

**Н.Е. Кабдин, В.Ф. Сторчевой**

# **ЭЛЕКТРОПРИВОД**

*Учебник для вузов*

*Рекомендовано Федеральным учебно-методическим объединением  
по сельскому, лесному и рыбному хозяйству  
для использования в учебном процессе*

Москва – 2021

УДК 631.3–83  
ББК 40.7  
К12

*Рецензенты:*

*Е.А. Воронин* – доктор технических наук, профессор  
(ФИЦ «Информатика и управление» РАН);  
*Л.Ю. Юферев* – доктор технических наук  
(ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»).

**Кабдин Н.Е.**

**К12** Электропривод: учебник / Н.Е. Кабдин, В.Ф. Сторчевой. – М.: МЭСХ, 2021. – 286 с.  
ISBN 978-5-6046184-4-8

В учебнике представлена краткая история развития электропривода, классификация электроприводов, механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей. Подробно рассмотрены электромеханические и механические характеристики, тормозные режимы и способы пуска электродвигателей постоянного и переменного тока, способы регулирования их скорости. Проанализировано влияние переходных процессов на работу электропривода. Значительное внимание уделяется вопросам энергетики электропривода и выбору электродвигателей по мощности в различных режимах работы.

Для закрепления полученных знаний в конце каждого раздела предусмотрены контрольные вопросы. Представлены тесты для самостоятельной проверки знаний, основные типы задач с подробным разбором их решения, а также задачи для самостоятельного решения, методические указания по выполнению курсовой работы.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки: 35.03.06 «Агроинженерия», направленности «Электрооборудование и электротехнологии» и «Автоматизация и роботизация технологических процессов»; 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 631.3–83  
ББК 40.7

ISBN 978-5-6046184-4-8

© Кабдин Н.Е., Сторчевой В.Ф., 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
<b>Раздел I. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....</b>	<b>27</b>
<b>Глава 1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....</b>	<b>27</b>
1.1. Электромеханические свойства двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....	27
1.1.1. Электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....	27
1.1.2. Тормозные режимы работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....	37
1.1.3. Пуск двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....	42
1.2. Электромеханические свойства двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....	46
1.2.1. Электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....	46
1.2.2. Тормозные режимы работы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....	51
1.2.3. Пуск двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....	54
1.3. Электромеханические свойства двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.....	56
1.3.1. Электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения .....	56
1.3.2. Тормозные режимы работы двигателя постоянного смешанного возбуждения .....	58
1.3.3. Пуск двигателя постоянного тока смешанного возбуждения .....	59
1.4. Электромеханические свойства асинхронного электродвигателя .....	60
1.4.1. Электромеханические и механические характеристики асинхронного электродвигателя .....	60
1.4.2. Тормозные режимы работы асинхронного электродвигателя .....	74
1.4.3. Пуск асинхронных электродвигателей.....	85
<b>Глава 2. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	<b>96</b>
2.1. Основные показатели регулирования скорости электропривода .....	96

2.2. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения .....	100
2.2.1. Реостатный способ регулирования скорости .....	100
2.2.2. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением магнитного потока .....	104
2.2.3. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением подводимого к якору напряжения.....	107
2.3. Способы регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения .....	109
2.3.1. Реостатное регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения .....	109
2.3.2. Регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения изменением магнитного потока .....	110
2.3.3. Регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения изменением подводимого напряжения .....	111
2.4. Способы регулирования скорости асинхронного электродвигателя.....	112
2.4.1. Реостатное регулирование скорости асинхронного электродвигателя .....	113
2.4.2. Регулирование скорости асинхронного электродвигателя изменением напряжения .....	116
2.4.3. Регулирование скорости асинхронного электродвигателя изменением числа пар полюсов .....	118
2.4.4. Частотное регулирование скорости асинхронного электродвигателя .....	122

**Глава 3. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ..... 133**

3.1. Расчетные схемы механической части электропривода.....	133
3.2. Уравнение движения электропривода .....	135
3.3. Виды переходных процессов в электроприводах. Причины их возникновения.....	138
3.4. Механические переходные процессы в электроприводах при постоянном динамическом моменте.....	139
3.5. Переходные процессы в электроприводах с динамическим моментом, линейно зависящим от скорости.....	140
3.5.1. Механические переходные процессы.....	142
3.5.2. Электромеханические переходные процессы .....	144
3.6. Переходные процессы в электроприводах при произвольной зависимости динамического момента от скорости .....	147

<b>Глава 4. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ .....</b>	<b>151</b>
4.1. Потери энергии в установившихся и переходных режимах работы электропривода .....	151
4.2. Нагрев и охлаждение электродвигателей.....	157
4.3. Нагрузочные диаграммы электроприводов. Типовые режимы работы двигателей .....	164
4.4. Выбор электродвигателей по мощности .....	168
4.4.1. Выбор двигателей по мощности при продолжительном режиме работы .....	169
4.4.2. Выбор двигателей по мощности при кратковременном режиме работы .....	176
4.4.3. Выбор двигателей по мощности при повторно- кратковременном режиме работы.....	181
4.4.4. Определение допустимого числа включений асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором .....	185
<b>Раздел II. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ, КУРСОВАЯ РАБОТА.....</b>	<b>189</b>
<b>Глава 5. РЕЖИМЫ РАБОТЫ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ .....</b>	<b>189</b>
5.1. Режимы работы, электромеханические свойства электродвигателей постоянного тока (ДПТ) .....	189
5.2. Режимы работы, электромеханические и механические характеристики двигателей переменного тока.....	208
<b>Глава 6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ..</b>	<b>217</b>
6.1. Регулирование скорости электропривода постоянного тока .....	217
6.2. Регулирование скорости асинхронного электропривода .....	223
<b>Глава 7. МЕХАНИКА И ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ .....</b>	<b>230</b>
<b>Глава 8. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ .....</b>	<b>240</b>
<b>Глава 9. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....</b>	<b>255</b>
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	271
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	283

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Содержание учебника отвечает требованиям государственных образовательных стандартов по направлениям подготовки бакалавров: 35.03.06 – «Агроинженерия», профили «Электрооборудование и электротехнологии» и «Автоматизация и роботизация технологических процессов» и 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» и соответствует программам дисциплины.

Изучение дисциплины основывается на знании физики, теоретических основ электротехники, теоретической механики, основ электроники и автоматики, электрических машин.

Широкое внедрение электрического привода во все отрасли промышленности, в сельское хозяйство предъявляет высокие требования к его статическим и динамическим характеристикам, поэтому является необходимым для бакалавра-электрика любого профиля знание основ электропривода.

Основное назначение данного учебника – сформировать у студентов базовые знания по электроприводу для последующего углубленного изучения специальных дисциплин.

В данном издании рассматриваются электромеханические свойства электродвигателей и способы регулирования скорости электропривода постоянного и переменного тока, вопросы механики и переходных процессов в электроприводах, а также нагрев и охлаждение электродвигателей, их выбор по мощности.

Изучение материала следует проводить последовательно, раздел за разделом; при этом основное внимание следует уделять пониманию основных положений дисциплины.

Материал в учебнике разбит на блоки: учебный информационный материал и контрольный блок, включающий тесты, задачи с решениями и задачи для самостоятельного решения, курсовую работу.

Изучив информационный материал, ответив на контрольные вопросы, разобрав предложенные с решениями задачи, студент должен проверить степень усвоения материала, ответив на вопросы тестов для самопроверки и решив задачи для самостоятельной проработки. Если при ответах на вопросы и решении задач студент встретит затруднения, ему следует вернуться к изучению соответствующих страниц информационного блока.

Следует подчеркнуть, что тесты служат для самоконтроля студента, поэтому ему не следует искать обходных путей для поиска правильных ответов. Предложенная методика изложения учебного материала дает студенту целостное представление о содержании и концепции изучаемого курса.

# ВВЕДЕНИЕ

## В.1. Определение понятия «Электропривод»

Электрическим приводом (ЭП), согласно ГОСТ Р 50369–92, называется электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса [1].

Структурная схема электропривода представлена на рис. В.1. Электропривод состоит из трех основных частей: системы управления (СУ), электродвигательного устройства (ЭД), механической части (МЧ).

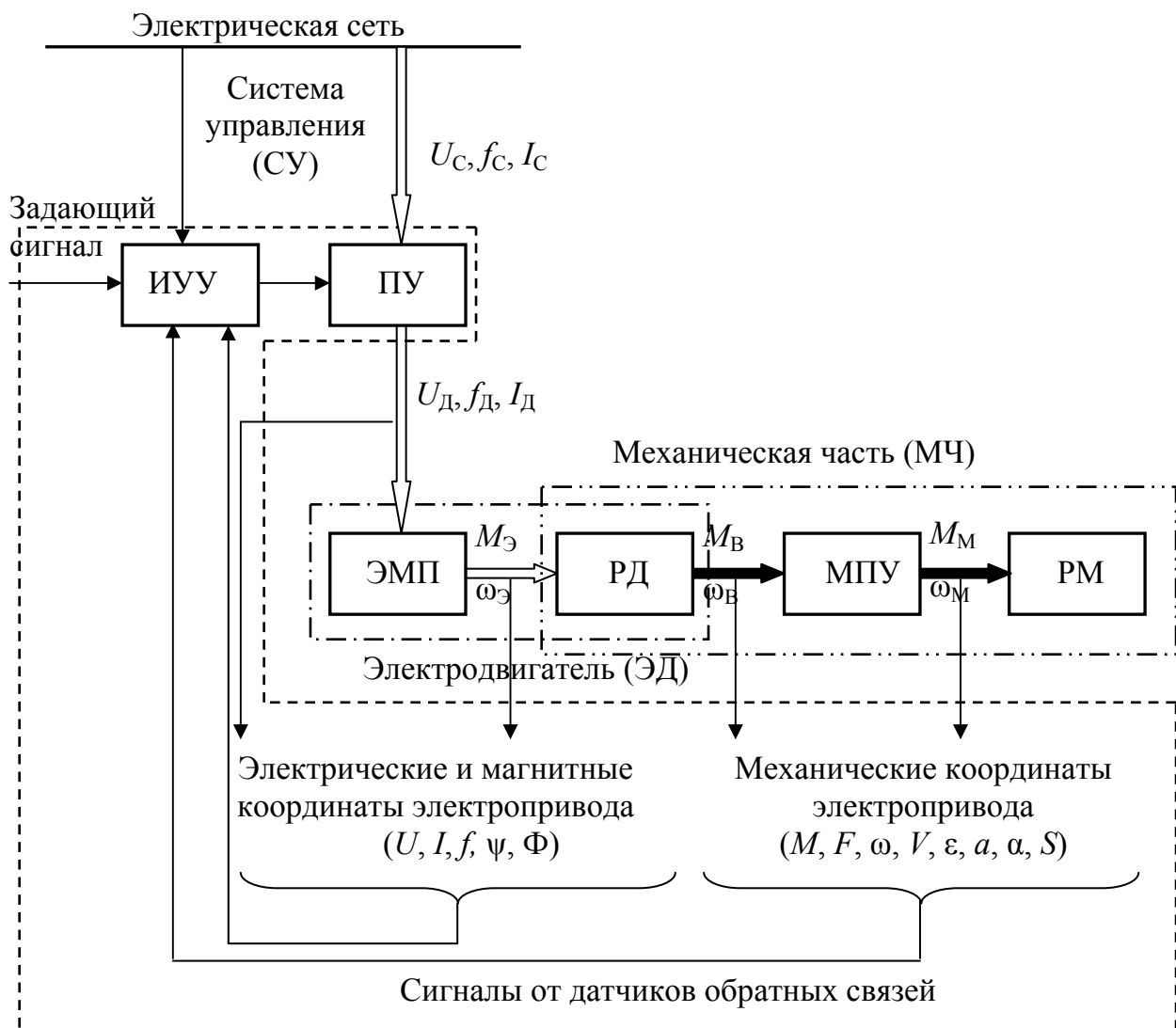


Рис. В.1

На рис. В.1 приняты следующие обозначения: ИУУ – информационно-управляющее устройство; ПУ – силовое преобразовательное устройство; ЭМП – электромеханический преобразователь; РД – ротор двигателя; МПУ – передаточное устройство; РМ – рабочая машина;  $U_C, f_C, I_C$  – напряжение, частота и ток, потребляемый электроприводом из сети;  $U_D, f_D, I_D$  – напряжение, частота и ток обмоток статора двигателя переменного тока;  $M_{\text{Э}}, \omega_{\text{Э}}$  – электромагнитный момент и скорость магнитного поля, созданного обмотками статора;  $M_{\text{В}}, \omega_{\text{В}}$  – момент и скорость двигателя;  $M_{\text{М}}, \omega_{\text{М}}$  – момент и скорость исполнительного органа рабочей машины;  $\psi, \Phi$  – потокосцепление и магнитный поток;  $F, V$  – сила и скорость исполнительного органа рабочей машины;  $\varepsilon, a$  – угловое и линейное ускорение;  $\alpha$  – угол поворота;  $S$  – линейное перемещение.

Система управления (СУ) состоит из силового преобразовательного устройства (ПУ) и информационно-управляющего устройства (ИУУ), включающего в себя задающие устройства и датчики обратных связей, контролирующих состояние электропривода и технологического процесса. Преобразовательные устройства различают по току (постоянного и переменного тока), а также по элементной базе – тиристорные и транзисторные преобразователи. Преобразовательное устройство (ПУ) предназначено для преобразования и регулирования параметров электрической энергии (род тока, величина напряжения и частоты и др.), подводимой к электродвигателю. Информационно-управляющее устройство (ИУУ) предназначено для получения, преобразования, хранения, распределения и выдачи информации о переменных ЭП, технологического процесса и сопредельных систем для формирования управляющих воздействий в электроприводе.

Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется в части двигателя, называемой электромеханическим преобразователем энергии (ЭМП), который можно рассматривать как идеализированный двигатель, ротор (РД) которого не обладает механической инерцией и не имеет механических потерь. На такой ротор воздействует развиваемый ЭМП электромагнитный момент  $M_{\text{Э}}$  при скорости  $\omega_{\text{Э}}$ , при этом вырабатывается энергия, которая передается реальному ротору двигателя. Наибольшее распространение в электроприводе получили электрические двигатели постоянного тока (независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения) и двигатели переменного тока (асинхронные с короткозамкнутым ротором, асинхронные с фазным ротором, однофазные асинхронные двигатели).

Для передачи механической энергии от электродвигательного устройства (ЭД) к исполнительному органу и изменения ее параметров предназначена механическая часть (МЧ), включающая в себя ротор



двигателя (РД), механическое передаточное устройство (МПУ) (редуктор, цепная и ременная передачи, вариатор, планетарные системы, кулисные механизмы, электромагнитные муфты скольжения и др.) и исполнительный орган рабочей машины (РОМ). Рабочая машина – машина, осуществляющая изменение формы, свойств, состояния и положения предмета труда. Исполнительный орган рабочей машины – движущийся элемент рабочей машины, выполняющий технологическую операцию.

Из изложенного следует, что современный автоматизированный электропривод представляет собой сложную электромеханическую систему. Электропривод взаимодействует с системой электроснабжения или источником электрической энергии, с одной стороны, с технологической установкой или машиной, с другой стороны, и, наконец, через информационный канал (задающие устройства, датчики и т.д.) с информационной системой более высокого уровня, часто с человеком – оператором, с третьей стороны.

Можно считать, что электропривод как подсистема входит в указанные системы, являясь их частью. Действительно, специалиста по электроснабжению электропривод обычно интересует как потребитель электроэнергии, технолога или конструктора машин – как источник механической энергии, инженера, разрабатывающего или эксплуатирующего АСУ, – как развитый интерфейс, связывающий его систему с технологическим процессом или системой электроснабжения.

## **В.2. Краткая история развития электропривода**

Электрический привод – сравнительно молодая отрасль науки и техники, насчитывающая немногим более столетия с момента практического применения. Появление ЭП обусловлено трудами многих отечественных и зарубежных ученых-электротехников. В этом ряду имена таких ученых как датчанин Х. Эрстед, показавший возможность взаимодействия магнитного поля и проводника с током (1820 г.), француз А. Ампер, математически оформивший это взаимодействие в том же 1820 г., англичанин М. Фарадей, построивший в 1821 г. экспериментальную установку, доказавшую возможность построения электродвигателя. Это отечественные ученые Б.С. Якоби и Э.Х. Ленц, которым впервые удалось создать в 1834 г. электродвигатель (ЭД) постоянного тока. Работа Б.С. Якоби по созданию двигателя получила мировую известность, и многие последующие работы в этой области были вариацией или развитием его идей, например, в 1837 г. американец Девенпорт построил свой электродвигатель с более простым коммутатором. В 1838 г. Б.С. Якоби усовершенствовал конструкцию ЭД, привнеся в него практически все элементы современной электрической

машины. Этот электродвигатель, мощностью в 1 л.с., был использован для привода лодки, которая с 12 пассажирами совершила движение со скоростью до 5 км/ч против течения Невы. Поэтому **1838 г. считается годом рождения электропривода.** Уже на этой первой, еще несовершенной модели электропривода обнаружилось весьма значительное преимущество его по сравнению с господствовавшими в то время паровыми механизмами – это отсутствие парового котла, запасов топлива и воды, т.е. существенно лучшие массогабаритные показатели.

Однако несовершенство первого ЭД, а главное неэкономичность источника электроэнергии – гальванической батареи, которая была разработана итальянцем Л. Гальвани (1737–1798), явились причиной того что, работы Б.С. Якоби и его последователей сразу не получили практического применения. Требовался простой, надежный и экономичный источник электрической энергии.

В 1833 г. академик Э.Х. Ленц открыл принцип обратимости электрических машин, определивший пути развития двигателей и генераторов. И в 1870 г. сотрудник французской фирмы «Альянс» З. Грамм создал промышленный тип электрического генератора постоянного тока. Вот некоторые примеры. Наш соотечественник электротехник В.Н. Чиколев (1845–1898) создает в 1879 г. ЭП для дуговых ламп, электроприводы швейной машины (1882) и вентилятора (1886), отмеченные золотыми медалями на всероссийских выставках. Происходит внедрение ЭП постоянного тока в военно-морском флоте: подъемник боезапасов на броненосце «Сисой Великий» (1890–1894), первый рулевой привод на броненосце «12 Апостолов» (1892).

Отмечаются случаи использования электропривода в городском транспорте – трамвайные линии в городах Киеве, Казани и Нижнем Новгороде (1892), в Москве (1903) и Петербурге (1907). Однако отмеченные успехи были незначительными. В 1890 г. электропривод составлял всего лишь 5 % от общей мощности используемых механизмов.

Появившийся практический опыт требовал анализа, систематизации и разработки теоретической базы для последующего освещения путей развития ЭП. Огромную роль здесь сыграл научный труд нашего соотечественника крупнейшего электротехника Д.А. Лачинова (1842–1903), опубликованный в 1880 г. в журнале «Электричество» под названием «Электромеханическая работа», заложивший первые основы науки об электроприводе. Д.А. Лачинов убедительно доказал преимущества электрического распределения механической энергии, впервые дал выражение для механической характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, дал классификацию электрических машин по способу возбуждения, рассмотрел условия питания двигателя от генератора. Поэтому **1880 г. – год опубликова-**

**ния научного труда «Электромеханическая работа», считается годом рождения науки об электроприводе.**

Наряду с электроприводом постоянного тока пробивал себе дорогу в жизнь и электропривод переменного тока. В 1841 г. англичанин Ч. Уитсон построил однофазный синхронный электродвигатель. Но он не нашел практического применения из-за трудностей при пуске. В 1876 г. П.Н. Яблочков (1847–1894) разработал несколько конструкций синхронных генераторов для питания изобретенных им свечей, а также изобрел трансформатор. Следующим шагом на пути к ЭП переменного тока явилось открытие в 1888 г. итальянцем Г. Феррарисом и югославом Н. Теслой явления вращающегося магнитного поля, что положило начало конструированию многофазных электродвигателей. Феррарисом и Теслой были разработаны несколько моделей двухфазных двигателей переменного тока. Однако двухфазный ток в Европе не получил широкого распространения. Причиной этого была разработка русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским (1862–1919) в 1889 г. *трехфазной* системы переменного тока. В этом же 1889 г. 8 марта он запатентовал асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (АД КЗ), а несколько позднее – и с фазным ротором. Уже в 1891 г. на электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне М.О. Доливо-Добровольский продемонстрировал асинхронные электродвигатели мощностью 0,1 кВт (вентилятор); 1,5 кВт (генератор постоянного тока) и 75 кВт (насос). М.О. Доливо-Добровольским также были разработаны 3-фазный синхронный генератор и 3-фазный трансформатор, конструкции которых остаются практически неизменными и в наше время.

