P и ток якоря I меняются в меньших пределах, чем у ДПТ НВ. При увеличении момента нагрузки в 4 раза, потребляемая мощность увеличивается в 2 раза, а у ДПТ НВ тоже в 4. Это свойство ДПТ ПВ определяет область их применения – привод механизмов с тяжелыми условиями пуска и работы: частые пуски, реверсы, перегрузки. Двигатели с последовательным возбуждением применяются в качестве тяговых двигателей электровозов, поездов метрополитена, трамвая, электрических подъемных кранов.

Двигатели СВ имеют две обмотки независимую LM1 и последовательную LM2.

Приобретают свойства ДПТ ПВ и ДПТ НВ. Возможно рекуперат. Торм и ХХ.

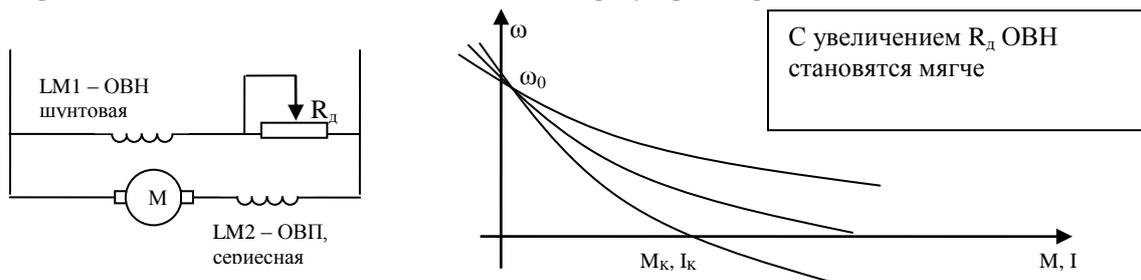


Рис. Схема включения и мех. характеристики ДПТ СВ

Механические характеристики ДПТ СВ строят также с помощью универсальных естественных характеристик. Наличие двух ОВ увеличивает габариты, массу. Применяются, когда требуется сочетание хороших регулировочных свойств и устойчивой работы при резких колебаниях нагрузки.

Однако и здесь необходимо технико-экономическое обоснование.

2.6. Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.

1. Как видно из $\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha}$, увеличение сопротивления якорной цепи будет уменьшать скорость вращения. При этом горизонтальная асимптота сместится вниз.

Регулирование только вниз, получаемые характеристики мягче, не плавное, но прост в реализации (последовательно в ОЯ добавляют сопротивление).

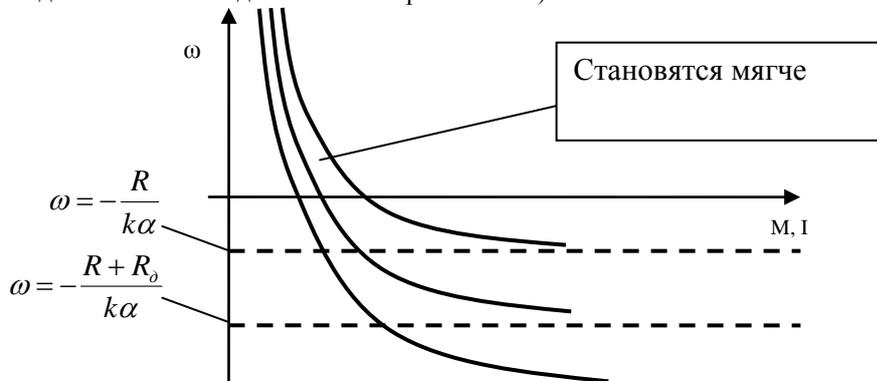


Рис. М. характеристики при регулировании скорости изменением R ОЯ

2. С изменением напряжения ОЯ ДПТ ПВ скорость также изменится (2). При этом горизонтальная асимптота останется прежней.

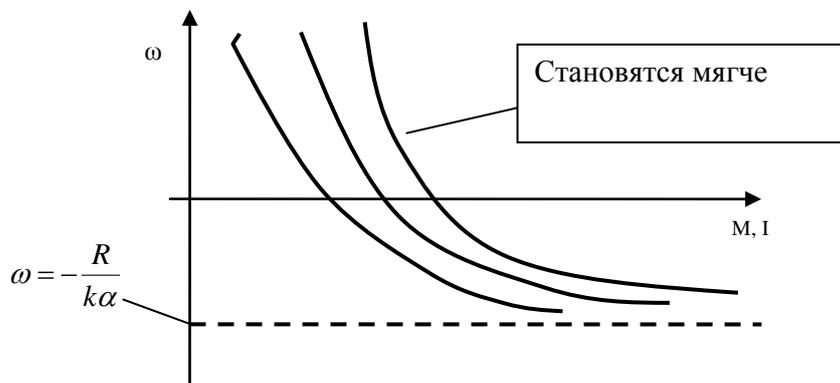


Рис. М. характеристики при регулировании скорости изменением напряжения ОЯ

Регулирование только вниз, характеристики становятся мягче. Необходим специальный преобразователь напряжения, (управляемый выпрямитель).

3. Регулирование скорости изменением потока возбуждения.

Необходимо изменять поток возбуждения при том же токе в ОЯ. При шунтировании ОВ (KM1 замкнут, KM2 разомкнут), только часть тока I проходит через LM ($I_{я} = I$, $I_{ов} = I - I_{ш1}$). Уменьшение магнитного потока при уменьшении тока ОВ вызовет увеличение скорости.

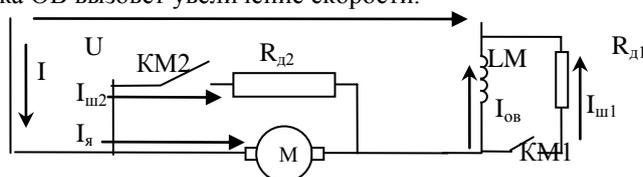


Рис. Схема для регулирования потока возбуждения шунтированием ОВ или ОЯ

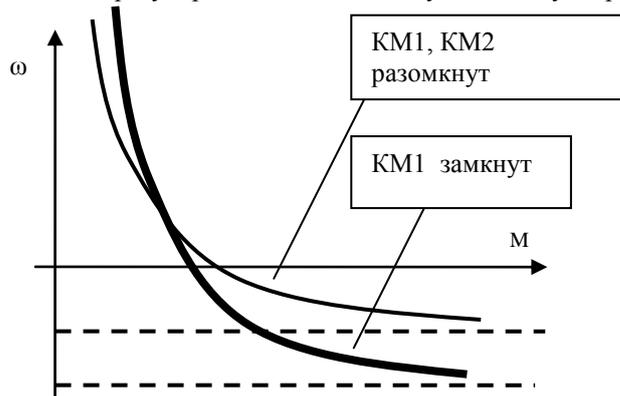


Рис. . М. характеристики при регулировании скорости шунтированием ОВ

Возможно регулирование только вверх, характеристика становится мягче, нет существенных потерь энергии.

4. Регулирование скорости шунтированием ОЯ. При шунтировании ОЯ (KM2 замкнут, KM1 разомкнут) по ОЯ протекает меньший $I_{я} = I - I_{ш2}$. При этом $I_{ов} = I_{я} + I_{ш2}$, т.е. ток ОВ содержит постоянную составляющую, которая не зависит от нагрузки $I_{ш2}$. При этом ДПТ ПВ приобретает свойства ДПТ НВ. Характеристики приобретают большую жесткость, пересекают ось ординат.

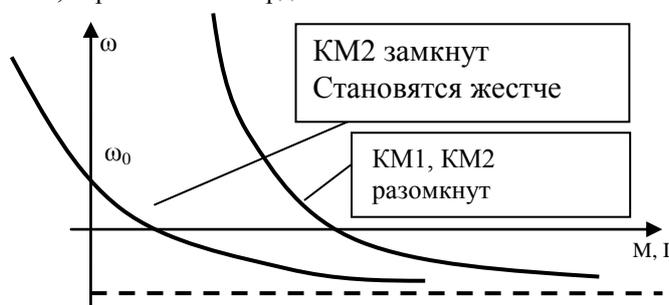


Рис. М. характеристики при регулировании скорости шунтированием ОЯ

2.7. Торможение двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

Динамическое торможение осуществляется по схеме самовозбуждения. Должно быть остаточное магнитное поле в двигателе.

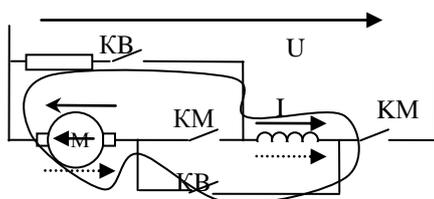
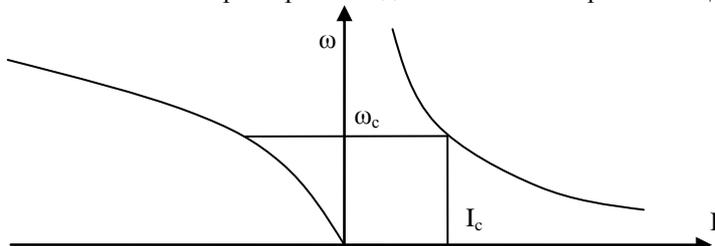
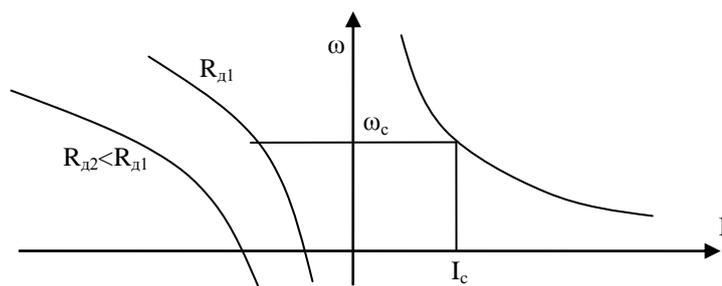


Рис Схема и м. характеристика динамического торможения ДПТ ПВ.



Необходимо сохранить направление тока в ОВ во избежания размагничивания (размыкаем КМ, замыкаем КВ). Динамическое торможение малоэффективно (на низких скоростях малый тормозной момент). Применяют редко.



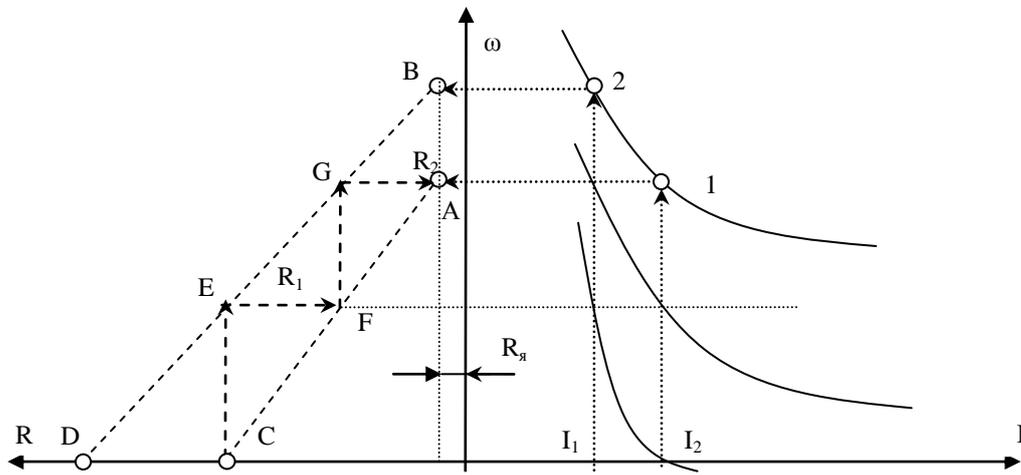
Для быстрого торможения и регулирования скорости в процессе торможения используют торможение противовключения. Для **торможения противовключением** необходимо изменить полярность напряжения ОЯ при сохранении полярности ОВ. При этом изменится знак момента двигателя. Для ограничения тока в этом режиме вводится R_d .

Если желательно поддерживать тормозной момент в определенных пределах то по мере снижения скорости дополнительно уменьшают сопротивления ступенями, как это осуществляется при пуске. Способ часто применяется.

Пуск, торможение и реверсирование ДПТ СВ могут осуществляться теми же способами, что и двигателей с параллельным и последовательным возбуждением. Для двигателя смешанного возбуждения часто осуществляется динамическое торможение при включенной только одной обмотке параллельного возбуждения. При этом механические характеристики получаются как у двигателя с независимым возбуждением в виде прямых линий, проходящих через начало координат. В приводах, где требуется быстрое торможение, для увеличения магнитного потока одновременно с обмоткой параллельного возбуждения включают и обмотку последовательного возбуждения. Но, вследствие насыщения магнитной цепи это незначительно увеличивает магнитный поток и тормозной момент.

2.8. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

Расчет пусковых сопротивлений этих двигателей составляет определенные трудности, обусловленные нелинейностью их механических характеристик. Поэтому наибольшее распространение получили графические методы. Рис. 4.11. Строят график $\omega=f(I)$, определяют I_1, I_2 (аналогично ДПТ НВ), получают А, В. Слева оси ординат – ось сопротивлений R_y . На оси сопротивлений отмечают две точки С, D. $R_1=U/I_1, R_2=U/I_2$. Соединив А и С, В и D, из точки С проводят линию СЕFGА. Число горизонтальных отрезков определяет число ступеней пускового реостата, а длина отрезков в масштабе сопротивлений определяет сопротивления резисторов. Если ломаная линия не приходит в точку А, корректируют значение тока I_2 .



2.9. Схема включения и статические характеристики асинхронного двигателя.

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Асинхронные двигатели широко применяются в промышленности благодаря простоте их конструкции, надежности и низкой стоимости.

Трехфазный АД имеет обмотку статора, подключаемую к трехфазной сети переменного тока с напряжением U и частотой f , и обмотку ротора, которая может быть выполнена в двух вариантах. АД с фазным ротором (выполнение обычной трехфазной обмотки из проводников с выводами на три контактных кольца). АД с короткозамкнутым ротором – выполнение обмотки заливкой алюминия в пазы ротора (рис 5.1). Однофазная схема замещения (рис. 5.1)

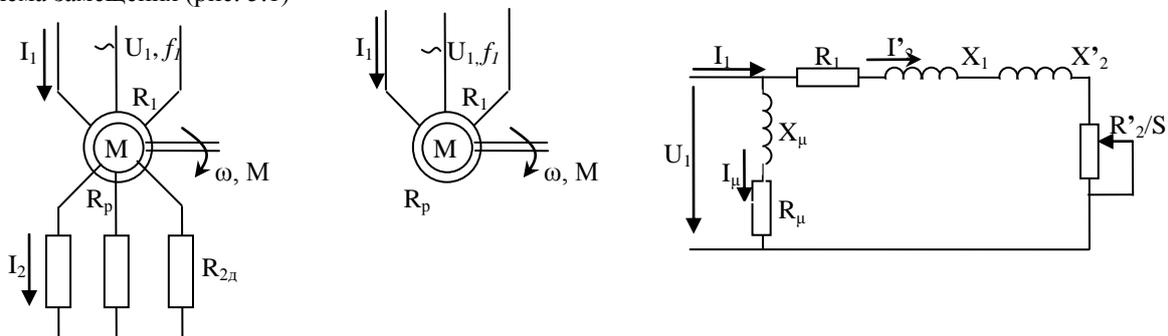


Рис Схема включения АД с фазным (а), короткозамкнутым ротором (б), Г-образная однофазная схема замещения АД

U_1 – действующее значение напряжения, приложенного к одной фазе обмотки статора, частотой f_1 ;



Рис Фазное и линейное напряжения

I_μ , I_1 , I_2 – фазные токи соответственно намагничивания, обмотки статора и ротора (приведенный к числу витков обмотки статора);

R_1 – суммарное активное сопротивление фазы статора;

$R'_2 = R'_p + R'_{2л}$ – суммарное активное сопротивление фазы ротора, приведенное к числу витков обмотки статора.

Включает в себя R'_p , – собственное сопротивление обмотки ротора (приведенное); $R'_{2л}$ – добавочное активное сопротивление (приведенное).

x_1 , x'_2 – индуктивные сопротивления рассеяния соответственно фазы обмотки статора, обмотки ротора (приведенное к числу витков обмотки статора);

R_μ – активное сопротивление, учитывающее потери в стали магнитной системы при перемагничивании;

x_μ – индуктивное сопротивления контура намагничивания.

При включении статора в сеть трехфазного тока его обмотки создают магнитное поле Φ , которое вращается со скоростью n_1 . Силовые линии этого поля пересекают обмотку ротора и индуцируют в ней ЭДС E_2 .

Величина ЭДС пропорциональна разности скоростей поля статора и ротора:

$$E_2 \sim (n_1 - n)\Phi \quad (\#)$$

По обмотке ротора под действием ЭДС E_2 потекут токи, создающие магнитное поле ротора. Магнитное поле ротора взаимодействует с вращающимся полем статора, возникает вращающийся момент. Начав движение, ротор будет «догонять» поле статора. Но у асинхронного двигателя всегда $n < n_1$. Иначе при равенстве исчезает ЭДС E_2 , токи, и магнитное поле ротора, и начинается торможение.

Отставание ротора от магнитного поля статора называется скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\% = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} 100\% \quad (1)$$

Отметим, что в схеме замещения зависимость R'_2 от скольжения s не соответствует физической сущности электромагнитных процессов. В действительности от скольжения зависит индуктивное сопротивление ротора X'_2 . Так, $X'_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2$ (*). В то же время известно, что частота f_2 ЭДС E_2 в обмотке ротора зависит от скольжения $f_2 = f_1 s$. Выполненное же преобразование (деление на s) позволило составить схему замещения.

Электромеханическая и механическая характеристика АД.

В отличие от ДПТ электромеханическая характеристика АД представляется в виде зависимости тока ротора от скольжения $I'_2 = f(s)$, а не от скорости ω . Уравнение электромеханической характеристики следует из схемы замещения:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(X_1 + X'_2)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2}} \quad (2)$$

В то же время скольжение однозначно определяет величину скорости:

$$\text{Из (1)} \quad \omega = \omega_0 (1 - s) \quad (3)$$

Поэтому при построении характеристик $I'_2(s)$ отражается и зависимость $I'_2(\omega)$.

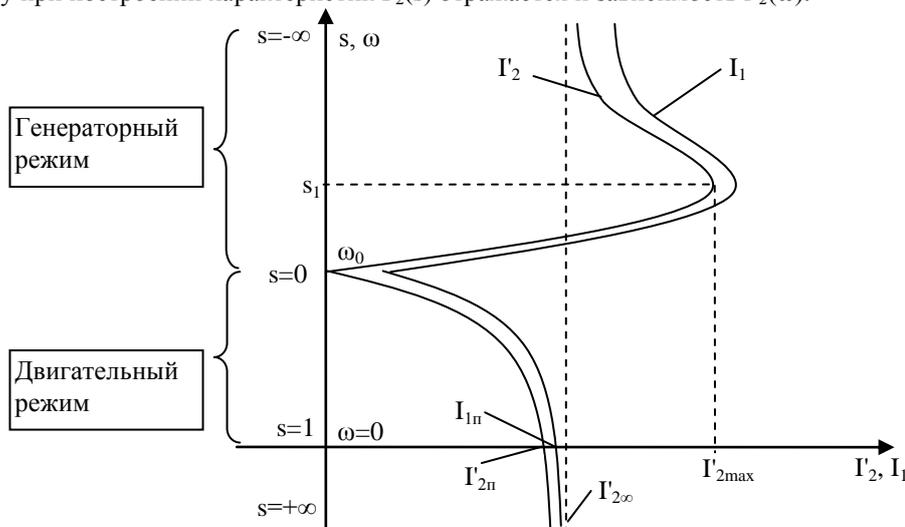


Рис Электромеханическая характеристика

На графике ток I_1 больше тока I_2 в соответствии со схемой замещения на величину тока холостого хода I_μ (первый закон Кирхгофа).

$$I_1 = I_\mu + I'_2$$

Рассмотрим характерные точки электромеханической характеристики:

- 1) Идеальному холостому ходу соответствует скорость вращения ротора $\omega = \omega_0$, скольжение $s = 0$ (ротор и поле статора вращаются синхронно), ток ротора $I'_2 = 0$, статора $I_1 = I_\mu$. Асинхронный двигатель самостоятельно обеспечить этот режим не может. Для создания режима необходимо приводить во вращение с частотой $\omega = \omega_0$ другим двигателем. На схеме замещения этому режиму соответствует разрыв цепи ротора (I'_2).
- 2) Короткому замыканию (режим пуска) соответствует режим, когда $\omega = 0$, скольжение $s = 1$, ток ротора $I'_2 = I'_{2п}$, статора $I_1 = I_{1п}$. Ток $I_{1п}$ называется пусковым током, достигает 5-7 кратного значения от номинального тока.

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(X_1 + X'_2)^2 + (R_1 + R'_2)^2}}, \text{ получили приняв } s=1;$$

3) токи статора и ротора I_1, I_2 достигают своего максимального значения при минимуме знаменателя выражения (2), когда $s = s_1 = -R_2' / R_1 \Rightarrow$

$$I_2' = \frac{U_1}{(X_1 + X_2')}$$

Этот режим наступает при скоростях выше синхронной ω_0 , т.е. в генераторном режиме.

4) При высоких скоростях $\omega = \pm\infty, s = \pm\infty$, значение тока ротора асимптотически приближается к значению

$$I_{2\infty}' = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

Получим выражение для механической характеристики. Потери мощности в цепи ротора (потери скольжения), представляют собой разность электромагнитной и полезной механической мощности:

$$\Delta P_2 = P_{эм} - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s$$

Потери мощности в роторе, выраженные через электрические величины:

$$\Delta P_2 = 3I_2'^2 R_2'$$

$$\Rightarrow M = \frac{3I_2'^2 R_2'}{\omega_0 s}, \text{ подставив в выражение ток (2) получим}$$

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0 s \left[(X_1 + X_2')^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 \right]}$$

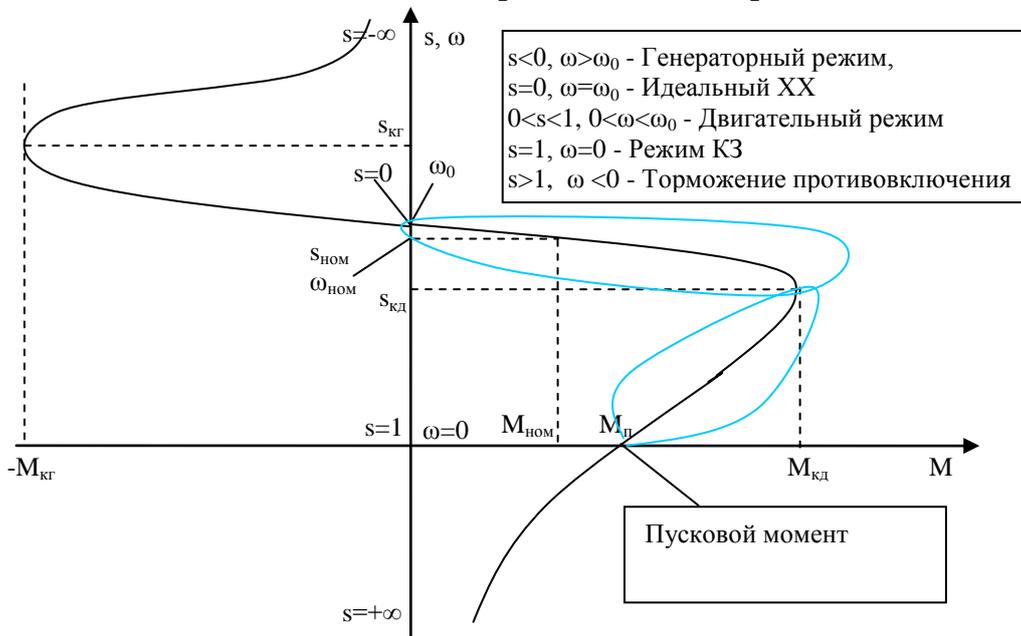


Рис. Механическая характеристика АД

Для определения критического скольжения s_k и момента M_k исследуем полученную зависимость $M(s)$ на

экстремум $\frac{dM}{ds} = 0$ обнаружим две точки.

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$M_k = \pm \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \quad (5) \quad (+ \text{ в двигательном, } - \text{ в генераторном})$$

Разделив (4) на (5) и выполнив преобразования, получим более удобную форму:

$$M = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2as_k}, \text{ где } a = \frac{R_1}{R_2'} \text{ - формула Клосса}$$

Для машин средней и большой мощности можно пренебречь активным сопротивлением статора, тогда $a=0$ и

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k + s}{s} \frac{s}{s_k}} \quad (6)$$

Кроме того, в области малых скольжений можно пренебречь s/s_k , тогда

$$M = \frac{2sM_k}{s_k} \quad (7)$$

Из (6), обозначив $\frac{M_k}{M_{ном}}$ как λ_M можно получить выражения для нахождения s_k :

$$s_k = s_{ном} (\lambda_M \pm \sqrt{\lambda_M^2 - 1})$$

Формула может быть использована для определения s_k по каталожным данным.

Проанализируем особенности механической характеристики АД. Она носит нелинейный характер и состоит из двух частей. Первая – рабочая часть – в пределах скольжения от 0 до $s_{кд}$. Эта часть характеристики близка к линейной и имеет отрицательную жесткость. Здесь момент, развиваемый двигателем, примерно пропорционален токам статора и ротора. Можно использовать выражение (7).

Вторая часть механической характеристики АД при $s > s_{кд}$ – криволинейная, с положительным значением жесткости. Несмотря на то, что ток двигателя по мере роста скольжения увеличивается (рис 5.3), момент, напротив уменьшается.

Из-за нелинейности механической характеристики существует несоответствие между пусковым током (5-7 кратный) и пусковым моментом (0,4-0,5 номинального). Тяжелый пуск.

Рассмотрим процесс пуска.

Пуск начинается с $s=1$, в начале пуска скольжение велико. Индуктивное сопротивление обмотки ротора $X'_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2$ велико и существенно превосходит R'_2 . $X'_2 \gg R'_2$.

ЭДС при этом велика, поскольку $\sim \Phi(n_1 - n)$

Поэтому ток I'_2 тоже велик, но его активная составляющая мала (потому что $\cos\varphi$ низкий). Поэтому и момент, развиваемый двигателем мал.

2) При разгоне двигателя скольжение уменьшается, ЭДС ротора снижается, частота тока f_2 и X'_2 ротора пропорционально уменьшаются.

Соответственно уменьшается полный ток ротора. Активное сопротивление становится соизмеримым с индуктивным, а затем и становится больше. Вследствие повышения $\cos\varphi$, активная составляющая тока растет, возрастает и момент двигателя.

Т.е. своеобразие механической характеристики АД определяется зависимостью индуктивного сопротивления ротора от скольжения.

2.10. Регулирование скорости асинхронного двигателя

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (2 часа).

$$M_K = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \quad (1)$$

$$s_K = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad p - \text{число пар полюсов} \quad (3)$$

1. Регулирование частоты вращения АД путем включения добавочных резисторов в цепь статора.

При изменении $R_1 = R_c + R_{1д}$, величины M_K , s_K уменьшаются, а ω_0 неизменна. Способ мало пригоден для регулирования – перегрузочная способность, характеризуемая M_K снижается, поэтому способ обеспечивает малый диапазон изменения момента; добавляются потери мощности на сопротивлениях. Применяется для ограничения пусковых токов в АД КЗ.