Марсель Депре в 1881 г. обосновал возможность передачи электроэнергии на расстояние. В 1882 г. была построена первая линия электропередачи протяженностью 57 км и мощностью 3 кВт.

В результате вышеперечисленных работ были устранены последние принципиальные технические препятствия к распространению электрической передачи энергии и был создан наиболее надежный, простой и дешевый электрический двигатель АД с к.-з. ротором.

Первые в России 3-фазные ЭП переменного тока были установлены в 1893 г. в Шепетовке и на Коломенском заводе, где к 1895 г. было установлено 209 электродвигателей общей мощностью 1507 кВт. И все же темпы внедрения электропривода в промышленность оставались низкими из-за отсталости России в области электротехнического производства (2,5 % от мировой продукции) и выработки электроэнергии (15 место в мире) даже в пору расцвета царской России (1913).

В 1920 г. был поставлен вопрос о коренной реорганизации всего народного хозяйства. Был разработан план ГОЭЛРО (государственный

план электрификации России), предусматривающий в течение 10–15 лет создание 30 тепловых и гидроэлектростанций общей мощностью 1 млн 750 тыс. кВт (к 1935 г. было введено около 4,5 млн кВт). Работая над планом ГОЭЛРО, В.И. Ленин отметил, что «электрический привод как раз наиболее надежно обеспечивает и любую быстроту и автоматическую связанность операций на самом обширном поле труда».

В процессе реализации этого плана были созданы заводы, научно-исследовательские и конструкторские организации, которые стали решать задачи по конструированию, производству и внедрению в народное хозяйство электроприводов различного назначения. Благодаря этому уже в 1927 г. мощность электродвигателей в промышленном производстве достигла 75 % от мощности всех двигателей.

Одновременно электропривод начинает формироваться как самостоятельное научное направление. Впервые теория электропривода была изложена в книге С.А. Ринкевича «Электрическое распределение механической энергии» вышедшей в 1925 г.

С этого времени начали формироваться в Ленинграде и Москве научные школы автоматизированного электропривода. Начинается подготовка инженеров-электроприводчиков: с 1923–1924 гг. в Ленинградском электротехническом и в Ленинградском индустриальном институтах, а с 1930 г. в Московском энергетическом институте. Эти вузы стали базой для подготовки ученых и преподавателей в области автоматизированного электропривода.

Большое влияние на развитие электропривода оказали и продолжают оказывать научные школы, созданные в 30-х годах в Ленинграде профессором В.К. Поповым и в Москве Д.П. Морозовым и А.Г. Голованом. Ленинградская школа электропривода развивалась благодаря трудам многих видных ученых (В.П. Андреева, Ю.А. Сабина, А.В. Башарина, С.А. Ковчина, Ю.А. Борцова и других).

Московская школа электропривода, сформировавшаяся в МЭИ, выдвинула известных ученых: М.Г. Чиликина, А.С. Сандлера, М.М. Соколова, В.И. Ключева, Н.Ф. Ильинского и других. По учебникам и научным работам этих ученых воспитывались многие поколения электроприводчиков.

Впоследствии были созданы научные школы в Свердловске (под руководством профессора В.А. Шубенко), в Чебоксарах (под руководством профессора А.Д. Поздеева), в Новосибирске (под руководством профессора Г.В. Грабовецкого).

В годы войны в Москве было организовано ЦКБ «Электропривод» (впоследствии ВНИИЭлектропривод), ставшее Всесоюзным научным центром по разработке и внедрению автоматизированных электропри-

водов в различные отрасли народного хозяйства. В этом институте под руководством М.Г. Юнькова и О.В. Слежановского были созданы многие виды автоматизированных электроприводов для металлургии, горной, нефтяной, газовой промышленности, сельского хозяйства.

В 1930 г. на факультете электрификации вновь образованного Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства профессором М.Г. Евреиновым при участии профессоров Н.А. Артемьева, С.И. Курбатова и В.А. Александрова была создана кафедра «Электропривод и применение электрической энергии в сельском хозяйстве». С момента образования на кафедре работали высококвалифицированные специалисты: А.Ф. Гребенников, П.Ф. Надеждин, А.И. Лаврентьев, К.А. Круг, Д.С. Чукаев, Н.А. Сазонов и др.

В результате НИР в предвоенные годы на кафедре были разработаны и апробированы новые технические решения по применению электрической энергии в производственных процессах сельского хозяйства, в частности, электропахотные агрегаты лебедочной системы и макетные образцы электротракторов с кабельным питанием, автоматические насосные станции для водоснабжения, электрифицированный транспорт и электромолотба, электромеханическая дойка, электропривод целого ряда производственных машин и механизмов.

В 1932 г. под руководством академика М.Г. Евреинова было издано первое учебное пособие по применению электроэнергии в сельском хозяйстве, а в 1933 г. коллектив кафедры выпустил пособие «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве» уже в двух томах. Кроме того, в 1932 г. была выпущена книга С.П. Смирнова «Электропахота», а в 1935 и 1936 г. – два издания книги «Электромолотба» (авторы Г.И. Назаров, Г.В. Саенко, Л.Я. Цивьян).

В период с 1936 по 1939 гг. под руководством М.Г. Евреинова был обследован ряд МТС и сельскохозяйственных предприятий с целью разработки практических рекомендаций по электроприводу сельскохозяйственных машин и механизмов.

В 1935 г. кандидатская диссертация Г.И. Назарова «Исследование пускового режима электропривода молотилки МК-1100» была первой в области применения электроэнергии в сельском хозяйстве, положив начало разработке научных основ электропривода сельскохозяйственных машин, в том числе и исследованию электроприводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями.

Работа Г.И. Назарова «Теория и метод расчета маховиковых электроприводов сельскохозяйственных машин с пульсирующей нагрузкой» представляет крупное теоретическое и экспериментальное исследование в области теории маховикового электропривода и теории рабочих процессов сельскохозяйственных машин и механизмов.

Теоретические работы профессора Г.И. Назарова «О рациональном приводе электротрактора», «О формуле оптимального передаточного числа электропривода» и ряд других, выполненных совместно с учениками (Н.А. Сазонов, А.М. Мусин, А.П. Фоменков и др.) внесли серьезный вклад в теорию электропривода.

В 1949–1950 гг. под председательством Г.И. Назарова межведомственной комиссией пяти министерств разработаны рекомендации для сельского хозяйства и требования к промышленности по переводу сельскохозяйственных машин на автоматизированный электропривод.

Двумя изданиями (в 1938 и 1949 г.) вышел учебник Г.И. Назарова по курсу «Электропривод в сельском хозяйстве», по которому обучалось не одно поколение инженеров. В 1965 и 1972 гг. под редакцией Г.И. Назарова выпущено учебное пособие «Основы электропривода и применение электроэнергии в сельском хозяйстве».

В 1972 г. было издано учебное пособие авторского коллектива ЧИМЭСХ (А.М. Басов, А.Т. Шаповалов, С.А. Кожевников) «Основы электропривода и автоматическое управление электроприводом в сельском хозяйстве».

В 1973 г. издан учебник А.П. Фоменкова «Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий», второе издание вышло в 1984 г. и который используется до сих пор при подготовке специалистов в области электрификации сельского хозяйства.

В последующие годы значительный вклад в развитие электропривода в сельском хозяйстве внесли А.М. Мусин, Н.Ф. Мякишев, А.П. Якименко, А.А. Герасенков, которые решали вопросы по рациональному электроприводу стационарных и мобильных кормораздатчиков, агрегатов по приготовлению кормов, доению и первичной обработке молока, оптимальному микроклимату и т.д.

В настоящее время основная цель серийно выпускаемых и вновь разрабатываемых электроприводов направлена в первую очередь на увеличение их надежности, уменьшение массогабаритных показателей, стоимости и эксплуатационных расходов. Основные разработки современных электроприводов проводятся на базе электрических машин переменного тока.

Новые системы электроприводов переменного тока получили распространение в связи с дальнейшим развитием микропроцессорной техники и силовой полупроводниковой техники на полностью управляемых тиристорах (GTO, GCT, IGCT) и новых поколений транзисторов, прежде всего биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и МДП-транзисторов с индуцированным каналом (MOSFET).

На современной элементной базе получили возможность реализации следующие системы электроприводов:

- для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором – системы фазового управления (регулирование угловой скорости изменением напряжения), частотное регулирование;
- для асинхронного двигателя с фазным ротором фазовое управление, частотное управление в режиме машины двойного питания, каскадные схемы, системы с импульсным управлением в цепи выпрямленного тока ротора;
- для синхронных двигателей частотное управление, частотно-токовое управление, вентильный электропривод.

Для регулируемого электропривода переменного тока появилась необходимость разработки специальных конструкций электрических машин, предназначенных для регулирования угловой скорости, отличающихся от серийно выпускаемых асинхронных и синхронных двигателей рассчитанных для работы с постоянной скоростью. Это связано с перегревом машин переменного тока, работающих на пониженных скоростях. Комплектные электроприводы должны гарантированно обеспечивать работу в заданном диапазоне скоростей без перегрева двигателя и преобразователя.

### **В3. Классификация электроприводов**

Электроприводы разнообразны по своим функциональным возможностям, схемному и конструктивному исполнению, степени автоматизации, что связано с большим разнообразием рабочих машин. Классификация электроприводов по отдельным признакам приведена в табл. В.1.

**По способу передачи механической энергии исполнительному органу** электроприводы бывают индивидуальными, групповыми и взаимосвязанными. Если каждый рабочий орган машины приводится в действие своим электроприводом, то он называется индивидуальным. Такой привод может быть однодвигательным, либо многодвигательным. При групповом электроприводе один двигатель приводит в движение несколько рабочих органов. По мере развития техники групповой электропривод все больше вытесняется индивидуальным.

Взаимосвязанный ЭП содержит два или несколько приводов, связанных между собой электрически или механически и при работе которых поддерживаются необходимые соотношения их скоростей и нагрузок. Примером такого ЭП может служить привод, в котором несколько двигателей работают на общий вал или тяговый орган.

**По виду движения электродвигателя** различают электропривод вращательного и поступательного движения. Наибольшее применение получили электроприводы вращательного движения. В последнее время значительное внимание уделяется линейным двигателям. В тех механизмах, где рабочий орган совершает поступательное движение

применение линейных двигателей конструктивно гораздо удобнее, чем использование специальных кинематических пар: винт–гайка, шарико-винтовые передачи, кривошипно-шатунный механизм и др.

Таблица В1

**Классификация автоматизированных электроприводов**

Классификационный признак	Классификационные градации
По способу передачи механической энергии исполнительному органу	1. Индивидуальный 2. Групповой 3. Многодвигательный 4. Взаимосвязанный
По виду движения электродвигателя	1. Вращательного движения 2. Линейный 3. Нереверсивный 4. Реверсивный 5. Непрерывный 6. Дискретный 7. Многокоординатный
По способу соединения двигателя с рабочим органом	1. Редукторный 2. Безредукторный 3. Конструктивно-интегрированный 4. Мехатронный
По роду тока электродвигателя	1. Постоянного тока 2. Переменного тока
По регулируемости	1. Нерегулируемый 2. Регулируемый
По основному контролируемому параметру	1. Регулируемый по скорости 2. Регулируемый по моменту 3. Регулируемый по положению
По виду управления	1. С ручным управлением 2. С полуавтоматическим управлением 3. С замкнутой САР скорости с ручным заданием или с заданием от системы управления технологическим процессом 4. С замкнутой САР положения, обеспечивающей точное позиционирование 5. Программно-управляемый 6. Следящий 7. Адаптивный
По виду электрического преобразовательного устройства	1. Вентильный. 2. Управляемый выпрямитель–двигатель (УВ–Д) 3. Преобразователь частоты–двигатель (ПЧ–АД)

Создание новых эффективных конструкций линейных двигателей с питанием их от полупроводниковых преобразователей частоты открывает новые возможности использования линейных электроприво-



дов. Привод вращательного и поступательного движения может быть нереверсивным и реверсивным, непрерывным и дискретным.

Многокоординатные электроприводы на основе специальных шаговых электродвигателей находят применение в высокоточных робототехнических установках, например, доильных. Многокоординатные электроприводы позволяют осуществлять пространственные движения рабочего органа по нескольким координатам.

**По способу соединения двигателя с рабочим органом** различают редукторный электропривод, в котором электродвигатель соединяется с рабочим органом машины через редуктор или другую кинематическую передачу (цепные, ременные передачи, планетарные системы, кулисные механизмы, винтовая, шарико-винтовая, зубчато-реечная, барабанно-канатная передачи), и безредукторный электропривод, в котором двигатель непосредственно соединен с рабочим органом, что характерно для высокоскоростных рабочих машин, например, насосов и вентиляторов.

В последние годы стремятся, особенно для высокоточных электроприводов, конструктивно объединить рабочий орган с приводным электродвигателем. Примерами таких конструктивно-интегрированных электроприводов являются: электрошпиндели (для шлифовальных станков), мотор-колеса (для транспортных средств) и др.

Новым направлением в технике является создание электромеханических модулей, включающих в себя рабочий орган, электромеханическое устройство (двигатель) с системой его регулирования и микропроцессорное управляющее устройство. Такие модули, получившие название мехатронных, применяются в роботах и станках с числовым программным управлением.

**По роду тока электродвигательного устройства** различают ЭП постоянного и переменного тока. Различают следующие электродвигатели постоянного тока: независимого возбуждения, последовательного возбуждения, смешанного возбуждения, с возбуждением от постоянных магнитов и т.д. Электропривод переменного тока может быть реализованным на базе следующих электродвигателей: асинхронных с короткозамкнутым и фазным ротором, асинхронных однофазных, синхронных, линейных, коллекторных и т.д.

**По регулируемости** различают нерегулируемый и регулируемый электропривод. Нерегулируемый ЭП – это ЭП, в котором исполнительный орган приводится в движение с неизменной скоростью. Регулируемый ЭП – ЭП, в котором исполнительный орган приводится в движение с изменяемой скоростью в соответствии с требованиями технологического процесса.

**По основному контролируемому параметру** в зависимости от технологических требований электропривод должен осуществлять регулиро-

вание по: моменту, скорости или положению рабочего органа машины. (Это не означает, что при этом не регулируются другие параметры; при регулировании положения необходимо регулировать скорость и т.п.).

В зависимости от диапазона регулирования скорости, регулируемые электроприводы разделяются на:

- регулируемые приводы с ограниченным диапазоном регулирования (не более 2:1);
- регулируемые приводы общего назначения с диапазоном регулирования не выше 100:1;
- широкорегулируемые электроприводы (диапазон регулирования скорости порядка 1000:1);
- высокоточные электроприводы (диапазон регулирования 10000:1 и выше).

**Классификация электроприводов по виду управления** включает в себя электроприводы с системами управления, различающимися по их функциональным возможностям и сложности.

Наиболее простые системы с ручным управлением характерны для нерегулируемых электроприводов. Такие электроприводы имеют систему управления на основе релейно-контакторной аппаратуры, выполняющей функции пуска, останова, защиты и блокировки.

Электроприводы с полуавтоматическим управлением подразумевают управление электроприводом оператором с помощью командно-контроллера, кнопок управления и других аппаратов. Система управления содержит элементы автоматического управления и регулирования, обеспечивающие автоматическое изменение параметров электропривода в соответствии с командами оператора. Такие системы характерны, например, для электропривода грузоподъемных кранов, мобильных кормораздатчиков и т.п.

Для регулируемого электропривода, как правило, используются замкнутые САР по току и скорости. В этом случае управление может осуществляться оператором. Задание на скорость может также определяться системой технологической автоматики (например, дозаторы и другие машины).

Позиционные электроприводы обеспечивают точную остановку рабочего органа механизма в заданном положении. Системы управления такими электроприводами содержат замкнутый контур положения, действующий постоянно или при входе рабочего органа в зону точной остановки.

Если задающее воздействие на параметры движения рабочего органа задается программными средствами, то такие электроприводы составляют класс электроприводов с программным управлением, в которых перемещение исполнительного органа осуществляется по задан-

ной программе. В настоящее время широкое распространение получили электроприводы с числовым программным управлением (ЧПУ). Приводы с ЧПУ содержат замкнутые контуры регулирования по скорости и положению.

Если положение рабочего органа должно изменяться в соответствии с заданием, характер которого заранее неизвестен, то функцией электропривода в этом случае является слежение и отработка этого задания с необходимой точностью. Такой электропривод называется следящим.

Электропривод, в котором автоматически обеспечивается оптимальный режим движения исполнительного органа при изменяющихся условиях работы, называется адаптивным.

**По виду электрического преобразовательного устройства** бывают вентильные, системы УВ–Д, ПЧ–Д, Г–Д.

Вентильный ЭП содержит преобразователь вентильного типа, чаще всего полупроводниковый, который в свою очередь подразделяется на тиристорный и транзисторный в зависимости от того, на каких силовых полупроводниковых ключах выполнено преобразовательное устройство.

Система УВ–Д (управляемый выпрямитель–двигатель) – это ЭП, в котором преобразовательным устройством служит управляемый выпрямитель.

Система ПЧ–Д (преобразователь частоты–двигатель) – ЭП переменного тока, в котором преобразовательное устройство выполнено в виде преобразователя частоты с непосредственной связью или с промежуточным звеном постоянного тока.

Система Г–Д (генератор–двигатель) – это ЭП, в котором преобразовательное устройство выполнено в виде электромашинного преобразовательного агрегата, состоящего из асинхронного и двигателя постоянного тока. В настоящее время используется в основном в учебном процессе для снятия механических характеристик электродвигателей.

#### **В.4. Механические характеристики производственных механизмов**

Правильное сочетание механических характеристик электродвигателя и рабочей машины – одно из главных условий высоких технико-экономических показателей работы машины.

Зависимость между скоростью  $\omega_c$  и моментом статических сопротивлений, т. е.  $\omega_m = f(M_m)$ , называют механической характеристикой рабочей машины или производственного механизма.

Под моментом  $M_c$  статических сопротивлений машины обычно понимается момент сопротивлений, который не вызывается ускорени-

ем отдельных органов машины. При наличии ускорений, помимо статических, возникают динамические моменты или усилия. В дальнейшем момент статических сопротивлений будем именовать просто моментом сопротивлений.

Под скоростью  $\omega_M$  понимается угловая скорость вращения вала, выраженная в рад/с. Часто на практике используют внесистемную единицу частоты вращения  $n$  вала, выраженную в об/мин.

В общем случае момент сопротивлений рабочей машины может зависеть не только от скорости, но и от других факторов: пути, времени и др. Значительная часть рабочих машин состоит из нескольких механизмов, поэтому их характеристики представляют собой сумму характеристик отдельных механизмов. Этим объясняется целесообразность классификации механических характеристик производственных механизмов, а не всех сложных рабочих машин.

Наиболее общее и распространенное выражение для механической характеристики производственных механизмов имеет вид:

$$M_M = M_{M0} + (M_{MH} - M_{M0}) \left( \frac{\omega_M}{\omega_{MH}} \right)^x, \quad (B.1)$$

где  $M_M$  – момент сопротивления механизма при скорости  $\omega_M$ ;  $M_{M0}$  – момент механических потерь на трение в механизме;  $M_{MH}$  – момент сопротивления механизма при номинальной скорости;  $x$  – коэффициент, определяющий вид механической характеристики.

Используя выражение (B.1) для различных значения показателя степени  $x$  можно выявить четыре основные группы производственных механизмов (рис. B.2):

1.  $x = 0$ .