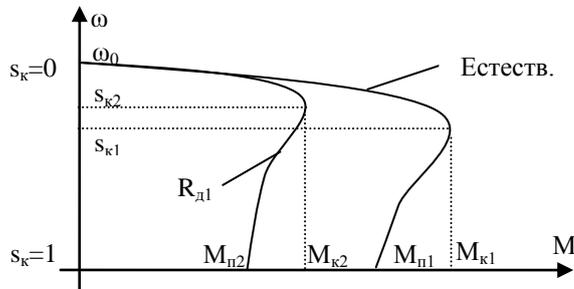


Рис. Механическая характеристика при включении R_d в цепь статора

2. Регулирование координат АД путем включения добавочных резисторов в цепь ротора.

При изменении $R'_2 = R'_p + R'_{2d}$, M_k , ω_0 неизменны. s_k прямо пропорциональна R'_2 (рис. 2). Практически s_k можно сделать любым.

Недостатки: снижения жесткости характеристик, потери энергии на сопротивлениях (хоть и не такая большая как в первом способе), ступенчатость регулирования скорости. Регулирование только вниз. Только для АД с ФР.

Достоинства: возможность увеличения пускового момента до величины критического облегчает пуск.

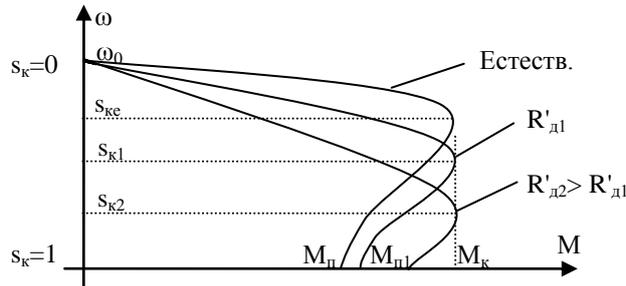


Рис. Механическая характеристика при включении R_d в цепь статора

3. Регулирование координат АД путем изменения напряжения, подводимого к обмотке статора.

Способ позволяет осуществить регулирование координат с хорошими показателями, обеспечить экономичный режим работы АД. (**КЗ, ФР**)

Для регулирования координат АД между сетью переменного тока и статором двигателя включен регулятор напряжения (тиристорный). С помощью управляющего сигнала напряжение изменяется от нуля до номинального. При этом частота напряжения на двигателе не изменяется и равна стандартной (50 Гц).

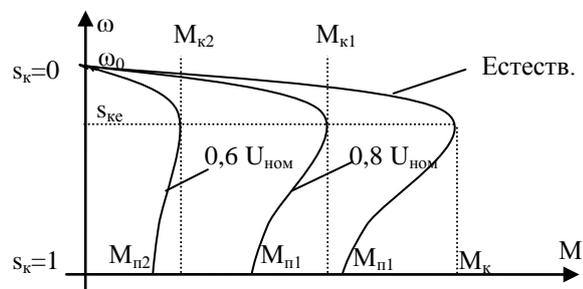
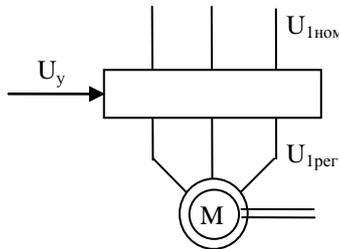


Рис Механическая характеристика при изменении напряжения ОС

Регулирование напряжения на статоре не приводит к изменению скорости ω_0 , и не влияет на критическое скольжение. Существенно меняется критический момент, и соответственно перегрузочная способность. M_k уменьшается пропорционально квадрату напряжения. Диапазон регулирования поэтому очень мал. В настоящее время преимущественно используются тиристорные регуляторы напряжения.

4. Регулирование координат АД изменением частоты питающей сети. Данный способ, называемый частотным регулированием, применяется в первую очередь для регулирования скорости, широко применяется в настоящее время. Принцип его заключается в том, что изменяя частоту f_1 питающего АД напряжения можно в соответствии с (3) изменять скорость идеального ХХ (скорость поля статора). Частотный способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, получаемые характеристики обладают высокой жесткостью.

Если рассмотреть выражение (1) для M_k , учитывая что $R_1 \ll X$ можно установить, что $M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0(X_1 + X_2)}$.

Поскольку $x \sim f$, $\omega_0 \sim f \Rightarrow M_k = C \frac{U_1^2}{f_1^2}$. Для поддержания величины M_k (и \Rightarrow перегрузочной способности)

одновременно с частотой необходимо изменять и подводимое к нему напряжение.

Рациональный закон изменения при этом зависит от характера нагрузки M_c . При почти неизменной нагрузке закон: $U_1/f_1 = const$. Для вентиляторов, насосов $U_1/f_1^2 = const$. И т.п. Таким образом, при реализации частотного способа регулирования скорости АД 2 используется преобразователь частоты, который позволяет также регулировать напряжение на его статоре. Рис 5.5.4

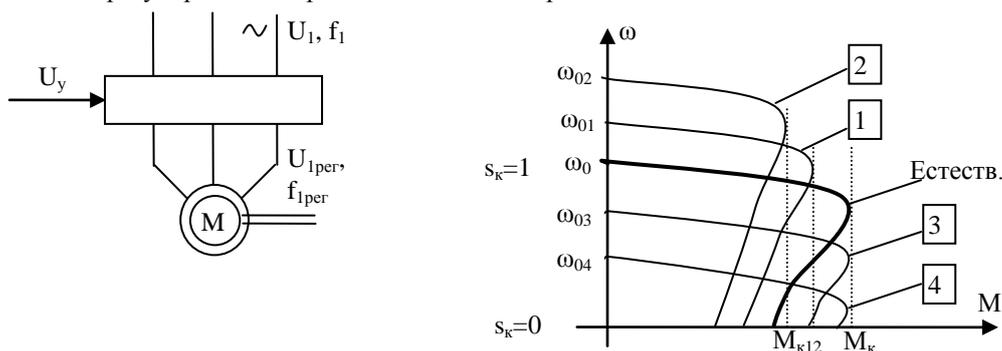


Рис Механическая характеристика при изменении частоты питающей сети

Рассмотрим механические характеристики для двух областей частот:

Область частот $f < f_{ном}$. (Характеристики 3, 4) M_k постоянен, ω_0 снижается.

Область частот $f > f_{ном}$. (Характеристики 1, 2).

В соответствии с законом $\frac{U}{f} = const$ при повышении частоты выше номинальной, необходимо

повышать напряжение выше номинального, что недопустимо по условиям нормальной работы. Поэтому регулирование скорости в этой области производится при $U=const$, поэтому M_k уменьшается.

Данный способ наиболее перспективен. Для АД КЗ, ФР

2.11. Торможение асинхронного двигателя.

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Рассмотрим рекуперативное (генераторное) торможение (рис) Условием перехода АД в генераторный режим является повышение частоты вращения ротора выше магнитного поля статора ω_0 . В этих условиях момент АД становится отрицательным (рис), а вырабатываемая энергия отдается в сеть. Практически этот режим можно получить, мгновенно уменьшив скорость поля статора ω_0 во время работы АД. Из выражения $\omega_0 = 60f_1/p$ видно, что сделать это можно двумя способами – изменением числа пар полюсов или частоты.

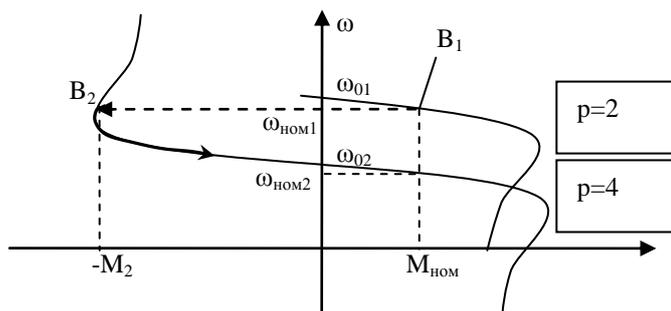


Рис. Режим рекуперативного торможения АД

Например, изменение числа пар полюсов возможно в двухскоростном двигателе, с двумя обмотками. Также можно изменить частоту f_1 при питании АД от преобразователя частоты. При снижении частоты до ω_{02} в начальный момент под действием сил инерции ротор двигателя продолжает вращение с прежней частотой, но режим двигателя переходит в B_2 . Момент становится отрицательным $-M_2$, т.е. тормозящим и частота уменьшится до $\omega_{ном2}$.

2. Динамическое торможение. Этот режим торможения наступает в трехфазном АД при отключении двигателя от сети переменного тока и подключении его к источнику питания постоянного тока (1 на 2). При этом постоянный ток, проходя по обмотке статора, создаст неподвижное магнитное поле. Взаимодействие поля с обмоткой ротора создаст на роторе тормозной электромагнитный момент, направленный против вращения ротора. При торможении механическая энергия преобразуется в электрическую, которая расходуется на нагрев

обмотки ротора. В АД с ФР выбором R_d обеспечивается большой тормозной момент (по мере торможения уменьшают R_d).

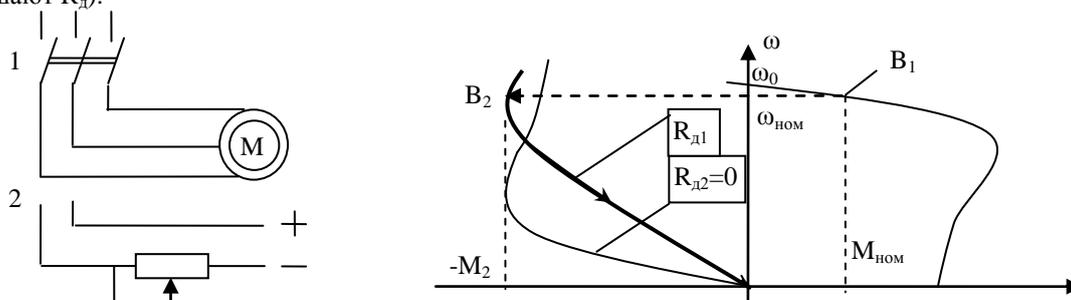


Рис Режим динамического торможения

3. Торможение противовключения. Позволяет получить большие тормозные моменты. Применяют при необходимости быстрой остановки АД. Для создания режима достаточно у работающего АД изменить направление вращения поля статора путем переключения двух фазных проводов. Например, ABC->ACB.

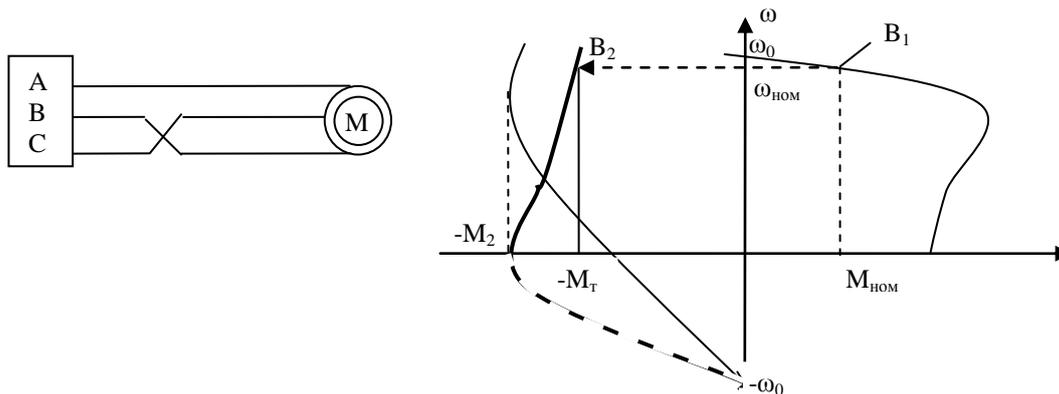


Рис Режим торможения противовключения

Рабочая точка при таком переключении переместится из B_1 в B_2 . В результате на ротор двигателя будет действовать тормозной момент $-M_T$, под действием которого скорость уменьшится до нуля. При $\omega=0$ АД необходимо отключить от сети, иначе произойдет реверсирование. В АД ФР тормозной момент можно регулировать введением в цепь ротора добавочного резистора. При этом величина R_d не влияет на M_k , а влияет на величину критического скольжения s_k . Наиболее эффективным получается торможение противовключения с величиной $s_k=1,47$. При такой величине среднее значение тормозного момента при изменении скорости от номинальной до нуля максимально.

2.12. Ограничение тока при пуске асинхронного двигателя

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Ранее было установлено, что пуск АД сопровождается повышением токов в обмотках статора в 5-7 раз выше номинального значения, пусковой момент при этом 0,4-0,5 номинального момента. Необходимо увеличить M_n , снизить токи.

При пуске АД КЗ используют –

- 1) прямой пуск для АД малой, а иногда средней мощности.
- 2) Для АД КЗ средней, большой мощности применяют пуск с пониженным напряжением. Но при этом снижается пусковой, критический момент. Применяется лишь с небольшой нагрузкой, чтобы $M_n > M_c$.
- 3) Включение добавочных сопротивлений в цепь обмотки статора. Потери.

Для снижения пусковых токов и увеличения момента в АД с ФР в цепь ротора включают добавочные активные сопротивления.

Механические характеристики АД при работе на разных ступенях пускового реостата представлены на рис.

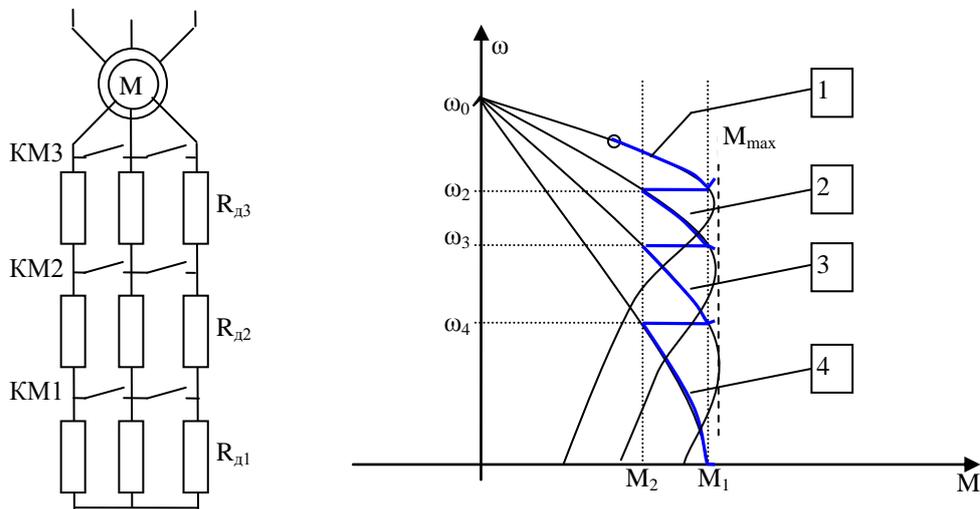


Рис 5.6. Схема пуска АД в три ступени и механические характеристики при пуске

Сопротивления ступеней реостата и моменты времени их переключения подобраны таким образом, что в процессе пуска момент двигателя меняется от наибольшего значения $M_1=(0,7-0,85)M_k$ до значения $M_2=(1-1,2)M_{ном}$. M_1 – пусковой момент, M_2 – момент переключения.

Пуск двигателя происходит аналогично ДПТ НВ.

При выборе числа ступеней m пускового реостата следует помнить, что с увеличением ступеней пуск мягче, но возрастает продолжительность пусковых операций. Обычно $m=2-4$.

2.13. Схема включения и статические характеристики синхронного двигателя

Лекция проводится в интерактивной форме: лекция-беседа, лекция с разбором конкретных ситуаций (1 час).

Статор СД, схема включения которого приведена на рис. 5.13а выполняется аналогично статору АД с трехфазной обмоткой, подключаемой к сети переменного тока. Ротор СД имеет ОВ и пусковую короткозамкнутую обмотку. Короткозамкнутая обмотка – для пуска, который происходит аналогично АД. При достижении подсинхронной скорости, ток подается в ОВ и СД втягивается в синхронизм с сетью.

ОВ получает питание от источника постоянного тока – генератора постоянного тока или от управляемого тиристорного выпрямителя.

ГПТ (2) установлен на одном валу с СД (1). Регулирование тока возбуждения СД $I_{вд}$ осуществляется изменением с помощью резистора (3) тока $I_{вв}$ возбуждения возбудителя 4. Отметим, что в современных схемах АВР СД широко применяются тиристорные управляемые выпрямители.

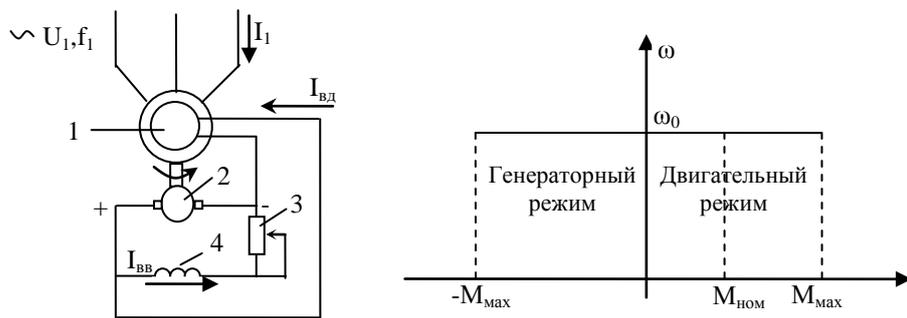
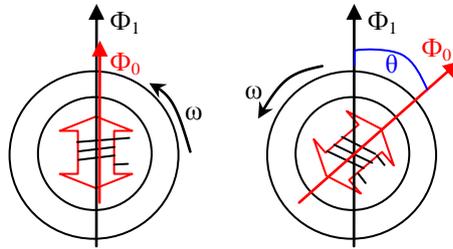


Рис. Схема включения и механические характеристики СД

Вращающий момент СД обусловлен взаимодействием вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора (аналогично АД), и магнитного поля, создаваемого ОВ. Взаимодействие этих полей может создать постоянный по направлению вращения момент только в том случае, когда ротор будет вращаться со скоростью магнитного поля $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$, нет скольжения.



Механическая характеристика представляет собой прямую линию до некоторого максимального момента нагрузки M_{max} , превышение которого приводит к выпаданию СД из синхронизма, т.е. к нарушению синхронного вращения ротора и магнитного поля.

При отсутствии нагрузки векторы поля статора Φ_1 и ротора Φ_0 совпадают в пространстве и совместно вращаются со скоростью ω_0 . При появлении на валу двигателя момента M_c векторы расходятся на угол θ . Максимальный момент M_{max} будет при $\theta=\pi/2$. Если нагрузка на валу будет больше M_{max} , то СД выпадет из синхронизма.

Момент СД представляет собой синусоидальную функцию угла θ :

$$M = \frac{3U_{\phi} E \sin \theta}{\omega_0 x_1} = M_{max} \sin \theta, \text{ где}$$

U_{ϕ} – фазное значение напряжения сети, E – ЭДС в обмотке статора СД; x_1 – индуктивное сопротивление фазы обмотки СД;

Для определения максимального момента M_{max} , до которого сохраняется синхронная работа СД с сетью, служит угловая характеристика СД. Она отражает зависимость момента M от угла сдвига θ .

Номинальные значения угла $\theta_{ном}$ составляют 25-30°, им соответствуют номинальные момент $M_{ном}$. Как правило, $M_{max}/M_{ном}=2 \dots 2,5$.

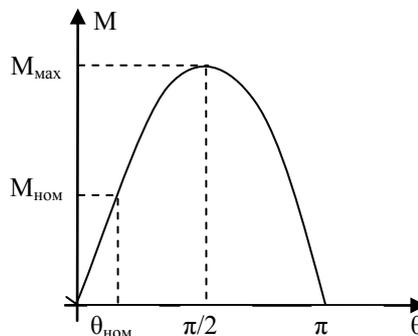


Рис 5.15 Угловая характеристика СД

2.14. Регулирование скорости синхронного двигателя.

После вхождения синхронного двигателя в синхронизм его скорость при изменениях момента нагрузки на валу до некоторого максимального значения M_{max} остается постоянной и равной синхронной скорости

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{z_p}$$

Так как изменение числа пар полюсов z_p у серийно выпускаемых двигателей не применяется, то частотное регулирование является практически единственным способом регулирования угловой скорости синхронных двигателей. Оно характеризуется в основном такими же показателями, что и частотное регулирование скорости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Это регулирование плавное, двухзонное. Диапазон регулирования вверх от номинальной синхронной скорости ограничивается механической прочностью ротора, его балансировкой и качеством подшипников. Диапазон регулирования вниз от

номинальной синхронной скорости может достигать значений $D = 1$: (50 - т-100) и более с учетом абсолютной жесткости механических характеристик двигателя и обеспечения синусоидальности напряжения питания.

Стабильность скорости высокая. Допустимая нагрузка при постоянном возбуждении и независимой вентиляции соответствует номинальному моменту.

Использование полупроводниковых преобразователей частоты открывает большие возможности в отношении формирования требуемых статических и переходных процессов частотно-регулируемых синхронных электроприводов.

В отличие от асинхронного короткозамкнутого двигателя при частотном регулировании скорости синхронный двигатель обладает тремя каналами управления моментом: изменением тока возбуждения I_f , изменением напряжения обмоток статора U_j и изменением частоты f_j напряжения обмоток статора.

Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов преобразователь частоты - синхронный двигатель для законов регулирования класса $U_j I_f = \text{const}$ приведены на рис. 5.56.

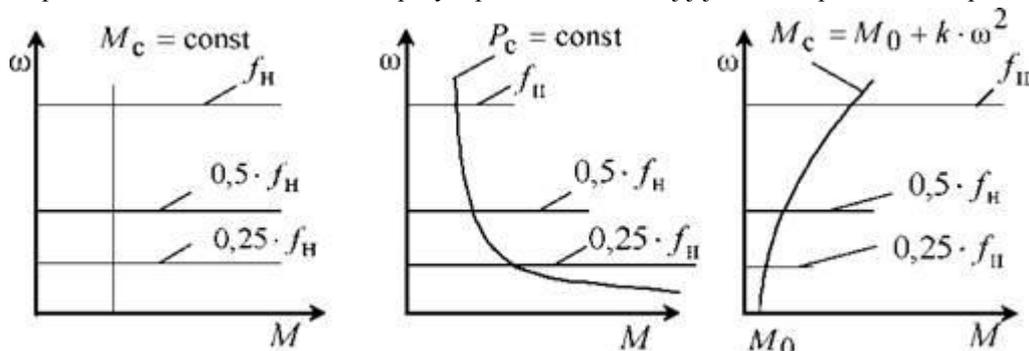


Рис. Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов преобразователь частоты - синхронный двигатель

Рассмотренные законы управления при частотном регулировании скорости синхронного двигателя справедливы только в первом приближении, особенно для явнополюсного синхронного двигателя, так как неучет реактивного электромагнитного момента приводит к значительным (до 20 %) погрешностям механических свойств двигателя.

Синхронный двигатель обладает очень важным свойством - при подаче на статорные обмотки постоянного напряжения ($f = 0$) он создает тормозной момент при неподвижном роторе, обеспечивая механическую фиксацию ротора в заданном положении.

РАЗДЕЛ 3: ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЕГО РАБОТЫ

3.1. Переходный процесс в электроприводах с двигателем постоянного тока

Переходным процессом (ПП) ЭП называют процесс перехода из одного установившегося режима работы в другое установившееся состояние, когда изменяется скорость, ток и момент двигателя.

Причины возникновения ПП следующие: 1) управляющие воздействия (включение, отключение, изменение задания на скорость) 2) возмущающие воздействия (изменение нагрузки на валу двигателя)

Задачей является определение времени и характера ПП, оценка величин момента, тока, ускорения в динамических режимах.

Механические переходные процессы в электроприводах с ДПТНВ.

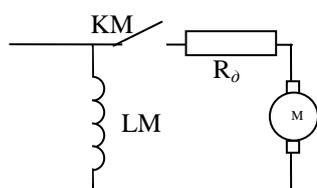


Рис. Схема включения ДПТ НВ

При замыкании КМ протекает 2 ПП: электромеханический и электромагнитный. В схемах реостатного регулирования координат активное сопротивление ОЯ значительно больше индуктивного.

Электромагнитная постоянная времени $T_3=L/R>0$, электромагнитные переходные процессы протекают очень быстро. Рассмотрим механические переходные процессы.

Пусть магнитный поток $\Phi = const$, обозначим $k\Phi = C$, тогда

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi} = \frac{U}{C} - \frac{IR}{C} \quad (*)$$

Известно, что $M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$. Разделим на C .

$$\frac{M}{C} - \frac{M_c}{C} = \frac{J}{C} \frac{d\omega}{dt}$$

Поскольку $M = k\Phi I = CI$, то

$$I = I_c + \frac{J}{C} \frac{d\omega}{dt} \quad (**)$$

где I_c – ток ОЯ, соответствующий моменту сопротивления M_c .

Подставим полученное выражение тока в (*)

$$\omega = \frac{U}{C} - \frac{IR}{C} = \frac{U}{C} - \frac{I_c R}{C} - \frac{JR d\omega}{C^2 dt}, \text{ т.к. } \frac{U}{C} = \omega_0, \text{ то}$$

$$\omega = \omega_0 - \frac{I_c R}{C} - \frac{JR d\omega}{C^2 dt} = \omega_c - \frac{JR d\omega}{C^2 dt},$$

где ω_c – скорость, установившаяся после окончания переходного процесса

Итак, $\omega + T_m \frac{d\omega}{dt} = \omega_c$ - дифференциальное уравнение, описывающее механический переходный процесс.

Где $T_m = \frac{JR}{C^2}$ - электромеханическая постоянная времени. Характеризует скорость протекания процесса.

Чем меньше – тем быстрее процесс.

Итак, ПП, определяемые одной механической инерционностью (моментом инерции J) описываются дифференциальным уравнением первого порядка. Решение этого уравнения:

$$\omega = (\omega_{нач} - \omega_{уст}) e^{\frac{-t}{T_m}} + \omega_{уст}$$

$\omega_{нач}$ – начальное значение частоты вращения, $\omega_{уст}$ – установившееся значение.

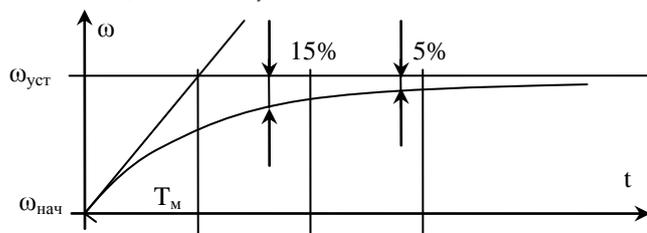
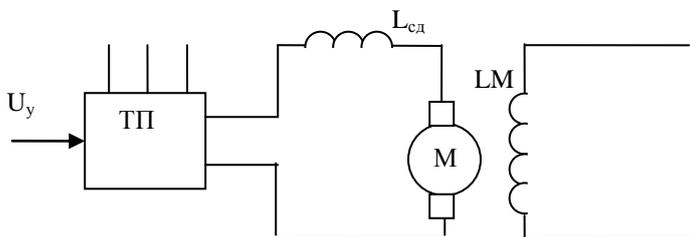


Рис. Экспоненциальное изменение скорости от времени

При экспоненциальном законе изменения величины во времени установившееся значение достигается теоретически через бесконечно большое время. Практически за условный конец переходного процесса можно принять момент времени, когда величина изменилась на 95%. При этом условное время переходного процесса $t_{пп}=3T_m$.

Электромеханические переходные процессы в электроприводах с ДПТНВ (с учетом T_3).

Рассмотрим получившую широкое распространение систему тиристорный преобразователь-ДПТ. В данной системе в ОЯ включен сглаживающий дроссель $L_{сд}$, поэтому необходимо учитывать электромагнитную постоянную времени $T_3 = L/R$.