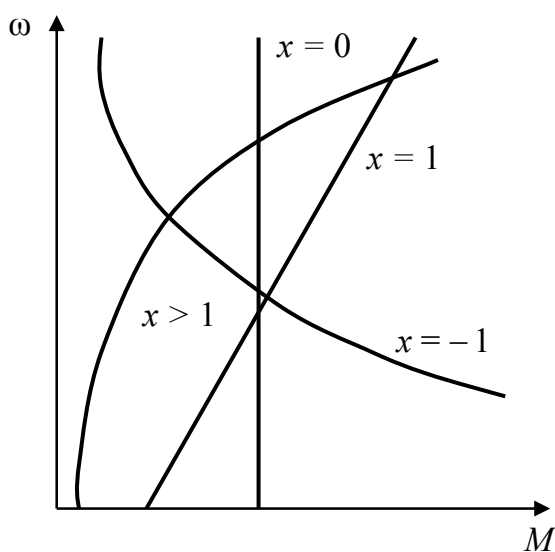


Рис. B.2

В этом случае  $\left( \frac{\omega_M}{\omega_{MH}} \right)^0 = 1$  и тогда  $M_M = M_{MH} = \text{const}$ , т.е. момент сопротивления не зависит от скорости.

Такую характеристику имеют подъемные краны, лебедки, тельферы, ленточные, цепочные, скребковые транспортеры. К этой группе с приближением можно отнести все механизмы, у которых момент сопротивления является момент сил трения. Это связано с тем, что в

пределах рабочих скоростей момент трения изменяется незначительно.

2.  $x = 1$ .

Уравнение В.1 принимает вид:

$$M_M = M_{MO} + \left( \frac{M_{MH} - M_{MO}}{\omega_{MH}} \right) \omega_M = M_{MO} + a\omega_M, \quad (B.2)$$

т.е. механизмы имеют линейно-возрастающую механическую характеристику.

Типичным примером подобных механизмов может служить генератор постоянного тока независимого возбуждения, работающий на постоянную внешнюю нагрузку.

3.  $x > 1$ .

В этом случае уравнение принимает вид:

$$M_M = M_{MO} + \left( \frac{M_{MH} - M_{MO}}{\omega_{MH}^x} \right) \omega_M^x = M_{MO} + b\omega_M^x, \quad (B.3)$$

т.е. механизмы имеют нелинейно-возрастающую (параболическую) механическую характеристику.

Такой механической характеристикой обладают вентиляторы, центробежные насосы, сепараторы, молотильные барабаны дробилок. При  $x = 2$  характеристики принято называть вентиляторными.

4.  $x = -1$ .

Для этих характеристик аналитическое выражение механической характеристики принимает вид:

$$M_M = M_{MO} + \left( \frac{M_{MH} - M_{MO}}{\omega_{MH}^{-1}} \right) \omega_M^{-1} = M_{MO} + \frac{c}{\omega_M}, \quad (B.4)$$

т.е. механизмы имеют нелинейно-спадающую (гиперболическую) механическую характеристику.

Такая характеристика свойственна токарным, расточным, фрезерным, сверлильным и другим металлорежущим станкам, зерновым нориям.

Приведенная выше классификация не исчерпывает практически возможных случаев, но дает представление о типичных характеристиках производственных механизмов и рабочих машин.

В механической части электропривода действуют различные виды усилий, моментов, различающиеся характером действия. Статический момент, действующий со стороны производственных механизмов, может быть пассивным (реактивным) и активным (потенциальным).

Пассивный (реактивный) статический момент возникает при движении механизмов и направлен против направления движения. Поэтому он всегда будет тормозным. При изменении направления движения изменяется и направление (знак) реактивного момента (рис. В.3). Этот

момент создается силами трения, возникающими при движении трущихся поверхностей механизмов, их рабочих органов и т.п.

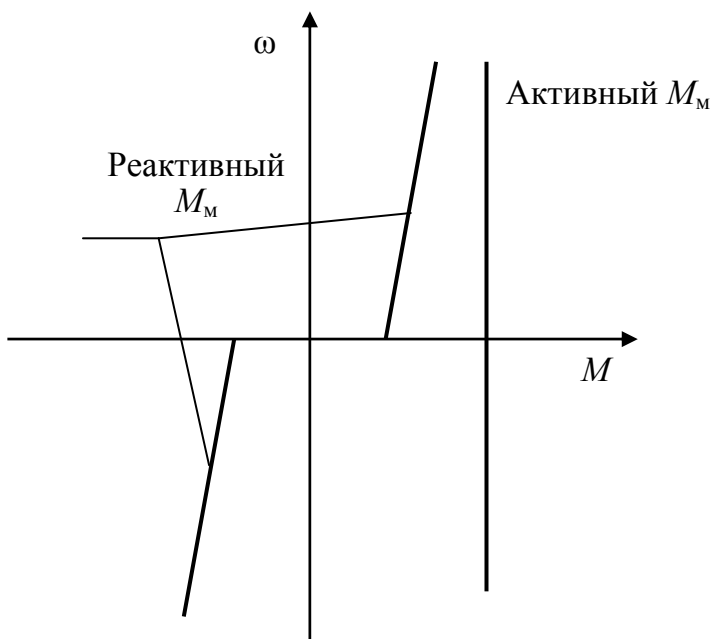


Рис. В.3

Активный статический момент создается независимо от наличия и направления движения механизмов источниками механической энергии, в качестве которых могут быть сила ветра, потенциальная энергия от массы груза или упруго деформированного элемента и т.п. Этот момент направлен всегда в одну сторону. Поэтому при изменении направления движения на обратное направление активного момента сохраняется (рис. В.3). В связи с этим

активный момент нагрузки может быть как тормозным, так и движущим. Например, при подъеме груза активный момент от массы груза — тормозной, а при спуске — движущий.

Анализ видов статического момента показывает, что между реактивными и активными моментами имеется существенное отличие: *реактивный момент с изменением направления движения также меняет свое направление, активный же момент сохраняет его постоянным.*

### В.5. Механические характеристики электродвигателей

Зависимость угловой скорости электродвигателя от момента на его валу  $\omega = f(M)$  называют механической характеристикой электродвигателя.

Различают механические характеристики электродвигателей естественные и искусственные. У каждого электродвигателя одна естественная механическая характеристика, которая соответствует типовой схеме включения, номинальному напряжению и частоте питания и отсутствию внешних дополнительных сопротивлений в цепях его обмоток.

Искусственных механических характеристик у электродвигателя множество. Они соответствуют режимам, когда параметры питающей сети (напряжение, частота) отличаются от номинальных, изменена схема включения обмоток или в цепи обмоток введены добавочные сопротивления. Искусственные характеристики используются в том случае, когда естественные не могут удовлетворить требованиям рабо-

чей машины, при регулировании скорости, в периоды пуска и торможения двигателей.

Степень изменения скорости с изменением момента у различных типов электрических двигателей неодинакова и различается в зависимости от жесткости механических характеристик (рис. В.4).

Жесткость механической характеристики определяется коэффициентом жесткости  $\beta$ , под которым понимается производная момента по угловой скорости

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} = \frac{M_1 - M_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\Delta M}{\Delta\omega}. \quad (\text{В.5})$$

Механические характеристики электродвигателей можно разделить на четыре основных типа в зависимости от их коэффициента жесткости  $\beta$  (рис. В.5):

1. Абсолютно жесткая механическая характеристика, при которой скорость с изменением момента остается неизменной, т.е.  $\beta = \infty$ . Такой характеристикой обладает синхронный двигатель (кривая 1).

2. Жесткая механическая характеристика, отличающаяся незначительным изменением скорости при изменении момента. Коэффициент жесткости в этом случае  $\beta = 40 \dots 10$ .

Жесткую механическую характеристику имеют двигатели постоянного тока параллельного или независимого возбуждения (кривая 2), асинхронные двигатели рабочей части характеристики (кривая 3).

3. Мягкая механическая характеристика отличается значительным изменением скорости при изменении момента. Эти характеристики свойственны двигателям постоянного тока последовательного возбуждения (кривая 4) и смешанного возбуждения (кривая 5). Коэффициент жесткости в этом случае  $\beta < 10$ .

4. Абсолютно мягкая механическая характеристика, при которой момент двигателя остается неизменным с изменением скорости, т.е.  $\beta = 0$ .

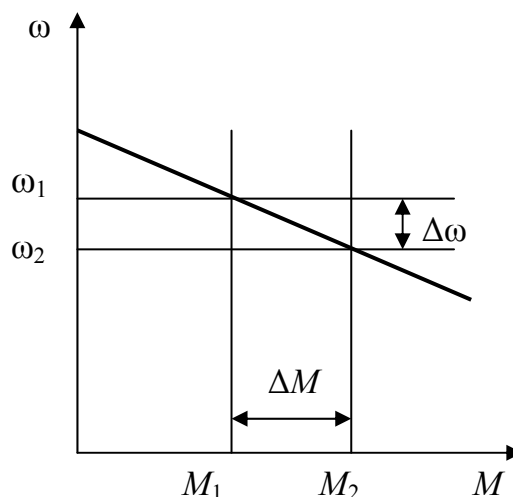


Рис. В.4

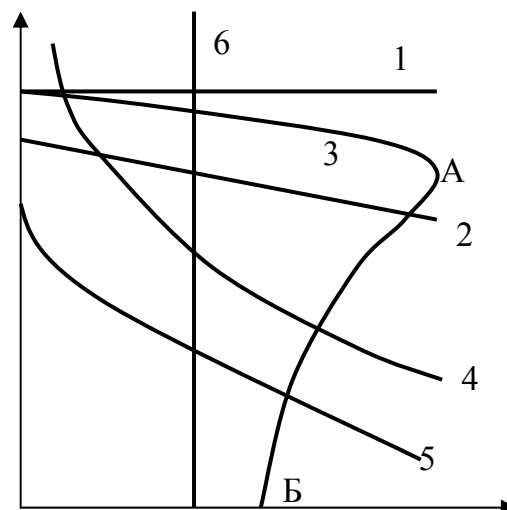


Рис. В.5

Такой характеристикой обладает двигатель постоянного тока независимого возбуждения при питании обмотки якоря от источника тока (кривая б).

Коэффициент жесткости характеристик может изменяться в широких пределах, быть как положительной, так и отрицательной величиной. Например, для рабочей ветви характеристики асинхронного электродвигателя  $\beta < 0$ , в точке А, где момент двигателя имеет максимальное значение,  $\beta = 0$ , а на участке А–Б –  $\beta > 0$ .

### В.6. Установившееся движение электропривода. Статическая устойчивость

Рассмотрим самую простейшую механическую систему, состоящую из ротора двигателя и непосредственно связанной с ним нагрузки – рабочего органа машины (рис. В.6). Несмотря на простоту, система

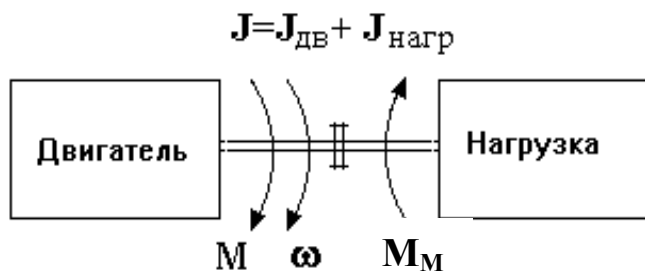


Рис. В.6

ма вполне реальна: именно так реализована механическая часть ряда приводов насосов, вентиляторов, многих других машин. К такой модели может быть приведена механическая часть большинства электроприводов.

Считаем, что к системе на рис. В.6 приложены два момента – момент  $M$ , развиваемый двигателем, и момент  $M_M$ , создаваемый нагрузкой, а также потерями механической части (трение), которые имеют свою величину и направление.

Движение системы определяется вторым законом Ньютона:

$$\pm M \pm M_M = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (\text{В.6})$$

где  $\omega$  – угловая скорость,  $J$  – суммарный момент инерции системы.

В уравнении (В.6) момент  $M_M$  практически полностью определяется свойствами нагрузки, а момент  $M$ , который можно принять за независимую переменную, формируется двигателем.

Моменты  $M$  и  $M_M$  могут зависеть от времени, от положения, от скорости. Наиболее интересна и важна связь моментов  $M$  и  $M_M$  со скоростью  $\omega$ . Зависимости  $\omega(M)$  и  $\omega(M_M)$ , называемые механическими характеристиками соответственно двигателя и рабочей машины, служат очень удобным и полезным инструментом при анализе статических и динамических режимов работы электропривода.

Механические характеристики двигателя и нагрузки, рассматриваемые совместно, позволяют очень просто определить координаты –



скорость и моменты в установившемся (статическом) режиме  $\omega_{уст}$  и  $M_{уст}$ . Действительно, если отразить зеркально относительно оси скорости характеристику  $M_M$  (рис. В.7а), то точка  $A$  пересечения отраженной кривой  $M_M$  с характеристикой двигателя  $M$  определит установившийся режим, поскольку выполнится условие  $M + (-M_M) = 0$  или  $\sum M = 0$ , отрезки  $AB$  и  $BC$  будут равными.

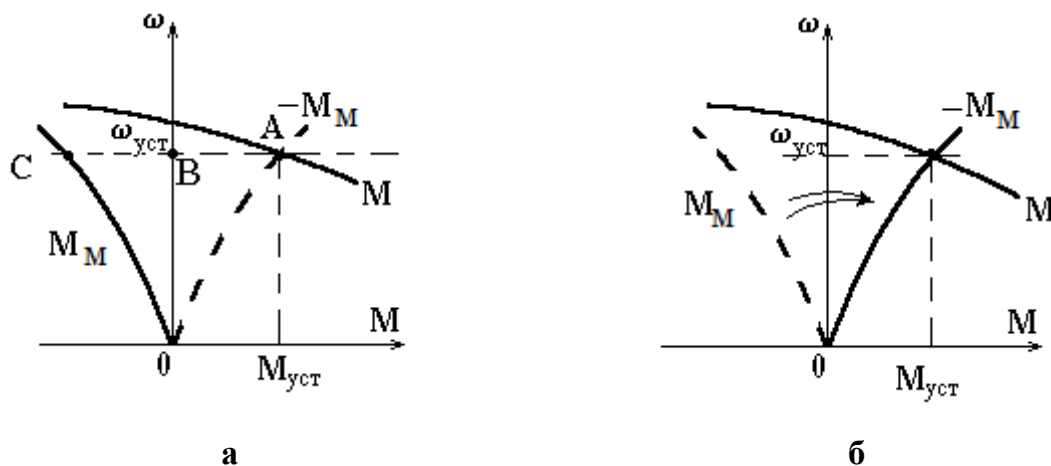


Рис. В.7

Легко видеть, что здесь мы выполнили одну операцию – перенесли  $M_C$  из второго квадранта в первый. Эту операцию можно исключить, если записывать уравнение движения (В.6) в виде:

$$\pm M - (\pm M_M) = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (\text{В.7})$$

где знак « $\rightarrow$ » перед  $\pm M_M$  и означает зеркальный перенос характеристики нагрузки (рис. В.7б). Этот прием традиционно используется в электроприводе, т.е. вместо общей и, конечно, правильной общей записи (В.6) используют измененную форму (В.7), помня, что это лишь удобный прием, при котором установившийся режим получается при простом пересечении характеристики  $M$  и  $-M_M$ .

Механические характеристики двигателя и нагрузки позволяют определить, будет ли статически устойчив установившийся режим, т.е. вернется ли система после действия любого случайного возмущения к исходному статическому состоянию – рис. В.8а, или не вернется – рис. В.8б.

В первом случае (рис. В.8а) показано, что любое случайное, например снижение скорости ( $\omega_1 < \omega_{уст}$ ) сопровождается преобладанием движущего момента  $M$  над тормозящим  $M_M$ , и равновесие восстанавливается, система возвращается в исходное состояние. Во втором случае (рис. В.8б) такое же случайное изменение скорости приводит к преобладанию тормозящего момента, и равновесие не восстанавливается – система статически неустойчива.

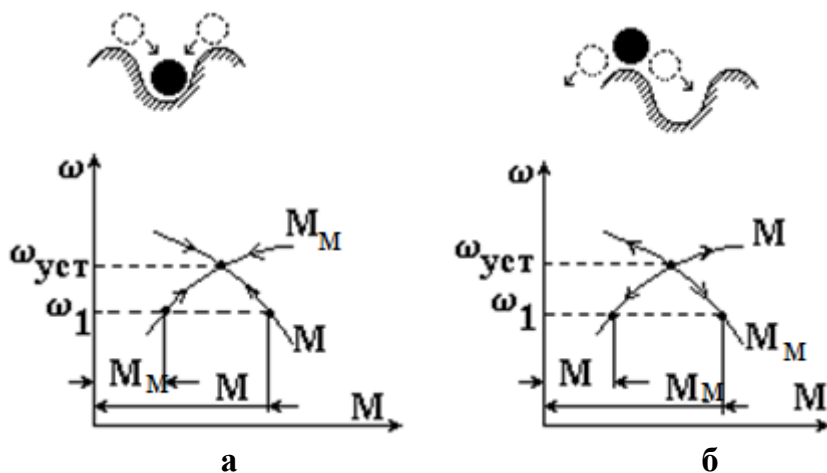


Рис. В.8

В общем случае условие статической устойчивости электропривода в окрестностях некоторой точки  $\omega_{уст}$  определяется неравенством:

$$\beta - \beta_M < 0,$$

где  $\beta$  – статическая жесткость механической характеристики электродвигателя;  $\beta_M$  – статическая жесткость механической характеристики рабочей машины, приведенная к валу двигателя.

### Контрольные вопросы и задания

1. Назовите составные части электропривода.
2. Назовите основные типы электродвигателей.
3. Назовите основные признаки, по которым классифицируются электропривода.
4. Что называется механической характеристикой производственного механизма, рабочей машины?
5. Что называется механической характеристикой электродвигателя?
6. Запишите уравнение движения электропривода. Поясните возможные состояния электропривода на основании уравнения движения.
7. Что такое жесткость механической характеристики?
8. Изобразите механические характеристики известных Вам двигателей.
9. Назовите основные типы механических характеристик производственных механизмов.
10. Как с помощью механической характеристики электродвигателя и производственного механизма определяется установившаяся скорость?
11. Поясните основные условия статической устойчивости механического движения. Запишите условие статической устойчивости электропривода.
12. В чем заключается различие между реактивным и активным статическими моментами, действующими со стороны производственных механизмов на нагрузку?

# Раздел I

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### Глава 1

#### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Двигатели постоянного тока различают по способу включения *обмотки возбуждения* в электрическую цепь.

1. Электродвигатели *с независимым возбуждением* (ДПТНВ). У них обмотка возбуждения подключается к источнику питания отдельно от источника питания обмотки якоря или может быть выполнена на постоянных магнитах. При этом электрическая цепь обмотки возбуждения является независимой от силовой цепи якоря, т.е. изменение тока якоря при изменении нагрузки не сказывается на токе (магнитном потоке) обмотки возбуждения. ДПТНВ являются самыми массовыми электрическими машинами постоянного тока.

2. Электродвигатели *с параллельным возбуждением* (ДПТПарВ). Характеризуются включением обмотки возбуждения параллельно с обмоткой якоря двигателя. По своим характеристикам близки к ДПТНВ. В случае несоизмеримости мощности источника питания  $P_{ист}$  и двигателя  $P_{дв}$ , когда  $P_{ист} \gg P_{дв}$  характеристики практически идентичны характеристикам ДПТНВ.

3. Электродвигатели *с последовательным возбуждением* (ДПТПВ). Обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря, что обуславливает зависимость магнитного потока от тока якоря, т.е. от нагрузки. Вследствие этого характеристики двигателя имеют нелинейный вид.

4. Электродвигатели *со смешанным возбуждением* (ДПТСВ) имеют две обмотки возбуждения – параллельную и последовательную. Поэтому двигатель смешанного возбуждения сочетает в себе свойства как ДПТ независимого возбуждения, так и ДПТ последовательного возбуждения и его характеристики имеют нелинейный вид.

#### **1.1. Электромеханические свойства двигателя постоянного тока независимого возбуждения**

##### **1.1.1. Электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения**

Электромеханической характеристикой (ЭМХ) двигателя называется зависимость угловой скорости ( $\omega$ ) вала от тока ( $I$ ) в обмотке якоря, которая устанавливает связь между электрической и механической величинами.

Механическая характеристика (МХ) представляет собой зависимость угловой скорости  $\omega$  от развиваемого двигателем электромагнитного момента  $M$  и устанавливает связь между двумя механическими величинами.

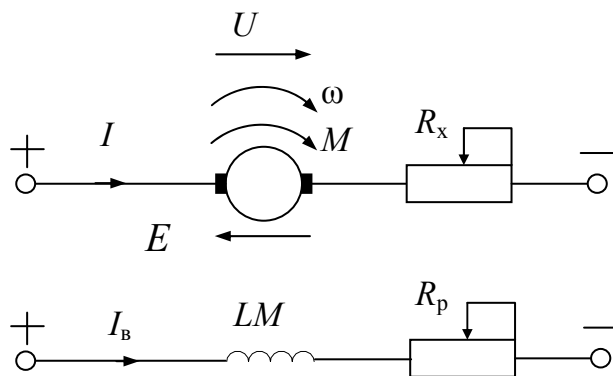


Рис. 1.1

На рис. 1.1 представлена схема включения в сеть двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТНВ).

Направления всех электрических и механических величин указаны для двигательного режима работы. Уравнения электромеханической и механической характеристик можно получить, используя:

- 2-й закон Кирхгофа для цепи якоря:

$$U = E + I(R_{\text{я}} + R_x); \quad (1.1)$$

- выражения, отражающие взаимосвязь параметров ДПТ:

$$E = k\Phi\omega; \quad (1.2)$$

$$M = k\Phi I. \quad (1.3)$$

где  $U$  – напряжение сети постоянного тока;  $E$  – эдс обмотки якоря;  $\Phi$  – магнитный поток;  $k = \frac{pN}{2\pi a}$  – конструктивный коэффициент двигателя;  $p$  – число пар полюсов;  $N, a$  – число активных проводников и параллельных ветвей обмотки якоря;  $\omega$  – угловая скорость якоря;  $R_{\text{я}}$  – внутреннее сопротивление цепи якоря ДПТ, включающее в себя сопротивление обмоток якоря, компенсационной и дополнительных полюсов, а также переходное сопротивление щеточного контакта;  $R_x$  – внешнее дополнительное сопротивление, включенное последовательно в цепь якоря;  $R_p$  – внешнее дополнительное сопротивление, включенное последовательно в цепь обмотки возбуждения.

Подставив в выражение (1.1) значение  $E$ , согласно (1.2), в результате преобразований получим уравнение электромеханической характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_x}{k\Phi} I. \quad (1.4)$$

Выразив величину тока якоря из (1.3) и подставив в (1.4), в результате преобразований получим уравнение механической характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_x}{(k\Phi)^2} M. \quad (1.5)$$

Учитывая, что для данного двигателя  $\Phi = \text{const}$ , уравнения можно записать в следующем виде:

$$\omega = A - BI; \quad (1.6)$$

$$\omega = A - CM, \quad (1.7)$$

где  $A = \frac{U}{k\Phi}$ ;  $B = \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{k\Phi}$ ;  $C = \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{(k\Phi)^2}$ .

Таким образом, электромеханическая и механическая характеристики ДПТ независимого возбуждения представляют собой прямые линии (рис. 1.2, 1.3), пересекающие ось ординат в одной и той же точке, соответствующей скорости идеального холостого хода, при которой ток и момент равны нулю:

$$\omega_0 = A = \frac{U}{k\Phi}. \quad (1.8)$$

Для электромеханической и механической характеристик ДПТ независимого возбуждения также справедливо выражение:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c, \quad (1.9)$$

где  $\Delta\omega_c = \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{k\Phi} I = \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{(k\Phi)^2} M$  – статический перепад скорости.

Для электродвигателей различают естественные и искусственные электромеханические и механические характеристики. Под естественными (ЕЭМХ и ЕМХ) понимаются характеристики, соответствующие номинальным значениям напряжения на якоре двигателя  $U_{\text{н}}$ , магнитного потока  $\Phi_{\text{н}}$  и отсутствию дополнительного сопротивления  $R_{\text{х}}$  в цепи якоря при включении в сеть по паспортной схеме. Все остальные характеристики называются искусственными.

Поскольку статические характеристики ДПТНВ линейны, то для построения их естественных характеристик достаточно выбрать координаты двух точек.

Для построения естественной электромеханической характеристики (ЕЭМХ) необходимо найти две точки (рис. 1.2):

**Точка 1** с координатами:

- ток якоря  $I=0$ ;
- скорость равна скорости идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}}. \quad (1.10)$$

Значение коэффициента пропорциональности  $k\Phi_{\text{н}}$  при номинальном магнитном потоке определяют по выражению:

$$k\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}}R_{\text{я}}}{\omega_{\text{н}}}. \quad (1.11)$$

Для определения значения коэффициента пропорциональности  $k\Phi_n$  необходимо знать величину внутреннего сопротивления цепи якоря двигателя  $R_{я}$ . Сопротивление  $R_{я}$  можно найти следующими способами:

- если двигатель имеется в наличии, то при отключённом от сети двигателе необходимо измерить, например, методом амперметра-вольтметра, поворачивая якорь на некоторый угол;

- сопротивление цепи якоря может быть взято из каталогов или из справочной литературы.

- в некоторых справочниках приводятся кривые относительных значений сопротивления цепи якоря для серии машин в функции номинальной мощности на валу.

- приближённо, с погрешностью около 10 %, величину  $R_{я}$  можно определить через номинальные данные, если предположить, что половина всех потерь мощности в двигателе при номинальной нагрузке приходится на потери в меди обмоток якоря.

Потери мощности в двигателе:

$$\Delta P_n = U_n I_n - P_n. \quad (1.12)$$

или

$$\Delta P_n = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n. \quad (1.13)$$

Потери мощности в меди обмоток якоря:

$$\Delta P_{ян} = I_n^2 R_{я}. \quad (1.14)$$

Учитывая, что  $\Delta P_{ян} = I_n^2 R_{я} = \frac{\Delta P_n}{2}$  и используя выражения (1.12)–(1.14), получим:

$$R_{я} = \frac{U_n I_n - P_n}{2I_n^2} \quad (1.15)$$

или

$$R_{я} = \frac{(1 - \eta_n) U_n}{2I_n}. \quad (1.16)$$

**Точка 2** с координатами:

- ток якоря равен номинальному току  $I = I_n$ ;
- скорость равна номинальной скорости:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (1.17)$$

где  $n_n$  – номинальная частота вращения якоря двигателя.

Для построения естественной механической характеристики (EMX) необходимо также найти две точки (рис. 1.3):

**Точка 1** с координатами:

- момент двигателя  $M = 0$ ;

- скорость равна скорости идеального холостого хода (1.10).

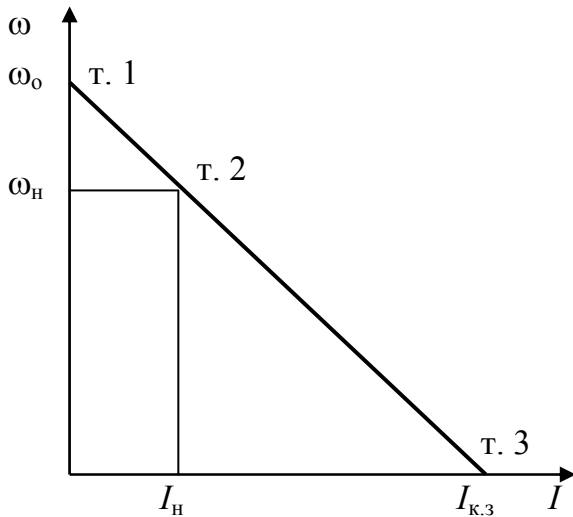
**Точка 2** с координатами:

- момент двигателя равен номинальному электромагнитному мо-

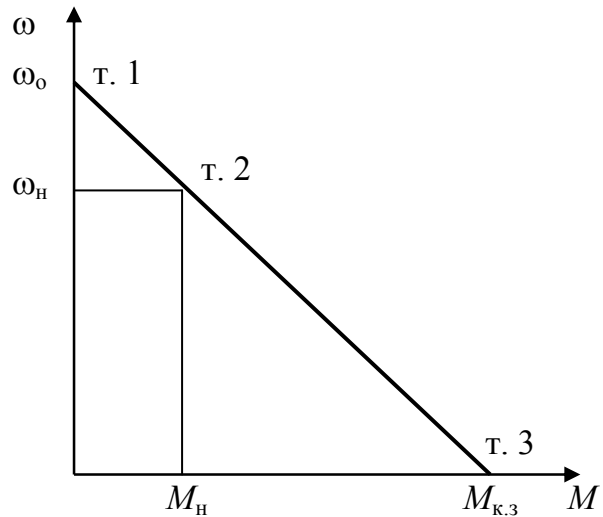
менту:

$$M_H = k\Phi_H I_H. \quad (1.18)$$

- скорость равна номинальной скорости (1.17).



**Рис. 1.2**



**Рис. 1.3**

В качестве второй точки иногда можно воспользоваться точкой короткого замыкания (точка 3, рис. 1.2, 1.3), когда угловая скорость равна нулю. При этом ток короткого замыкания:

$$I_{к.з.} = \frac{U_H}{R_я}; \quad (1.19)$$

момент короткого замыкания:

$$M_{к.з.} = k\Phi_H I_{к.з.} \quad (1.20)$$

Часто бывает полезным представить электромеханическую и механическую естественные характеристики в относительных единицах, приняв за базовые величины скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  и номинальные значения напряжения  $U_H$ , тока  $I_H$ , момента  $M_H$ , магнитного потока  $\Phi_H$ , сопротивления обмотки якоря  $R_H$ .

Номинальное сопротивление якоря определяется по выражению  $R_H = \frac{U_H}{I_H}$  и имеет следующий физический смысл – это сопротивление обмотки якоря, которое ограничивает ток якоря до номинального значения в заторможенном состоянии ( $\omega = 0$ ) и приложенном номинальном напряжении.

Если разделить правую и левую части выражения (1.4) на скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ , получим уравнение электромеханической характеристики в относительных единицах:

$$\omega_* = \frac{U_*}{\Phi_*} - I_* \frac{R_{я*}}{\Phi_*}, \quad (1.21)$$

где  $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_0}$ ,  $U_* = \frac{U}{U_H}$ ,  $I_* = \frac{I}{I_H}$ ,  $\Phi_* = \frac{\Phi}{\Phi_H}$ ,  $R_{я*} = \frac{R_{я}}{R_H}$ .

При подстановке в выражение (1.21)  $I_* = \frac{M_*}{\Phi_*}$ , где  $M_* = \frac{M}{M_H}$ ,

получим уравнение механической характеристики в относительных единицах:

$$\omega_* = \frac{U_*}{\Phi_*} - M_* \frac{R_{я*}}{\Phi_*^2}, \quad (1.22)$$

Для естественных характеристик уравнения (1.21) и (1.22) в относительных единицах примут вид:

- электромеханическая:

$$\omega_* = 1 - I_* R_{я*}, \quad (1.23)$$

- механическая:

$$\omega_* = 1 - M_* R_{я*}, \quad (1.24)$$

Сопоставляя выражения (1.9) и (1.23) и (1.24), получаем:

$$\Delta\omega_{с*} = I_* R_{я*} = M_* R_{я*} \quad (1.25)$$

При  $M = M_H$  и  $I = I_H$  из уравнения (1.25) видно, что статический перепад при номинальной нагрузке равен сопротивлению цепи якоря в относительных единицах, то есть  $\Delta\omega_{с*} = R_{я*}$ .

Таким образом, в относительных единицах естественные механическая и электромеханическая характеристики совпадают.

Анализ уравнения механической характеристики (1.5) показывает, что искусственные механические характеристики (ИМХ) можно получить:

- включением дополнительного сопротивления  $R_x = \text{varia}$  в цепь якоря;
- изменением подводимого к якорю двигателя напряжения  $U = \text{varia}$ ;
- изменением магнитного потока двигателя  $\Phi = \text{varia}$ .

Для оценки влияния различных параметров на вид и свойства механической характеристики электродвигателя определим модуль жесткости механической характеристики, для чего используем преобразованное уравнение (1.5):

$$M = \frac{Uk\Phi}{R_{я} + R_x} - \frac{(k\Phi)^2}{R_{я} + R_x} \omega. \quad (1.26)$$

Дифференцируя уравнение (1.26), получим модуль жесткости механической характеристики:



$$\beta = \frac{dM}{d\omega} = \left| \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}} \right|. \quad (1.27)$$

Таким образом, модуль жесткости определяется сопротивлением цепи якоря, потоком возбуждения и не зависит от напряжения подводимого к якорю двигателя.

Использование электродвигателя с искусственными механическими характеристиками связано с необходимостью:

- ограничения пускового тока и момента;
- регулирования скорости рабочей машины;
- обеспечения работы двигателя в тормозных режимах.

**Искусственные (реостатные) механические характеристики**, получаемые при введении дополнительного сопротивления  $R_{\text{х}}$  в цепь якоря, как видно из уравнения механической характеристики (1.5), проходят через точку скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ , принадлежащую естественной механической характеристике, но имеют меньший модуль жесткости  $\beta$  (1.14), а, следовательно, и жесткость по отношению к ЕМХ (рис. 1.4).

Для построения реостатной характеристики необходимо иметь также две точки (рис. 1.4):

**Точка 1** с координатами:

- момент двигателя  $M = 0$ ;
- скорость равна скорости идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}}. \quad (1.28)$$

**Точка 2** с координатами:

- задается моментом двигателя равным номинальному электромагнитному моменту:

$$M_{\text{н}} = k\Phi_{\text{н}} I_{\text{н}}. \quad (1.29)$$

- определяем скорость при номинальном моменте и дополнительном сопротивлении  $R_{\text{х}}$ :

$$\omega_{\text{н}}^{R_{\text{х}}} = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{(k\Phi_{\text{н}})^2} M_{\text{н}}. \quad (1.30)$$

Реостатную электромеханическую характеристику строят аналогично рассмотренному выше. Следует отметить, что как и в случае естественных электромеханической и механической характеристик, соответствующие реостатные характеристики, выраженные в относительных единицах, будут совпадать.

Реостатные характеристики, как правило, используются для ограничения тока якоря в процессе пуска электродвигателя или в режиме

торможения. Использование этих характеристик для регулирования скорости рабочих машин неоправданно в связи с большими потерями энергии в дополнительном сопротивлении и уменьшением стабильности скорости из-за снижения жесткости.

Искусственные механические характеристики при снижении напряжения  $U$  на якоре располагаются параллельно естественной характеристике (рис. 1.5) и проходят через точку  $\omega_0$ , величина которой изменяется пропорционально напряжению в соответствии с выражением (1.10).

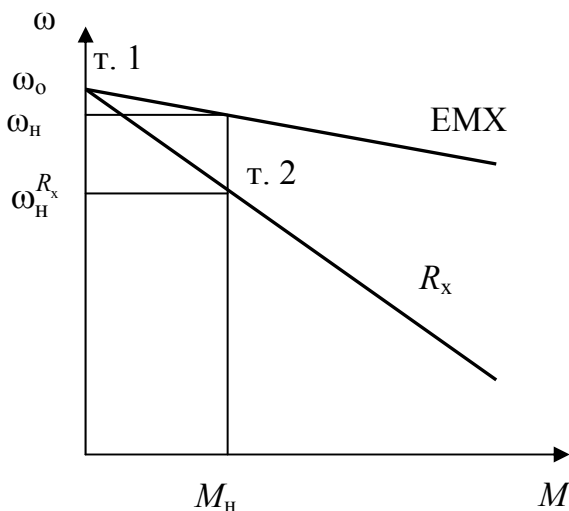


Рис. 1.4

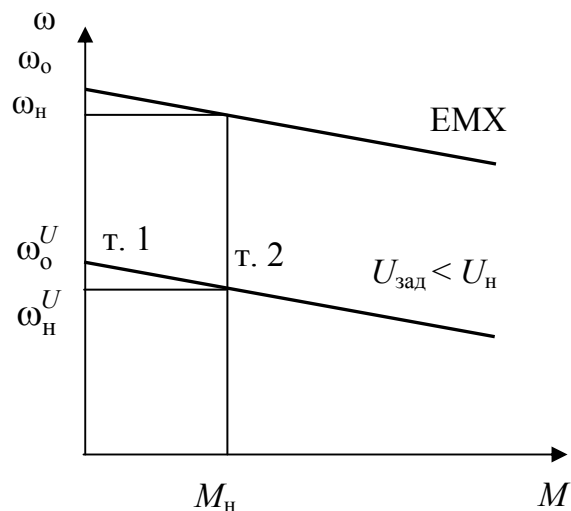


Рис. 1.5

Для построения характеристики при заданном напряжении  $U_{\text{зад}}$  на якоре необходимо иметь две точки (рис. 1.5):

**Точка 1** с координатами:

- момент двигателя  $M = 0$ ;
- скорость равна скорости идеального холостого хода при заданном напряжении  $U_{\text{зад}}$ :

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{зад}}}{k\Phi_H}. \quad (1.31)$$

**Точка 2** с координатами:

- задаемся моментом двигателя равным номинальному электромагнитному моменту:

$$M_H = k\Phi_H I_H. \quad (1.32)$$

- определяем скорость при номинальном моменте и заданном напряжении  $U_{\text{зад}}$ :

$$\omega_H^U = \frac{U_{\text{зад}}}{k\Phi_H} - \frac{R_{\text{я}}}{(k\Phi_H)^2} M_H. \quad (1.33)$$

Электромеханическую характеристику строят аналогично рассмотренному выше. Следует отметить, что, как и в случае естественных электромеханической и механической характеристик, соответст-

вующие характеристики при изменении напряжения, выраженные в относительных единицах, будут совпадать.

Рассмотренные характеристики широко применяются при регулировании скорости рабочей машины, поскольку при этом отсутствуют дополнительные потери энергии, а жесткость характеристик не изменяется.

Искусственные электромеханические и механические характеристики при изменении магнитного потока  $\Phi$  возбуждения получают, как правило, за счет ослабления магнитного потока  $\Phi$  двигателя, т.е. за счет уменьшения тока возбуждения  $I_{\text{в}}$ . Это связано с тем, что магнитная система электродвигателя при номинальном потоке практически насыщена. К тому же увеличение тока возбуждения приводит к перегреву обмотки возбуждения и, следовательно, может стать причиной аварии двигателя.

Из уравнения (1.4) электромеханической характеристики следует, что с уменьшением магнитного потока возрастает скорость идеального холостого  $\omega_{0\text{н}}$  и все электромеханические характеристики имеют общую точку  $I_{\text{кз}} = U_{\text{н}} / R_{\text{я}}$  при  $\omega = 0$  (рис. 1.6).

Искусственные механические характеристики при снижении магнитного потока  $\Phi$  обладают меньшей жесткостью (1.27) по отношению к естественной характеристике и имеют большее значение скорости идеального хода  $\omega_0$  [(1.10) и рис. 1.7]. При снижении магнитного потока в соответствии с выражением (1.3) уменьшается величина момента при номинальном токе, а, следовательно, и перегрузочная способность.

Механические характеристики (рис. 1.7) отличаются от ЭМХ тем, что при  $\omega = 0$  имеют разные значения моментов короткого замыкания  $M_{\text{кз}} = k\Phi_{\text{зад}} I_{\text{кз}}$  вследствие разной величины магнитного потока.

Для построения электромеханической характеристики при заданном магнитном потоке  $\Phi_{\text{зад}}$  необходимо иметь две точки (рис. 1.6).