Двигатель представляет собой два накопителя энергии. Поле якорной цепи может накапливать электромагнитную энергию, а маховые массы двигателя – кинетическую энергию.

Рис. Система ТП-ДПТНВ

На основании второго закона Кирхгофа:

$$U = E + IR + L \frac{dI}{dt}, \text{ где } L = L_{с\delta} + L_{я}.$$

$$U = C\omega + IR + L \frac{dI}{dt} \quad / \text{разделим на } C$$

$$\frac{U}{C} = \omega + \frac{IR}{C} + \frac{L}{C} \frac{dI}{dt}$$

(****)

Из уравнение движения ЭП получали (**), $I = I_c + \frac{J}{C} \frac{d\omega}{dt}$

Подставим выражения для тока в (****) и преобразуем:

$$\omega_c = \omega + T_M \frac{d\omega}{dt} + T_M T_\varepsilon \frac{d^2 \omega}{dt^2}, \quad (##)$$

T_ε – характеризует электромагнитную инерционность. Инерционность объясняется накоплением энергии электромагнитного поля.

Характер переходных процессов определяется видом корней характеристического уравнения диф.ур-я (##):

$$1 + T_M p + T_M T_\varepsilon p^2 = 0$$

Корни этого уравнения:

$$p_{1,2} = \frac{-T_M \pm \sqrt{T_M^2 - 4T_M T_\varepsilon}}{2T_M T_\varepsilon}.$$

1) Если $T_M > 4T_\varepsilon$, то корни p_1, p_2 будут вещественными и отрицательными. В этом случае решение уравнения (##) имеет вид:

$$\omega = \omega_c + c_1 e^{p_1 t} + c_2 e^{p_2 t}, \text{ где } c_1 \text{ и } c_2 - \text{ константы}$$

Переходный процесс в этом случае будет носить монотонный характер

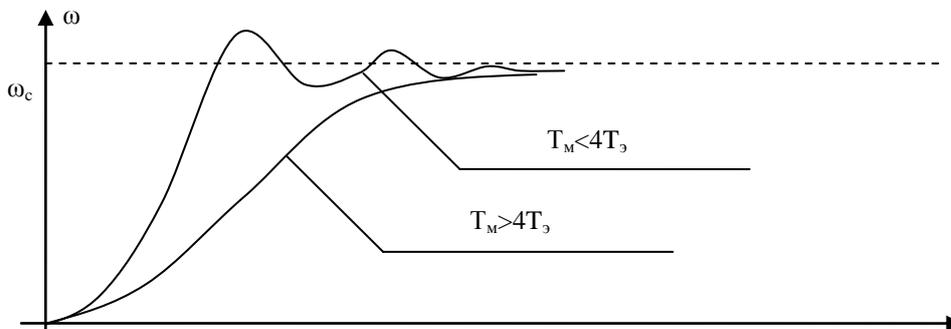


Рис. Переходные характеристики при пуске электропривода.

2) Если $T_M < 4T_\varepsilon$, то корни будут комплексными сопряженными с отрицательной вещественной частью $p = \alpha \pm j\Omega$. Решив диф. ур-е (##) получим:

$$\omega = \omega_c + e^{\alpha t} (c_1 \cos \Omega t + c_2 \sin \Omega t)$$

Переходный процесс характеризуется периодическими колебаниями с частотой Ω и затухающей амплитудой. Колебательность процесса связана с тем, что происходит периодическое преобразование кинетической энергии в электромагнитную и наоборот.

На рис показаны переходные характеристики скорости и тока при пуске двигателя до достижения скорости

$$\omega_{уст} = \frac{U_{я}}{C} - \Delta \omega_c$$

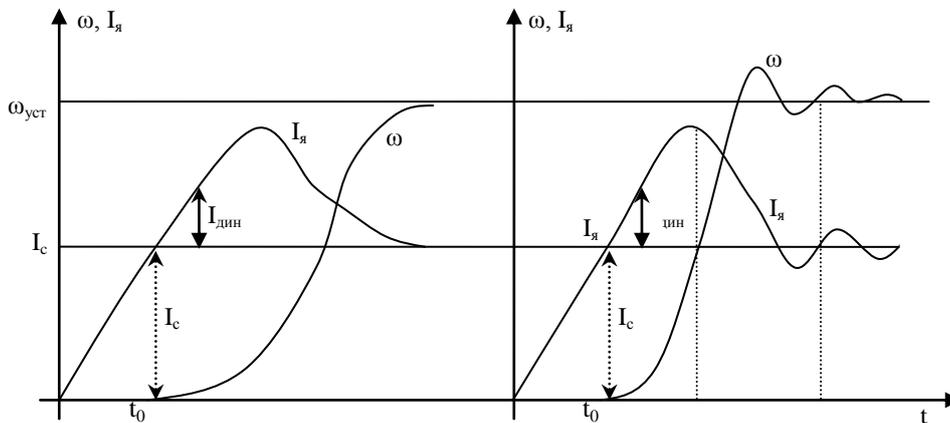


Рис. Переходные характеристики для тока и скорости

В течение времени t_0 ток якоря по экспоненциальному закону $i_c = \frac{U_{я}}{R_{я}} (1 - e^{-\frac{t}{T_{я}}})$ до $I_c = M_c / C$. Когда ток (момент) становится равным статическому, начинается движение вала двигателя.

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow I - I_c = \frac{J}{C} \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow I - I_c > 0 \Rightarrow \frac{J}{C} \frac{d\omega}{dt} > 0$$

Динамический ток (момент) возрастает, вследствие чего растет ускорение двигателя ($M_j = J \frac{d\omega}{dt}$).

Затем под действием ЭДС якоря ток начинает спадать $I = \frac{U - E}{R}$ и скорость двигателя приближается к установившемуся значению

3.2. Переходный процесс в электроприводах с асинхронным двигателем

При исследовании переходных режимов в приводах с АД в первом приближении пренебрегаем электромагнитными процессами, так как они протекают значительно быстрее электромеханических процессов.

Рассмотрим переходный процесс в АД с ФР

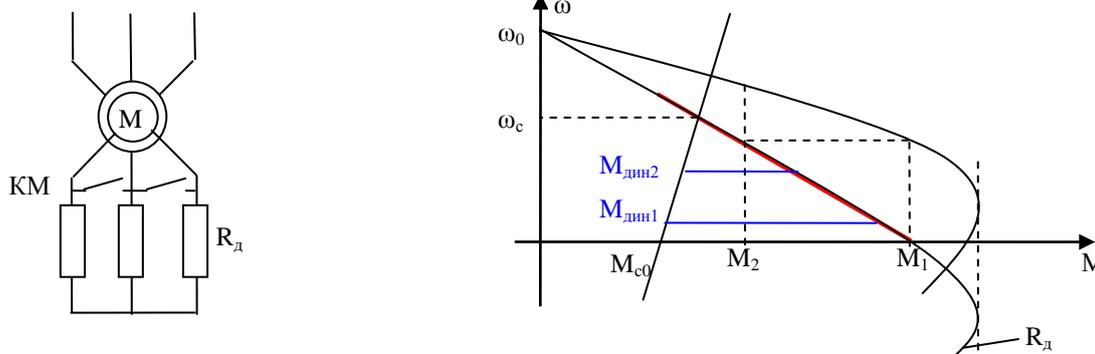


Рис. Механические характеристики АД с ФР при пуске.

При линейной зависимости момента двигателя и момента сопротивления от скорости в пределах рассматриваемых интервалов, переходный процесс описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \text{— основное уравнение электропривода} \\ M = M_1 - \beta\omega, \text{— уравнение прямой (красной) (линеаризируем мех. хар. АД)} \\ M_c = M_{c0} + \beta_c\omega \text{— уравнение прямой характеристики механизма} \end{cases}$$

где β, β_c – модули жесткости механической характеристики двигателя и механизма;

M_1, M_{c0} – моменты двигателя и механизма при скорости, равной нулю.

Решая систему уравнений относительно угловой скорости, получим дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} + (\beta + \beta_c)\omega &= M_1 - M_{c0} \quad / \text{ поделим на } \beta + \beta_c \quad (1) \\ \frac{J}{\beta + \beta_c} \frac{d\omega}{dt} + \omega &= \frac{M_1 - M_{c0}}{\beta + \beta_c} \\ \omega_c &= \omega + T_m \frac{d\omega}{dt} \quad (2) \end{aligned}$$

где ω_c – точка пересечения характеристик двигателя и механизма, установившаяся скорость вращения.

$T_m = J / (\beta + \beta_c)$ – механическая постоянная времени электропривода, с.

Постоянная времени T_m является важным параметром электропривода, характеризующим темп изменения момента и угловой скорости двигателя в переходных процессах. T_m можно трактовать как время разгона двигателя из неподвижного состояния до установившегося значения скорости, если начальная величина динамического момента сохранялась бы в процессе разгона неизменной.

Общее решение уравнения (2) выражается так:

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (3)$$

Так как скорость и момент двигателя в рассматриваемом случае связаны между собой линейно, то зависимость момента от времени аналогична:

$$M = M_{уст} + (M_{нач} - M_{уст}) e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (4)$$

Полученные выражения для момента и скорости при принятых допущениях имеют универсальный характер. Они остаются справедливыми для различных переходных процессов (пуск, торможение, сброс и наброс нагрузки) при условии линейно изменяющихся от скорости моментов M и M_c . В каждом конкретном случае в выражения (3), (4) должны быть подставлены соответствующие значения $\omega_{нач}$, $\omega_{уст}$, $M_{нач}$, $M_{уст}$ и T_m .

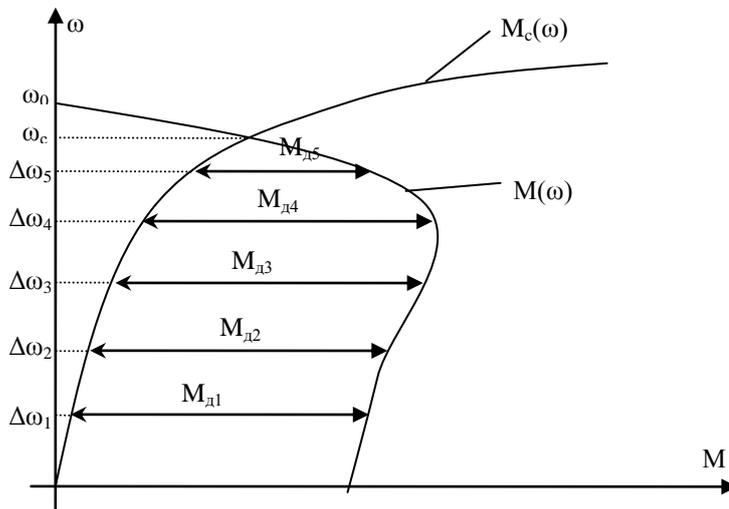
Если в частном случае $M_c = \text{const}$ (характеристика вертикальная прямая), то $\beta_c = 0$, и тогда

$$T_m = \frac{J}{\beta} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta M}; \quad \omega_{уст} = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta}, \quad \text{где } \Delta\omega, \Delta M \text{ – приращения скорости и момента на}$$

прямолинейном участке механической характеристики АД.

Численное решение дифференциального уравнения для случая разгона асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

В некоторых случаях линеаризация характеристик приводит к значительным погрешностям. Например, при разгоне АД с механизмом, обладающим нелинейной характеристикой $M_c(\omega)$. Применяют численные методы.



Как известно

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad M - M_c = M_\partial - \text{динамический момент.}$$

$$\text{Для численного решения } M_\partial = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}.$$

Определяем динамический момент в пределах каждого участка разбиения.

$$M_{\partial 1} = J \frac{\Delta\omega_1}{\Delta t_1} \implies \Delta t_1 = \frac{J}{M_{\partial 1}} \Delta\omega_1$$

$$M_{\partial 2} = J \frac{\Delta\omega_2}{\Delta t_2} \implies \Delta t_2 = \frac{J}{M_{\partial 2}} \Delta\omega_2$$

$$M_{\partial i} = J \frac{\Delta\omega_i}{\Delta t_i} \implies \Delta t_i = \frac{J}{M_{\partial i}} \Delta\omega_i$$

Время переходного процесса:

$$\Delta t_{mn} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i = \sum_{i=1}^n \frac{J}{M_{\partial i}} \Delta\omega_i$$

Для рассматриваемого примера $n=5$:

3.3. Потери мощности и энергии в установившемся и переходном режимах работы электропривода.

Анализ потерь энергии в различных режимах электропривода важен как с точки зрения анализа экономичности работы системы, так и для оценок теплового состояния двигателей при выборе или проверке их по условиям нагрева.

В общем случае мощность потерь энергии в двигателях удобно представлять в виде суммы потерь ΔP_c , не зависящих от нагрузки, и потерь ΔP_v которые пропорциональны нагрузке двигателей:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_v, \quad (9.7)$$

Постоянные потери ΔP_c определяют потери в стали $\Delta P_{ст}$, механические потери $\Delta P_{мех}$ а для двигателей постоянного тока независимого возбуждения и синхронных двигателей — и потери в обмотках возбуждения

$\Delta P_v = I_a^2 R_a$. Переменные потери ΔP_v определяются потерями в меди, которые пропорциональны квадрату тока двигателя и сопротивлениям обмоток. Для двигателей постоянного тока

$$\Delta P_v = I_a^2 R_a; \quad (9.8)$$

для асинхронных двигателей

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2'. \quad (9.9)$$

При небольшом диапазоне изменения токов асинхронного двигателя, когда $I_\mu \approx \text{const}$, при малых скольжения, для которых $\cos \varphi_2 \approx 1$ удобно принять, что $I_1^2 \approx I_\mu^2 + I_2'^2$. Тогда потери от тока намагничивания можно отнести к постоянным потерям, добавив к ним величину $3I_\mu^2 R_1$, а переменные выразить только через ток ротора в виде

$$\Delta P_v = 3I_2'^2 R_2' (1 + R_1/R_2'). \quad (9.10)$$

У синхронных двигателей переменные потери определяются потерями в меди статора и равны:

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1. \quad (9.11)$$

При токах, соответствующих номинальным режимам двигателей при работе на естественных характеристиках, переменные потери можно определить по данным двигателя. Поэтому удобно выразить потери при токах, отличных от номинальных, через номинальные.

Определим кратность тока двигателей x , равную:

$$x = I_\mu / I_{\mu, \text{НОМ}};$$

для двигателей постоянного тока

$$x = I_2' / I_{2, \text{НОМ}}';$$

для асинхронных;

$$\text{для синхронных двигателей } x = I_1 / I_{1, \text{НОМ}}.$$

Запишем общее выражение для переменных потерь в виде

$$\Delta P_v = \Delta P_{v, \text{НОМ}} x^2.$$

Кроме того, введя отношение постоянных потерь к номинальным переменным $\alpha = \Delta P_c / \Delta P_{v, \text{НОМ}}$, суммарные потери можно представить выражением

$$\Delta P = \Delta P_{v, \text{НОМ}} (\alpha + x^2).$$

Значение коэффициента α зависит от номинальной мощности, скорости и исполнения двигателя и лежит в пределах $\alpha = 0,5 \div 2$.

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения и асинхронного двигателя переменные потери могут быть определены через электромагнитный момент и относительный перепад скорости двигателя (скольжение). Поскольку потребляемая якорем двигателя независимого возбуждения мощность P_μ есть $UI = M\omega_0$, а электромагнитная механическая $M\omega$, то

$$\Delta P_v = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) \frac{\omega_0}{\omega_0} = P_\mu \frac{\Delta\omega}{\omega_0}.$$

Соответственно для асинхронного двигателя, определив переменные потери в роторе, ΔP_{vr} как $M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s$, получим

$$\Delta P_v = M\omega_0 s (1 + R_1/R_2') = \Delta P_{vr} (1 + R_1/R_2').$$

Полученные выше соотношения относились к статическим установившимся режимам работы двигателей.

На примере гармонического режима колебаний момента и скорости двигателя с линейной механической характеристикой рассмотрим определение потерь в динамическом установившемся режиме. Допустим, что

$$\omega = \omega_{cp} + \Delta\omega \sin \Omega t$$

и соответствующие этим колебаниям скорости изменения момента

$$M = M_{cp} + \Delta M \sin (\Omega t - \psi)$$

Мгновенные значения мощности переменных потерь в двигателе постоянного тока и в роторе асинхронного двигателя определяются произведением $\Delta P_v(t) = M(t) [\omega_0 - \omega(t)]$. Для сопоставления потерь в статическом и гармоническом режимах получим выражение средних потерь за период колебаний момента и скорости в виде

$$\Delta P_{v, cp} = \frac{\Omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\Omega} [M_{cp} + \Delta M \sin (\Omega t - \psi)] [\omega_0 - \omega_{cp} - \Delta\omega \sin \Omega t] dt.$$

проинтегрировав это выражение, получим

$$\Delta P_{v, cp} = M_{cp} (\omega_0 - \omega_{cp}) - \Delta M \Delta\omega \cos \psi. \quad (9.12)$$

Амплитуды колебаний момента ΔM для заданных амплитуд колебаний скорости $\Delta\omega$, а также фазовый сдвиг этих колебаний определяются частотными характеристиками динамической жесткости (3.45) и рис. 3.13,6. Это дает возможность записать (9.12) в виде

$$\Delta P_{v\text{ср}} = M_{\text{ср}}(\omega_0 - \omega_{\text{ср}}) - \Delta\omega^2 \beta(\Omega) \cos \psi(\Omega)$$

или

$$\Delta P_{v\text{ср}} = M_{\text{ср}}(\omega_0 - \omega_{\text{ср}}) - \frac{\Delta M^2}{\beta(\Omega)} \cos \psi(\Omega). \quad (9.13)$$

Поскольку в низкочастотной области, которой соответствуют реальные частоты колебаний, значение $\cos \psi$ отрицательно, то наличие колебаний скорости приводит к увеличению потерь, и тем в большей степени, чем ниже частота этих колебаний и выше динамическая жесткость механической характеристики двигателя.

Особое значение правильная оценка потерь энергии имеет для регулируемых электроприводов. Дело в том, что выбор способа регулирования скорости или момента двигателя определяется в конечном итоге его экономичностью. И хотя понятие экономичности включает в себя капитальные затраты и эксплуатационные расходы, при этих равных условиях показатели расхода энергии и регулировочных потерь являются основой для сопоставления регулируемых электроприводов по экономичности.

С энергетической точки зрения регулирование скорости или момента означает изменение мощности механической энергии на валу двигателя. В связи с этим возможны несколько способов регулирования $P_{\text{мех}}$

Наиболее просто можно уменьшить $P_{\text{мех}}$, установив на пути потока энергии устройство, отбирающее часть энергии, при этом отведенную энергию можно рассеять в виде теплоты (рис. 9.3, а) или вернуть в сеть (рис. 9.3, б).

К первому способу относятся реостатные схемы, когда энергия рассеивается на резисторах, включаемых в силовые цепи. Такой же результат можно получить, увеличив потери в самой машине, например при несимметричном питании асинхронного двигателя, при котором в фазах двигателя протекают несинусоидальные токи. Такие способы параметрического регулирования при длительном снижении уровня $P_{\text{мех}}$ с энергетической точки зрения заведомо неэкономичны, так

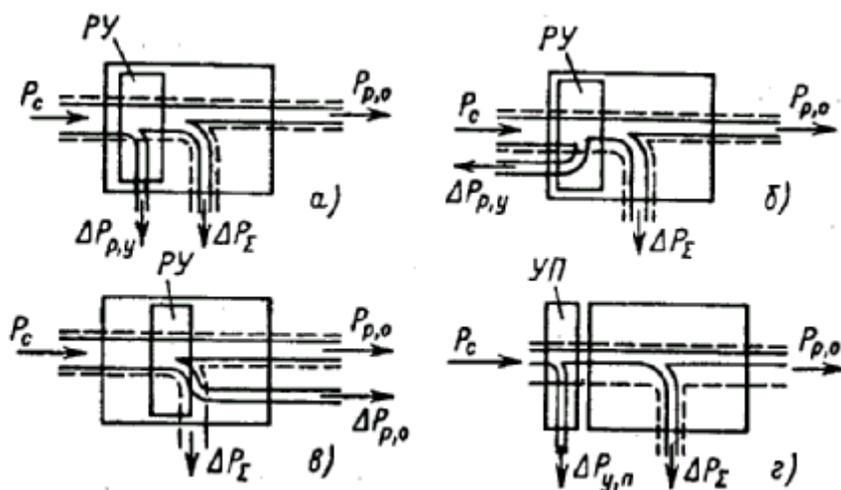


Рис. 9.3. Схема баланса мощности в регулируемом электроприводе:

$ПУ$ - регулирующее устройство; $УП$ - управляемый преобразователь

как принципиально основаны на увеличении потерь энергии в электроприводе.

Экономичнее, отведя часть энергии, вернуть ее в сеть. Такая энергетическая схема регулирования (рис. 9.3, б) реализуется в каскадных схемах включения. Каскадные схемы, как было рассмотрено в гл. 7, позволяют также обеспечить изменение скорости путем возврата энергии скольжения не в сеть, а на вал механизма (рис. 9.3, в). Этот способ выгоден, когда требуется регулирование скорости при постоянной мощности на валу. Для параметрических способов регулирования снижение скорости при $P_{\text{мех}} = \text{const}$ является более неблагоприятным, чем при $M_{\text{с}} = \text{const}$. В этом случае со снижением скорости возрастают не только потери в двигателе, но и потребляемая от источника энергия. Однако при регулировании вверх от номинальной скорости путем параметрического регулирования тока возбуждения двигателя независимого возбуждения ток якоря и потребляемая мощность не меняются, потери не растут, чем определяется высокая экономичность параметрического способа регулирования в данном случае.

Наиболее экономично, конечно, регулировать координаты электропривода так, чтобы мощность потребляемой энергии определялась мощностью, необходимой в данный момент механизму, и потерями. Такие возможности имеют системы УП—Д, позволяющие регулировать параметры $U, I, f_{\text{на}}$ входе электромеханического преобразователя таким образом, чтобы управление механической энергией осуществлялось не за счет увеличения потерь, а за счет необходимого снижения потребления энергии электродвигателем (рис. 9.3, г).

Анализируя потери энергии в регулируемых приводах, надо учитывать, что составляющая суммарных потерь (9.7), не зависящая от нагрузки ΔP_c при регулировании скорости, изменяется. Приближенно можно считать, что

$$\Delta P_c = \Delta P_B + (\Delta P_{\text{мех, ном}} + \Delta P_{\text{ст, ном}}) (\omega / \omega_{\text{ном}})^2, \quad (9.14)$$

т.е. потери в стали $\Delta P_{\text{ст}}$ и механические $\Delta P_{\text{мех}}$, пропорциональны квадрату скорости, а изменение потерь на возбуждение ΔP_B зависит от наличия регулирования тока возбуждения. В свою очередь переменные потери в этом случае запишем в виде

$$\Delta P_B = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}\Sigma} = M (\omega'_0 - \omega), \quad (9.15)$$

где ω'_0 — скорость холостого хода на регулировочной характеристике.

Тогда суммарные потери для регулируемого привода с двигателем с независимым возбуждением можно представить в виде

$$\Delta P = \Delta P_B (\Delta P_{\text{мех, ном}} + \Delta P_{\text{ст, ном}}) (\omega / \omega_{\text{ном}})^2 + M (\omega'_0 - \omega). \quad (9.16)$$

При регулировании реостатным способом ($\omega'_0 = \omega'_0 \text{ном}$) переменные потери растут пропорционально относительному перепаду скорости, а постоянные снижаются, поэтому изменение суммарных потерь зависит от соотношения постоянных и переменных потерь для данного двигателя и статической нагрузки.

При регулировании скорости путем изменения напряжения ($\omega'_0 = \text{var}$), например, с $M_c = M_{c, \text{ном}} = \text{const}$ ток якоря неизменен, неизменны переменные потери суммарные потери несколько снижаются вследствие снижения постоянных потерь.

Если используется регулирование скорости путем ослабления поля двигателя при $M_c \omega_c = \text{const}$, то ток возбуждения из-за нелинейности кривой намагничивания изменяется в большей степени, чем поток.

Аппроксимируем зависимость между током и потоком на участке $0 - \Phi_{\text{ном}}$ приближенным выражением

$$I_B / I_{B, \text{ном}} \approx (\Phi / \Phi_{\text{ном}})^m = (\omega_0 / \omega'_0)^m \approx (\omega_{\text{ном}} / \omega)^m,$$

где m принимает значение от 1 до 2.

Для этого случая выражение постоянных потерь можно записать в виде (при $m = 2$)

$$\Delta P_c = \Delta P_{B, \text{ном}} \left(\frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega} \right)^2 + (\Delta P_{\text{мех, ном}} + \Delta P_{\text{ст, ном}}) (\omega / \omega_{\text{ном}})^2. \quad (9.17)$$

Анализ (9.17) показывает, что приближенно можно считать постоянные потери при регулировании потоком неизменными. Снижение потерь в обмотке возбуждения компенсируется примерно таким же увеличением механических потерь.

При регулировании с постоянной мощностью на валу ток якоря неизменен при регулировании скорости путем изменения потока ($I_{\text{я}} = \text{const}$), т. е. и переменные потери неизменны. Отсюда следует, что и суммарные потери при этом не меняются:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_B = \text{const}.$$

При регулировании скорости путем изменения напряжения на якоре двигателя $\omega_0 = \text{var}$ имеют место потери и в преобразователе. Для системы Г—Д постоянными потерями являются механические и потери в стали машин преобразователя. Так как скорость преобразователя изменяется незначительно, то его постоянные потери можно считать неизменными.

Переменные потери вращающегося преобразователя состоят из потерь в меди обмоток статора и ротора приводного двигателя генератора. Потери в якоре генератора входят в результирующие потери якорной цепи, которые определяются по формуле (9.8).

Для статического преобразователя с полупроводниковыми вентилями постоянные потери определяются в основном потерями в стали силового трансформатора и реакторов. Эти потери меняются мало, поэтому для управляемых преобразователей постоянные потери практически неизменны и равны номинальным:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пр, ном}} \approx \text{const.}$$

К переменным потерям статического преобразователя относятся потери в меди обмоток силового трансформатора, а также потери в вентилях:

$$\Delta P_{\text{впр}} = 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2 + \Delta P_{\text{вт}} + \Delta P_{\text{д}}, \quad (9.18)$$

Последнее выражение можно записать в виде

$$\Delta P_{\text{впр}} = (\Delta P_{\text{к,з}} + \Delta P_{\text{р, ном}}) \left(\frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{ном}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{вт}} \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (9.19)$$

где $\Delta P_{\text{к,з}}$ - потери трансформатора при опыте короткого замыкания; $\Delta P_{\text{р, ном}}$, $\Delta P_{\text{вт}}$ потери при номинальном токе якоря соответственно в уравнивательных и сглаживающих реакторах и вентилях.

Рассмотрим изменение составляющих потерь для регулируемого асинхронного привода.

В асинхронном двигателе к постоянным потерям относятся механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$, потери в стали статора $\Delta P_{\text{ст, с}}$ и ротора $\Delta P_{\text{ст, р}}$, а также потери в меди статора от намагничивающего тока I_{μ} , т.е.

$$\Delta P_{\text{с}} = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{ст, с}} + \Delta P_{\text{ст, р}} + 3I_{\mu}^2 R_1.$$

Для механических потерь, как и для двигателя постоянного тока, можно без большой ошибки принять

$$\Delta P_{\text{мех}} \approx \Delta P_{\text{мех, ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (9.20)$$

где $\Delta P_{\text{мех, ном}}$ - механические потери при номинальной скорости двигателя.

Потери в стали (от вихревых токов и наличия явления гистерезиса) пропорциональны квадрату амплитуды индукции B_m^2 и частоте в степени примерно 1,3. Принимая, что при регулировании скорости двигателя $B_m/B_{\text{м ном}} = E_1/E_{1\text{ ном}} \approx U/U_{\text{ ном}}$ и что объемы статора и ротора равны, можно

получить выражение для суммарных потерь в стали в виде

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст, р}} + \Delta P_{\text{ст, с}} \approx \Delta P_{\text{ст, с, ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ ном}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{\text{ ном}}} \right)^{1,3} +$$

$$+ \Delta P_{\text{ст, с, ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ ном}}} \right)^2 \left(\frac{f_1 s}{f_{\text{ ном}}} \right)^{1,3}$$

или

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст, с, ном}} \left(\frac{U}{U_{\text{ ном}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{\text{ ном}}} \right)^{1,3} (1 + s^{1,3}), \quad (9.21)$$

где $\Delta P_{\text{ст, с, ном}}$ - потери в стали статора при номинальных частоте $f_{\text{ ном}}$ и напряжении питания $U_{\text{ ном}}$.

При реостатном способе регулирования частота и напряжение номинальном, при этом

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст, с, ном}} (1 + s^{1,3}), \quad (9.22)$$

т. е. суммарные потери в стали при снижении скорости растут вследствие роста потерь в стали ротора. Увеличение потерь в стали в диапазоне скоростей от номинальной до нуля практически компенсируется снижением механических потерь, поэтому

$$\Delta P_{\text{с}} = \text{const} = \Delta P_{\text{мех, ном}} + \Delta P_{\text{ст, с, ном}} + 3I_{\mu}^2 R_1. \quad (9.23)$$

При частотном регулировании и работе двигателя на линейном участке механической характеристики скольжение невелико во всем диапазоне изменения скорости и потерями в стали ротора можно пренебречь. Тогда при регулировании по закону $U/f = \text{const}$ с учетом (9.22) получим

$$\Delta P_{\text{с}} \approx \Delta P_{\text{ст, с, ном}} \left(\frac{U}{f} \right)^2 \frac{f^{3,3}}{U_{\text{ ном}}^2 f_{\text{ ном}}^{1,3}} = \Delta P_{\text{ст, с, ном}} \left(\frac{f}{f_{\text{ ном}}} \right)^{3,3}. \quad (9.24)$$

Переменные потери в цепях асинхронного двигателя определяются суммой (9.9):

$$\Delta P_v \approx 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_{2\Sigma} = M\omega_0 s (1 + R_1/R_{2\Sigma}),$$

где R_1 - сопротивление цепи фазы статора; $R_{2\Sigma}'$ - приведенное сопротивление цепи фазы ротора.

Если при частотном регулировании $M = \text{const} = M_{\text{ном}}$, то перепад скорости и переменные потери остаются неизменными:

$$\Delta P_v = \Delta P_{\text{вном}} = M_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}} (1 + R_1/R_{2\Sigma}') = \text{const.} \quad (9.25)$$

При реостатном регулировании

$$\Delta P_v = M\omega_0 s \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \frac{R_2'}{R_2' + R_{2\text{доб}}'} \right) = M\omega_0 s + M\omega_0 s_{\text{ном}} \frac{R_1}{R_2'}, \quad (9.26)$$

где R_2' - приведенное сопротивление обмотки ротора; $R_{2\text{доб}}'$ - приведенное добавочное сопротивление в цепи ротора. Переменные потери в роторной цепи определяются моментом и скольжением, а в статорной цепи - только моментом. Если регулирование осуществляется с $M = \text{const}$, то потери в статоре постоянны, а в роторной цепи пропорциональны скольжению. При вентиляторном характере изменения момента сопротивления

$$M_c = M_{\text{ном}} (\omega/\omega_{\text{ном}})^2 \quad (9.27)$$

потери в роторной цепи определяются следующим выражением:

$$\Delta P_{\text{рп}} = M_{\text{ном}} (\omega/\omega_{\text{ном}})^2 (\omega_0 - \omega). \quad (9.28)$$

Дифференцирование (9.28) по скорости позволяет найти максимум потерь в роторной цепи, скорость и скольжение, при которых этот максимум имеет место, а именно

$$\omega_{\text{max}} = 2/3\omega_0; \quad s_{\text{max}} = 1/3;$$

$$\Delta P_{\text{рmax}} = \frac{4}{27} M_{\text{ном}} \omega_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 = \frac{4}{27} P_{\text{ном}} \left(\frac{\omega_0}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (9.29)$$

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность на валу двигателя.

Потери в статорной цепи убывают с уменьшением скорости:

$$\Delta P_{\text{вс}} = \Delta P_{\text{вс, ном}} \frac{R_1}{R_2'} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2. \quad (9.30)$$

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при «вентиляторном» моменте сопротивления и реостатном регулировании потери в якорной цепи определяются также с помощью выражений (9.28) и (9.29).

Рассмотрим далее методику определения потерь энергии за время переходного процесса вначале в нерегулируемых приводах, когда задающее воздействие (ω) устанавливается скачком.

В общем случае при переходе от одного установившегося режима работы к другому двигатель на отдельных этапах работает в различных режимах, и суммарные потери энергии в переходном процессе определяются выражением

$$\Delta A_{\text{п,п}} = \int_0^{t_{\text{п,п}}} \Delta P(t) dt = \int_0^{t_{\text{п,п}}} [\Delta P_c(t) + \Delta P_v(t)] dt = \Delta A_{\text{п,пс}} + \Delta A_{\text{п,пв}} \quad (9.31)$$

Так как в переходных процессах токи двигателей и соответственно потери в большинстве случаев значительно превышают номинальные, то доля потерь энергии, определяемая постоянными потерями, как правило, невелика. На основании (9.16) и (9.26) мощность переменных потерь в якорной цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения и мощность потерь в роторе асинхронного двигателя можно представить одним и тем же выражением и записать потери энергии в виде

$$\Delta A_{\text{п,п}} = \int_0^{t_{\text{п,п}}} M\omega_0 s dt = \int_0^{t_{\text{п,п}}} (M\omega_0 - M\omega) dt, \quad (9.32)$$

где $s = \Delta\omega/\omega_0$ - относительный перепад скорости для двигателя постоянного тока независимого возбуждения; $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ - скольжение для асинхронного двигателя.

Вначале примем, что момент статического сопротивления $M_c = 0$, при этом потери энергии будут обусловлены только переходным процессом.

Подставим в (9.32) выражение для момента двигателя в переходном процессе при $M_c=0$. В соответствии с уравнением движения

$$M = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \text{ поэтому}$$

$$\Delta A_{п,п} = \int_0^{t_{п,п}} \left(J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \omega_0 - J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \omega \right) dt = \int_{\omega_{нач}}^{\omega_{кон}} (J_{\Sigma} \omega_0 - J_{\Sigma} \omega) d\omega. \quad (9.33)$$

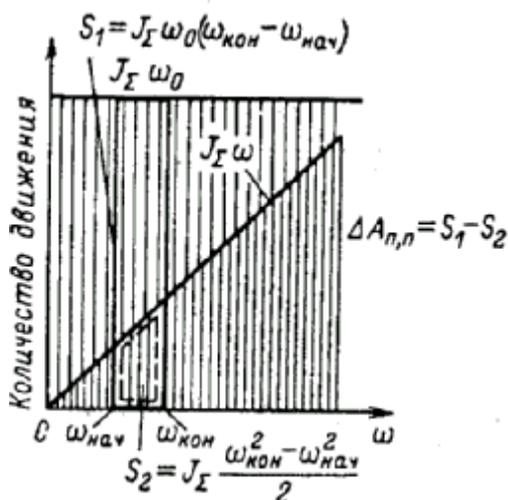


Рис. 9.4. К определению потерь энергии в переходных процессах вхолостую

Как видно из правой части выражения (9.33), производная потеря энергии по скорости не зависит от времени и равна разности количеств движения при скорости ω_0 и текущей скорости ω (рис. 9.4).

Проинтегрировав выражение (9.33), получим потери энергии при изменении скорости от $\omega_{нач}$ до $\omega_{кон}$

$$\begin{aligned} \Delta A_{п,п} &= J_{\Sigma} \omega_0 \omega \Big|_{\omega_{нач}}^{\omega_{кон}} - J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} \Big|_{\omega_{нач}}^{\omega_{кон}} = \\ &= \underbrace{J_{\Sigma} \omega_0 (\omega_{кон} - \omega_{нач})}_{S_1} - \underbrace{J_{\Sigma} \frac{\omega_{кон}^2 - \omega_{нач}^2}{2}}_{S_2} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} (s_{нач}^2 - s_{кон}^2), \quad (9.34) \end{aligned}$$

де S_1 и S_2 — соответствующие площади на рис. 9.4.

При изменении скорости затрачено (или высвободилось) количество энергии, равное разности кинетических энергий при начальной и конечной скоростях привода. При подстановке в (9.34) значений

$\omega_{нач} = \omega_0(1 - s_{нач})$ и $\omega_{кон} = \omega_0(1 - s_{кон})$ и приведении подобных членов получается формула потерь энергии, выраженных через запас кинетической энергии привода

$$J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \text{ при скорости } \omega = \omega_0.$$

Определим затраты и потери энергии при некоторых типичных переходных процессах, подставив в (9.34)

соответствующие значения $\omega_{нач}, \omega_{кон}, (s_{нач}, s_{кон})$. Для пуска вхолостую
 $\omega_{нач} = 0; \omega_{кон} = \omega_0; s_{нач} = 1, s_{кон} = 0$ (рис 9.5,А)

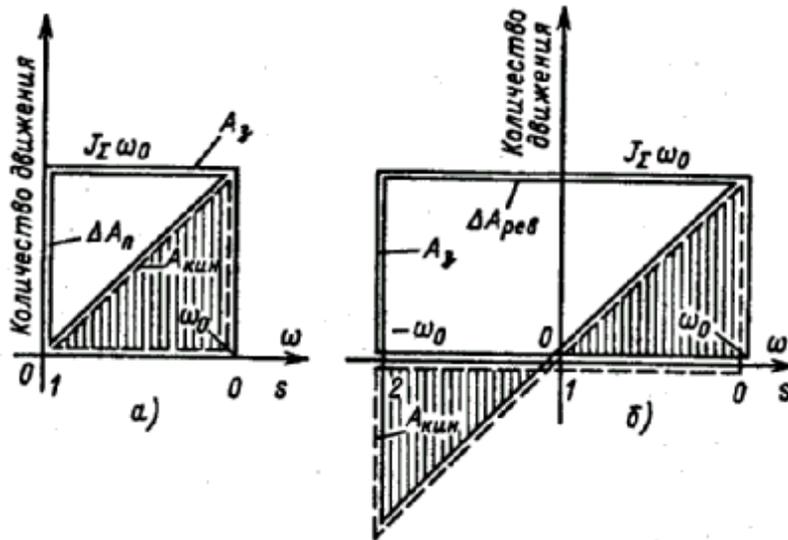


Рис. 9.5. Потребление энергии и потери в переходных процессах вхолостую при пуске (в) и реверсе с торможением противовключением (б)

$$\Delta A_n = J_\Sigma \frac{\omega_0^2}{2}; A_{з,п} = J_\Sigma \omega_0 (\omega_0 - 0) = J_\Sigma \omega_0^2,$$

где ΔA_n - потери энергии; $A_{з,п}$ - затраты энергии при пуске без учета потерь в статоре (или на возбуждение).
 Затраты энергии на пуск вхолостую $A_{з,п}$ вдвое больше запаса кинетической энергии привода в конце пуска;
 половина потребленной энергии рассеивается в виде потерь.

Пусть начальное значение скорости при реверсе вхолостую соответствует режиму противовключения и равно $\omega_{нач} = -\omega_0$, а конечное $\omega_{кон} = \omega_0$, скольжение $s_{нач} = 2$, а $s_{кон} = 0$. Подставив их в (9.34), получим

$$\Delta A_{рев} = 4J_\Sigma \frac{\omega_0^2}{2}; A_{з,рев} = 4J_\Sigma \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (9.35)$$

При реверсе потери энергии равны четырехкратному запасу кинетической энергии и равны количеству энергии, потребленной из сети (рис. 9.5, б).

Далее, выполнив аналогичные подстановки, можно получить, что при торможении противовключением потери энергии

равны $\Delta A_{пр} = 3J_\Sigma \frac{\omega_0^2}{2}$, при этом из сети будет потреблено

$$A_{з,пр} = 2J_\Sigma \frac{\omega_0^2}{2} \text{ (рис. 9.6, а).}$$

Более экономичным, чем торможение противовключением, является динамическое торможение, при котором энергия из сети не потребляется

$$A_{з,д,т} = 0; \Delta A_{д,т} = J_\Sigma \frac{\omega_0^2}{2},$$

а потери определяются величиной рассеянной в виде теплоты кинетической энергии привода (рис. 9.6, б).

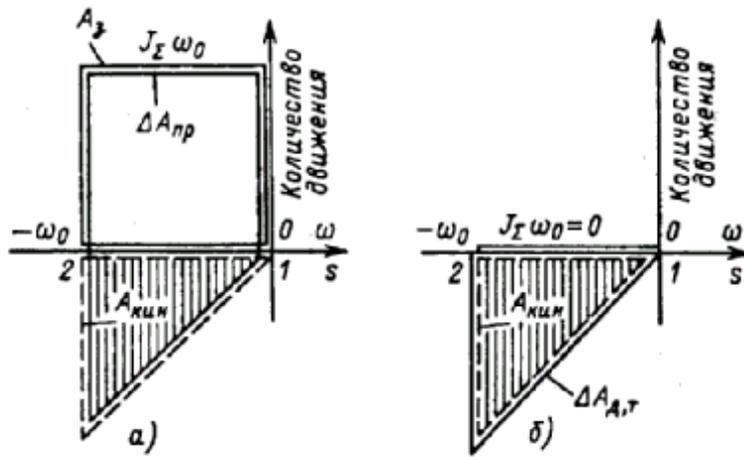


Рис. 9.6. Потребление энергии и потери в переходных процессах при торможении противовключением (а) и динамическом торможении. (б)

Наиболее рационально при торможении возвращать энергию, которую высвобождают инерционные массы привода, в источник питания. Такой режим генераторного торможения можно реализовать, например, при снижении скорости двухскоростного двигателя. В этом случае при $\omega_2 = 1/2\omega_0$, используя (9.34), получаем

$$A_{\lambda, \Gamma} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{01}}{2} (0,5\omega_{01} - \omega_{01}) = -1/2 J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta A_{\Gamma, \Gamma} = \frac{1}{4} J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (9.36)$$

Рассмотренные переходные процессы обладают важной особенностью. Из соотношений (9.33), (9.34) видно, что потери энергии ΔA не зависят от времени переходного процесса, а значит, и от формы механической характеристики двигателя, а определяются только диапазоном изменения скорости в переходном процессе.

В переходных процессах со статической нагрузкой на валу момент двигателя определяется как динамической, так и статической составляющей, поэтому в этом случае мощность потерь в якоре двигателя постоянного тока или в роторе асинхронного двигателя равна:

$$\Delta P = \left(M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \right) (\omega_0 - \omega) = \left[J_{\Sigma} \omega_0 \frac{d\omega}{dt} - J_{\Sigma} \omega \frac{d\omega}{dt} \right] + M_c (\omega_0 - \omega). \quad (9.37)$$

К мощности потерь, определяемой переходным процессом при холостом ходе, добавляется составляющая, связанная с нагрузкой. Потери энергии в этом случае зависят от характера статического момента и формы механической характеристики двигателя. Изменения скорости зависят от установившейся скорости ω_c . Так, при переходном процессе под нагрузкой

$$\Delta A_{n, n} = J_{\Sigma} \omega_0 \int_{\omega_{c, \text{нач}}}^{\omega_{c, \text{кон}}} d\omega - J_{\Sigma} \int_{\omega_{c, \text{нач}}}^{\omega_{c, \text{кон}}} \omega d\omega + \int_0^{t_{n, n}} M (\omega_0 - \omega) dt.$$

Примем, что $\omega_c \approx \omega_0$ тогда составляющая потерь, обусловленная динамическим моментом, не будет отличаться от потерь в переходных процессах при холостом ходе, и последнее равенство можно записать в виде

$$\Delta A_{n, n} = \Delta A_{x, x} + \Delta A_c,$$

где $\Delta A_{x, x}$ - потери в переходном процессе при $M_c = 0$; ΔA_c - составляющая, отражающая влияние статической нагрузки. При пуске с $M_c = \text{const}$ влияние статического момента учитывает величина ΔA_c равная:

$$\Delta A_c = M_c \int_0^{t_{n, n}} (\omega_0 - \omega) dt = M_c \omega_0 t_{n, n} - M_c \int_0^{t_{n, n}} \omega dt.$$

Для пусковых режимов ΔA_c положительна. Для тормозных режимов величина ΔA_c отрицательна, так как при динамическом торможении $\omega_0 = 0$, а при торможении противовключением $\omega_0 = -\omega_0$. Потери энергии при торможении под нагрузкой меньше потерь при торможении вхолостую. В режиме реверса потери энергии как без нагрузки, так и под нагрузкой равны сумме потерь при торможении противовключением и пуске.

Суммарные потери энергии в цепях асинхронного двигателя определяются также и потерями в статорной обмотке и добавочном сопротивлении роторной цепи. Поэтому потери в асинхронном двигателе, если по-прежнему пренебречь постоянной составляющей потерь ΔP_c и влиянием тока холостого хода (т.е. считать $I_1 \approx I_2$), можно определить по формуле

$$\Delta A = \int_0^{t_{n,n}} 3I_2'^2 (R_1 + R_2' + R_{2\text{доб}}') dt.$$

Далее, заменяя потери мощности в роторной цепи мощностью скольжения, т. е.

$3I_2'^2 (R_2' + R_{2\text{доб}}') = M\omega_0 s$, в результате несложных преобразований получаем при $M_c = 0$

$$\Delta A = \int_{s_{\text{кон}}}^{s_{\text{нач}}} J_{\Sigma} \omega_0^2 s \left(1 + \frac{R_1}{R_2' + R_{2\text{доб}}'} \right) ds. \quad (9.38)$$

Например, при пуске, учитывая, что $s_{\text{нач}} = 1$ и $s_{\text{кон}} = 0$, имеем

$$\Delta A_n = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2' + R_{2\text{доб}}'} \right), \quad (9.39)$$

где $R_1, R_2', R_{2\text{доб}}'$ — соответственно сопротивление фазы статора и приведенные собственное и добавочное сопротивления фазы ротора (для короткозамкнутых двигателей $R_{2\text{доб}}' = 0$). Из (9.39) следует, что потери при пуске состоят из потерь

в роторной цепи $\Delta A_{n2} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2}$ и потерь в статорной цепи

$$\Delta A_{n1} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \frac{R_1}{R_2' + R_{2\text{доб}}'},$$

зависящих от активных сопротивлений статора и роторной цепи. Причем чем больше сопротивление роторной цепи, тем меньше потери в статоре асинхронного двигателя.

Для короткозамкнутого двигателя $R_{2\text{доб}}' = 0$ и составляющая потерь в статоре равна:

$$\Delta A_{n1} = J_{\Sigma} \frac{w_0^2}{2} \frac{R_1}{R_2'}$$

В короткозамкнутых двигателях общего назначения $R_1 \approx R_2'$, т. е. составляющая потерь энергии в статоре примерно равна потерям в роторе.

У двигателей с короткозамкнутым ротором уменьшение потерь в статоре может быть достигнуто путем применения специальной конструкции ротора имеющего повышенное сопротивление, — это двигатели с повышенным скольжением и со сплошным стальным ротором. Двигатели с глубоким пазом также обладают повышенным сопротивлением ротора, изменяющимся в функции скольжения, что также приводит к уменьшению переменных потерь в статоре.

При использовании двух- или многоскоростных асинхронных двигателей прямой пуск до максимальной скорости нежелателен, так как потери энергии окажутся значительно выше, чем у односкоростного короткозамкнутого двигателя такой же мощности, имеющего номинальную скорость, равную максимальной скорости многоскоростного двигателя. Это объясняется тем, что габариты и момент нагрузки многоскоростного двигателя, определяемые для низшей скорости, значительно больше, чем у односкоростного двигателя.

Пусть, например, для двухскоростного двигателя осуществляется пуск в две ступени. Если для пуска двигателя на первую ступень обмотка статора включена так, что его синхронная скорость равна половине максимальной скорости $w_0 / 2$, то потери энергии при этом составят (при $M_c = 0$).

$$\Delta A_{nI} = J_{\Sigma} \frac{w_0^2}{8} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right)$$

Пуск на вторую ступень со скорости $w_0 / 2$ до w_0 вызовет потери

$$\Delta A_{nII} = J_{\Sigma} \frac{w_0^2}{8} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right)$$

Суммарные потери при пуске

$$\Delta A_n = \Delta A_{nI} + \Delta A_{nII} = J_{\Sigma} \frac{w_0^2}{4} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (9.40)$$

Следовательно, двухступенчатый пуск уменьшает потери энергии вдвое, по сравнению с пуском в одну ступень. В этом случае предполагалось, что отношение R_1 / R_2 сохранялось неизменным с переключением числа полюсов.

Ступенчатый пуск двухскоростного двигателя аналогичен пуску двигателя постоянного тока независимого возбуждения путем изменения подводимого к якорю напряжения в две ступени.

Многоступенчатый пуск трех- и четырехскоростного двигателя приводит к снижению потерь энергии еще в большей степени.

Торможение двух- или многоскоростного двигателя для снижения потерь энергии аналогично пуску может быть ступенчатым. Так, если, двухскоростной двигатель имеет две синхронные скорости W_{01} и W_{02} , то торможение от W_{02} до W_{01} можно осуществить с рекуперацией энергии в сеть, а W_{01} до 0 – противовключением. Потери энергии при торможении без нагрузки на первой ступени (рекуперативное торможение) можно определить по формуле

$$\begin{aligned} \Delta A_{п.т} &= J_{\Sigma} w_0^2 \frac{1}{m^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)^{1-m} \int_0^1 s ds = \\ &= J_{\Sigma} \frac{w_0^2}{m^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{(m-1)^2}{m^2} \end{aligned}$$

где $m = w_{02} / w_{01}$

Потери энергии на второй ступени (торможение противовключением)

$$\Delta A_{тп} = J_{\Sigma} \frac{w_{02}^2}{m^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \int_1^2 s ds = J_{\Sigma} \frac{w_{02}^2}{m^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{3}{m^2}$$

Суммарные потери при ступенчатом торможении равны:

$$\Delta A_{т} = J_{\Sigma} w_{02}^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{(m-1)^2 + 3}{m^2} \quad (9.41)$$

В отличие от нерегулируемого привода, когда значения W_0 задаются скачком и при этом в начальной стадии переходного процесса ввиду больших скольжений мощность потерь велика (рис. 9.6), в регулируемом приводе имеется возможность плавного задания ω , и снижения тем самым текущего значения скольжения и потерь. Рассмотрим изменение мощности потерь при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения при линейном задании ЭДС преобразователя. Зависимости $w_0(t) = e_n(t)/c$ и $w(t)$ при пуске вхолостую представлены на рис. 9.7. На первом этапе пуска ($t \leq t_{n0}$)

$$\begin{aligned} w(t) &= \varepsilon_0(t) - T_m \varepsilon_0 \left(1 - e^{-t/T_m} \right) \\ M &= M_0 \left(1 - e^{-t/T_m} \right) \end{aligned}$$

на втором ($t > t_{n0}$)

$$\begin{aligned} w(t) &= w_0 + (w' - w_0) e^{-(t-t_{n0})/T_m} \\ M &= M_0 e^{-(t-t_{n0})/T_m} \end{aligned}$$

где w' – скорость, соответствующая переходу от первого ко второму участку пуска.

Потери энергии аналогично выражению (9.32) запишем в виде

$$\Delta A_n = \int_0^{t_{n,n}} M (w_0 - w) dt$$

Полагая $t_{n,n} \gg T_m$ и допуская для упрощения линейную зависимость w от t , показанную на рис. 9.7 штриховой линией, получаем

$$\left. \begin{aligned} w(t) &= \varepsilon_0 t - T_m \varepsilon_0; w_0 - w = T_m \varepsilon_0 \\ M &= J_\Sigma \frac{dw}{dt} = J_\Sigma \varepsilon_0; \varepsilon_0 t_n = w_0 \end{aligned} \right\} \quad (9.42)$$

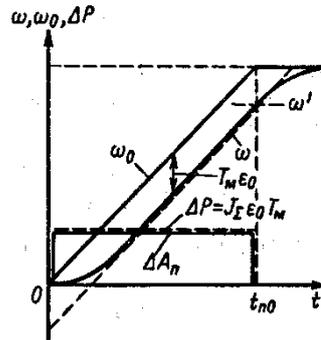


Рис. 9.7. Графики $w(t)$, $w_0(t)$ и потерь энергии при пуске вхолостую в системе УП – Д.

Тогда

$$\Delta A_n = \int_0^{t_{n,n}} J_\Sigma \varepsilon_0 T_m dt \quad (9.43)$$

или окончательно с учетом соотношений

$$\Delta A_n = \frac{J_\Sigma w_0^2}{2} \frac{2T_m}{t_{n0}} \quad (9.44)$$

График мощности потерь при условии (9.42) показан на рис. 9.7 (штриховая линия). Площадь под графиком пропорциональна потерям энергии, определяемым (9.44),

Из (9.44) следует, что когда $T_m \ll t_{n0}$ потери энергии при пуске с линейным изменением напряжения значительно меньше, чем при пуске с постоянным напряжением, когда w задается скачком.

Если управление двигателем производится по системе Г-Д путем включения обмотки возбуждения генератора на полное напряжение, ЭДС генератора изменяется по экспоненциальному закону и потери в якорной цепи будут определяться выражением

$$\Delta A_n \int_0^{t_{n,n}} i_a^2 (R_{я,\Gamma} + R_{я,дв}) dt \quad (9.45)$$

При пуске вхолостую ток якорной цепи

$$i_a(t) = I_{к,з} \left(e^{-t/T_g} - e^{-t/T_m} \right) \frac{1}{m-1} \quad (9.46)$$

где $m = T_g / T_m$ – отношение постоянной времени обмотки возбуждения к электромеханической постоянной привода.

Подставляя (9.46) в (9.45), после преобразований получаем

$$\Delta A_{n\Gamma-Д} = \Delta A_n \frac{1}{m+1} \quad (9.47)$$

где $\Delta A_n = J_\Sigma \frac{w_0^2}{2}$.

Очевидно, что чем больше T_g по сравнению с T_m , т.е. чем медленнее нарастает ЭДС генератора, тем меньше потери энергии. Форсирование возбуждения приводит к возрастанию потерь энергии.

Можно показать, что при пуске под нагрузкой потери энергии в якорной цепи Г-Д равны:

$$\Delta A_{n\Gamma-Д}' = \Delta A_{n\Gamma-Д} + P_c (2T_m + \Delta w_c t_n) \quad (9.48)$$

где P_c , Δw_c – соответственно мощность, потребляемая двигателем, и перепад скорости, обусловленный моментом нагрузки M_c , при установившейся ЭДС генератора.

В процессе рекуперативного торможения вхолостую потери в якорной цепи составят

$$\Delta A_{p,\tau\Gamma-D} = \Delta A_n \frac{m}{m-1}$$

и при $M_c = const$

$$\Delta A_{p,\tau\Gamma-D} = \Delta A_n \frac{1}{m-1} - P_c(2T_m + 2\Delta w_c t_\tau)$$

Анализируя потери энергии в регулируемом асинхронном приводе при плавном задании частоты f_1 и, следовательно, w_0 , не будем учитывать влияние на потери электромагнитных переходных процессов и будем считать, что асинхронный двигатель в переходном режиме всегда работает на линейном участке механической характеристики, т. е. абсолютное скольжение s_a , всегда меньше критического: $s_a < s_{a,\kappa}$.