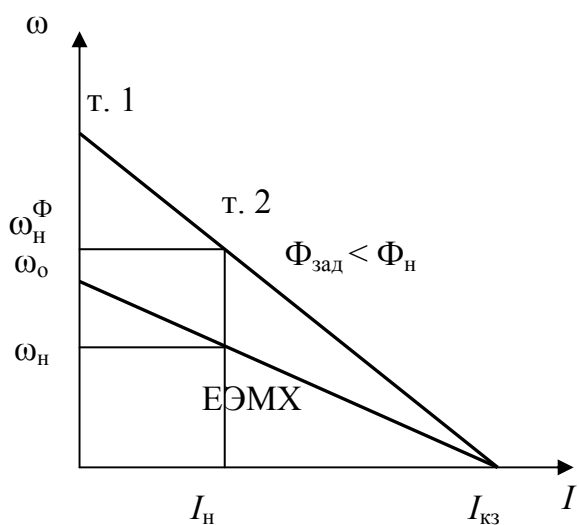


Рис. 1.6

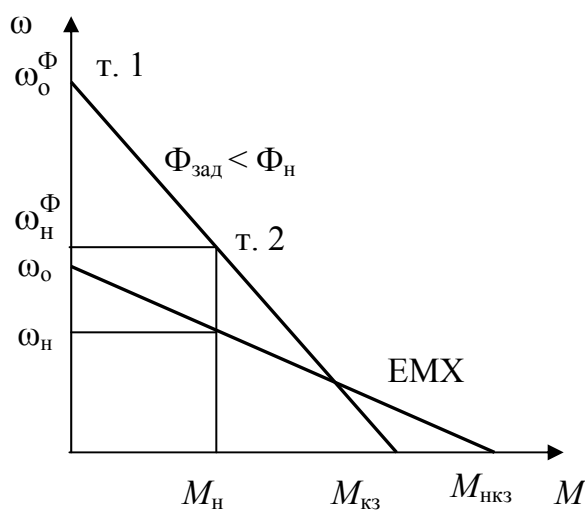


Рис. 1.7

**Точка 1** с координатами:

- момент двигателя  $I = 0$ ;
- скорость равна скорости идеального холостого хода при заданном магнитном потоке  $\Phi_{\text{зад}}$ :

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{зад}}}. \quad (1.34)$$

**Точка 2** с координатами:

- задаемся током двигателя равным номинальному:

$$I = I_{\text{н}}; \quad (1.35)$$

- определяем скорость при номинальном токе и заданном магнитном потоке  $\Phi_{\text{зад}}$ :

$$\omega_{\text{н}}^{\Phi} = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{зад}}} - \frac{R_{\text{я}}}{k\Phi_{\text{зад}}} I_{\text{н}}. \quad (1.36)$$

Для построения механической характеристики при заданном магнитном потоке  $\Phi_{\text{зад}}$  необходимо иметь две точки (рис. 1.7):

**Точка 1** с координатами:

- момент двигателя  $M = 0$ ;
- скорость равна скорости идеального холостого хода при заданном магнитном потоке  $\Phi_{\text{зад}}$ :

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{зад}}}. \quad (1.37)$$

**Точка 2** с координатами:

- задаемся моментом двигателя равным номинальному электромагнитному моменту:

$$M_{\text{н}} = k\Phi_{\text{н}} I_{\text{н}}; \quad (1.38)$$

- определяем скорость при номинальном моменте и заданном напряжении  $U_{\text{зад}}$ :

$$\omega_{\text{н}}^{\Phi} = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{зад}}} - \frac{R_{\text{я}}}{k\Phi_{\text{зад}}} M_{\text{н}}. \quad (1.39)$$

Искусственные электромеханические и механические характеристики в относительных единицах отличаются друг от друга.

Искусственные механические характеристики при изменении магнитного потока возбуждения могут применяться для кратковременного увеличения скорости рабочей машины или при малых нагрузках, например ускоренное перемещение суппорта токарного станка.

ДПТ независимого возбуждения может работать как в двигательном, так и в тормозном режиме. Основным режимом работы является двигательный, для которого характерны следующие признаки (рис. 1.1):

- совпадение по направлению электромагнитного момента  $M$  и угловой скорости  $\omega$  якоря;

- противоположные направления тока  $I$  и эдс  $E$  в обмотке якоря;
- противоположные направления напряжения  $U$  и эдс  $E$  в обмотке якоря.

Характеристики ДПТ независимого возбуждения в двигательном режиме располагаются в первом (для прямого направления вращения) и третьем (для обратного) квадрантах плоскости  $\omega, M$  (рис. 1.9).

Общими характерными признаками тормозных режимов являются (рис. 1.8):

- противоположные направления электромагнитного момента  $M$  и угловой скорости  $\omega$  якоря;
- совпадение по направлению тока  $I$  и эдс  $E$  в обмотке якоря.

### 1.1.2. Тормозные режимы работы двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Для ДПТ независимого возбуждения возможны следующие тормозные режимы: генераторное торможение с отдачей энергии в сеть, торможение противовключением и динамическое торможение.

#### Генераторное торможение

Генераторное торможение (ГТ) наступает при угловой скорости якоря, превышающей скорость идеального холостого хода, т.е.  $\omega > \omega_0$ . Электродвижущая сила  $E$  якоря становится больше напряжения сети  $U$  и ток якоря изменяет свое направление, т.е. становится отрицательным и совпадающим по направлению с эдс (рис. 1.8):

$$I = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}, \quad E > U. \quad (1.40)$$

В этом случае изменяет свое направление электромагнитный момент двигателя, который становится тормозным. Механическая энергия, поступающая на вал электродвигателя, преобразуется в электрическую, которая передается в сеть.

Принимая во внимание сделанные пояснения, уравнение баланса мощностей можно представить в виде:

$$P_{\text{м}} = P_{\text{эл}} + \Delta P, \quad (1.41)$$

где  $P_{\text{м}}$  – механическая мощность, направлена от рабочей машины (РМ) к двигателю;  $P_{\text{эл}}$  – электрическая мощность после электромеханического преобразования механической энергии, поступающей от

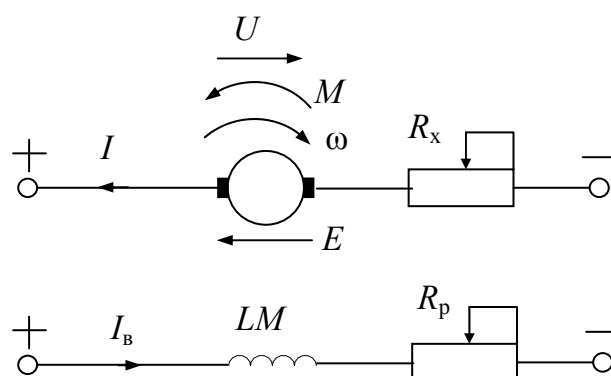


Рис. 1.8

РМ, возвращается в сеть;  $\Delta P$  – потери мощности в двигателе, вызывающие его нагрев.

Характеристики ДПТ в генераторном режиме располагаются во втором (при прямом направлении вращения) и в четвертом (при обратном) квадрантах плоскости  $\omega, M$  и являются продолжением характеристик в двигательном режиме (рис. 1.9).

Характерными признаками генераторного режима являются (рис. 1.8):

- противоположные направления электромагнитного момента  $M$  и угловой скорости  $\omega$  якоря;
- совпадение по направлению тока  $I$  и эдс  $E$  в обмотке якоря.
- противоположные направления напряжения  $U$  и эдс  $E$  в обмотке якоря, при этом  $E > U$ .

В режим рекуперативного торможения, например, переходит двигатель, к валу которого приложен момент больший по абсолютному значению и противоположный по направлению электромагнитному моменту электродвигателя.

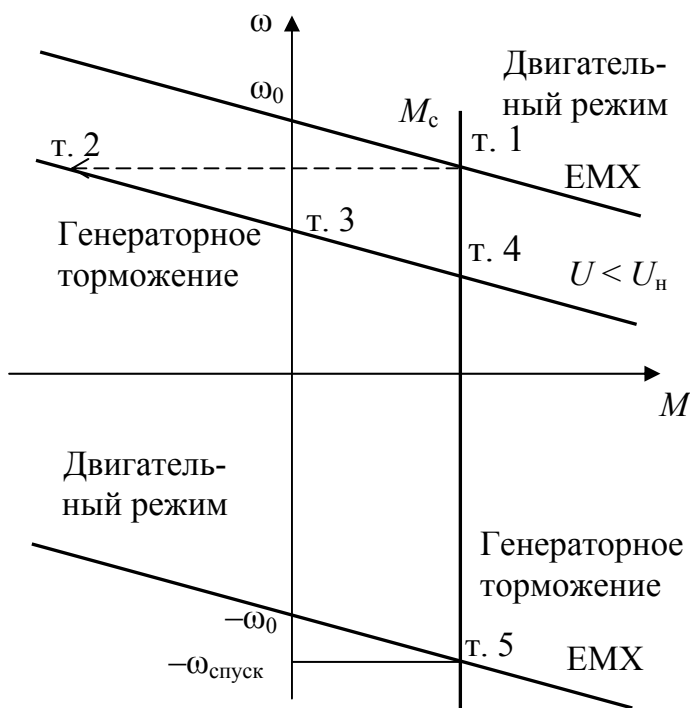


Рис. 1.9

Данный режим может быть получен, например, при  $U_n = \text{const}$  в случае активного момента на валу двигателя, обусловленного опускающимся грузом (рис. 1.9, точка 5).

Режим генераторного торможения наблюдается также при ступенчатом снижении питающего напряжения на обмотке якоря двигателя. При снижении напряжения рабочей характеристикой электродвигателя становится прямая  $U < U_n$ , переход осуществляется из точки 1 в точку 2, далее до

скорости идеального холостого хода (точка 3) электродвигатель работает в режиме генераторного торможения, затем двигатель вновь перейдет в двигательный режим (точка 4).

### Торможение противовключением

Режим торможения противовключением (ПВ) имеет две разновидности: перемена полярности напряжения, приложенного к якорю

двигателя, и тормозной спуск, которые по физическим процессам, протекающим в электродвигателе, не отличаются друг от друга.

**При изменении полярности напряжения** якорь двигателя, обладающий определенным моментом инерции, продолжает вращаться в прежнем направлении и эдс сохраняет свое направление. При этом эдс и напряжение  $U_H$  направлены в одну сторону, а ток якоря под их действием изменяет знак на противоположный (рис. 1.10):

$$I = \frac{-U_H - E}{R_{\text{я}} + R_x}, \quad (1.42)$$

что вызывает изменение направления момента, который будет тормозным (рис. 1.11, точка 2).

Так как ток якоря обусловлен суммой эдс двигателя и напряжения сети, то ток в якоре в момент переключения может достигать  $(20 \dots 40)I_H$ , что недопустимо по условиям коммутации и допустимому ускорению.

Поэтому для ограничения тока и момента в цепь якоря включают добавочное сопротивление  $R_x$ , величину которого можно определить с учетом знака эдс из выражения:

$$R_x = \frac{U_H + E}{I_{\text{доп}}} - R_{\text{я}},$$

обеспечивая соблюдение условий:

$$I_{\text{доп}} < (2 \dots 2,5)I_H$$

$$\text{и } M_{\text{доп}} < (2 \dots 2,5)M_H.$$

Наличие тормозного момента электродвигателя приводит к быстрому снижению скорости. Торможение будет продолжаться до момента останова двигателя (рис. 1.11, точка 3), после чего, если его не отключить от сети, он переходит в двигательный режим и раскручивает рабочую машину в обратном направлении (рис. 1.11, точка 4).

Принимая во внимание сделанные пояснения, уравнение баланса мощностей можно представить в виде:

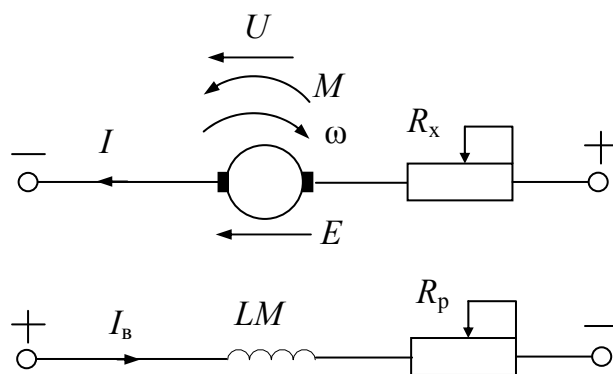


Рис. 1.10

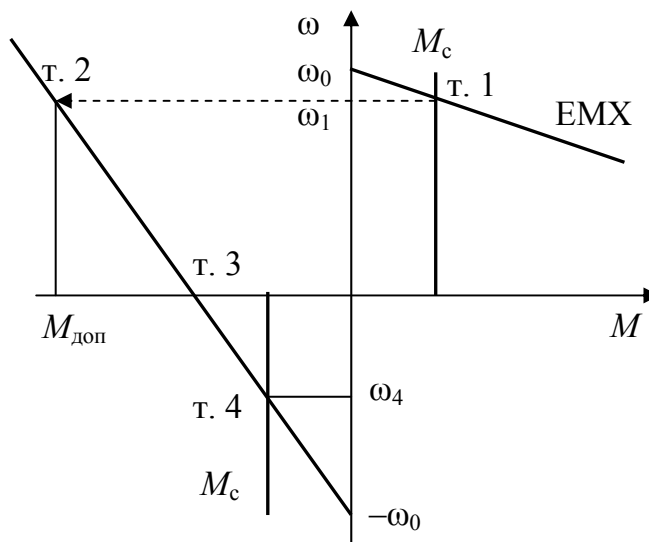


Рис. 1.11

$$\Delta P = P_{\text{эл}} + P_{\text{м}}. \quad (1.43)$$

Таким образом, вся мощность, как потребляемая активная мощность из сети  $P_{\text{эл}}$ , так и преобразуемая в электрическую механическая мощность  $P_{\text{м}}$  рабочей машины превращаются в тепловые потери, идущие на нагрев двигателя, создавая неблагоприятный с энергетической точки зрения и в тепловом отношении режим работы электродвигателя.

Характерными признаками режима торможения противовключением являются (рис. 1.10):

- противоположные направления электромагнитного момента  $M$  и угловой скорости  $\omega$  якоря;
- совпадение по направлению тока  $I$  и эдс  $E$  в обмотке якоря;
- совпадение по направлению напряжения  $U$  и эдс  $E$  в обмотке якоря.

**Режим тормозного спуска** может быть получен при работе электродвигателя с рабочей машиной, обладающей активным моментом сопротивления. К такого рода машинам относятся подъемно-крановые механизмы. При этом необходимо, чтобы момент короткого замыкания  $M_{\text{к.з}}$  двигателя был меньше активного момента  $M_{\text{с}}$  статической нагрузки, обусловленного весом груза (рис. 1.12). Уменьшения момента короткого замыкания двигателя добиваются включением дополнительного сопротивления  $R_{\text{x}}$  в цепь якоря. Ток якоря в этом случае уменьшается, момент двигателя  $M$  становится меньше активного момента сопротивления  $M_{\text{с}}$  (рис. 1.12, точка 2), двигатель начинает снижать скорость до точки  $M_{\text{к.з}}$  ( $\omega = 0$ ), а затем под воздействием момента  $M_{\text{с}}$  реверсируется ( $\omega < 0$ ) и разгоняется в направлении, противоположном действию момента двигателя (рис. 1.12, точка 3), и, следовательно, изменяется направление эдс (рис. 1.13). После точки  $M_{\text{к.з}}$  происходит режим торможения противовключением (тормозной спуск). В этом случае вал электродвигателя под действием момента нагрузки вращается в направле-

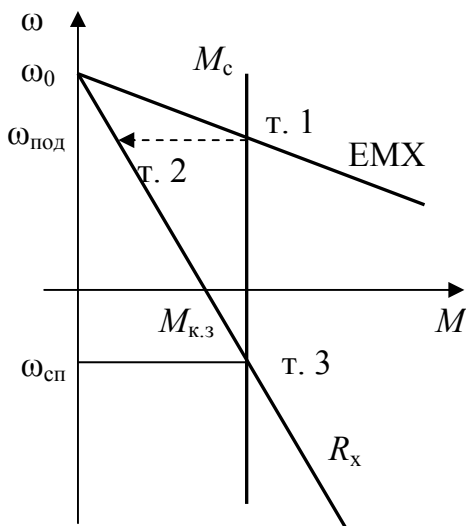


Рис. 1.12

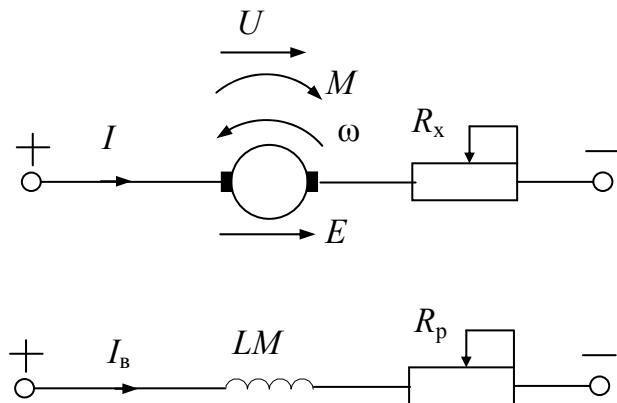


Рис. 1.13



нии, противоположном направлению двигательного режима, что соответствует режиму опускания груза (рис. 1.12, точка 3).

Рассматривая этот режим, заметим, что эдс и напряжение  $U_H$  также суммируются, но направлены в противоположную сторону по отношению к режиму торможения противовключением переменной полярности (рис. 1.10 и 1.13).

Для определения тока якоря в режиме тормозного спуска справедливо выражение:

$$I = \frac{U_H + E}{R_{\text{я}} + R_x}. \quad (1.44)$$

Величину дополнительного сопротивления в цепи якоря в режиме тормозного спуска можно определить из выражения (1.44).

Баланс мощностей (1.43) и характерные признаки такие же, что и при торможении противовключением переменной полярности напряжения, приложенного к якорю.

Характеристики ДПТ в режиме торможения противовключением располагаются во втором (при перемене полярности, см. рис. 1.11) и четвертом (при тормозном спуске, см. рис. 1.12) квадрантах плоскости  $\omega$ ,  $M$  и являются продолжением характеристик в двигательном режиме.

### Динамическое торможение

Динамическое торможение (ДТ) происходит при отключении обмотки якоря от сети и замыкании ее на дополнительное сопротивление  $R_x$ . Обмотка возбуждения при этом остается подключенной к сети (рис. 1.14). Якорь двигателя продолжает вращаться за счет запасенной кинетической энергии в том же направлении, что и в двигательном режиме. Поэтому эдс не изменяет своего направления. Но так как  $U = 0$ , ток якоря изменяет свое направление, т.е. становится отрицательным (рис. 1.14). При этом момент также будет отрицательным, т.е. тормозным (рис. 1.15, точка 2), двигатель переходит в режим динамического торможения (рис. 1.15, участок 2–3 характеристики).

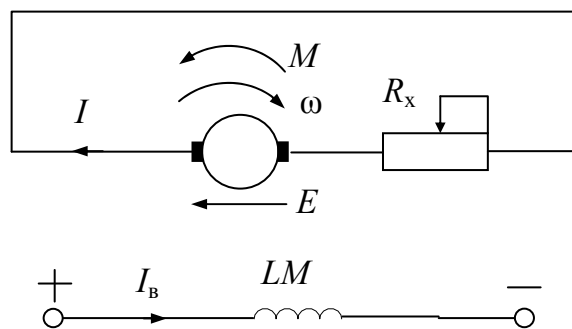


Рис. 1.14

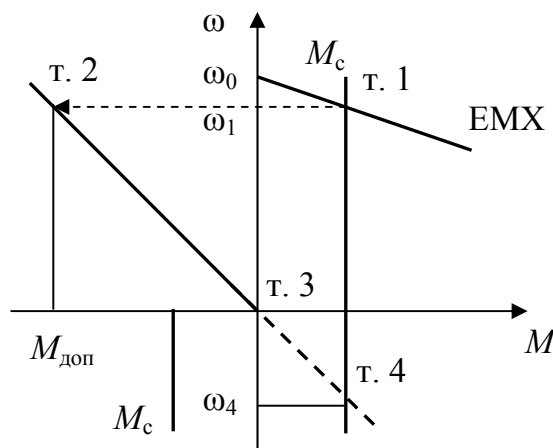


Рис. 1.15

Скорость двигателя снижается до  $\omega = 0$  (рис. 1.15, точка 3). В случае активного момента сопротивления  $M_c$  рабочей машины в этой точке необходимо применить механический или электромагнитный тормоз, т.к. двигатель под воздействием момента  $M_c$  может реверсироваться и разогнаться в противоположном направлении до скорости  $\omega_4$  (рис. 1.15, точка 4).