При данных допущениях электромагнитный момент асинхронного двигателя является функцией относительного скольжения и относительной частоты $f_* = f / f_{ном} = w_0 / w_{01}$, т. е. можно записать $M = \varphi(s_a; f_*)$.

Учитывая, что $w = w_{ном}(f_* - s_a)$, уравнение движения электропривода с асинхронным двигателем при $C_{12} = \infty$ можно записать в виде

$$\begin{aligned} M &= M_c + J_\Sigma \frac{d[w_{ном}(f_* - s_a)]}{dt} = \\ &= M_c + J_\Sigma w_{ном} \frac{df_*}{dt} - J_\Sigma w_{ном} \frac{ds_a}{dt} \end{aligned} \quad (9.49)$$

Текущее значение момента асинхронного двигателя в функции относительной частоты f_* и скорости w при учете того, что при $s_a < s_\kappa$ электромагнитный момент пропорционален s_a определяется выражением ($M = K_{sa}s_a$)

$$M = K_{sa}f_* - \frac{K_{sa}}{w_{ном}} w_0 \quad (9.50)$$

Подставляя полученное уравнение механической характеристики асинхронного двигателя (9.50) в уравнение движения (9.49), получаем

$$K_{sa}f_*(t) = M_c + \frac{K_{sa}}{w_{ном}} w + J_\Sigma \frac{dw}{dt}$$

где $f_*(t)$ – закон изменения относительной частоты.

Пусть, как и при рассмотрении потерь переходных процессов, при линейном изменении напряжения двигателя независимого возбуждения управляющее воздействие изменяется линейно и $\varepsilon_0 = const$, тогда абсолютное скольжение будет изменяться по закону

$$s_a = \frac{M_c + J_\Sigma \varepsilon_0}{K_{sa}} (1 - e^{-t/T_m}) + s_{a,c} e^{-t/T_m} \quad (9.51)$$

где $s_{a,c} = M_c / K_{sa}$ – абсолютное скольжение, соответствующее статическому моменту;

$T_m = J_\Sigma w_{ном} s_{ном} / M_{ном}$ – электромеханическая постоянная времени.

Потери энергии в статорной и роторной цепях в переходном процессе при линейном изменении задания частоты будут равны:

$$\Delta A_{n,n} = \int_0^{t_{n,n}} M w_{ном} s_a \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) dt \quad (9.52)$$

В частности, при пуске $M_c = 0$ когда заданное время разгона $t_{n,n} = w_{ном} / \varepsilon_0 \gg T_m$, $s_a = J_\Sigma \varepsilon$ учитывая (9.52), получаем

$$\Delta A_{n,n} = \frac{J_{\Sigma} w_{1ном}^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{2T_m}{t_{n0}} \quad (9.53)$$

Видно, что выражения (9А4) и (9.53) аналогичны, и при сравнительно медленном задании W_0 при частотном пуске асинхронного двигателя так, чтобы $s_a < s_{a,к}, t_{n0} \gg T_m$, потери энергии могут быть существенно снижены по сравнению с потерями при прямом пуске. Аналогичные результаты можно получить при анализе частотного управления торможением асинхронного двигателя.

3.4. Энергосбережение средствами электропривода

Электроприводами потребляется более 60% производимой в мире электроэнергии, поэтому вопросы энергосбережения имеют чрезвычайно важное значение. Для России это тем более важно, поскольку стоимость электроэнергии возрастает и при неэкономичных системах электроприводов производственные расходы возрастают, соответственно возрастает стоимость вырабатываемой технологическими комплексами продукции. Установленные стандартами показатели качества электроэнергии делают необходимым при выборе систем электроприводов, особенно при большой их установленной мощности, рассмотрение всей электротехнической цепи от КТП (комплектная трансформаторная подстанция), где осуществляется контроль потребляемой активной и реактивной мощности и качества электроэнергии, до исполнительных органов рабочих и транспортных машин. Следует оптимально осуществлять набор силовых модулей (трансформаторов, реакторов, фильтров, полупроводниковых преобразователей, тормозных средств), при которых обеспечиваются минимальные потери электроэнергии, не нарушаются показатели качества электроэнергии у источника питания и решаются все задачи технологии.

К основным методам сбережения электроэнергии в автоматизированных электроприводах технологических агрегатов и комплексов относятся следующие:

1. Применение вместо нерегулируемых электроприводов регулируемых, с помощью которых возможно при изменении режимов работы технологического оборудования и физико-механических свойств обрабатываемого вещества, устанавливать оптимальные по энергетическим затратам условия обработки вещества, например, оптимальные скорости насосов расхода и свойств жидкости, шпинделей металлообрабатывающих станков, размеров и материала обрабатываемых деталей, роторов дробилок, размеров и свойств дробимых веществ. Переход на регулирование давления и расхода воды насосных агрегатов с помощью регулируемых электроприводов, взамен дроссельного регулирования, приводит к исключению потерь напора и экономии электроэнергии, примерно на 30 %. Насос, как устройство преобразования энергии, имеет свой коэффициент полезного действия - отношение механической энергии, приложенной к валу, к гидравлической энергии, получаемой в напорном трубопроводе насосного агрегата. Анализ требуемого изменения частоты насосного агрегата при изменении расхода в сети показывает, что с уменьшением расхода требуется снижение частоты вращения. Если рассмотреть работу агрегата для расхода меньше номинального, то для этих режимов рационально работать с пониженной частотой вращения. В этом случае КПД насоса выше, чем при работе с номинальной частотой вращения. Таким образом, снижение частоты вращения в соответствии с технологической нагрузкой позволяет не только экономить потребляемую энергию благодаря исключению гидравлических потерь, но и получить экономический эффект из-за повышения коэффициента полезного действия насоса.

2. Применение силовых модулей регулируемых электроприводов, имеющих максимальные коэффициенты полезного действия и мощности (главными среди них являются электродвигатели, управляемые полупроводниковые преобразователи — выпрямители и инверторы, тормозные модули, обеспечивающие рекуперацию электроэнергии от двигателя в сеть переменного или постоянного напряжения); максимально возможное исключение потерь электроэнергии при использовании тормозных резисторов. Для примера рассмотрим тяговые электроприводы маршрутного электротранспорта, в частности трамвая. В широко распространенных тяговых электроприводах трамваев с пуско-тормозными реостатами потери в реостатах достигают 63% энергии, потребляемой трамваем из контактной линии. Непосредственно на движение задействуется 25 % энергии сети, а 63 % энергии превращаются в тепло в реостатах в процессах разгона и торможения трамвая. Замена реостатного регулирования электроприводов на регулирование с использованием транзисторных широтно-импульсных преобразователей дает возможность снизить потери в пусковых режимах и вернуть энергию, вырабатываемую при торможении, в контактную сеть. В результате расход энергии, потребляемой трамваем, уменьшается почти в 2 раза. Широтно-импульсный преобразователь осуществляет преобразование кодовых сигналов из диапазона чисел от 0 до 256 в длительность импульсов. Причем если на входе нуль, то на выходе формируется импульс отрицательной полярности и максимальной длительности, равной периоду следования импульсов широтно-импульсного преобразователя. При сигнале на входе, равном 256, формируется положительный импульс максимальной длительности; при сигнале на входе, равном 128, на выходе широтно-импульсного преобразователя формируются за период два разнополярных импульса одинаковой длительности. Преимущество использования ШИМ (Широтно-импульсная модуляция) - это легкость изменения величины напряжения при минимальных потерях. Конечно же, можно, применять делитель

напряжения, но его работа основана на применении резисторов, а на них происходит рассеивание энергии, что в свою очередь вызывает нагрев и неэкономичность (преобразование электрической энергии в тепловую). Работа широтно-импульсного преобразователя реализуется с помощью полупроводниковых приборов – транзисторов. Максимальные потери на транзисторах бывают при их полуоткрытом состоянии. Поэтому используют два крайних положения: полностью открыты или закрыты, тогда потери минимальны. Частота срабатывания транзисторов очень большая, то есть переходные состояния имеют мало времени и потери, фактически, сводятся к нулю. ШИМ нашел широкое применение как регулятор оборотов двигателей постоянного тока (ДПТ).

3. Исключение режимов пуска и торможения технологических агрегатов и комплексов в результате применения дополнительных механизмов с регулируемыми электроприводами, обеспечивающих совмещение движений основных механизмов в технологическом процессе для перевода их в непрерывные режимы работы. Для примера рассмотрим стан холодной прокатки металлической полосы, в котором имеются режимы: пуска агрегатов до заправочной скорости, заправки полосы, пуска до номинальной скорости, рабочей прокатки, остановки агрегатов и смены рулона на размотке. Далее цикл повторяется. Перевод стана в непрерывный режим осуществляется введением в технологическую схему дополнительных агрегатов. Непрерывный стан холодной прокатки, рассматриваемый с позиций автоматического регулирования, представляет собой сложный многомерный объект, характеризующийся наличием нескольких взаимосвязанных регулируемых параметров, нескольких регулирующих воздействий, а также многими возмущениями, действующими на различные элементы системы стана. *Непрерывные станы холодной прокатки* являются сложными агрегатами, для которых имеет место тесное слияние технологического процесса с системой многодвигательного автоматизированного электропривода и элементами конструкции самого стана.

Так же к основным направлениям энергосбережения средствами промышленного электропривода относится выбор электродвигателя. Энергосбережение по отношению к простейшему неуправляемому самому массовому электроприводу состоит в совершенствовании процедуры выбора двигателя для конкретной технологической установки с целью соблюдения номинального теплового режима двигателя в процессе эксплуатации. Постановка задачи очевидна – двигатель заниженной мощности быстро выходит из строя, а двигатель завышенной мощности преобразовывает энергию неэффективно, т.е. с высокими удельными потерями в самом двигателе (низкий КПД) и в подводящих линиях (низкий $\cos\phi$). Решение задачи не всегда элементарно, часты ошибки, а т.к. простейших электроприводов миллионы, то возможен большой ущерб. В случаях, когда нагрузка неизменна, ошибки вызваны лишь низкой квалификацией разработчиков (двигатель выбирали по диаметру вала). Когда нагрузка меняется, выбор оказывается значительно сложнее, что ещё усугубляется недостаточностью исходной информации, паспортных и каталожных данных. В основе взаимоотношений между энергоснабжающей организацией и предприятием находятся устанавливаемые, с учетом тех или иных факторов, тарифы на электроэнергию. Несовершенство тарифа очевидно, так как он не учитывает качество потребляемой энергии и влияние этого параметра на характеристики электрооборудования. Минимальные затраты энергии возможны при разной степени аварийности электрооборудования, представляющей собой достаточно сложную функциональную зависимость от состояния оборудования, уровня его обслуживания, состояния энергетического хозяйства в целом, включая и характеристики электроэнергии. Общие затраты включают не только плату за электроэнергию, преобразованную тем или иным способом в полезный продукт, но и расходы на ремонт и обслуживание электрооборудования. По этой причине целесообразнее рассматривать показатель, который равен сумме непосредственных платежей за электроэнергию и затрат на восстановление электрооборудования: $C = C_1 + C_2$, где: C_1 – затраты на электроэнергию, определенные по трехставочному или зонному тарифу; C_2 – стоимость ремонтов, восстановления электрооборудования. Последний показатель достаточно высок и в основном показывает состояние энергохозяйства: при удовлетворительном – затраты на ремонт минимальны, при неудовлетворительном – сравнимы с платежами по основным статьям. Известно, что в отдельных подотраслях промышленности аварийность электродвигателей колеблется от 20 до 60–70 % в год, причем указанные показатели отличаются даже в случае однотипных предприятий или производств. Характерно, что при общем спаде производства количество аварийных выходов машин не уменьшается, а растет. С учетом недогрузки электрических машин в нормальном технологическом режиме на 20–25 % и снижении производительности в 2,5–3 раза, затраты на ремонт двигателей (при наработке на отказ 4000 час) вплотную приближаются к стоимости электроэнергии, которую потребил бы двигатель за время эксплуатации между двумя ремонтами при условии, что цена 1 кВт·ч находится на уровне 1–1,1 р. С учетом транспортных и иных расходов, связанных с аварийным выходом двигателей из строя, удельные затраты на ремонт приближаются к соответствующему показателю для новых заводских машин.

Повышения экономичности массового нерегулируемого электропривода посредством перехода на энергосберегающие двигатели и двигатели улучшенной конструкции, специально предназначенные для работы с регулируемым электроприводом.

В энергосберегающих двигателях за счет увеличения массы активных материалов (железа и меди) повышены номинальные значения КПД и $\cos\phi$. Энергосберегающие двигатели используются, например, в США и дают эффект при постоянной нагрузке. Целесообразность применения энергосберегающих двигателей должна оцениваться с учетом дополнительных затрат, поскольку небольшое (до 5 %) повышение номинальных КПД и $\cos\phi$ достигается за счет увеличения массы железа на 30–35 %, меди на 20–25 %, алюминия на 10–15 %. Ориентировочные зависимости КПД и $\cos\phi$ от номинальной мощности для обычных и энергосберегающих двигателей фирмы «Гоулд» приведены на рис. 1.

Ожидается изменение методик проектирования двигателей, отвечающих их применению в составе именно регулируемого электропривода. Прежде всего это касается асинхронного двигателя, для которого отказ от

традиционных требований фиксированных амплитуды и частоты питающей сети, прямого включения в питающую сеть, обеспечения заданной перегрузочной способности приводит к существенному изменению конструкции и резкому улучшению характеристик. Можно отметить выпуск серии асинхронных двигателей, спроектированных фирмой «Siemens» для общепромышленных электроприводов. Изменяется методика проектирования и других типов двигателей, расширяется их номенклатура. По-видимому, следует ожидать резкого, взрывного улучшения характеристик по-новому спроектированных двигателей для регулируемого электропривода и соответствующую корректировку требований к системам управления. Так, прогнозируется рост частоты питания двигателей в регулируемом электроприводе до 500–1000 Гц и выше и снижение индуктивностей обмоток. Наблюдается рост выпуска электропривода с синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов (так называемый бесконтактный ВД постоянного тока). Эти двигатели имеют наилучшие массогабаритные показатели. Среди других типов двигателей выделим индукторный двигатель (Switch Reluctance Motor), разработанный и активно предлагающийся в последние годы. Как утверждают разработчики, его характеристики улучшены, что в комбинации с упрощенным силовым преобразователем позволяет надеяться на его массовое применение. Перспективным является также синхронно-реактивный двигатель, который по прогнозам обладает массогабаритными показателями, лежащими в промежутке между соответствующими рекордными значениями синхронного двигателя и асинхронного двигателя, а по энергетической эффективности, возможно, превосходит их, причем при более низкой стоимости. Реактивные ВД упрощают схемы коммутаторов и якорных обмоток. При оптимизации угла опережения инвертора можно добиться увеличения момента и КПД привода. Существует оптимальный угол опережения в зависимости от частоты вращения. Увеличение КПД достигается также за счет соответствующего укорачивания шага обмотки.

Для наилучшего использования синхронного двигателя традиционной конструкции необходимо уменьшить сверхпереходные реактивные сопротивления (за счет открытых пазов статора, увеличения воздушного зазора, демпферной обмотки на роторе и др.) и реакцию якоря (за счет увеличения воздушного зазора и выбором коэффициента полюсного перекрытия).

РАЗДЕЛ 4: ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

4.1. Общие требования, предъявляемые к электроприводе.

Четкую последовательность этапов проектирования электропривода определить практически невозможно. Как правило, приходится принимать какие-то ориентировочные решения, на основе которых производятся последующие расчеты, а затем вновь возвращаться к первоначально принятому решению и уточнять и корректировать его. Очень часто вообще приходится идти несколькими параллельными путями и, сравнивая получаемые результаты, принимать решение по выбору варианта.

Проектирование всегда необходимо начинать с изучения свойств рабочей машины, для которой предназначается электрический привод, и составления на базе полученных результатов технического задания. В нем должны быть сформулированы все требования, касающиеся как статических, так и динамических свойств разрабатываемого электропривода. На основе заданий должны быть выявлены возможные пути решения поставленной задачи — установлены возможные варианты привода, удовлетворяющие поставленным условиям. При этом хотя бы предварительно должны быть проработаны все вопросы построения электропривода, включая, и систему управления. Далее на основе данных об ожидаемых режимах работы механизма — возможной частоте включений, характере изменения статического момента, ожидаемых значениях скорости и ускорения, должны быть построены его нагрузочные диаграммы. На основе последних ориентировочно может быть оценена необходимая мощность и момент, развешиваемый двигателем. Далее должна быть выбрана номинальная скорость двигателя. При этом возможны различные подходы к решению этого вопроса. Для приводов, у которых существенное значение имеют переходные процессы, одновременно должно быть просчитано оптимальное значение передаточного отношения редуктора. При наличии длинных механических валов здесь же необходимо оценить возможное влияние упругих деформаций и учесть их в уравнениях, описывающих поведение системы.

При работе механизма с ударной нагрузкой, как это имеет место в прессах, ножницах и т. п. объектах, необходимо продумать вопрос об использовании маховика для снижения возможных перегрузок двигателя. Здесь же необходимо оценить его момент инерции. Следует, однако, иметь в виду, что окончательно вопрос о необходимости маховика и его размерах может быть решен лишь после выбора двигателя.

Чтобы перейти к предварительному выбору преобразователя, питающего двигатель, необходимо, уже на этом этапе продумать вопросы управления приводом и составить структурную схему привода. Исходя из требований по допустимым погрешностям должны быть определены необходимые передаточные коэффициенты (коэффициенты усиления) блоков, последовательно включаемых в цепь управления, и соответствующие им схемные воплощения.

Далее следует один из основных этапов проектирования — синтез системы управления. В большинстве случаев структура системы управления выбирается на основе инженерной интуиции проектировщика, исходя

из сформулированных ранее требований к функционированию привода. Это может быть система подчиненного управления, система комбинированного управления и т. д.

Задача синтеза в основном касается выбора параметров корректирующих цепей, т.е. преимущественно проводится параметрический синтез. Лишь некоторые методы, известные в теории автоматического управления (аналитического конструирования, модального управления), осуществляют структурный синтез. Однако результаты их обычно бывают либо избыточными, либо требуются дополнительные, иногда достаточно сложные, структурные преобразования для построения реальной схемы.

На этом же этапе производится выбор задающего устройства — задатчика интенсивности, а также устройств ограничения токов, моментов. По результатам синтеза определяются все блоки системы управления.

Далее можно приступить к расчету динамики, т.е. к построению кривых переходных процессов. На основе этих кривых строятся нагрузочные диаграммы электропривода. Последние являются основой для проверки правильности выбора мощности двигателя. Несоответствие первоначально принятому значению приводит к необходимости уточнения типоразмера двигателя, и проведения повторного расчета во всей его последовательности.

После завершения расчета по выбору мощности двигателя можно провести расчет электрических параметров преобразователя, питающего двигатель, и всех блоков управления. Как правило, используют готовые блоки, выпускаемые промышленностью, и к потребителю поступают уже предварительно настроенные системы управления. Необходимо лишь уточнить параметры отдельных узлов, например регуляторов в системах с блоками УБСР. Естественно, что некоторая подстройка необходима, так как при проектировании установки расчетчик располагает лишь приближенными сведениями об объекте как в отношении его математического описания, так и параметров. Кроме того, в расчетах часто не учитывается некоторая нелинейность характеристик, упругие деформации в механических передачах. Однако в реальной системе влияние их может оказаться заметным. Иногда приходится даже вводить дополнительные корректирующие средства. Если проектирование велось параллельно для нескольких вариантов, то на завершающем этапе необходимо провести технико-экономическое сравнение и окончательно выбрать целесообразный тип привода и оформить всю техническую документацию.

Существенному ускорению проектных работ в настоящее время способствует их автоматизация — внедрение САПР. В связи со сложностью электромеханических объектов, различием физических процессов, протекающих в отдельных звеньях систем управления, полностью решить проблему автоматизации пока не удается. Как правило, автоматизация сейчас ведется в двух направлениях:

Использование ЭВМ для решения наиболее сложных в математическом плане задач анализа и особенно синтеза систем управления. При этом обычно используются приемы оптимизации решения задач.

Автоматизация трудоемких работ по выбору элементов электромеханических систем, наиболее пригодных для поставленных требований. Для этого создаются банки данных электродвигателей, преобразователей, усилителей, датчиков различных физических величин. Проектирование, как правило, ведется в диалоговом режиме с активным участием проектировщика, а иногда даже и интерактивном режиме с решением ряда вопросов непосредственно разработчиком.

Постепенное расширение областей применения ЭВМ при разработке электромеханических систем позволяет существенно сократить сроки проектирования и повысить эффективность использования труда квалифицированных специалистов.

Следует еще остановиться на выборе параметров используемой электроэнергии — напряжения и частоты. Значения их регламентируют ГОСТ 21 128—83 и ГОСТ 6697—83, которыми предусмотрена широкая шкала номинальных значений U и f . Однако на промышленных предприятиях основное напряжение в распределительных сетях — 380 В, которое обеспечивает относительно небольшие потери в сетях.

Дальнейшее повышение напряжения обычно нерационально. Напряжение 500 В уже относится к категории высоких и его использование усложняет эксплуатацию. Лишь для индивидуальных установок большой мощности может быть рациональным использование напряжений 3, 6, 10 кВ.

Внутри установок возможен широкий выбор уровня напряжения. Он не регламентирован ГОСТ. В частности, широко используются двигатели постоянного тока на напряжение 400 и 440 В. Напряжение преобразовательных установок, питающих двигатели, определяется номинальным напряжением последних и схемой преобразователя.

В промышленных установках, как правило, используется та же частота тока, что и в энергосистеме, т.е. 50 Гц. В установках с преобразователями частоты в качестве номинальной (от которой идет регулирование в сторону более низких значений) также обычно принимается частота 50 Гц, так как на другие частоты двигатели не изготавливаются. В локальных установках, а также в сервоприводах и следящих системах с целью уменьшения габаритных размеров и массы аппаратуры иногда используют повышенную частоту 400 Гц. Следует, однако, иметь в виду, что по массогабаритным показателям двухфазные двигатели с номинальной частотой 400 Гц незначительно отличаются от двигателей с номинальной частотой 50 Гц.

4.2. Нагрев и охлаждение двигателей.

Выделение тепловых потерь приводит к нагреванию двигателей, накладывая тем самым ограничения на режимы работы электропривода.

Электрическая машина является сложным объектом нагрева, все особенности которого в расчетах по предварительному выбору двигателя учесть трудно. Поэтому на практике применяются упрощенные модели. Чтобы лучше представить суть допущений, лежащих в основе этих тепловых моделей, рассмотрим электрическую машину как объект нагрева. На рис. 9.9 изображены разрезы асинхронного короткозамкнутого двигателя в поперечном и продольном направлениях.

Основное количество теплоты в машине выделяется в обмотках статора 1 и ротора 2.

Конструкция электрических машин содержит элементы, выполненные из материалов, имеющих существенно различную теплопроводность и теплоемкость. Сравнительно хорошо проводят теплоту материалы, из которых выполняются обмотки, – медь и алюминий. Хуже способность к передаче теплоты у сталей, из которых выполнены магнитопроводы и станина машины. Плохо проводят теплоту изоляционные материалы, окружающие проводники – источники теплоты. Препятствуют хорошему отводу теплоты из машины и нециркулирующие слои воздуха, а также неплотности механического контакта отдельных элементов. В диапазоне температур, при которых работают элементы электрических двигателей, практически все количество теплоты, передаваемое от нагретых элементов менее нагретым, пропорционально первой степени разности температур между этими элементами.

Неоднородность тепловых свойств объема машины, ее «слоистость», неравномерное распределение источников теплоты определяют сложную картину распределения температуры по сечению. Существенным образом на нагрев влияют и способ охлаждения, и положение отдельных частей машины относительно путей протекания охлаждающего воздуха. Так, при развитых путях циркуляции воздуха внутри машины тепловая энергия отводится от обмоток теплообменом с потоками воздуха, в малой степени передаваясь железу статора и корпусу машины. В двигателях с развитой за счет ребрения наружной поверхностью и внешним обдувом теплоотвод реализуется в основном поверхностью машины. Несмотря на высокую теплопроводность меди и равномерное выделение теплоты по длине, в осевом направлении машины тоже имеется неравномерное распределение температуры. Лобовые и пазовые части обмотки находятся в различных условиях охлаждения: пазовая часть отделена от стали дополнительно пазовой изоляцией, лобовая часть может оказаться в среде подогретого воздуха в зависимости от положения относительно Вентилятора. Поэтому в машинах закрытого исполнения лобовые части оказываются нагретыми больше пазовых, а в машинах защищенного исполнения наоборот.

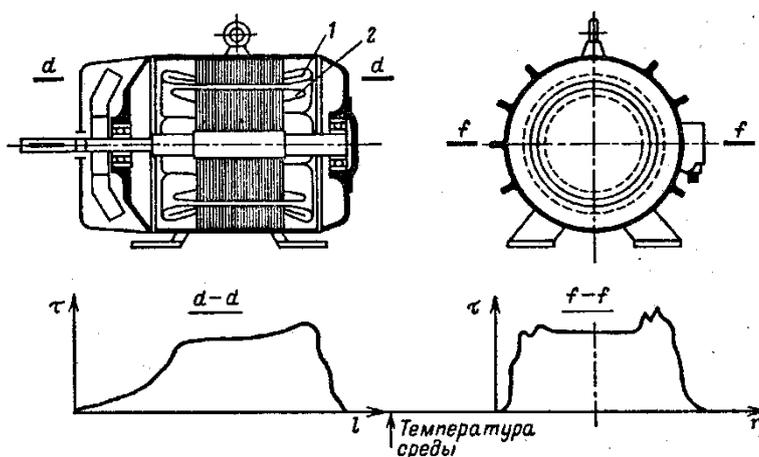


Рис. 9.9, Примерное распределение температуры в продольном (а) и поперечном (б) сечениях асинхронного двигателя

Из-за конечной скорости распределения теплоты по сечению машины в динамических тепловых режимах распределение температуры зависит еще и от времени.

Разность температур между соседними элементами машины или средой – это как бы «температурное напряжение», определяющее направление перетока теплоты. На рис.9.9 показано возможное в некоторый момент времени распределение температуры по поперечному сечению и вдоль статорной обмотки асинхронного двигателя.

Расчетная практика и экспериментальные исследования показывают, что удовлетворительные модели нагрева электрических машин для предварительного выбора двигателей и проверки их по тепловому режиму можно получить, приняв некоторые упрощающие положения, не искажающие в целом физическую картину процессов нагрева.

Так, принимается, что мощность теплоотдачи в машине от одного тела другому или окружающей среде равна произведению первой степени разности температур между этими телами на коэффициент теплоотдачи A , Вт/с. Например, если разность температур между корпусом машины и охлаждающей средой, температура которой принимается постоянной, равна τ , °С, то мощность теплового потока от корпуса к среде есть

$$\Delta P = A \tau, \text{ Вт.}$$

Рассмотрим тепловую модель двигателя, состоящую из двух тел, одно из которых представляет ее обмотки с теплоемкостью C_1 Вт с/°C, а другое – магнитопроводы и станину с суммарной теплоемкостью C_2 . Теплоемкость численно равна количеству теплоты, необходимой для увеличения температуры тела на 1 °C, поэтому в общем случае справедливо соотношение $Cd\tau = \Delta P dt$, Вт с. Медь обмоток и сталь конструкции обладают довольно высокой удельной теплопроводностью, поэтому допустимо приближенно принять, что в любой момент времени температура в пределах обмотки и стали одинакова, т.е. считать теплопроводность бесконечной. Наличие между сталью и медью термического сопротивления – изоляции – определяет разность температур между ними. Мощность теплового потока между этими телами модели равна:

$$\Delta P = A_{12}(\Theta_{ст} - \Theta_{м}) = A_{12}(\tau_1 - \tau_2)$$

где ΔP – мощность теплового потока между сталью и медью; τ_1 и τ_2 – соответственно $(\Theta_{м} - \Theta_{среды})$ и $(\Theta_{ст} - \Theta_{среды})$ – превышения температур меди и стали над температурой охлаждающей среды; A_{12} – коэффициент.

Принятым допущениям соответствует физическая модель, изображенная на рис. 9.10. Это составной цилиндр. Внутренняя часть его с теплоемкостью C_1 , представляет обмотки, теплопередача между которыми и сталью определяется коэффициентом A_{12} моделирующим термическое сопротивление изоляции. Оболочка цилиндра с теплоемкостью C_2 моделирует массу железа машины. Мощность теплового потока от корпуса к окружающей среде пропорциональна A_2 .

Теплоотвод с поверхности и от внутренних частей машины, который осуществляется в основном путем конвекции, зависит от скорости охлаждающего воздуха U . При этом теплота отводится потоками воздуха и от внутренних частей машины. Для этого в модели предусмотрен канал в массе меди и указан коэффициент теплоотдачи A_1 , от обмотки к окружающей среде. Коэффициенты A_1 и A_2 в общем случае зависят от скорости движения охлаждающего воздуха. Вентилятор B может приводиться в движение самой машиной, и тогда $U = f(w)$, или от специального двигателя, тогда $U = const$. В ряде типов машин вентилятор отсутствует и $A_1 \approx cont$, $A_2 \approx cont$

Используем полученную модель для анализа статических тепловых состояний двигателя при постоянных значениях мощности потерь в меди ΔP_m и стали $\Delta P_{ст}$ и соответственно $\tau_1 = const$, $\tau_2 = const$. Уравнения, описывающие статическое тепловое состояние, должны отражать баланс между мощностью внутренних тепловыделений, теплового потока, направленного к каждому из тел модели, и мощностью теплоотвода.

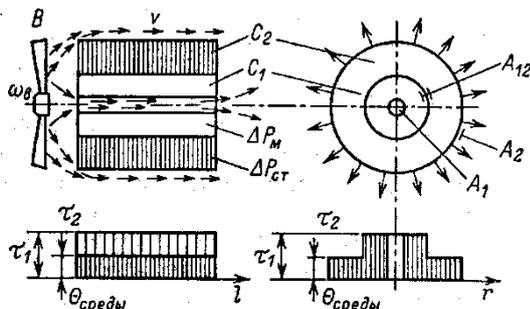


Рис. Упрощенная модель двигателя как тела нагрев

Поэтому справедливы следующие уравнения:

для меди

$$\Delta P_m = A_{12}(\tau_1 - \tau_2) = A_1 \tau_1 \quad (9.62)$$

Мощность тепловых потерь в меди

Мощность теплового потока между сталью и медью

Мощность теплового потока от меди к охлаждающей среде.

для стали

$$\Delta P_{ст} = A_{12}(\tau_1 - \tau_2) = A_2 \tau_2 \quad (9.63)$$

Мощность тепловых потерь в стали

Мощность теплового потока между медью и сталью

Мощность теплового потока от стали к охлаждающей среде.

Параметры C_1 и C_2 определяют тепловую инерционность и в (9.62), (9.63) не входят, так как на статические режимы не влияют.

Решив систему алгебраических уравнений (9.62), (9.63) несложно, поэтому приведем выражения для τ_1 и τ_2 без вывода:

$$\tau_1 = \frac{\Delta P_m (A_2 + A_{12}) + \Delta P_{cm} A_{12}}{A_1 A_2 + A_1 A_{12} + A_2 A_{12}}$$

$$\tau_2 = \frac{\Delta P_{cm}}{A_2 + A_{12}} + \frac{\Delta P_m A_{12} (A_2 + A_{12}) + \Delta P_{cm} A_{12}^2}{(A_1 A_2 + A_1 A_{12} + A_2 A_{12})(A_2 + A_{12})}$$

Важно заметить, что ввиду линейности принятой модели нагрева двигателя выражения (9.64), (9.65) и полученные ниже можно использовать при оценке средних температур τ_{1cp} и τ_{2cp} для процессов с периодическим или случайным характером изменения потерь, но постоянными средними значениями.

4.3. Расчет мощности и выбор типа электродвигателя при продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном режимах работы.

Основы выбора мощности электропривода

В инженерной деятельности специалиста-электроприводчика задача правильного определения требуемой мощности электропривода и выбора двигателей, обладающих достаточной мощностью и перегрузочной способностью, имеет исключительно важное практическое значение. Ограничения, накладываемые на процессы электромеханического преобразования энергии по условиям нагрева, условиям коммутации тока на коллекторах машин постоянного тока, по максимальному моменту двигателей переменного тока (см. §2.7) при выборе двигателей должны учитываться тщательно, достоверно, с разумным запасом, обоснованным анализом вероятных изменений факторов, определяющих нагрев и перегрузочную способность двигателей, а также оценкой точности используемых методов расчета.

Ошибки в сторону занижения требуемой мощности электропривода снижают надежность его работы и при неблагоприятных условиях вызывают ускоренный износ изоляции и выход двигателей из строя. Однако ошибки в сторону запаса также влекут за собой издержки, связанные с нерациональным использованием дорогостоящего оборудования, ухудшением энергетических показателей недогруженных двигателей и увеличением динамических нагрузок механизмов. Поэтому от правильности выбора двигателей при проектировании существенно зависит производительность, надежность и экономичность приводимых в движение машин.

Необходимые сведения о перегрузочной способности различных двигателей, достаточные для правильного выбора двигателей по перегрузочной способности, уже изложены в гл. 2. Главное внимание в данной главе уделяется выбору двигателей по нагреву, который при работе электропривода определяется тепловыделением, обусловленным потерями энергии в элементах конструкции двигателей - обмотках, магнитопроводах, коллекторах и т. п. Приступая к изучению данной главы, полезно восстановить в памяти сведения о потерях энергии, процессах нагрева двигателей и их энергетических показателях, полученные ранее в курсе «Электрические машины». Изложенные выше сведения о режимах преобразования энергии, переходных процессах работы электроприводов, используются в данной главе для определения потерь энергии не только в установившихся, но и в переходных процессах, а также для изложения метода расчета нагрузочных диаграмм электропривода и обоснования используемых при проектировании электроприводов наиболее общих методов проверки двигателей по нагреву.

В сравнении с другими разделами курса данный раздел, главной целью которого является изучение методов расчета потерь энергии, нагрузочных диаграмм, процессов нагрева и охлаждения двигателей и методов проверки их выбора по нагреву, представляется более простым для освоения. Однако необходимо избежать его поверхностного изучения, ибо формальное неквалифицированное использование несложных расчетных соотношений при решении конкретных задач проектирования электроприводов приводит к грубым ошибкам. Необходимо хорошо усвоить допущения и ограничения, принятые при получении тех или иных формул и методов расчета, знать физику процессов, для которых они получены, и уметь грамотно обосновывать возможность или недопустимость их использования для различных двигателей, их режимов работы и т. д.

Активному освоению изложенных в главе методов расчета должны способствовать снабженные пояснениями примеры расчета, представленные в главе, а также практические занятия по курсу и выполнение первой части курсового проекта.

Нагрузочные диаграммы электропривода

Выше было установлено, что нагрузка двигателя является основным фактором, определяющим потери энергии, выделяющиеся в двигателе при работе. В соответствии с основным уравнением движения она зависит от статической нагрузки и динамических моментов, обусловленных изменениями скорости электропривода:

$$M = M_c(t) + J_\Sigma \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (5.31)$$

Нагрузочными диаграммами электропривода называются зависимости, определяющие его статические и полные нагрузки как функции времени в процессе работы. Соответственно различают два вида нагрузочных диаграмм. Нагрузочной диаграммой исполнительного механизма называется зависимость момента статической нагрузки от времени $M_c=f(t)$, дополненная заданной тахограммой установившихся рабочих скоростей $\omega_3(t)$. Нагрузочная диаграмма двигателя - зависимость момента двигателя от времени $M=f(t)$, соответствующая известной зависимости текущей скорости электропривода от времени $\omega(t)$.

Расчет нагрузочной диаграммы двигателя может быть произведен с помощью (5.31), если известны нагрузочная диаграмма исполнительного механизма, суммарный момент инерции электропривода J_Σ и зависимость $\omega=f(t)$. На первых этапах проектирования до выбора двигателя J_Σ и $\omega=f(t)$ не определены, поэтому основой предварительного выбора двигателей и расчета нагрузочных диаграмм двигателей являются нагрузочные диаграммы исполнительного механизма, рассчитываемые по техническому заданию на проектирование. Нагрузочные диаграммы двигателя - зависимости $M(t)$ в сочетании с зависимостями $\omega(t)$, позволяющие рассчитать токи, суммарное тепловыделение в двигателе $\Delta P_{дв.гр.}(t)$ и осуществить проверку правильности предварительного выбора двигателя.

Все многообразие производственных механизмов с точки зрения режимов работы электропривода можно разделить на две большие группы: механизмы непрерывного и механизмы циклического действия. Для электроприводов механизмов, относящихся к этим группам характерны вполне определённые зависимости $M_c(t)$, $\omega_3(t)$ и, в конечном счете, определенные типовые нагрузочные диаграммы двигателей $M(t)$. Заметим, что на вид зависимостей $\omega(t)$ принципиальное влияние оказывает требование изменения направления движения механизма, в соответствии с которым различают нереверсивные и реверсивные электроприводы. Эта классификация при выборе двигателей по нагреву принципиального значения не имеет, однако, оказывает решающее влияние на проектирование системы управления электроприводом и поэтому ее следует иметь в виду.

Начнем рассмотрение с нагрузочных диаграмм механизмов непрерывного действия. Примером механизма непрерывного действия, пуск которого осуществляется в начале смены, а отключение - в конце смены или после нескольких смен непрерывной работы, является вентилятор. Так как регулирование скорости не предусматривается, а нагрузка постоянна, нагрузочная диаграмма двигателя не отличается от нагрузочной диаграммы вентилятора: $M = M_c = \text{const}$; $\omega = \omega_c = \text{const}$ (рис.5.7,а). Аналогичный режим работы, например, для эскалатора метрополитена будет отличаться изменениями во времени статической нагрузки $M_c(t)$, обусловленной изменениями потока пассажиров. В соответствии с механической характеристикой двигателя

$$M = \beta(\omega_0 - \omega)$$

изменения $M_c(t)$ будут вызывать изменения скорости и в переходных процессах динамические нагрузки будут оказывать влияние на нагрузочную диаграмму двигателя, степень которого зависит от нагрузочной диаграммы исполнительного механизма $M_c(t)$ и от параметров электропривода.

Для анализа степени влияния динамических нагрузок механизмов непрерывного действия на нагрузочные диаграммы двигателей рассмотрим нагрузочную диаграмму механизма, представленную на рис.5.7,б. Цикл работы механизма состоит из четырех участков работы t_1-t_4 с постоянным моментом нагрузки соответственно $M_{c1} \div M_{c4}$, нагрузочная диаграмма исполнительного механизма $M_c(t)$ показана на рисунке тонкой сплошной линией, а заданная скорость $\omega_3 = \omega_{cp}$ - штриховой линией $\omega_{cp} = \text{const}$.

Естественная механическая характеристика двигателя приведена на рис.5.7,в, там же показаны нагрузки $M_{c1} \div M_{c4}$. Вследствие ограниченной жесткости механической характеристики изменения нагрузки приводят к изменениям установившейся скорости электропривода. Переходный процесс при изменении нагрузки скачком в соответствии с (4.54) и (4.55) для i -го участка нагрузочной диаграммы можно при $T_3 \approx 0$ представить уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \omega_i &= \omega_{ci} + (\omega_{нач i} - \omega_{ci}) e^{-t/T_n}; \\ M_i &= M_{ci} + (M_{нач i} - M_{ci}) e^{-t/T_n}; \end{aligned} \right\} \quad (5.32)$$

причем отсчет времени для i -го участка ведется от $t=0$.

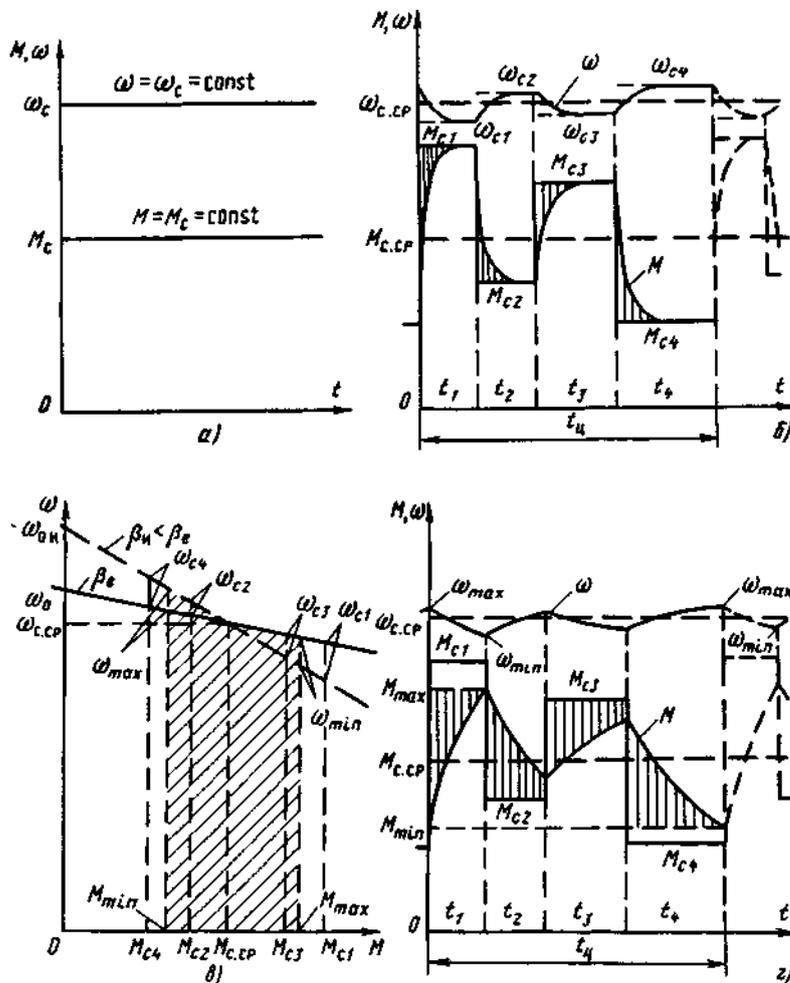


Рис. Нагрузочные диаграммы при непрерывном режиме работы (а, б, г) и механические характеристики двигателя (в)

Рассматривая (5.32), видим, что основное влияние на характер нагрузочной диаграммы двигателя при ступенчатом графике $M_c(t)$ оказывает в соответствии со свойством экспоненты соотношение длительности t_i приложения нагрузки M_{ci} и электромеханической постоянной времени $T_M = J_\Sigma / \beta$. Случай, когда $t_{i\max} > (3 \div 4) T_M$ представлен на рис. 5.7,б - зависимости $M(t)$ и $\omega(t)$ изображены сплошными жирными линиями. Его характерной особенностью является достижение установившейся скорости ω_c , на каждом из участков в соответствии с рис. 5.7,в. При этом динамические нагрузки, показанные на рис. 5.7,б вертикальной штриховкой, незначительно влияют на нагрев двигателя и проверку двигателя по перегрузочной способности можно производить по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма, так как $M_{\max} = M_{c\max}$.

Иные условия складываются, если $t_{i\max} < T_M$. Предположим, что увеличение T_M произошло вследствие соответствующего увеличения J_Σ . Для рассматриваемой нагрузочной диаграммы механизма графики $M(t)$ и $\omega(t)$ при $t_{i\max} < T_M$ представлены на рис. 5.7,г. Нетрудно видеть, что большая механическая инерция привода является фактором, благоприятно влияющим на нагрузочную диаграмму двигателя. Нагрузочная диаграмма сглаживается, размах колебаний момента уменьшается и в пределе при $J_\Sigma \rightarrow \infty$, $M \rightarrow M_{c\text{ср}}$, $\omega \rightarrow \omega_{c\text{ср}}$. Так как $M_{\max} < M_{c\max}$, снижаются требования к перегрузочной способности двигателя, а сглаживание зависимости $M(t)$ обеспечивает снижение переменных потерь, пропорциональных квадрату момента (тока).

В технике рассматриваемый эффект используется в электроприводах механизмов, работающих с ударной нагрузкой на валу (прессы, ножницы для резки металла и т. п.). Для увеличения суммарного момента инерции в таких механизмах на промежуточном валу передач устанавливается маховик, соответственно (прессы, ножницы для резки металла и т. п.). Для увеличения суммарного момента инерции в таких механизмах на промежуточном валу передач устанавливается маховик, соответственно такие электроприводы называются маховиковыми. Запасенная на предшествующем этапе энергия в увеличенных за счет маховика инерционных массах привода при ударе реализуется в больших динамических нагрузках на рабочем органе за счет освобождающейся кинетической энергии при снижении скорости.

Из выражения $T_M = J_\Sigma / \beta$ следует, что увеличение T_M может быть обеспечено соответствующим уменьшением жесткости механической характеристики. Если принять, что значение T_M на рис. 5.7,г получено не за счет увеличения J_Σ , а за счет уменьшения β от β_c до β_n , как показано на рис. 5.7,в, то кривая $M(t)$ не претерпит изменений, сглаживание нагрузочной диаграммы двигателя реализуется при любом способе увеличения T_M одинаково. Однако неравномерность хода, определяемая по кривой $\omega(t)$ должна существенно возрасти: при том же разбросе ΔM_{\max} изменения скорости $\Delta \omega_{\max}$ при $\beta = \beta_n$ в несколько раз больше, чем при $\beta = \beta_c$. Это естественно, так как при том же J_Σ реализовать те же требуемые для преодоления пиковой нагрузки изменения кинетической энергии можно только за счет увеличения $\Delta \omega_{\max}$.

Рассмотрим нагрузочные диаграммы механизмов циклического действия. Их главной особенностью является наличие в рабочем цикле одного или нескольких пусков, реверсов, торможений. При этом в техническом задании на проектирование электропривода, кроме данных, необходимых для расчета статических нагрузок, указываются исходные данные для расчета зависимости $\omega_3(t)$.

К их числу относятся: заданные перемещения $\phi_{3i}(S_{3i})$ на участках цикла работы; допустимое или требуемое ускорение ε_3 ; рабочая скорость ω ; время цикла $t_{ц}$ или число циклов в час $N_{ц}$. Эти данные позволяют рассчитать зависимость $\omega_3(t)$ и построить нагрузочную диаграмму исполнительного механизма $M_c(t)$. В качестве примера на рис.5.8 построены зависимости $M_c(t)$ и $\omega_3(t)$ для механизма циклического действия, цикл которого состоит из участка движения от места загрузки к месту выгрузки, и участка возвращения к месту загрузки. Расчет нагрузочной диаграммы двигателя $M(t)$, показанной на этом рисунке, производится с помощью (5.31). В заключение необходимо еще раз отметить, что на первоначальном этапе проектирования электропривода до выбора двигателя расчет нагрузочной диаграммы двигателя невозможен, так как

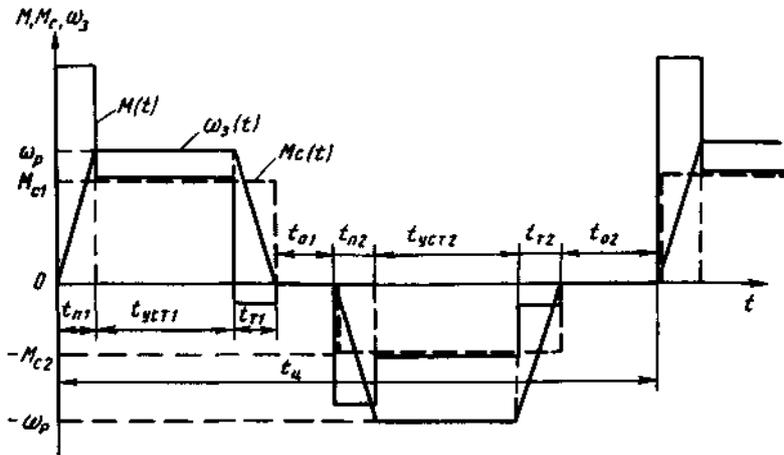


Рис 5.8 Нагрузочная диаграмма электропривода циклического действия

двигателе и во многих случаях выбор двигателя по зависимости $M_c(t)$ без оценки влияния динамических нагрузок недопустим. Поэтому в сложных случаях процесс выбора двигателя осуществляется в три этапа:

- 1) по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма с грубой оценкой влияния динамических нагрузок осуществляю! предварительный выбор двигателя;
- 2) для выбранного двигателя рассчитывают нагрузочную диаграмму двигателя и проверяют двигатель по нагреву;
- 3) если двигатель перегружен или недоиспользуется, по уточненной оценке влияния динамических нагрузок повторяют выбор и проверку вновь выбранного двигателя.

Номинальные режимы работы двигателей

Выбор двигателей по мощности и перегрузочной способности производится на основе номинальных данных двигателя, указываемых на его щитке, в каталогах и справочниках. Номинальные значения мощности, напряжения, тока силовой цепи и скорости соответствуют номинальной нагрузке на валу двигателя, при которой двигатель, работая в номинальном режиме при температуре окружающей среды $+40^\circ\text{C}$, нагревается до допустимой температуры. Температура окружающей среды $+40^\circ\text{C}$, принятая в соответствии с ГОСТ 183-74 в качестве базовой для установления номинальной нагрузки двигателя, с одной стороны, и допустимая максимальная рабочая температура двигателя, соответствующая классу изоляции его обмоток - с другой, определяют допустимое установившееся превышение температуры

$$\tau_{\text{доп}} = t_{\text{max доп}}^0 - 40^\circ\text{C}, \quad (5.33)$$

которое в соответствии с (5.28) пропорционально суммарной мощности потерь в двигателе при номинальной нагрузке

$$\tau_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{ном}} / A_{\text{ном}},$$

где $A_{\text{ном}}$ - теплоотдача двигателя в номинальном режиме.

Выше было отмечено исключительное многообразие реальных режимов работы двигателей, поэтому в электромашиностроении приняты в качестве номинальных несколько конкретных режимов работы, наиболее полно отражающих это многообразие и обеспечивающих достаточные возможности выбора двигателей для различных производственных механизмов. Действующим ГОСТ предусматриваются восемь номинальных режимов, которые в соответствии с международной классификацией имеют условные обозначения SI-S8. Рассмотрим краткую характеристику этих режимов.

Номинальный режим S1 называется продолжительным режимом работы, при котором двигатель работает длительно с постоянной номинальной нагрузкой и за время работы успевает нагреться до установившейся температуры. Зависимости мощности на валу P , мощности потерь ΔP и превышения температуры τ от времени для режима S1 представлены на рис.5.9. Время работы в этом режиме много больше времени нагревания двигателя, поэтому установившееся превышение температуры не должно быть

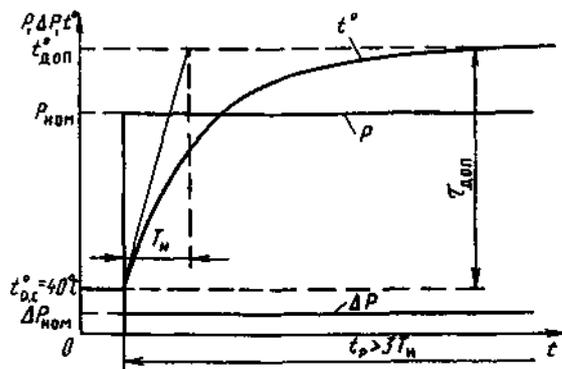


Рис. 5.9 Номинальный режим S1

больше допустимого. Условию $\tau_{уст} = \tau_{доп}$ соответствуют указываемые на щитке двигателя продолжительного режима номинальные значения $P_{ном}$, $U_{ном}$, $I_{ном}$, $n_{ном}$.

Двигатели номинального продолжительного режима работы предназначаются для использования преимущественно для обширной группы электроприводов механизмов непрерывного действия.

Номинальный режим S2 называется кратковременным режимом работы. В этом режиме периоды работы двигателя с номинальной нагрузкой чередуются с периодами отключения двигателя, причем за время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время отключения (паузы) успевает охладиться до температуры окружающей среды (рис.5.10). Благодаря последнему условию начальное превышение температуры при каждом включении равно нулю, а достигаемая за время работы температура двигателя в соответствии с (5.29)

$$\tau_{max} = \tau_{уст} \left(1 - e^{-t_p / T_n} \right) \quad (5.34)$$

определяется номинальной нагрузкой, временем $t_{ном}$ и постоянной времени нагрева T_n . Следовательно, номинальная мощность двигателя режима S2 соответствует вполне определенному номинальному времени работы $t_{рном}$, которое указывается на щитке двигателя и в каталогах. Значения $t_{ном}$ стандартизованы: $t_{ном} = 15; 30; 60; 90$ мин.

Если по истечении времени $t_{ном}$ двигатель не отключается, то его температура, как показано на рис.5.10, продолжает возрастать до $\tau_{уст} \gg \tau_{доп}$, что может повлечь за собой ускоренный износ изоляции и даже выход двигателя из строя.

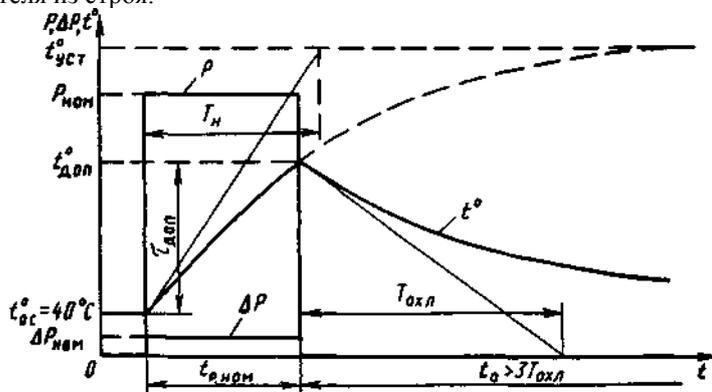


Рис 5 10 Номинальный режим S2

Двигатели кратковременного режима работы широко используются на электрическом транспорте и относительно редко в промышленном электроприводе для различных вспомогательных кратковременно работающих механизмов.

Номинальный режим S3 называется повторно-кратковременным. В этом режиме цикл работы содержит одно включение двигателя и одну паузу (см. рис.5.11), причем за время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы не успевает охладиться до температуры окружающей среды. На рис.5.11 представлен цикл, соответствующий установившемуся процессу нагрева, при котором все тепло, выделившееся в двигателе за время цикла, отдается в окружающую среду и превышение температуры $\tau(t)$ колеблется вблизи среднего значения $\tau_{ср}$. Для того чтобы значения максимального превышения температуры τ_{max} незначительно отличались от среднего значения, необходимо выполнение условия $t_p \ll T_n$, $t_0 \ll T_{охл}$, поэтому наибольшее время цикла регламентировано и составляет 10 мин.