Для определения тока якоря в режиме динамического торможения справедливо выражение:

$$I = \frac{-E}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}. \quad (1.45)$$

Характеристики ДПТ в режиме динамического торможения выходят из начала координат (так как  $U = 0$ ) и располагаются во втором (при прямом направлении вращения) и в четвертом (при обратном) квадрантах плоскости  $\omega, M$ .

Для ограничения тока якоря при динамическом торможении до допустимых значений  $I_{\text{доп}} < (2 \dots 2,5)I_{\text{н}}$  и  $M_{\text{доп}} < (2 \dots 2,5)M_{\text{н}}$ . дополнительное сопротивление в его цепи должно быть не ниже:

$$R_{\text{х}} = \frac{E}{I_{\text{доп}}} - R_{\text{я}}, \quad (1.46)$$

где  $E$  – эдс, соответствующая скорости  $\omega_1$ , с которой начинается торможение (рис. 1.15, точка 2).

Баланс мощностей для режима динамического торможения (так как  $U = 0$ ) можно представить в виде:

$$\Delta P = P_{\text{м}}. \quad (1.47)$$

иными словами, механическая мощность, поступающая от механизма на вал двигателя, преобразуется в электрическую  $\Delta P$ , которая тратится на нагрев двигателя.

Характерными признаками режима торможения противовключением являются (рис. 1.14):

- противоположные направления электромагнитного момента  $M$  и угловой скорости  $\omega$  якоря;
- совпадение по направлению тока  $I$  и эдс  $E$  в обмотке якоря.
- равенство нулю напряжения ( $U = 0$ ), приложенного к обмотке якоря.

Характеристики ДПТ в режиме динамического торможения располагаются во втором и четвертом (рис. 1.15) квадрантах плоскости  $\omega, M$ .

### 1.1.3. Пуск двигателя постоянного тока независимого возбуждения

При рассмотрении процесса пуска двигателя примем следующие допущения:

- щетки двигателя установлены на геометрической нейтрали, поэтому реакция якоря отсутствует и, следовательно, поток возбуждения постоянен и равен номинальному ( $\Phi = \Phi_{\text{н}}$ );

- индуктивность цепи обмотки якоря мала и ею можно пренебречь;
- тепловые переходные процессы в электроприводе закончились, и сопротивления якорной цепи не изменяются;
- двигатель питается от источника напряжения бесконечно большой мощности и, следовательно, напряжение обмотки якоря постоянно;
- момент сопротивления на валу двигателя принимаем постоянным.

При пуске двигателя необходимо обеспечить два условия:

1. Пусковой момент двигателя должен быть больше момента статической нагрузки. При их равенстве разгон прекратится.
2. Максимальные значения тока и момента при пуске не должны превышать допустимых пределов.

Режим пуска начинается с режима короткого замыкания, при котором обмотка якоря включена в сеть, а якорь неподвижен, т.е.  $E = 0$ . В этом случае ток цепи якоря определяется в соответствии с законом Ома:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}. \quad (1.48)$$

Поскольку на естественной характеристике сопротивление якоря очень мало, а напряжение равно номинальному, то  $I_{\text{пуск}} = (10 \dots 15)I_{\text{н}}$ . Отсюда следует, что при пуске двигателя необходимо либо снижать напряжение на обмотке якоря, либо включать дополнительное сопротивление в цепь якоря. Изменением напряжения пользуются только в случае регулируемого электропривода по системе «Управляемый преобразователь–двигатель» (УП–Д), обеспечивая такой темп нарастания напряжения при пуске, при котором ток и момент не превышают допустимых значений.

При питании от сети для ограничения пускового тока используют, как правило, пусковой реостат, сопротивление которого должно быть таким, чтобы  $I_{\text{пуск}} \leq I_{\text{доп}}$ .

По условиям коммутации, т.е. по условиям работы щеточного контакта, допустимый ток составляет  $I_{\text{доп}} = (2 \dots 2,5)I_{\text{н}}$ . Однако по условиям питающей сети или допустимых ускорений механизма допустимые ток и момент могут быть ограничены в большей степени.

Схема силовой цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения при пуске в две ступени пусковых сопротивлений приведена на рис. 1.16.

В рассматриваемой схеме обмотка возбуждения  $LM$  двигателя включена независимо от его обмотки якоря. В процессе пуска двигателя вначале получает питание обмотка возбуждения  $LM$ ,

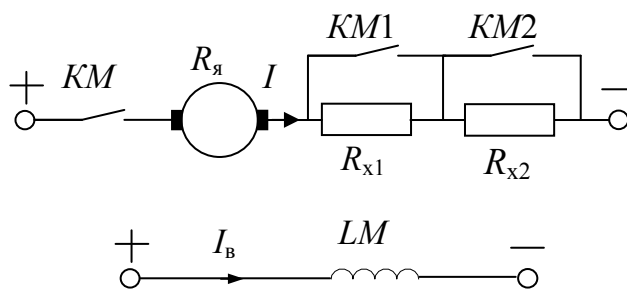


Рис. 1.16

затем, когда переходный процесс нарастания тока в обмотке возбуждения закончится и поток двигателя  $\Phi$  станет равным номинальному, замыкается контактор  $KM$ .

Обмотка якоря двигателя подключается к источнику постоянного напряжения  $U$  через пусковые сопротивления  $R_{x1}$  и  $R_{x2}$ . Каждой ступени сопротивления соответствует своя характеристика. По мере разгона двигателя пусковые сопротивления  $R_{x1}$  и  $R_{x2}$  последовательно выводятся из цепи обмотки якоря путем закорачивания их замыкающими контактами  $KM1$  и  $KM2$ .

Механические характеристики электродвигателя при пуске в две ступени пусковых сопротивлений приведены на рис. 1.17.

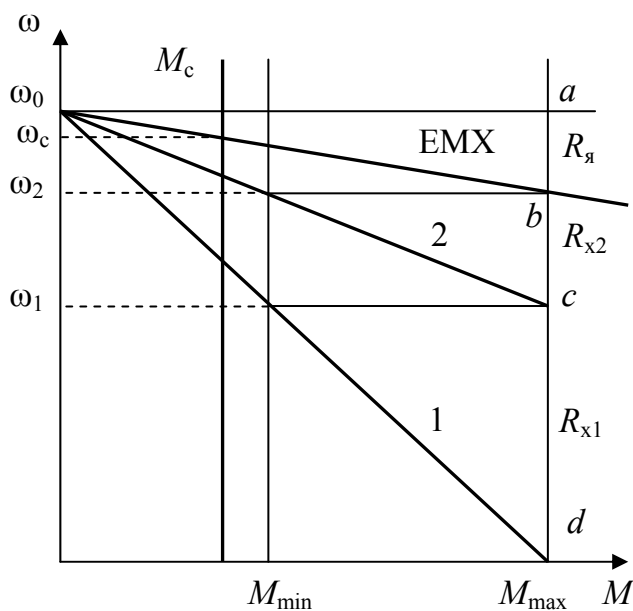


Рис. 1.17

двигатель переходит на характеристику 2 с добавочным сопротивлением  $R_{x2}$ . Момент снова скачком увеличивается до максимального  $M_{max}$ , двигатель разгоняется до скорости  $\omega_2$ , момент снизится до значения  $M_{min}$  и контактом  $KM2$  шунтируется резистор  $R_{x2}$ . Если расчет сопротивлений ступеней пускового реостата сделан правильно, то на всех характеристиках максимальный  $M_{max}$  и минимальный  $M_{min}$  моменты получатся одинаковыми. Процесс пуска заканчивается установившимся режимом в точке  $\omega_c$ , где момент двигателя уравнивается моментом сопротивления механизма  $M_c$ .

Порядок построения пусковой диаграммы:

- строится естественная механическая характеристика  $EMX$ ;
- задаются максимальным и минимальным (переключающим) моментами:

$$M_{max} = (2...2,5)M_H; \quad M_{min} = (1,1...1,3)M_c; \quad (1.49)$$

Процесс пуска происходит следующим образом.

В начальный момент пуска на якорь двигателя при замыкании контакта  $KM$  подается напряжение, при этом величина добавочного сопротивления максимальна  $R_{x1} + R_{x2}$ , происходит бросок момента до момента равного  $M_{max}$  (рис. 1.17). Двигатель начинает разгон по характеристике 1. По мере разгона двигателя до скорости  $\omega_1$  и снижения момента до значения  $M_{min}$  контактом  $KM1$  шунтируется резистор  $R_{x1}$ , и двига-

- строится первая пусковая механическая характеристика 1. Характеристика 1 проходит через две точки: скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  и максимального момента при скорости, равной нулю;

- в точке с координатами  $(M_{\min}, \omega_1)$  происходит закорачивание первого пускового сопротивления  $R_{x1}$  и двигатель переходит на пусковую характеристику 2. Характеристика 2 проходит через две точки: скорость идеального холостого хода и максимального момента  $M_{\max}$  при скорости, равной  $\omega_2$ ;

- в точке с координатами  $(M_{\min}, \omega_2)$  происходит закорачивание второго пускового сопротивления  $R_{x2}$  и двигатель переходит на ЕМХ.

Бросок момента при переходе двигателя на естественную характеристику должен быть равен допустимому моменту  $M_{\max}$ , т.е. двигатель должен перейти в точку  $b$ . Если это не происходит, то необходимо изменить либо момент переключения  $M_{\min}$ , либо допустимый  $M_{\max}$  в пределах указанных ранее значений (1.49).

В окончательном варианте правильно построенная пусковая диаграмма должна выглядеть так, как показано на рис. 1.17.

По пусковой диаграмме отрезки  $ab$ ,  $bc$  и  $cd$  пропорциональны сопротивлениям якорной цепи. Масштаб сопротивлений определяют по отрезку  $ab$ , который пропорционален сопротивлению якоря:

$$m_R = \frac{R_{\text{я}}}{\overline{ab}}, \quad (1.50)$$

где  $R_{\text{я}}$  – номинальное сопротивление якоря,  $\overline{ab}$  – отрезок на пусковой диаграмме, соответствующий номинальному сопротивлению якоря, мм.

Тогда сопротивления ступеней пускового реостата равны:

$$R_{x1} = m_R \overline{cd}, \quad R_{x2} = m_R \overline{bc}; \quad (1.51)$$

всего реостата:

$$R_{\text{реост}} = m_R \overline{bd} = R_{x1} + R_{x2}. \quad (1.52)$$

### Контрольные вопросы и задания

1. Начертите схему включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

2. Дайте определение электромеханической характеристики электродвигателя.

3. Дайте определение механической характеристики электродвигателя.

4. Напишите основные соотношения между параметрами ДПТ независимого возбуждения, которые необходимы для вывода уравнений электромеханической и механической характеристик.

5. Дайте определение естественной механической характеристики электродвигателей. Назовите основные точки, по которым производится ее построение.

6. Какие причины и как влияют на модуль жесткости механических характеристик ДПТ независимого возбуждения?

7. Назовите основные режимы работы ДПТ независимого возбуждения.

8. Начертите механические характеристики ДПТ независимого возбуждения при уменьшении магнитного потока.

9. Начертите механические характеристики ДПТ независимого возбуждения при уменьшении величины приложенного к якору напряжения.

10. Начертите механические характеристики ДПТ независимого возбуждения при включении дополнительного сопротивления в цепь якоря.

11. Назовите основные точки, по которым производится построение искусственных характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

12. В каких квадрантах координатной плоскости  $\omega, M$  изображаются механические характеристики ДПТ независимого возбуждения, соответствующие генераторному режиму работы? Изобразите их.

13. В каких квадрантах координатной плоскости  $\omega, M$  изображаются механические характеристики ДПТ независимого возбуждения, соответствующие режимам торможения противовключением? Изобразите их.

14. В каких квадрантах координатной плоскости  $\omega, M$  изображаются механические характеристики ДПТ независимого возбуждения, соответствующие режиму динамического торможения? Изобразите их.

15. Как рассчитать пусковые сопротивления при реостатном пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения?

## 1.2. Электромеханические свойства двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

### 1.2.1. Электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

У двигателей постоянного тока последовательного возбуждения обмотки возбуждения и якоря включаются *последовательно*. На

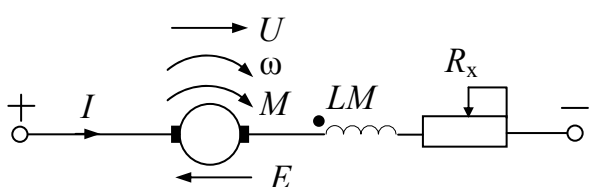


Рис. 1.18

рис. 1.18 представлена схема включения ДПТ последовательного возбуждения.

Поскольку физические процессы, протекающие в ДПТ последовательного возбуждения, аналогичны ДПТНВ, то для него справедливы те же соотношения, что и для ДПТ независимого возбуждения:

$$U = E + I(R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{х}}); \quad (1.53)$$

$$E = k\Phi(I)\omega; \quad (1.54)$$

$$M = k\Phi(I)I, \quad (1.55)$$

где  $R_B$  – сопротивление обмотки возбуждения;  $\Phi(I)$  – поток возбуждения, являющийся функцией тока якоря двигателя.

Используя приведенные выше выражения, получим уравнения электромеханической и механической характеристик:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{R_{\text{я}} + R_B + R_x}{k\Phi(I)} I; \quad (1.56)$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{R_{\text{я}} + R_B + R_x}{[k\Phi(I)]^2} M. \quad (1.57)$$

Внешне уравнения характеристик рассматриваемого двигателя аналогичны соответствующим уравнениям ДПТ независимого возбуждения. Однако необходимо учитывать, что магнитный поток двигателя последовательного возбуждения зависит от величины тока якоря и является переменной величиной и сопротивление якорной цепи является суммой сопротивлений обмотки якоря и обмотки возбуждения. Зависимость потока возбуждения  $\Phi$  от тока якоря  $I$  нелинейная и не имеет аналитического выражения. Вследствие этого аналитические зависимости для механической и электромеханической характеристик отсутствуют.

Использование уравнений (1.56) и (1.57) для построения механической и электромеханической характеристик возможно, но приводит к громоздким многоступенчатым расчетам.

Однако с целью получения представления о характере электромеханической и механической характеристик воспользуемся кусочно-линейной аппроксимацией кривой  $\Phi(I)$  (рис. 1.19). Ее начальный участок ( $I \leq 0,3I_H$ ) можно аппроксимировать прямой:

$$\Phi = \alpha I, \quad (1.58)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности.

Тогда

$$M = k\Phi(I)I = \frac{k}{\alpha} \Phi^2; \quad (1.59)$$

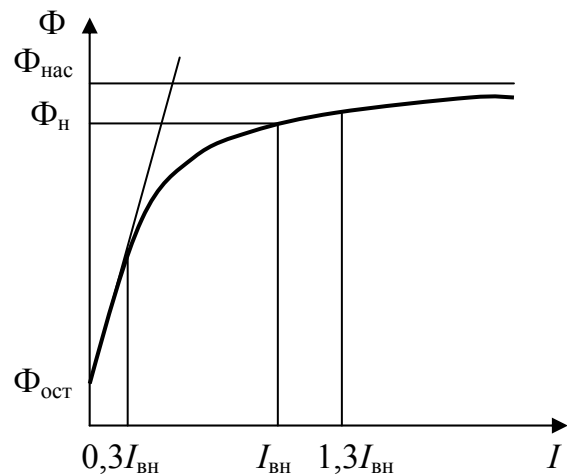


Рис. 1.19

$$\Phi = \sqrt{\frac{\alpha}{k}} M. \quad (1.60)$$

Подставляя (1.58) в (1.56) и (1.60) в (1.57), получим:

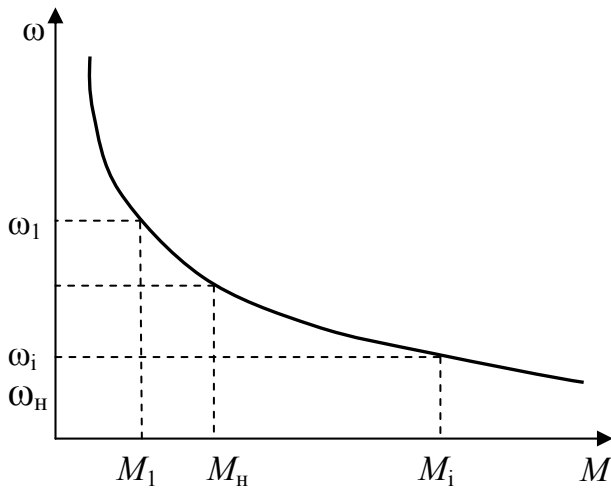
$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{x}}}{k\alpha} = \frac{A}{I} - B; \quad (1.61)$$

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{x}}}{k\alpha} = \frac{C}{\sqrt{M}} - B, \quad (1.62)$$

где  $A, B, C$  – константы.

Следовательно, при малых нагрузках электромеханическая и механическая характеристики имеют вид гиперболы.

При  $I \geq 1,3I_{\text{н}}$  магнитный поток можно считать практически постоянным вследствие насыщения магнитной системы двигателя. В этом случае электромеханическая и механическая характеристики близки к линейной.



**Рис. 1.20**

На рис. 1.20 представлена естественная механическая характеристика (EMX) ДПТ последовательного возбуждения.

Особенностью этой характеристики является отсутствие скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . В действительности скорость двигателя при идеальном холостом ходе будет все-таки конечной, так как при  $I$  якоря равном 0 существует остаточный магнитный поток  $\Phi_{\text{ост}}$  (рис. 1.19).

Обычно  $\Phi_{\text{ост}} = (0,02 \dots 0,1)\Phi_{\text{н}}$  и тогда

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_{\text{ост}}} = (10 \dots 50)\omega_{\text{н}}. \quad (1.63)$$

Такое превышение скорости недопустимо по условиям механической прочности. Допустимое значение скорости для данных электродвигателей составляет  $4\omega_{\text{н}}$ .

При малых нагрузках скорость электродвигателя сильно возрастает, что может быть причиной выхода его из строя. Поэтому ДПТ последовательного возбуждения можно использовать только тогда, когда нагрузка на его валу составляет не менее 25...30 % от номинальной. Данные электродвигатели нельзя использовать совместно с ременными и цепными передачами.



В области больших нагрузок механические характеристики этого двигателя имеют высокую жесткость, а с уменьшением нагрузки и ростом скорости величина коэффициента жесткости снижается. Это его свойство широко используется в электроприводах электрифицированного транспорта, где необходимо обеспечить надежное трогание с места и быстрый разгон, что осуществляется на участке характеристики с большим коэффициентом жесткости.

После разгона до установившейся скорости момент двигателя расходуется только на преодоление сил трения и составляет значительно меньшую величину, чем требуется для эффективного ускорения. Кроме того, с увеличением скорости движения механическая характеристика двигателя становится более мягкой, что позволяет избежать сильных бросков момента двигателя при внезапном изменении скорости движения (например, при проезде неровного участка дороги) и обеспечить плавное движение.

Для построения естественных механических и электромеханических характеристик используются универсальные характеристики, которые могут быть представлены в табличной (табл. 1.1) либо графической форме (рис. 1.21).

Таблица 1.1

Данные универсальных характеристик

$i$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$\mu$	0,1	0,3	0,5	0,74	1,0	1,3	1,55	1,85	2,1
$v$	2,2	1,5	1,2	1,08	1,0	0,92	0,88	0,85	0,82

Для каждой серии двигателей эти характеристики даются в относительных единицах. За базисные величины момента, скорости и тока приняты их номинальные значения.

Для построения естественных характеристик необходимо задаваться рядом значений тока  $i_i$  и по универсальным характеристикам находить соответствующие значения момента  $\mu_i$  и скорости  $v_i$  (табл. 1.1 или рис. 1.21). Зная из паспортных данных номинальные значения момента  $M_n$ , скорости  $\omega_n$  и тока

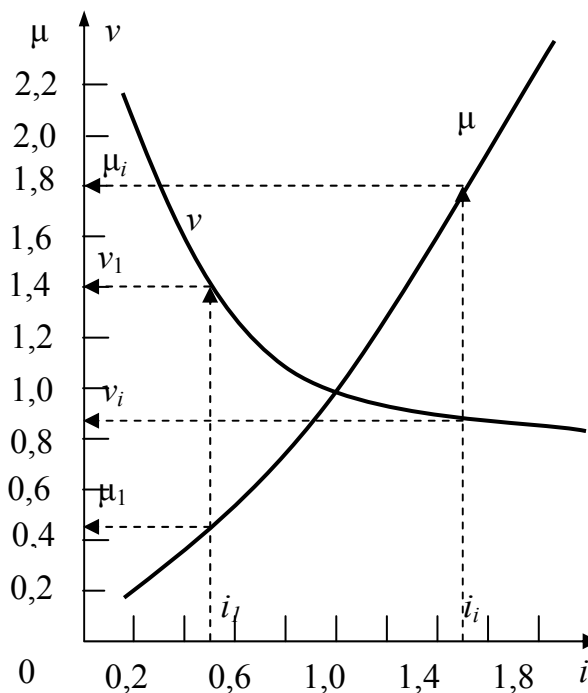


Рис. 1.21

$I_H$ , перейти к характеристикам в абсолютных единицах, используя выражения:

$$M_i = \mu_i M_H; \omega_i = v_i \omega_H; I_i = i_i I_H. \quad (1.64)$$

**Искусственные характеристики двигателя** постоянного тока с последовательным возбуждением можно получить:

- ведением в цепь якоря добавочного сопротивления  $R_x$  (реостатные характеристики);
- изменением подводимого напряжения сети  $U$ ;
- изменением магнитного потока  $\Phi$ .

Включение дополнительного сопротивления  $R_x$  в цепь якоря обычно используется для ограничения тока двигателя в процессе пуска или в режиме торможения. Оно может использоваться и для регулирования скорости электродвигателя, но при этом имеют место значительные потери энергии в дополнительном сопротивлении. Данные характеристики называют реостатными.

Для построения реостатных характеристик используют выражение:

$$\omega_{pi} = \omega_{ei} \frac{U_H - I_i (R_{я} + R_B + R_x)}{U_H - I_i (R_{я} + R_B)}, \quad (1.65)$$

где  $\omega_{pi}$  и  $\omega_{ei}$  – угловая скорость двигателя на реостатной и естественной характеристиках при одинаковом значении тока (момента).

Задаваясь произвольным значением тока  $I_i$ , по имеющейся естественной электромеханической характеристике находят  $\omega_{ei}$ . Затем по (1.65) при заданном  $R_x$  определяют значение скорости  $\omega_{pi}$ . По универсальной характеристике  $\mu(i)$  (рис. 1.21) определяют момент, соответствующий заданному значению тока  $I_i$ . По полученным данным ( $M, I, \omega_p$ ) строят реостатные, электромеханическую и механическую характеристики (рис. 1.22).

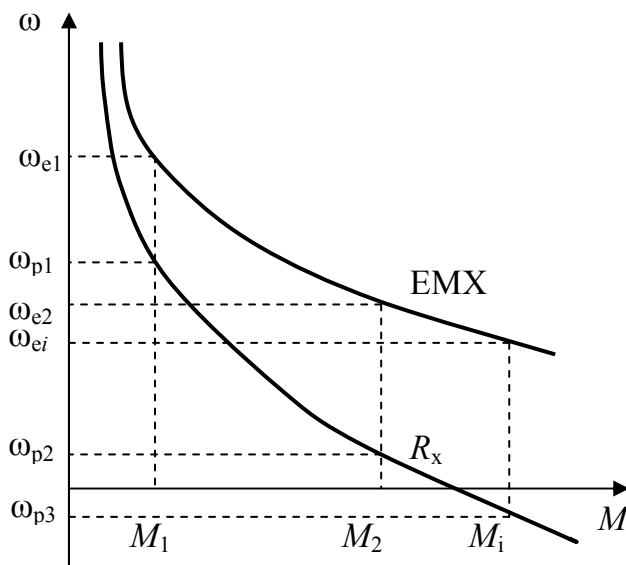


Рис. 1.22

Уменьшение напряжения ( $U < U_H$ ) приводит к снижению скорости при данной нагрузке практически без изменения соответствующего этой нагрузке коэффициента жесткости механической характеристики. Построение данной характеристики производится аналогично построению реостатных характеристик по выражению (1.66), задаваясь соответствующим значением напряжения  $U_{зад}$  (рис. 1.23):

$$\omega_{ui} = \omega_{ei} \frac{U_{\text{зад}} - I_i (R_{\text{я}} + R_{\text{в}})}{U_{\text{н}} - I_i (R_{\text{я}} + R_{\text{в}})} \quad (1.66)$$

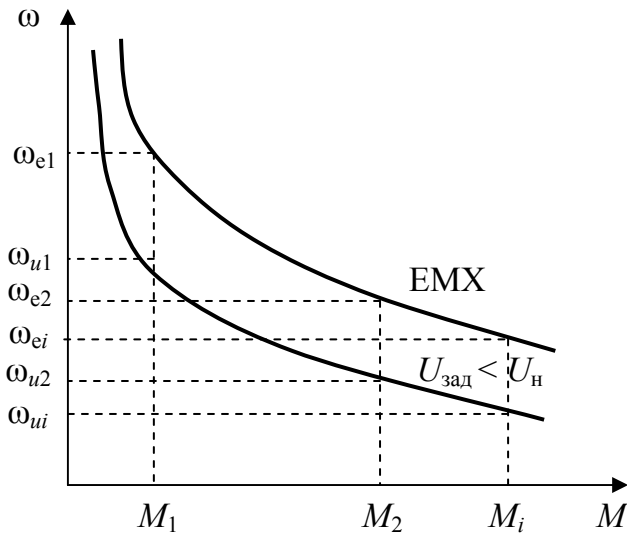


Рис. 1.23

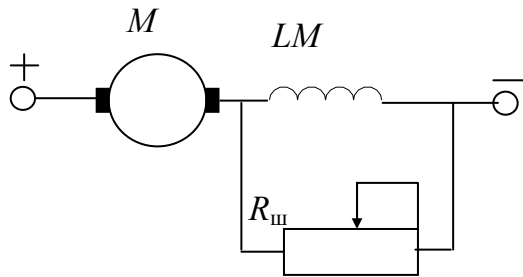


Рис. 1.24

Регулирование магнитного потока двигателя постоянного тока последовательного возбуждения возможно путем шунтирования обмотки возбуждения резистором  $R_{\text{ш}}$  (рис. 1.24).

При ослаблении магнитного потока ( $\Phi < \Phi_{\text{н}}$ ) скорость двигателя растет, однако жесткость механической характеристики снижается. Механические характеристики при различных сопротивлениях  $R_{\text{ш1}}$  и  $R_{\text{ш2}}$  показаны на рис. 1.25.

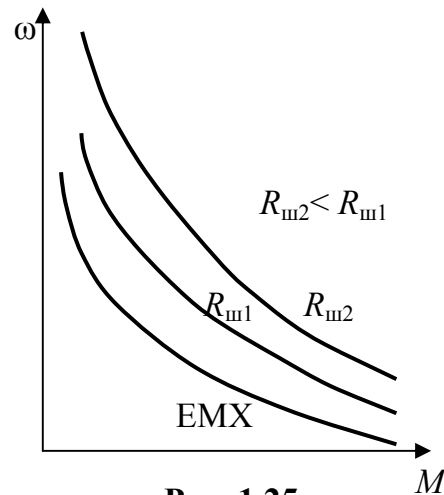


Рис. 1.25

### 1.2.2. Тормозные режимы работы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Для двигателя последовательного возбуждения возможны только два вида электрического торможения:

- торможение противовключением;
- динамическое торможение.

Для рассматриваемого двигателя неосуществим режим генераторного торможения, поскольку он связан с необходимостью увеличения скорости больше скорости идеального холостого хода, которой данный двигатель не имеет.

## Торможение противовключением

**Торможение противовключением**, как и для ДПТ с независимым возбуждением, осуществляется в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а якорь двигателя под воздействием сил инерции или активного момента сопротивления вращается в противоположную сторону – против включения.

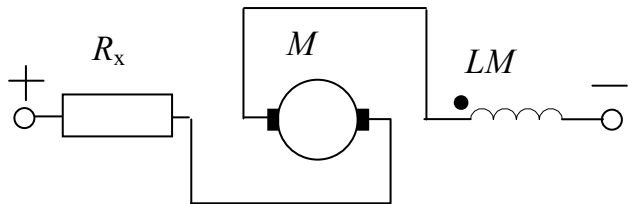


Рис. 1.26

Режим торможения противовключением осуществляется при реактивном статическом моменте  $M_c$  торможение противовключением выполняют путем изменения полярности напряжения на зажимах якоря двигателя (рис. 1.26), оставляя неизменным направление тока в обмотке возбуждения (во избежание перемagnичивания машины). Для ограничения тока в цепи якоря в режиме торможения вводится добавочное сопротивление  $R_x$  поскольку в этом случае эдс и напряжение сети направлены

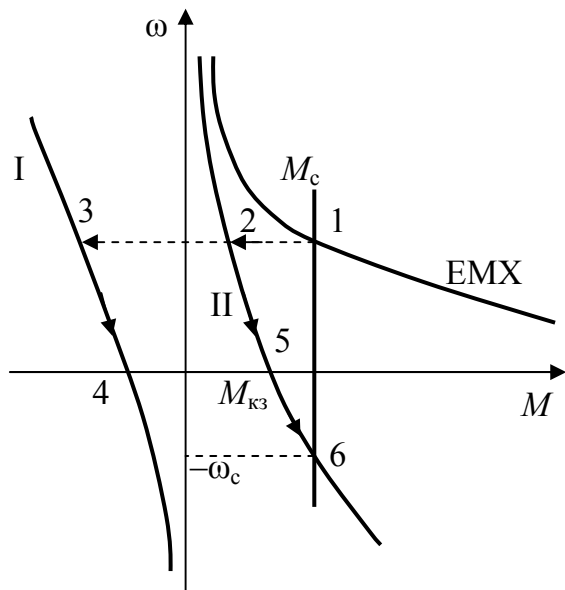


Рис. 1.27

Торможение противовключением в этом случае осуществляется по кривой I (рис. 1.27, характеристика I, участок 3–4).

Тормозной спуск с активным  $M_c$  путем введения большого добавочного сопротивления  $R_x$  (рис. 1.18). В результате уменьшается ток в цепи якоря, а, следовательно, момент двигателя (рис. 1.27, т. 2), который начинает тормозиться до  $\omega = 0$  (рис. 1.27, участок 2–5, точка 5), а затем якорь изменяет направление вращения, т.к.  $M_c > M_{к.з}$  (рис. 1.27, характеристика II, участок 5...6). При равенстве моментов  $M = M_c$  наступает установившийся режим

вращения якоря (рис. 1.27, точка 6) с частотой вращения  $-\omega_c$ .

## Динамическое торможение

Режим динамического торможения двигателя может быть осуществлен двумя способами: с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

**При динамическом торможении с независимым возбуждением** электродвигатель отключают от сети постоянного тока (рис. 1.28). За-

тем его якорь закорачивают на дополнительное сопротивление  $R_x$ . При этом обмотка возбуждения подключается к сети через дополнительное сопротивление  $R_B$ , которое ограничивает ток возбуждения до номинального значения. В этом случае торможение происходит аналогично торможению ДПТ независимого возбуждения, а механическая характеристика имеет вид прямой линии (рис. 1.29).

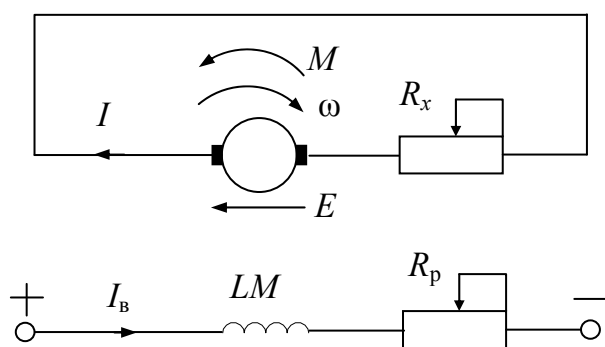


Рис. 1.28

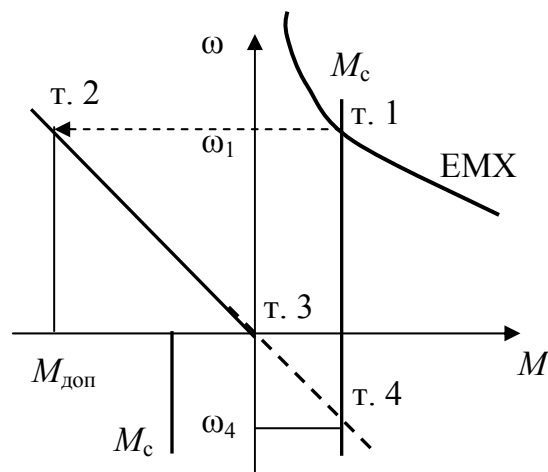


Рис. 1.29

Для ограничения тока необходимо включать в цепь якоря дополнительное сопротивление  $R_x$ , которое определяется по выражению:

$$R_x = \frac{E}{I_{\text{доп}}} - R_{\text{я}} - R_B. \quad (1.67)$$

**Динамическое торможение с самовозбуждением** происходит при отключении электродвигателя от сети постоянного тока (контакты  $K2$  размыкаются) и замыкании его на дополнительное сопротивление  $R_x$  (контакты  $K1$  замыкаются) при изменении полярности включения обмотки возбуждения, чтобы направление тока  $I_B$  в ней было таким же, как и в двигательном режиме (рис. 1.30). Сохранение направления тока исключает уничтожение малого остаточного потока двигателя.

При этом якорь продолжает вращаться в том же направлении под действием сил инерции и в его обмотке наводится эдс, обусловленная остаточным потоком возбуждения, и направление которой такое же, как и в двигательном режиме. Под действием этой эдс в замкнутом контуре цепи якоря протекает ток, создающий магнитный поток, совпадающий по направлению с остаточным потоком (первое обязательное условие), что приводит к увеличению потока, эдс и тока якоря  $I$ .

Поскольку ток якоря  $I$  по отношению к двигательному режиму имеет противоположное направление, момент двигателя становится тормозным.

Второе условие самовозбуждения поясняет рис. 1.31. Здесь приведен ряд вольт-амперных характеристик  $E = f_1(I)$  источника эдс, соот-

ветствующих различной скорости двигателя, и суммарного активного сопротивления цепи якоря  $I = f_2(E) = E / R_{я\Sigma}$ . Данное условие самовозбуждения графически выражается наличием точки пересечения этих характеристик (рис. 1.31, точки 1, 2).

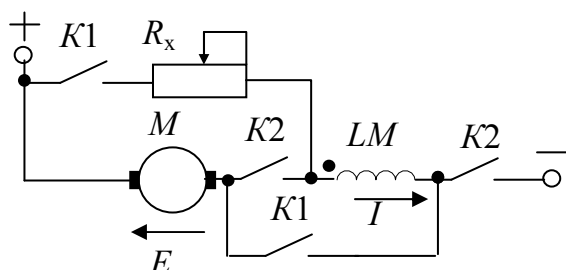


Рис. 1.30

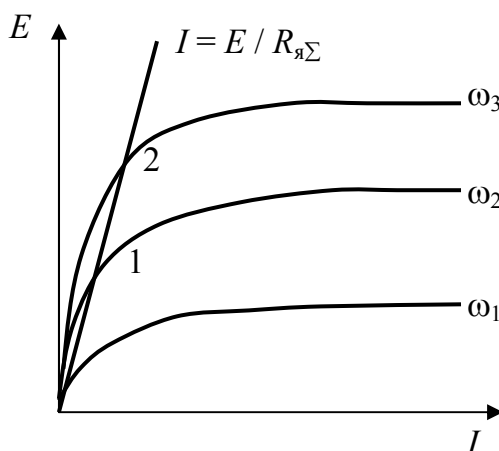


Рис. 1.31

Таким образом, минимальная скорость, при которой наступает самовозбуждение, соответствует  $\omega = \omega_2$ . (рис. 1.30 и 1.31).

Механические характеристики в режиме динамического торможения с самовозбуждением при разных значениях дополнительного сопротивления  $R_x$  представлены на рис. 1.32. Двигатель из точки 1 в первом квадранте переходит в точку 2 или 3 на характеристике динамического торможения во втором квадранте.

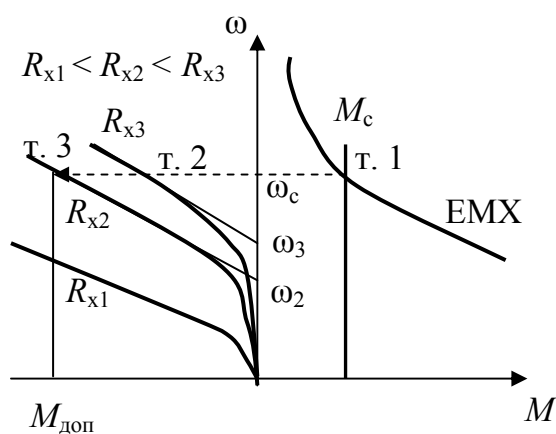


Рис. 1.32

Вначале процесс самовозбуждения проходит очень интенсивно и это приводит к броску тормозного момента. При токе возбуждения (якоря), соответствующем линейному участку кривой намагничивания (рис. 1.19, токи до  $0,3I_H$ ), процесс торможения становится малоэффективным, так как резко снижается момент (рис. 1.32).

### 1.2.3. Пуск двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Пуск ДПТПВ осуществляется аналогично пуску ДПТНВ.

Необходимо либо снижать напряжение на обмотке якоря, либо включать дополнительное сопротивление в цепь якоря. Изменением напряжения пользуются только в случае регулируемого электропривода по системе «Управляемый преобразователь–двигатель» (УП–Д,

обеспечивая такой темп нарастания напряжения при пуске, при котором ток и момент не превышают допустимых значений.

При питании от сети для ограничения пускового тока используют, как правило, пусковой реостат, сопротивление которого должно быть таким, чтобы  $I_{\text{пуск}} \leq I_{\text{доп}}$ .

По условиям коммутации, т.е. по условиям работы щеточного контакта, допустимый ток составляет  $I_{\text{доп}} = (2 \dots 2,5) I_{\text{н}}$ .

Однако, с учетом того, что у двигателя последовательного возбуждения при  $I_{\text{доп}} = (2 \dots 2,5) I_{\text{н}}$  магнитный поток равен практически потоку насыщения  $\Phi_{\text{нас}} = (1,1 \dots 1,3) \Phi_{\text{н}}$  (рис. 1.19), допустимый момент при пуске будет гораздо больше, чем у ДПТНВ и составлять  $M = k\Phi(I) I = (1,1 \dots 1,3) \Phi_{\text{н}} (2 \dots 2,5) I_{\text{н}} \approx (2,2 \dots 3,25) M_{\text{н}}$ .

Таким образом, ДПТПВ при одном и том же допустимом токе обладает более высокой перегрузочной способностью по моменту, чем ДПТНВ. Именно благодаря этому свойству двигателя с последовательным возбуждением используются в электрическом транспорте в качестве тягового электропривода.

### Контрольные вопросы

1. Начертите схему подключения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
2. Особенности естественной механической и электромеханической характеристик ДПТПВ.
3. Построение естественной механической характеристики ДПТПВ по паспортным данным.
4. Способы получения искусственных механических характеристик.
5. Механические характеристики ДПТПВ при изменении напряжения на якоре.
6. Механические характеристики ДПТПВ при включении дополнительного сопротивления в цепь якоря.
7. Механические характеристики ДПТПВ при изменении магнитного потока.
8. Назовите тормозные режимы работы ДПТНВ.
9. Динамическое торможение ДПТПВ с независимым возбуждением. Схема и характеристики.
10. Динамическое торможение ДПТПВ с самовозбуждением. Схема и характеристики.
11. Торможение противовключением ДПТПВ переменной полярности. Схема и характеристики.
12. Торможение противовключением ДПТПВ (тормозной спуск). Схема и характеристики.