Главной характеристикой повторно-кратковременного режима является продолжительность включения двигателя

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100\% = \frac{t_p}{t_u} 100\%, \quad (5.35)$$

причем номинальные значения ПВ_{ном} составляют 15, 25, 40, 60 и 100%. На щитке двигателя указываются номинальные значения $P_{ном}$, $U_{ном}$, $I_{ном}$, $n_{ном}$ соответствующие конкретному указанному на щитке

значению номинальной продолжительности включения ПВ_{НОМ}. В каталогах приводятся номинальные данные для всех номинальных ПВ, в том числе и для ПВ_{НОМ}=100%, что соответствует работе двигателя режима S3 в продолжительном режиме S1.

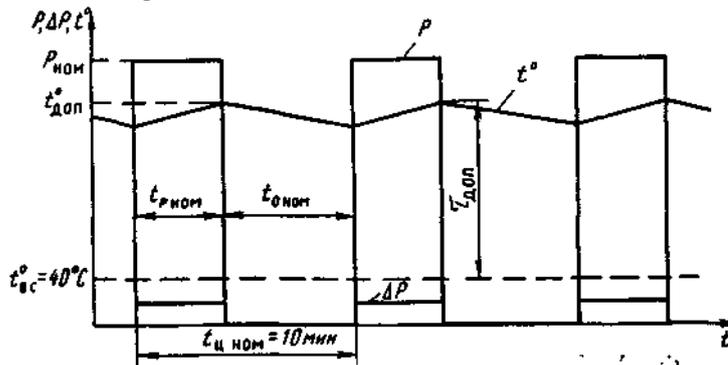


Рис 5 II. Номинальный режим S3

Полезно сопоставить двигатель режима S3, работающий при ПВ_{НОМ}=100%, с двигателем режима S1, предназначенным для работы с ПВ_{НОМ}=100%. Двигатель повторно-кратковременного режима проектируется для работы в основном режиме ПВ_{НОМ}=25% или ПВ_{НОМ}=40%, его параметры оптимизированы для этого основного режима. Благодаря наличию паузы в цикле работы в период t_p двигатель можно перегрузить при ПВ_{НОМ}=25% примерно вдвое в сравнении с продолжительным режимом работы. При этом должна быть обеспечена требуемая перегрузочная способность

$$\lambda_{25\%} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{НОМ } 25\%}} = 2 \div 2,5. \quad (5.36)$$

Максимальный момент двигателя обеспечивается его конструктивными данными и не зависит от ПВ. Поэтому при работе двигателя режима S3 в продолжительном режиме его перегрузочная способность составит

$$\lambda_{100\%} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{НОМ } 100\%}} = 4 \div 5. \quad (5.37)$$

Эта перегрузочная способность избыточна, двигатель имеет худшие массо-габаритные показатели, чем двигатель режима S1, рассчитанный на ПВ_{НОМ}=100% и имеющий нормальную для этого режима перегрузочную способность $\lambda=2 \div 2,5$. Однако двигатель режима S1 нельзя использовать в режиме ПВ_{НОМ}=25%: по нагреву его можно перегрузить в этом случае в 2 раза, но недостаточного запаса по моменту для переходных процессов при такой нагрузке не будет.

Эти несложные рассуждения наглядно демонстрируют необходимость создания специальных серий двигателей для различных режимов работы и рациональность использования двигателей в тех режимах, для которых они рассчитаны.

Рассмотренные режимы S1, S2, S3 являются основными и до сравнительно недавнего времени другие номинальные режимы не предлагались. Разработанные в теории электропривода инженерные методы эквивалентирования режимов работы двигателей по нагреву позволяют решать задачи выбора двигателей на основе этих трех номинальных режимов для всех практических случаев. Действующий ГОСТ расширил номенклатуру номинальных режимов до S8 в целях облегчения выбора двигателей для конкретных осложненных обстоятельств.

Номинальный режим S4 - это повторно-кратковременный режим с частыми пусками.

Номинальный режим S5 - повторно-кратковременный с частыми реверсами.

Номинальный режим S6 называется перемежающимся. Это продолжительный режим, в котором периоды работы двигателя с номинальной нагрузкой чередуются с периодами работы вхолостую, причем за время работы с нагрузкой двигатель не успевает нагреться до установившейся максимальной температуры, а за время работы вхолостую не успевает охладиться до установившейся минимальной температуры холостого хода. Характеристикой режима S6 является продолжительность нагрузки:

$$ПН = \frac{t_n}{t_n + t_{xx}} \cdot 100\%, \quad (5.38)$$

где t_n и t_{xx} - время работы соответственно с номинальной нагрузкой и вхолостую.

Номинальный режим S7 - перемежающийся с частыми реверсами.

Номинальный режим S8 - перемежающийся режим с двумя и более скоростями в цикле работы.

Краткая характеристика дополнительных номинальных режимов S4÷S8 подтверждает, что номинальные данные основных режимов здесь дополняются информацией, облегчающей выбор двигателей для интенсивных повторно-кратковременных режимов, в которых потери энергии в переходных процессах при пусках, реверсах и торможениях оказывают определяющее влияние на тепловые процессы в короткозамкнутых асинхронных двигателях, а также для продолжительного режима работы с переменной циклической нагрузкой.

Методы эквивалентирования режимов работы двигателей по нагреву

Необходимость эквивалентирования режимов работы двигателей по нагреву связана с тем, что реальные режимы работы электроприводов весьма многообразны и вероятность точного совпадения конкретного режима с каким-либо номинальным практически исключена. В то же время выполнение подробных тепловых расчетов для каждого случая выбора двигателя является, как правило, трудно реализуемым путем проверки двигателей по нагреву в связи с отсутствием необходимых данных и неоправданной сложностью расчетов. Поэтому в процессе развития электропривода были созданы эффективные косвенные методы проверки двигателей по нагреву. Наиболее общие из них вошли составной частью в теорию электропривода, причем основой этих методов является так называемый метод средних потерь

Эти методы учитывают, что тепловые процессы в двигателях в нормальных условиях работы благодаря большой тепловой инерции протекают замедленно, поэтому быстрые изменения нагрузки двигателя и, соответственно, тепловыделения фильтруются тепловой инерцией и зависимость $\tau(t)$ сглаживается тем в большей степени, чем меньше время цикла в сравнении с постоянной времени нагрева T_n . При работе в повторно-кратковременном или перемежающемся режимах условие $t_{ц} < T_n$ выполняется по определению и, как выше отмечено, через некоторое время после начала работы наступает установившийся тепловой режим, при котором превышение температуры колеблется относительно среднего значения $\tau_{ср}$ в узких пределах.

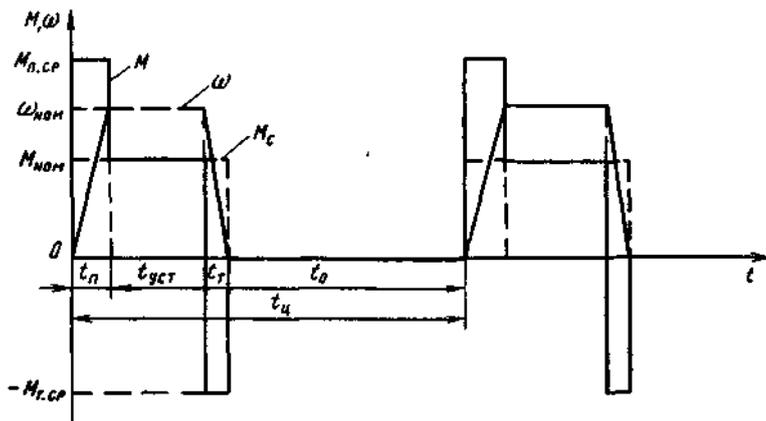


Рис. 5.14 График повторно-кратковременного режима работы электропривода

На рис.5.14 в качестве примера приведен простейший реальный график повторно-кратковременного режима с одним включением двигателя в цикле, учитывающий реальную различную нагрузку двигателя на всех этапах цикла. Нагрузка $M(t)$ и мощность потерь $\Delta P_{дв.гр}(t)$ увеличиваются в переходных процессах и отсутствуют в период паузы. Соответственно в установившемся по нагреву цикле работы температура колеблется относительно $\tau_{ср}$, возрастая при увеличении мощности потерь, снижаясь в период паузы. Признаком установившегося теплового цикла является равенство начального и конечного превышения температуры: $\tau_{нач} = \tau_{кон}$. ПРИ этом все тепло выделившееся за время цикла в двигателе, за то же время полностью отдается в окружающую среду. Максимальное превышение температуры τ_{max} не должно быть больше допустимого значения $\tau_{доп}$, однако при условии $t_{ц} \ll T_n$ значения τ_{max} и $\tau_{ср}$ близки и эквивалентирование реального и номинального цикла работы по нагреву с приемлемой точностью может быть проведено при $\tau_{max} = \tau_{ср}$. Прежде чем перейти к количественным оценкам, рассмотрим особенности процесса, представленного на рис.5.14. В периоды переходных процессов полные выделяющиеся в двигателе потери нелинейно зависят от времени в связи с отмеченной выше зависимостью от скорости потерь в стали и механических (рис.5.13). Изменения скорости должны быть учтены и при оценках теплоотдачи, так как у двигателей с самовентилиацией номинальная теплоотдача $A_{ном}$ реализуется только при $\omega \geq \omega_{ном}$, а при снижении скорости существенно ухудшается. Наконец, в рассматриваемом простейшем цикле имеет место только одно включение двигателя, чему соответствует четыре участка работы с различной нагрузкой t_1-t_4 . В общем случае цикл может содержать несколько включений и пауз и общее число различных этапов цикла обозначим n .

Для установившегося режима работы уравнение теплового баланса на основании сказанного можно записать в виде:

$$\int_0^{t_{ц}} \Delta P_{дв.гр}(t) dt = \int_0^{t_{ц}} A(t) \tau(t) dt. \quad (5.39)$$

Здесь левая часть представляет тепло, выделившееся в двигателе за $t_{ц}$, а правая - тепло, отданное в окружающую среду. Реальную зависимость $\Delta P_{дв.гр}(t)$ заменим ступенчатым графиком $\Delta P_1(t)$, усредняя значения $\Delta P_{дв.гр}$ на соответствующих участках работы, аналогично поступим с зависимостью $A(t)$. Кроме того, примем $\tau(t) \approx \tau_{ср} = \text{const}$ и разрешим уравнение относительно $\tau_{ср}$:

$$\tau_{ср} = \frac{\sum_1^n \Delta P_1 t_i}{\sum_1^n A_i t_i}. \quad (5.40)$$

Примем, что проверяемый двигатель имеет номинальный режим S1, или S3 при $P_{\text{НОМ}}=100\%$, или S6 при $P_{\text{НОМ}}=100\%$. Тогда для номинального режима можно записать:

$$\tau_{\text{НОМ}} = \Delta P_{\text{НОМ}} / A_{\text{НОМ}} = \tau_{\text{ДОП}} \quad (5.41)$$

Приравняв (5.40) и (5.41) и умножив равенство на $A_{\text{НОМ}}$, получим основную формулу метода средних потерь

$$\Delta P_{\text{СР}} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i t_i}{\sum_1^n \beta_{y \tau} t_i} \leq \Delta P_{\text{НОМ}}, \quad (5.41a)$$

где $\beta_{y \tau} = A_i / A_{\text{НОМ}}$ - коэффициент ухудшения теплоотдачи на i -м участке цикла работы.

Итак, если в реальном цикле работы двигателя выполняется условие

$$t_{\text{Ц}} / T_{\text{Н}} \leq t_{\text{ЦНОМ}} / T_{\text{Н}}$$

и средние за цикл эквивалентные по нагреву с учетом ухудшения теплоотдачи потери $\Delta P_{\text{СР}}$ не превосходят номинальных потерь двигателя $\Delta P_{\text{НОМ}}$, двигатель в реальном цикле, отличном от номинального, работает с допустимой по нагреву нагрузкой.

Если в реальном цикле на различных его этапах двигатель работает ω скоростью, близкой к номинальной, $\beta_{y \tau} = 1$ и формула метода средних потерь упрощается:

$$\Delta P_{\text{СР}} = \frac{1}{t_{\text{Ц}}} \sum_1^n \Delta P_i t_i \leq \Delta P_{\text{НОМ}} \quad (5.42)$$

Формулой (5.42) следует пользоваться и при проверке по нагреву двигателей, имеющих независимую вентиляцию.

Проверка двигателей методом средних потерь обеспечивает достоверные результаты, однако требует знания многих исходных данных и расчет зависимости $D^{\text{ДВГР}}$ (0 относительно трудоемок. Во многих случаях без существенного ущерба для точности вместо метода средних потерь можно пользоваться полученными на его основе методами эквивалентного тока, эквивалентного момента и эквивалентной мощности.

Метод эквивалентного тока вытекает из анализа состава средних и номинальных потерь двигателя С учетом (5.1) средние потери в двигателе

$$\Delta P_{\text{СР}} = \frac{\sum_1^n (\Delta P_{\text{С}i} + I_i^2 R_i) t_i}{\sum_1^n \beta_{y \tau} t_i}$$

Номинальные потери двигателя:

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = \Delta P_{\text{СНОМ}} + I_{\text{НОМ}}^2 R$$

Сравнив два последних выражения можно получить следующее условие для проверки двигателя по нагреву:

$$\frac{\sum_1^n \Delta P_{\text{С}i} t_i}{\sum_1^n \beta_{y \tau} t_i} + \frac{\sum_1^n I_i^2 R_i t_i}{\sum_1^n \beta_{y \tau} t_i} \leq \Delta P_{\text{СНОМ}} + I_{\text{НОМ}}^2 R$$

Если принять $R_i = R = \text{const}$ и предположить, что средние постоянные потери близки к $\Delta P_{\text{СНОМ}}$, т. е.

$$\Delta P_{\text{СР}} = \frac{\sum_1^n \Delta P_{\text{С}i} t_i}{\sum_1^n \beta_{y \tau} t_i} \approx \Delta P_{\text{СНОМ}},$$

то проверку двигателя по нагреву можно производить методом эквивалентного тока:

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n I_i^2 t_i}{\sum_1^n \beta_{y \tau} t_i}} \leq I_{\text{НОМ}} \quad (5.43)$$

Если двигатель работает с постоянной скоростью или имеет независимую вентиляцию $\beta_{y \tau} = 1$. При этом

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{Ц}}} \sum_1^n I_i^2 t_i} \leq I_{\text{НОМ}} \quad (5.44)$$

Построение зависимости $I(t)$ проще, чем расчет потерь $P_{\text{ДВГР}}(t)$, поэтому во всех случаях, когда применим метод средних потерь и сопротивление обмоток силовой цепи двигателя $R \approx \text{const}$, применение метода эквивалентного тока предпочтительно. Условие $R \approx \text{const}$ выполняется для большинства двигателей, исключение

представляют асинхронные короткозамкнутые двигатели с глубоким пазом или с двойной беличьей клеткой на роторе, у которых сопротивление R'_2 при пусках изменяется значительно вследствие эффекта вытеснения тока.

Когда момент двигателя пропорционален току силовой цепи, проверку удобнее проводить методом эквивалентного момента:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_i^2 t_i}{\sum_1^n \beta_{yT,i} t_i}} \leq M_{\text{ном}}. \quad (5.45)$$

При $R = 1$

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_1^n M_i^2 t_i} \leq M_{\text{ном}}. \quad (5.46)$$

Проверка двигателя осуществляется непосредственно по нагрузочной диаграмме двигателя $M(t)$. Формулы (5.45) или (5.46) используются при проектировании на начальном этапе для предварительного выбора двигателя. Так как при этом данные двигателя еще неизвестны, предварительный выбор в случаях, когда известно, что время переходных процессов $St_{n,л} \ll t_{\text{ц}}$, производят по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма $M_c=f(t)$. Когда влияние переходных процессов существенно, пытаются оценить ожидаемый момент инерции двигателя, на основе этой оценки строят приближенную (ожидаемую) нагрузочную диаграмму двигателя и определяют по ней требуемый эквивалентный момент и требуемую номинальную мощность двигателя

$$P_{\text{треб}} = M_{\text{экв}} \omega_{\text{ном}} \leq P_{\text{ном}}.$$

Выбранный предварительно двигатель должен быть проверен по нагреву по уточненной нагрузочной диаграмме $M_i(t)$ или по рассчитанной зависимости $\Delta P_{\text{дв.гр}}(t)$

В заключение упомянем возможность проверки двигателя по нагреву методом эквивалентной мощности по формуле:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_1^n P_i t_i} \leq P_{\text{ном}}. \quad (5.47)$$

Данный метод применим, если $P_i \sim M_i$, т. е. при $\omega_i = \text{const}$, либо если $P_i \sim I_i$. Возможности метода эквивалентной мощности ограничены, поэтому рекомендовать его к широкому использованию нет оснований.

4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2.	Управление асинхронным двигателем с обеспечением его прямого пуска	2	0
2	2.	Управление асинхронным двигателем с обеспечением его прямого пуска и реверса	2	0
3	2.	Управление асинхронным двигателем с обеспечением его пуска с переключением обмотки статора со звезды на треугольник	2	0
4	2.	Исследование механических характеристик электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением	6	0
5	2.	Исследование влияния напряжения питающей сети на режим работы асинхронного двигателя по механическим характеристикам	4	0
6	2.	Частотное регулирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	2	0
ИТОГО			18	0

4.4. Семинары / 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 интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Приведение статических моментов сопротивления и моментов инерции к частоте вращения вала двигателя	2	разбор конкретных ситуаций (1 час)
2	1.	Исследование установившегося режима работы электропривода. Анализ устойчивости режима.	2	разбор конкретных ситуаций (1 час)
3	2.	Исследование способов регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения	2	разбор конкретных ситуаций (1 час)
4	2.	Исследование способов регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения	2	разбор конкретных ситуаций (1 час)
5	2.	Исследование способов регулирования скорости асинхронного двигателя	2	разбор конкретных ситуаций (1 час)

6	3.	Определение времени пуска электропривода центробежного механизма с асинхронным двигателем	2	разбор конкретных ситуаций (1 час)
7	4.	Расчет мощности и выбор двигателя для продолжительного режима работы	6	разбор конкретных ситуаций (4 часа)
ИТОГО			18	10

4.5. Контрольные мероприятия: контрольная работа

Цель: Освоить методику выбора мощности двигателя и разработки системы автоматического управления пуском и торможением асинхронного двигателя

Структура: Каждое индивидуальное задание предполагает выполнение студентом следующих разделов:

- Выбор мощности двигателя и ее проверка
- Расчет пускового режима
- Расчет режима торможения
- Разработка схемы управления

Основная тематика: Разработка и определение параметров схемы управления пуском и торможением асинхронного двигателя, расчет пускового и тормозного режимов

Рекомендуемый объем: Пояснительная записка объемом 15 - 20 страниц должна содержать титульный лист, задание, описание выполняемых действий по каждому разделу и полученные результаты.

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

Оценка	Критерии оценки контрольной работы
Зачтено	В контрольной работе верно выполнены все этапы расчетов. Корректно выбрана мощность двигателя. Правильно рассчитаны параметры пускового и тормозного режимов. Схема управления разработана без ошибок или с незначительными замечаниями.
Не зачтено	Контрольная работа содержит значительное количество ошибок в расчете параметров пускового или тормозного режимов. Некорректно выбрана мощность двигателя или разработана схема управления с существенными ошибками.

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>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>5</i>				
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
1. Механика электропривода	17	+	-	1	17	Лк, ПЗ, СРС	Зачет
2. Характеристики и режимы работы двигателей	64	+	+	2	32	Лк, ЛР, ПЗ, СРС	Зачет, кр
3. Переходные процессы в электроприводах и энергетические показатели его работы	14	+	+	2	7	Лк, ПЗ, СРС	Зачет
4. Выбор электрических двигателей	13	+	+	2	6,5	Лк, ПЗ, СРС	Зачет, кр
<i>всего часов</i>	108	62,5	45,5	2	54		

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

1. Шакиров В.А. Электрический привод : методические указания к выполнению лабораторных работ / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 64 с.
2. Шакиров В.А. Электрический привод. Разработка системы автоматического управления пуском и торможением асинхронного двигателя : методические указания по курсовому проектированию / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 44 с.
3. Владимиров Э.В. Электропривод: методические указания / В. В. Владимиров, М.А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2005. - 18 с.
4. Владимиров Э.В. Разработка системы электропривода «Тиристорный преобразователь – двигатель»: методические указания по курсовому проектированию для спец. "Электроснабжение промышленных предприятий" / Э. В. Владимиров. - Братск : БрИИ, 1999. - 37 с.
5. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие / А. А. Кувшинов, Э. Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург: ОГУ. 2017. - 114 с. [Электронный ресурс]. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=481766
6. Теория электропривода. Часть 2: Регулирование координат электропривода: учебное пособие / А. А. Кувшинов, Э. Л. Греков; Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург : ОГУ, 2014. - 166 с. [Электронный ресурс]. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=259232
7. Данилов П.Е. Теория электропривода : учебное пособие / П.Е. Данилов, В.Л. Барышников. В.В. Рожков. - М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2018. - 415с. [Электронный ресурс]. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=480141

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

№	Наименование издания (автор, заглавие, выходные данные)	Вид заяв- тия (Лк, ЛР, ПЗ)	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспечен- ность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
Основная литература				
1.	Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с	Лк, ЛР, ПЗ	49	1
2.	Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.	Лк, ЛР, ПЗ	75	1
Дополнительная литература				
3.	Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.	Лк, ЛР, ПЗ	44	1
4.	Фролов Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 368 с.	Лк, ПЗ	9	0,5
5.	Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод : учебное пособие для вузов / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. - Москва : Академия, 2004. - 256 с.	Лк, ПЗ	14	0,8

6.	Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / В. М. Терехов: ред. О. И. Осипов. - Москва : Академия, 2005. - 304 с	Лк, ЛР, ПЗ	14	0,8
7.	Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учебное пособие для вузов / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. - Москва: Академия, 2008. - 208 с.	Лк, ПЗ	9	0,5
8.	Шакиров В.А. Электрический привод : методические указания к выполнению лабораторных работ / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 64 с.	Лк, ЛР	36	1
9.	Шакиров В.А. Электрический привод. Разработка системы автоматического управления пуском и торможением асинхронного двигателя : методические указания по курсовому проектированию / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 44 с.	Лк, ПЗ	32	1

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

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

Лабораторная работа №1

Управление асинхронным двигателем с обеспечением его прямого пуска

Цель работы:

В лабораторной работе изучаются основы автоматического управления режимом пуска асинхронных двигателей в разомкнутых релейно-контакторных системах. Основной задачей является экспериментальное подтверждение основных теоретических положений автоматического управления путем проверки работоспособности схемы пуска.

Задание:

1. Собрать электрическую схему пуска асинхронного двигателя.
2. Провести запуск двигателя и его остановку.
3. Провести регистрацию показаний приборов измерения.

Порядок выполнения:

Для выполнения работы необходимо собрать электрическую схему прямого пуска асинхронного двигателя. После проведения запуска двигателя необходимо снять показания приборов – вольтметра и амперметра. Далее необходимо провести остановку двигателя.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Схема пуска двигателя
4. Показания вольтметра и амперметра
5. Описание последовательности действий и наблюдаемых событий
6. Выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить принцип работы магнитного пускателя

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом и втором разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Шакиров В.А. Электрический привод: методические указания к выполнению лабораторных работ / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 64 с.
4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какие функции выполняет нереверсивный магнитный пускатель?
2. В чем различие между разомкнутыми и замкнутыми системами автоматического управления?
3. Объясните последовательность работы схемы пуска.
4. Объясните назначение элементов схемы пуска.
5. Какие аппараты защищают двигатель от перегрузки, от сверхтоков?

Лабораторная работа №2

Управление асинхронным двигателем с обеспечением его прямого пуска и реверса

Цель работы:

В лабораторной работе изучаются основы автоматического управления режимом пуска и реверса асинхронных двигателей в разомкнутых релейно-контакторных системах. Основной задачей является экспериментальное подтверждение основных теоретических положений автоматического управления путем проверки работоспособности схемы пуска и реверса.

Задание:

1. Собрать электрическую схему пуска асинхронного двигателя.
2. Провести запуск двигателя и его остановку, реверс.
3. Провести регистрацию показаний приборов измерения.

Порядок выполнения:

Для выполнения работы необходимо собрать электрическую схему прямого пуска асинхронного двигателя. После проведения запуска двигателя необходимо снять показания приборов – вольтметра и амперметра. Далее необходимо сделать попытку реверса двигателя. Зафиксировать наблюдения. После остановки двигателя необходимо повторить попытку реверса и зафиксировать наблюдения.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Схема пуска двигателя
4. Показания вольтметра и амперметра
5. Описание последовательности действий и наблюдаемых событий
6. Выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить принцип работы тепловой защиты двигателя

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом и втором разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Шакиров В.А. Электрический привод: методические указания к выполнению лабораторных работ / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 64 с.
4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какие функции выполняет реверсивный магнитный пускатель?
2. Для чего реализован «самоподхват» катушки контактора?
3. Для чего выполнена взаимная блокировка контакторов в схеме.

Лабораторная работа №3

Управление асинхронным двигателем с обеспечением его пуска с переключением обмотки статора со звезды на треугольник

Цель работы:

В лабораторной работе изучается способ ограничения пусковых токов асинхронных двигателей. Основной задачей является экспериментальное подтверждение основных теоретических положений.

Задание:

1. Собрать электрическую схему пуска асинхронного двигателя.
2. Провести запуск двигателя.
3. Провести регистрацию показаний приборов измерения.

Порядок выполнения:

Для выполнения работы необходимо собрать электрическую схему пуска асинхронного двигателя с переключением обмоток со звезды на треугольник. После проведения запуска двигателя необходимо регистрировать показания приборов – вольтметра и амперметра, фиксировать наблюдения.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Схема пуска двигателя
4. Показания вольтметра и амперметра
5. Описание последовательности действий и наблюдаемых событий
6. Выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить принцип работы реле времени

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом и втором разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Шакиров В.А. Электрический привод: методические указания к выполнению лабораторных работ / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 64 с.
4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какие особенности пуска АД?
2. Почему недостаточная мощность сети ограничивает пуск АД?
3. Объясните, почему пуск АД с пониженным напряжением питания возможен лишь при незначительной нагрузке на валу?
4. Объясните, почему при соединении обмоток статора по схеме «звезда» линейные токи меньше в три раза по сравнению с линейными токами в схеме «треугольник».

Лабораторная работа №4

Исследование механических характеристик электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Цель работы:

Цель работы – изучение механических характеристик электродвигателя постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением при различных способах регулирования скорости.

Задание:

1. Собрать электрическую схему электропривода с двигателем постоянного тока.
2. Провести запуск двигателя.
3. Провести построение естественной механической характеристики.
4. Изменить сопротивление обмотки якоря и построить искусственную механическую характеристику.
5. Изменить магнитный поток обмотки возбуждения и построить искусственную механическую характеристику.
6. Изменить напряжение обмотки якоря и построить искусственную механическую характеристику.

Порядок выполнения:

Для выполнения работы необходимо собрать электрическую схему для исследования механических характеристик двигателя постоянного тока независимого или параллельного возбуждения. Далее необходимо построить естественную механическую характеристику, изменяя момент сопротивления на валу двигателя постоянного тока. Затем необходимо добавить сопротивление в обмотку якоря и повторить построение механической характеристики. Далее необходимо изменить ток обмотки возбуждения и повторить построение механической характеристики. В завершении необходимо уменьшить напряжение на обмотке якоря и построить механическую характеристику.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Электрическая схема для проведения исследования
4. Таблицы измерений и результатов расчетов
5. Графики механических характеристик для четырех условий.
6. Выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить принцип динамического торможения асинхронного двигателя

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом и втором разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Шакиров В.А. Электрический привод : методические указания к выполнению лабораторных работ / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 64 с.

4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Постройте электромеханическую и механическую характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и укажите их характерные точки.
2. Напишите уравнение электромеханической, механической характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, опишите входящие в уравнения величины.
3. Опишите, как будут меняться механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении сопротивления обмотки якоря, напряжения обмотки якоря, тока возбуждения.
4. Перечислите достоинства и недостатки рассмотренных способов регулирования скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.
5. Объясните, почему регулирование частоты вращения двигателя напряжением возможно только в сторону уменьшения скорости, а регулирование частоты вращения магнитным потоком – в сторону увеличения скорости.

Лабораторная работа №5

Исследование влияния напряжения питающей сети на режим работы асинхронного двигателя по механическим характеристикам

Цель работы:

Оценка влияния напряжения питающей сети на работу асинхронного двигателя с помощью механических характеристик.

Задание:

1. Собрать электрическую схему для исследования электропривода с асинхронным двигателем.
2. Провести построение механических характеристик при трех уровнях питающего напряжения

Порядок выполнения:

Для выполнения работы необходимо собрать электрическую схему исследования электропривода с асинхронным двигателем. После проведения запуска двигателя необходимо провести регистрацию приборов измерения и расчет необходимых величин для построения механической характеристики. Далее необходимо повторить исследования для двух уровней напряжения.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Электрическая схема для исследования электропривода
4. Таблицы измерений и результатов расчетов
5. Графики механических характеристик для трех уровней напряжения.
6. Выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить понятие скольжения асинхронного двигателя

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом и втором разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Шакиров В.А. Электрический привод: методические указания к выполнению лабораторных работ / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 64 с.
4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Постройте механическую характеристику асинхронного двигателя и укажите характерные точки.
2. Напишите уравнение механической характеристики асинхронного двигателя, опишите входящие в уравнения величины.
3. Опишите, как будет меняться механическая характеристика асинхронного двигателя при изменении питающего напряжения.

Лабораторная работа №6

Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя

Цель работы:

Оценка влияния изменения частоты на механическую характеристику асинхронного двигателя

Задание:

1. Собрать электрическую схему для исследования электропривода с асинхронным двигателем.
2. Провести построение механических характеристик при трех уровнях частоты питающего напряжения

Порядок выполнения:

Для выполнения работы необходимо собрать электрическую схему исследования электропривода с асинхронным двигателем. После проведения запуска двигателя необходимо провести регистрацию приборов измерения и расчет необходимых величин для построения механической характеристики. Далее необходимо повторить исследования для двух других уровней частоты питающего напряжения.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Электрическая схема для исследования электропривода
4. Таблицы измерений и результатов расчетов
5. Графики механических характеристик для трех уровней частоты питающего напряжения.
6. Выводы по работе

Задания для самостоятельной работы:

Изучить схемы преобразователей частоты.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом и втором разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Шакиров В.А. Электрический привод : методические указания к выполнению лабораторных работ / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 64 с.
4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.
5. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / В. М. Терехов; ред. О. И. Осипов. - Москва : Академия, 2005. - 304 с

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дать описание основных законов регулирования.
2. Построить механические характеристики при законе регулирования $U/f = \text{const}$.
3. Дать объяснение необходимости изменения напряжения при регулировании частотой скорости асинхронного двигателя.

Практическое занятие № 1.

Приведение статических моментов сопротивления и моментов инерции к частоте вращения вала двигателя

Цель работы: Изучить принципы приведения статических моментов сопротивления и моментов инерции к требуемой частоте вращения

Задание:

1. Изучить основные механические характеристики электропривода
2. Изучить приемы приведения статического момента сопротивления и момента инерции к частоте вращения вала двигателя

Вид занятий в интерактивной форме: выполнить задание и разобрать конкретный пример.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Рисунок, поясняющий расчет механической части электропривода
4. Расчет приведенных значений статического момента сопротивления и моментов инерции к скорости вала двигателя.
5. Вывод

Задания для самостоятельной работы:

Изучить физический смысл махового момента и определить свойства электропривода, которые он характеризует.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практической работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.

2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

4. Фролов Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 368 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Перечислить основные элементы электропривода и объяснить их назначение
2. Область применения многодвигательного электропривода
3. Различие реактивного и активного статического момента сопротивления
4. С какой целью статические моменты и моменты инерции приводят к одной частоте вращения

Практическое занятие № 2.

Исследование установившегося режима работы электропривода. Анализ устойчивости режима.

Цель работы: Изучить принципы определения параметров установившегося режима работы электропривода и проверки на устойчивость.

Задание:

1. Определить возможные установившиеся режимы работы электропривода
2. Проверить на устойчивость системы «Двигатель-механизм»

Вид занятий в интерактивной форме: выполнить задание и разобрать конкретный пример.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Механические характеристики двигателя и механизма
4. Основные шаги анализа устойчивости системы «Двигатель-механизм»
5. Вывод

Задания для самостоятельной работы:

Изучить механические характеристики производственных механизмов

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практической работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.

2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

4. Фролов Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 368 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Условие установившегося режима работы электропривода
2. Условие устойчивости системы «Двигатель-механизм»
3. Понятие жесткости механической характеристики

Практическое занятие № 3.

Исследование способов регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Цель работы: изучить способы регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Задание:

1. Определить параметры установившегося режима работы электропривода
2. Выбрать способ регулирования скорости и определить необходимое изменение соответствующего параметра для перевода скорости к требуемому значению

Вид занятий в интерактивной форме: выполнить задание и разобрать конкретный пример.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения
4. Расчет параметров установившегося режима
5. Расчет параметров режима с измененной скоростью
6. Вывод

Задания для самостоятельной работы:

Изучить преимущества и недостатки способов регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практической работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом и втором разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.
4. Фролов Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 368 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Преимущества и недостатки регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения
2. Преимущества и недостатки регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения изменением сопротивления обмотки якоря
3. Преимущества и недостатки регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения изменением тока возбуждения

Практическое занятие № 4.

Исследование способов регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Цель работы: изучить способы регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Задание:

1. Определить параметры установившегося режима работы электропривода
2. Выбрать способ регулирования скорости и определить необходимое изменение соответствующего параметра для перевода скорости к требуемому значению

Вид занятий в интерактивной форме: выполнить задание и разобрать конкретный пример.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения
4. Расчет параметров установившегося режима
5. Расчет параметров режима с измененной скоростью
6. Вывод

Задания для самостоятельной работы:

Изучить преимущества и недостатки способов регулирования скорости двигателей постоянного тока последовательного возбуждения

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практической работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом и втором разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.
4. Фролов Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 368 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Преимущества и недостатки регулирования скорости двигателей постоянного тока последовательного возбуждения изменением напряжения
2. Преимущества и недостатки регулирования скорости двигателей постоянного тока последовательного возбуждения изменением сопротивления обмотки якоря
3. Преимущества и недостатки регулирования скорости двигателей постоянного тока последовательного возбуждения изменением тока возбуждения

Практическое занятие № 5.

Исследование способов регулирования скорости асинхронного двигателя

Цель работы: изучить способы регулирования скорости асинхронного двигателя

Задание:

1. Определить параметры установившегося режима работы электропривода
2. Выбрать способ регулирования скорости и определить необходимое изменение соответствующего параметра для перевода скорости к требуемому значению

Вид занятий в интерактивной форме: выполнить задание и разобрать конкретный пример.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Схема включения асинхронного двигателя
4. Расчет параметров установившегося режима
5. Расчет параметров режима с измененной скоростью
6. Вывод

Задания для самостоятельной работы:

Изучить преимущества и недостатки способов регулирования скорости асинхронных двигателей

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практической работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом и втором разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.
4. Фролов Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 368 с.
5. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / В. М. Терехов: ред. О. И. Осипов. - Москва : Академия, 2005. - 304 с

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Преимущества и недостатки регулирования скорости асинхронных двигателей частотой
2. Преимущества и недостатки регулирования скорости асинхронных двигателей изменением числа пар полюсов
2. Преимущества и недостатки регулирования скорости асинхронных двигателей изменением напряжения обмотки статора
2. Преимущества и недостатки регулирования скорости асинхронных двигателей изменением сопротивления обмотки статора
2. Преимущества и недостатки регулирования скорости асинхронных двигателей изменением сопротивления обмотки ротора

Практическое занятие № 6.

Определение времени пуска электропривода центробежного механизма с асинхронным двигателем

Цель работы: изучить метод конечных приращений для анализа переходных процессов в электроприводе с асинхронным двигателем

Задание:

1. Провести построение механических характеристик асинхронного двигателя и механизма.
2. Методом конечных приращений определить время пуска электропривода.

Вид занятий в интерактивной форме: выполнить задание и разобрать конкретный пример.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Механические характеристики асинхронного двигателя и механизма
4. Расчет времени пуска методом конечных приращений
6. Вывод

Задания для самостоятельной работы:

Изучить энергетические характеристики электропривода в переходных режимах

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практической работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором и третьем разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.

2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

4. Фролов Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 368 с.

5. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / В. М. Терехов: ред. О. И. Осипов. - Москва : Академия, 2005. - 304 с

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Основные этапы метода конечных приращений
2. Основное уравнение электропривода
3. Потери энергии в электроприводе при переходных режимах

Практическое занятие № 7.

Расчет мощности и выбор двигателя для продолжительного режима работы

Цель работы: изучить методики выбора мощности двигателя для продолжительного режима работы

Задание:

1. Изучить основные режимы работы электропривода
2. Применить методики выбора мощности двигателя для продолжительного режима работы

Вид занятий в интерактивной форме: выполнить задание и разобрать конкретный пример.

Форма отчетности:

Отчет может быть сформирован в письменном виде или в текстовом редакторе на персональном компьютере. Отчет должен быть выполнен на листах формата А4.

В отчете должны присутствовать:

1. Задание
2. Цель работы
3. Нагрузочная диаграмма электропривода
4. Предварительный выбор мощности двигателя
5. Проверка выбранного двигателя методом эквивалентного тока, мощности, момента и методом средних потерь

6. Вывод

Задания для самостоятельной работы:

Изучить методики выбора мощности для кратковременного и повторно-кратковременного режима работы

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практической работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором и четвертом разделах данной дисциплины.

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.

2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

4. Фролов Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 368 с.

5. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод : учебное пособие для вузов / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. - Москва : Академия, 2004. - 256 с.

6. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учебное пособие для вузов / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2008. - 208 с.

7. Шакиров В.А. Электрический привод. Разработка системы автоматического управления пуском и торможением асинхронного двигателя : методические указания по курсовому проектированию / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 44 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Проверка выбранной мощности двигателя методом средних потерь
2. Проверка выбранной мощности двигателя методом эквивалентного тока
3. Проверка выбранной мощности двигателя методом эквивалентного момента
4. Проверка выбранной мощности двигателя методом эквивалентной мощности

9.2. Методические указания по выполнению контрольной работы.

Порядок выполнения контрольной работы.

Для выполнения контрольной работы студенту присваивается вариант. В зависимости от варианта в качестве исходных данных представлена нагрузочная диаграмма.

Готовая контрольная работа сдается преподавателю на проверку за 2 недели до начала экзаменационной сессии. Результатом проверки могут быть:

- «допущен к защите»;
- «допущен к защите после доработки по замечаниям»;
- «не допущен к защите».

Если после проверки контрольная работа рекомендована преподавателем к защите, то следует подготовиться к ее защите.

В случае выявления при проверке ошибок и неточностей, студент допускается к защите контрольной работы только после их устранения.

В последнем случае требуется переделать контрольную работу в соответствии с предъявляемыми требованиями. Если контрольная работа не рекомендована преподавателем к защите, то после переработки работа вновь сдается на проверку.

Без защиты контрольной работы студент не допускается к сдаче зачета по дисциплине.

Защита контрольной работы производится в часы, определенные в соответствии с расписанием занятий.

На защите контрольной работы студент в краткой форме излагает основные принятые допущения при расчетах, основные этапы применяемых методик расчета и основные результаты, полученные в ходе их применения, отвечает на возникшие в ходе защиты вопросы.

Рекомендации по выполнению контрольной работы.

Задание: Произвести выбор мощности асинхронного двигателя по заданной нагрузочной диаграмме и провести выбор числа пусковых ступеней и сопротивления пусковых резисторов для обеспечения требуемых условий пуска, а также торможения, произвести построение механических характеристик для режима пуска и торможения, разработать схему управления пуском и торможением.

Исходные данные: техническое задание, выданное преподавателем.

Во введении необходимо описать основные этапы предстоящих расчетов.

Основная часть содержит этапы: предварительный выбор мощности асинхронного двигателя; проверка выбранной мощности методом средних потерь и методом эквивалентных величин; расчет числа и сопротивлений пусковых резисторов; построение пусковой диаграммы; расчет сопротивлений резисторов для режима торможения; построения механической характеристики для режима торможения противовключением; разработка схемы управления пуском и торможением.

В заключении необходимо провести анализ основных результатов, полученных на отдельных этапах расчетов. Сделать выводы по работе.

Список литературы:

Основная литература

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод : учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. - Москва : РАСХН, 2003. - 320 с.

2. Москаленко В.В. Электрический привод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. - Москва : Академия, 2007. - 368 с.

Дополнительная литература

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 416 с.

4. Фролов Ю. М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. - Санкт-Петербург : Лань, 2012. - 368 с.

5. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод : учебное пособие для вузов / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. - Москва : Академия, 2004. - 256 с.

6. Шакиров В.А. Электрический привод. Разработка системы автоматического управления пуском и торможением асинхронного двигателя : методические указания по курсовому проектированию / В. А. Шакиров, М. А. Федорова. - Братск : БрГУ, 2011. - 44 с.

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) – преподаватель использует для:

- получения информации при подготовке к занятиям,

- создания презентационного сопровождения лекций;
- интерактивного общения;
- проведения лабораторных занятий.

1. ОС Windows 7 Professional;
2. Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level;
3. Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security;
4. ПО "Антиплагиат"
5. Ай-Логос Система дистанционного обучения

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР, ПЗ</i>
1	3	4	5
Лк	Лекционная аудитория	Учебная мебель	-
ЛР	Лаборатория электропривода	Учебная мебель, лабораторный стенд УАДК.004 РБЭ (915.3) Лабораторный стенд ЭП.003 РБЭ	ЛР 1-6
ПЗ	Лаборатория электропривода	Учебная мебель, лабораторный стенд УАДК.004 РБЭ (915.3) Лабораторный стенд ЭП.003 РБЭ	ПЗ 1-7
кр	Читальный зал №3	Учебная мебель, Оборудование 15-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	-
СР	Читальный зал №3	Учебная мебель, Оборудование 15-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-2	способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1. Механика электропривода	1.1. Определение электропривода	Вопрос к зачету 1.1
			1.2. Уравнение движения электропривода	Вопрос к зачету 1.2
			1.3. Расчетная схема механической части электропривода	Вопросы к зачету 1.3-1.4
			1.4. Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей.	Вопросы к зачету 1.5-1.6
			1.5. Установившийся режим работы электропривода. Условие устойчивости системы «Производственный механизм – электродвигатель».	Вопросы к зачету 1.7-1.8
		2. Характеристики и режимы работы электродвигателей	2.1. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	Вопрос к зачету 2.1
			2.2. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	Вопросы к зачету 2.2-2.3
			2.3. Торможение двигателей постоянного тока независимого возбуждения	Вопрос к зачету 2.4
			2.4. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока независимого возбуждения	Вопрос к зачету 2.5
			2.5. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	Вопросы к зачету 2.6, 2.9

	2.6. Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	Вопросы к зачету 2.7, 2.10
	2.7. Торможение двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	Вопросы к зачету 2.8, 2.11
	2.8. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	Вопрос к зачету 2.12
	2.9. Схема включения и статические характеристики асинхронного двигателя.	Вопросы к зачету 2.13-2.16
	2.10. Регулирование скорости асинхронного двигателя.	Вопросы к зачету 2.17-2.19
	2.11. Торможение асинхронного двигателя.	Вопрос к зачету 2.20
	2.12. Ограничение тока при пуске асинхронного двигателя	Вопрос к зачету 2.21
	2.13. Схема включения и статические характеристики синхронного двигателя	Вопрос к зачету 2.22
	2.14. Регулирование скорости синхронного двигателя.	Вопрос к зачету 2.23
3. Переходные процессы в электроприводе и энергетические показатели его работы	3.1. Переходный процесс в электроприводах с двигателем постоянного тока	Вопросы к зачету 3.1-3.2
	3.2. Переходный процесс в электроприводах с асинхронным двигателем	Вопрос к зачету 3.3
	3.3. Потери мощности и энергии в установившемся и переходном режимах работы электропривода.	Вопросы к зачету 3.4-3.5.
	3.4. Энергосбережение средствами электропривода	Вопрос к зачету 3.6
4. Выбор электрических двигателей	4.1. Общие требования, предъявляемые к электроприводу.	Вопрос к зачету 4.1.
	4.2. Нагрев и охлаждение двигателей.	Вопрос к зачету 4.2

			4.3. Расчет мощности и выбор типа электродвигателя при продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном режимах работы.	Вопросы к зачету 4.3-4.4
ПК-5	готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности	2. Характеристики и режимы работы электродвигателей	2.1. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	Вопрос к зачету 2.1
			2.2. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.	Вопросы к зачету 2.2-2.3
			2.3. Торможение двигателей постоянного тока независимого возбуждения	Вопрос к зачету 2.4
			2.4. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока независимого возбуждения	Вопрос к зачету 2.5
			2.5. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	Вопросы к зачету 2.6, 2.9
			2.6. Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.	Вопросы к зачету 2.7, 2.10
			2.7. Торможение двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	Вопросы к зачету 2.8, 2.11
			2.8. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	Вопрос к зачету 2.12
			2.9. Схема включения и статические характеристики асинхронного двигателя.	Вопросы к зачету 2.13-2.16
			2.10. Регулирование скорости асинхронного двигателя.	Вопросы к зачету 2.17-2.19

			2.11. Торможение асинхронного двигателя.	Вопрос к зачету 2.20
			2.12. Ограничение тока при пуске асинхронного двигателя	Вопрос к зачету 2.21
			2.13. Схема включения и статические характеристики синхронного двигателя	Вопрос к зачету 2.22
			2.14. Регулирование скорости синхронного двигателя.	Вопрос к зачету 2.23
		3. Переходные процессы в электроприводе и энергетические показатели его работы	3.1. Переходный процесс в электроприводах с двигателем постоянного тока	Вопросы к зачету 3.1-3.2
			3.2. Переходный процесс в электроприводах с асинхронным двигателем	Вопрос к зачету 3.3
			3.3. Потери мощности и энергии в установившемся и переходном режимах работы электропривода.	Вопросы к зачету 3.4-3.5.
			3.4. Энергосбережение средствами электропривода	Вопрос к зачету 3.6
		4. Выбор электрических двигателей	4.1. Общие требования, предъявляемые к электроприводе.	Вопрос к зачету 4.1.
			4.2. Нагрев и охлаждение двигателей.	Вопрос к зачету 4.2
			4.3. Расчет мощности и выбор типа электродвигателя при продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном режимах работы.	Вопросы к зачету 4.3-4.4

2. Вопросы к зачету

№ п/п	Компетенции		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	1.1 Определение электропривода. 1.2 Уравнение движения электропривода. 1.3 Расчетные схемы механической части электропривода. 1.4 Многомассовые механические системы 1.5 Понятие о механической и электромеханической характеристике. 1.6 Основные характеристики двигателей	1. Механика электропривода

		<p>экспериментально го исследования при решении экспериментальны х задач</p>	<p>и производственных механизмов. 1.7 Установившееся движение электропривода. 1.8 Устойчивость механического движения.</p>	
			<p>2.1. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения. 2.2 Энергетические режимы работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения. 2.3 Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения. 2.4 Способы торможения электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения. 2.5. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока независимого возбуждения. 2.6. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. 2.7. Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. 2.8. Способы торможения электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. 2.9. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения. 2.10. Регулирование скорости двигателя постоянного тока смешанного возбуждения. 2.11. Способы торможения электропривода с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения. 2.12. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения. 2.13. Схема включения и схема замещения асинхронного двигателя. 2.14. Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя. 2.15. Механическая характеристика асинхронного двигателя. 2.16. Режимы работы асинхронного двигателя. 2.17. Регулирование скорости электропривода с асинхронным двигателем изменением сопротивления цепи ротора, статора, напряжением обмотки статора. 2.18. Регулирование скорости электропривода с асинхронным двигателем изменением частоты.</p>	<p>2. Характеристики и режимы работы электродвигателей</p>

			<p>2.19. Регулирование скорости электропривода с многоскоростными асинхронными двигателями.</p> <p>2.20. Торможение электропривода с асинхронным двигателем.</p> <p>2.21. Ограничение тока при пуске асинхронного двигателя.</p> <p>2.22. Схема включения и статические характеристики синхронного двигателя.</p> <p>2.23. Регулирование скорости синхронного двигателя.</p>	
			<p>3.1. Механические переходные процессы в электроприводах с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.</p> <p>3.2. Переходные процессы в системе «преобразователь-двигатель постоянного тока».</p> <p>3.3. Переходные процессы в электроприводах с асинхронным двигателем.</p> <p>3.4. Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы электропривода.</p> <p>3.5. Потери мощности и энергии в переходном режиме работы электропривода.</p> <p>3.6. Энергосбережение средствами электропривода</p>	3. Переходные процессы в электроприводе и энергетические показатели его работы
			<p>4.1. Общие требования, предъявляемые к электроприводу.</p> <p>4.2. Нагрев и охлаждение двигателей.</p> <p>4.3. Режимы работы электропривода</p> <p>4.4. Методы выбора мощности двигателя</p>	4. Выбор электрических двигателей
2	ПК-5	готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности	<p>2.1. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения.</p> <p>2.2 Энергетические режимы работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения.</p> <p>2.3 Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.</p> <p>2.4 Способы торможения электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.</p> <p>2.5. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока независимого возбуждения.</p> <p>2.6. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.</p> <p>2.7. Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.</p> <p>2.8. Способы торможения электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения.</p>	2. Характеристики и режимы работы электродвигателей

		<p>2.9. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.</p> <p>2.10. Регулирование скорости двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.</p> <p>2.11. Способы торможения электропривода с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения.</p> <p>2.12. Ограничение токов при пуске и торможении двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.</p> <p>2.13. Схема включения и схема замещения асинхронного двигателя.</p> <p>2.14. Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя.</p> <p>2.15. Механическая характеристика асинхронного двигателя.</p> <p>2.16. Режимы работы асинхронного двигателя.</p> <p>2.17. Регулирование скорости электропривода с асинхронным двигателем изменением сопротивления цепи ротора, статора, напряжением обмотки статора.</p> <p>2.18. Регулирование скорости электропривода с асинхронным двигателем изменением частоты.</p> <p>2.19. Регулирование скорости электропривода с многоскоростными асинхронными двигателями.</p> <p>2.20. Торможение электропривода с асинхронным двигателем.</p> <p>2.21. Ограничение тока при пуске асинхронного двигателя.</p> <p>2.22. Схема включения и статические характеристики синхронного двигателя.</p> <p>2.23. Регулирование скорости синхронного двигателя.</p>	
		<p>3.1. Механические переходные процессы в электроприводах с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.</p> <p>3.2. Переходные процессы в системе «преобразователь-двигатель постоянного тока».</p> <p>3.3. Переходные процессы в электроприводах с асинхронным двигателем.</p> <p>3.4. Потери мощности и энергии в установившемся режиме работы электропривода.</p> <p>3.5. Потери мощности и энергии в переходном режиме работы электропривода.</p> <p>3.6. Энергосбережение средствами электропривода</p>	<p>3. Переходные процессы в электроприводе и энергетические показатели его работы</p>

		4.1. Общие требования, предъявляемые к электроприводу. 4.2. Нагрев и охлаждение двигателей. 4.3. Режимы работы электропривода 4.4. Методы выбора мощности двигателя	4. Выбор электрических двигателей
--	--	--	--

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - физические явления и процессы, лежащие в основе современных электромеханических преобразователей энергии <p>(ПК-5):</p> <ul style="list-style-type: none"> - характеристики электроприводов с двигателями постоянного и переменного тока, преобразовательные устройства электроприводов и системы управления электроприводами <p>Уметь (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - использовать основные методы анализа и моделирования механической части электропривода и электродвигателей постоянного и переменного тока <p>(ПК-5):</p> <ul style="list-style-type: none"> - определять параметры электропривода в установившихся и переходных режимах <p>Владеть (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками теоретического и экспериментального исследования при решении задач управления электроприводом <p>(ПК-5):</p> <ul style="list-style-type: none"> - навыками выбора и проверки двигателя для различных режимов работы электропривода, оценки энергетических показателей работы электропривода 	<p>зачтено</p>	<p>Обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал и демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> - всестороннее знание программного материала; - умение правильного применения основных положений программного материала; - владеет всеми навыками, полученными в ходе изучения программного материала.
	<p>не зачтено</p>	<p>Обучающийся демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> - недостаточно полное знание программного материала; - применение с несущественными ошибками основных положений программного материала.

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Основы электропривода направлена на формирование у обучающихся знаний о современном электрическом приводе, умений регулирования координат электропривода и анализа его установившихся и переходных режимов для успешного решения теоретических и практических задач в их профессиональной деятельности.

Изучение дисциплины Основы электропривода предусматривает:

- лекции,
- лабораторные работы,
- практические занятия,
- контрольную работу,
- зачет.

В процессе изучения дисциплины рекомендуется на первом этапе обратиться к механике электропривода, характеристики и режимы работы двигателей и производственных механизмов, принципы регулирования скорости электропривода.

В процессе проведения практических занятий происходит закрепление навыков применения способов регулирования скорости, оценки преимуществ и недостатков способов регулирования скорости, анализа переходных режимов и выбора мощности двигателя.

Самостоятельную работу необходимо начинать с изучения теоретического материала.

В процессе консультации с преподавателем необходимо выяснить все непонятные моменты.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературы.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в интерактивной форме (в виде лекционных и практических занятий с разбором конкретных ситуаций,) в сочетании с внеаудиторной работой.

АННОТАЦИЯ

рабочей программы дисциплины

Основы электропривода

1. Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является формирование у обучающихся знаний о современном электрическом приводе, умений регулирования координат электропривода и анализа его установившихся и переходных режимов для успешного решения теоретических и практических задач в их профессиональной деятельности.

Задачей изучения дисциплины является изучение сущности происходящих в электрических приводах процессов преобразования энергии, методов определения основных параметров и характеристик электропривода, оценки энергетических показателей работы и выбора двигателя.

2. Структура дисциплины

2.1. Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк 18 ч; ПЗ 18 ч; ЛР 18 ч; СР 54 ч.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 108 часов, 3 зачетных единицы.

2.2. Основные разделы дисциплины:

- 1 – Механика электропривода
- 2 – Характеристики и режимы работы электродвигателей
- 3 – Переходные процессы в электроприводе и энергетические показатели его работы
- 4 – Выбор электрических двигателей

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-5 - готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности

4. Вид промежуточной аттестации: 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.)

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 2017 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «6» марта 2017г. №125 , заочной формы обучения от «6» марта 2017г. №125, для заочной (ускоренной) формы обучения от «4» апреля 2017г. №203

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 составил:

Шакиров В.А., доцент, к.т.н. _____

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ЭиЭ

от «28» декабря 2018 г., протокол №5

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 «28» декабря 2018 г., протокол №5

Председатель методической комиссии факультета _____

А.Д. Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник

учебно-методического управления _____

Г.П. Нежевец

Регистрационный № _____