### 1.3. Электромеханические свойства двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

#### 1.3.1. Электромеханические и механические характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

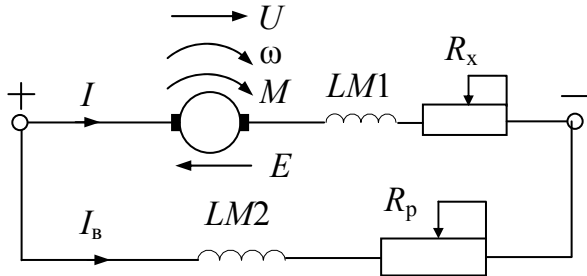


Рис. 1.33

На рис. 1.33 представлена схема включения ДПТ смешанного возбуждения (ДПТСВ). Двигатель имеет две обмотки возбуждения: последовательную  $LM1$  и независимую  $LM2$ .

Формально уравнения электромеханической и механической характеристик совпадают с соответствующими уравнениями для двигателя последовательного возбуждения:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{х}}}{k\Phi(I)} I; \quad (1.68)$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{х}}}{[k\Phi(I)]^2} M. \quad (1.69)$$

где  $R_{\text{в}}$  – сопротивление обмотки возбуждения  $LM1$ ;  $\Phi(I)$  – магнитный поток возбуждения представляет собой сумму двух составляющих – потока  $\Phi_{LM1}$ , создаваемого последовательной обмоткой  $LM1$  и являющегося функцией тока якоря двигателя, потока  $\Phi_{LM2}$ , создаваемого обмоткой  $LM2$  и независимого от тока якоря.

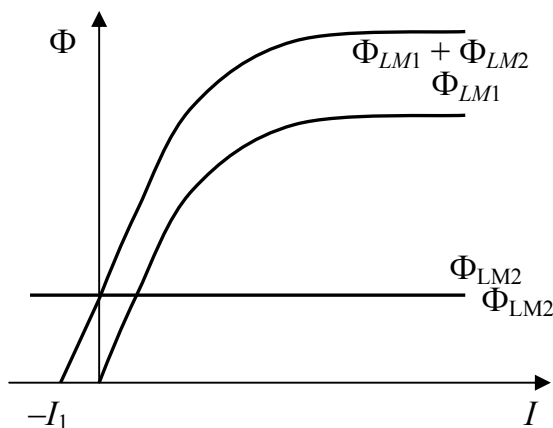


Рис. 1.34

Зависимость обеих составляющих и суммарного потока  $\Phi$  в функции тока представлены на рис. 1.34. Важно отметить, что при токе якоря, стремящемся к значению  $-I_1$ , суммарный магнитный поток  $\Phi = \Phi_{LM1} + \Phi_{LM2}$  стремится к нулю, т.е. ДПТСВ размагничивается.

Поэтому двигатель смешанного возбуждения, имея две обмотки возбуждения, сочетает в себе свойства как ДПТ независимого возбуждения, так и ДПТ последовательного возбуждения.

Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения ДПТСВ (рис. 1.35) занимает промежуточное положение между характеристикой ДПТНВ



и характеристикой ДПТПВ. У ДПТЭСВ, в отличие от ДПТПВ, скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  имеет конечное значение.

У ДПТЭСВ, выпускаемых промышленностью, соотношение магнитодвижущих сил (МДС) обмоток возбуждения при номинальном режиме составляет  $\frac{F_{LM1}}{F_{LM2}} = 1,6 \dots 2,6$ , что соответствует  $\Phi = (0,75 \dots 0,85)\Phi_H$  и

скорости идеального холостого хода  $\omega_0 = (1,3 \dots 1,6)\omega_H$ .

При малых нагрузках, когда двигатель еще не насыщен, поток возрастает от прибавления к постоянному потоку  $\Phi_{LM2}$  параллельной обмотки  $LM2$  потока  $\Phi_{LM1}$  последовательной обмотки  $LM1$  и скорость значительно снижается. При больших нагрузках двигатель насыщается и хотя ток последовательной обмотки растет, суммарный поток практически не изменяется. Поэтому скорость снижается незначительно, т.е. механическая характеристика достаточно жесткая и близка к линейной, как у ДПТНВ.

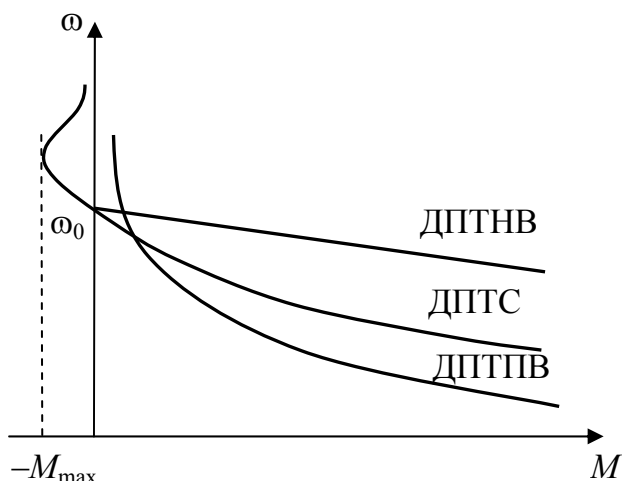


Рис. 1.35

Механическая характеристика не поддается точному аналитическому описанию, и поэтому задается в виде универсальных характеристик.

Кроме того, для ДПТЭСВ имеется дополнительная возможность получить искусственные характеристики изменением потока независимой обмотки возбуждения.

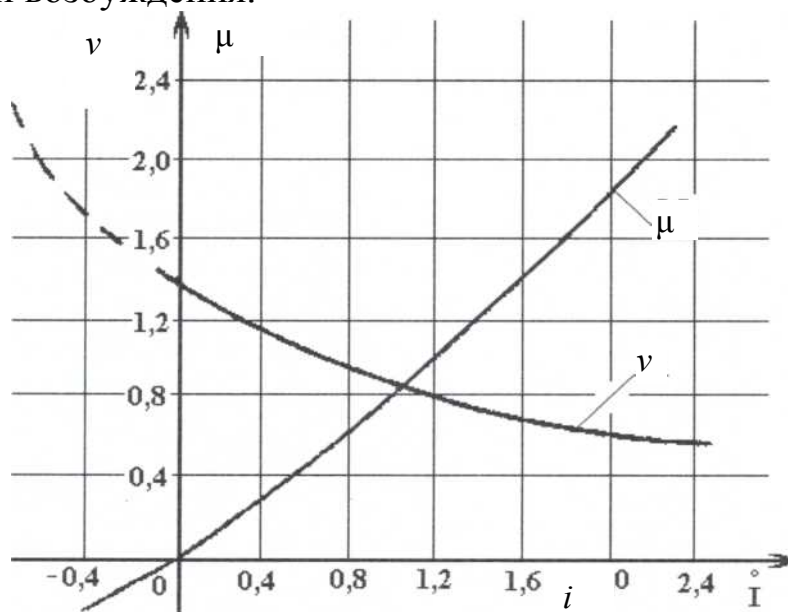


Рис. 1.36

Для построения естественных характеристик ДПТСВ необходимо задаваться рядом значений тока  $i_i$ , и по универсальным характеристикам находить соответствующие значения момента  $\mu_i$  и скорости  $v_i$ , также как для ДПТПВ (рис. 1.36). Зная из паспортных данных номинальные значения момента  $M_n$ , скорости  $\omega_n$  и тока  $I_n$ , перейти к характеристикам в абсолютных единицах, используя выражения:

$$M_i = \mu_i M_n; \omega_i = v_i \omega_n; I_i = i_i I_n. \quad (1.70)$$

Искусственные характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения можно получить такими же способами, что и для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения:

- ведением в цепь якоря добавочного сопротивления  $R_x$  (реостатные характеристики);
- изменением подводимого напряжения сети  $U$ ;
- изменением магнитного потока  $\Phi$ .

### 1.3.2. Тормозные режимы работы двигателя постоянного смешанного возбуждения

Для ДПТСВ возможны те же тормозные режимы, что и для ДПТ НВ:

- генераторное торможение;
- торможение противовключением;
- динамическое торможение.

**Генераторное торможение наступает** при скорости, большей скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . При этом ток в якоре и в обмотке последовательного возбуждения  $LM1$  (рис. 1.33) меняет свой знак, что может размагнитить машину, поэтому при возрастании скорости свыше  $\omega_0$  обмотку  $LM1$  обычно шунтируют, и машина работает как ДПТНВ, т.е. механические характеристики превращаются в прямые и располагаются во II квадранте.

**Торможение противовключением** осуществляется также как и ДПТПВ:

- тормозной спуск с активным моментом  $M_c$  путем включения большого добавочного сопротивления  $R_x$  в цепь якоря;
- изменение полярности напряжения на зажимах якоря двигателя при реактивном статическом моменте  $M_c$  и включении большого добавочного сопротивления  $R_x$  в цепь якоря.

Для осуществления **режима динамического торможения** якорь двигателя отключается от сети и замыкается на добавочное сопротивление  $R_x$ . Поскольку ток в якоре и последовательной обмотке возбуждения  $LM1$  изменит направление, машина будет размагничиваться. Поэтому при динамическом торможении ДПТСВ последовательную обмотку возбуждения  $LM1$  шунтируют и торможение осуществляют только при одной обмотке независимого (параллельного) возбуждения

$LM2$ , т.е. по схеме аналогичной схеме (рис. 1.28). Механические характеристики в этом случае будут как при торможении ДПТНВ – прямыми, проходящими через начало координат (рис. 1.29).

### 1.3.3. Пуск двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

Пуск ДПТСВ осуществляется аналогично пуску ДПТПВ. Необходимо либо снижать напряжение на обмотке якоря, либо включать дополнительное сопротивление в цепь якоря. Изменением напряжения пользуются только в случае регулируемого электропривода по системе «Управляемый преобразователь – двигатель» (УП–Д, обеспечивая такой темп нарастания напряжения при пуске, при котором ток и момент не превышают допустимых значений.

При питании от сети для ограничения пускового тока используют, как правило, пусковой реостат, сопротивление которого должно быть таким, чтобы  $I_{\text{пуск}} \leq I_{\text{доп}}$ .

По условиям коммутации, т.е. по условиям работы щеточного контакта, допустимый ток составляет  $I_{\text{доп}} = (2 \dots 2,5)I_n$ .

Однако с учетом того, что у двигателя последовательного возбуждения при  $I_{\text{доп}} = (2 \dots 2,5)I_n$  магнитный поток равен практически потоку насыщения  $\Phi_{\text{нас}} = (1,1 \dots 1,3)\Phi_n$  (рис. 1.19), допустимый момент при пуске будет гораздо больше, чем у ДПТНВ и составлять:

$$M = k\Phi(I)I = (1,1 \dots 1,3)\Phi_n(2 \dots 2,5)I_n \approx (2,2 \dots 3,25)M_n.$$

Таким образом, ДПТПВ при одном и том же допустимом токе обладает более высокой перегрузочной способностью по моменту, чем ДПТНВ.

Именно благодаря этому свойству двигателя с последовательным возбуждением используются в электрическом транспорте в качестве тягового электропривода.

### Контрольные вопросы

1. Начертите схему включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.
2. Напишите уравнение для механической характеристики двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.
3. Начертите естественную механическую характеристику двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.
4. Начертите механическую характеристику двигателя постоянного тока смешанного возбуждения при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря.
5. Начертите механическую характеристику двигателя постоянного тока смешанного возбуждения при изменении напряжения на якоре.
6. Перечислите возможные тормозные режимы двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

7. Динамическое торможение ДПТСВ с независимым возбуждением. Схема и характеристики.
8. Генераторное торможение ДПТСВ переменной полярности. Схема и характеристики.
9. Торможение противовключением ДПТСВ переменной полярности. Схема и характеристики.
10. Торможение противовключением ДПТСВ (тормозной спуск). Схема и характеристики.

## **1.4. Электромеханические свойства асинхронного электродвигателя**

### **1.4.1. Электромеханические и механические характеристики асинхронного электродвигателя**

Асинхронные двигатели (АД) – самый распространенный вид двигателей в промышленности и в сельском хозяйстве, отличающиеся низкой стоимостью, простотой обслуживания, высокой надежностью. При равной мощности имеют меньшую массу и габариты в сравнении с двигателями постоянного тока. Конструктивно асинхронный электродвигатель состоит из *статора* и *ротора*.

На статоре располагаются три распределенные обмотки, сдвинутые относительно друг друга на  $120^\circ$ , если число пар полюсов  $p = 1$ . Если число пар полюсов, образуемых обмотками, более одного, то, соответственно, увеличивается число секций и они будут сдвинуты геометрически относительно друг друга на  $120^\circ / p$  градусов. Благодаря пространственному сдвигу обмоток на  $120^\circ / p$  градусов и временному сдвигу фаз на  $120$  электрических градусов создается электромагнитное поле, вращающееся со скоростью

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (1.71)$$

где  $f_1$  – частота питающего напряжения.

В зависимости от конструкции ротора различают асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым и фазным ротором.

Наиболее широкое применение нашли асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Его роторная обмотка содержит расположенные в пазах алюминиевые или медные стержни, торцы которых соединены с двух сторон короткозамыкающими кольцами и напоминает беличье колесо, и часто называется «*беличьей клеткой*».

В двигателях с фазным ротором на роторе располагается трехфазная распределенная обмотка, соединенная обычно в звезду, концы которой соединены с контактными кольцами, жестко связанными с валом через изолирующие вставки. Токосъем с колец обеспечивается с

помощью щеток, щеткодержатели которых закреплены на подшипниковом щите.

Электромагнитный момент в АД создается благодаря взаимодействию вращающегося электромагнитного поля статора с активной составляющей тока ротора:

$$M = k\Phi I'_2 \cos\varphi_2, \quad (1.72)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток;  $I'_2$  – ток ротора;  $\varphi_2$  – угол между эдс  $E_2$  и током ротора.

Ток ротора возникает благодаря эдс  $E_2$ , которая индуцируется в обмотке ротора вращающимся электромагнитным полем. Величина эдс  $E_2$  и частота  $f_2$  зависят от частоты пересечения вращающимся полем проводников обмотки ротора. Эта частота определяется разностью скоростей поля  $\omega_0$  и ротора  $\omega$ , называемой скольжением:

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (1.73)$$

Таким образом, наибольшая величина эдс ротора ( $E_{2к}$ ) при работе в двигательном режиме будет при неподвижном роторе и по мере увеличения скорости ротора эдс  $E_2$  уменьшается пропорционально скольжению:

$$E_{2s} = E_{2к} S. \quad (1.74)$$

Аналогично частота  $f_2$  эдс и тока ротора при неподвижном роторе будет равна частоте тока статора  $f_1$  и по мере увеличения скорости будет уменьшаться пропорционально скольжению:

$$f_2 = f_1 S. \quad (1.75)$$

Схемы включения трехфазного асинхронного электродвигателя (АД) с короткозамкнутым и фазным ротором представлены на рис. 1.37 и рис. 1.38 соответственно.

Уравнения электромеханической и механической характеристик АД могут быть получены на основе рассмотрения Г-образной схемы замещения (рис. 1.39).

Электромеханической характеристикой асинхронного электродвигателя называется зависимость угловой скорости от тока. Эта зависимость относится как к току статора, так и к току ротора. Поэтому для АД различают две электромеханические характеристики:  $\omega = f(I_1)$  и  $\omega = f_1(I'_2)$ .

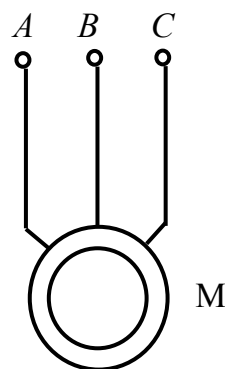


Рис. 1.37

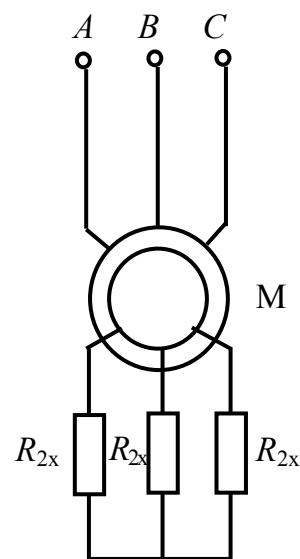


Рис. 1.38

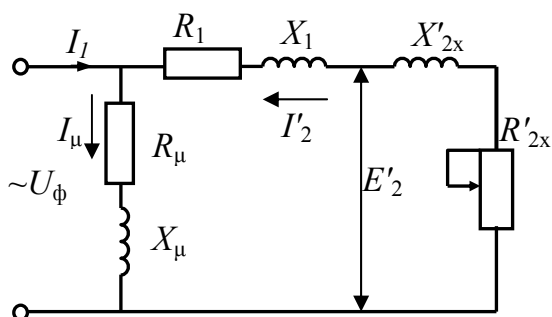


Рис. 1.39

Механической характеристикой АД называется зависимость угловой скорости от электромагнитного момента  $\omega = \varphi(M)$ .  
 В схеме замещения приняты следующие обозначения:  $U_\phi$  – действующее значение фазного напряжения;  $E'_2$  – приведенная эдс ротора;  $I_1$  – ток статора; где  $I'_2$  – приведенный ток ротора;  $I_\mu$  – ток намагничивающего контура;  $R_1$  – активное сопротивление фазы обмотки статора;  $R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{2x}$  – приведенное активное сопротивление фазы ротора, включая добавочное сопротивление резистора;  $X_1$  – индуктивное сопротивление фазы статора;  $X'_2$  – приведенное индуктивное сопротивление фазы ротора;  $X_1 + X'_2 = X_k$  – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания;  $X_\mu$ ,  $R_\mu$  – индуктивное и активное сопротивления намагничивающего контура;  $S$  – скольжение, которое однозначно определяет величину скорости двигателя  $\omega = \omega_0 (1 - S)$ .

Приведенный к статору ток ротора:

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_e m_1 m_2}, \quad (1.76)$$

где  $I_2$  – действительный ток ротора;  $k_e$  – коэффициентом трансформации эдс,  $k_e = E_1 / E_2$ ;  $m_1$ ,  $m_2$  – число фаз статора и ротора.

На практике у большинства двигателей  $m_1 = m_2$ , тогда

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_e}. \quad (1.77)$$

Приведенные к обмотке статора сопротивления ротора:

$$R'_2 = R_2 k_e; \quad (1.78)$$

$$X'_2 = X_2 k_e; \quad (1.79)$$

где  $R_2$ ,  $X_2$  – действительные активное и индуктивное сопротивления фазы роторной цепи.

Коэффициент  $k_e$  можно определить из паспортных данных двигателя:

$$k_e \approx 0,95 U_{\text{лн}} / E_{2к}, \quad (1.80)$$

где 0,95 – коэффициент, учитывающий 5%-ю потерю напряжения в обмотке статора;  $U_{\text{лн}}$  – номинальное линейное напряжение статора;  $E_{2к}$  – эдс между кольцами неподвижного ротора.

Несмотря на простоту конструкции и физических явлений, полное математическое описание процессов в асинхронной машине весьма сложно из-за:

- во-первых, все напряжения, токи, потокосцепления – переменные, т.е. характеризуются частотой, амплитудой, фазой или соответствующими векторными величинами;

- во-вторых, взаимодействуют движущиеся контуры, взаимное расположение которых изменяется в пространстве;

- в-третьих, магнитный поток нелинейно связан с намагничивающим током (проявляется насыщение магнитной цепи), активные сопротивления роторной цепи зависят от частоты (эффект вытеснения тока), сопротивления всех цепей зависят от температуры и т.п.

Поэтому рассмотрим самую простую модель асинхронной машины, пригодную для объяснения основных явлений в асинхронном электроприводе.

При этом необходимо сделать следующие допущения:

- параметры схемы замещения считаются не зависящими от режима работы;

- не учитывается насыщение магнитопровода, эффект вытеснения тока, изменение температуры и добавочные потери;

- не учитывается влияние пространственных и временных высших гармонических составляющих намагничивающих сил обмоток статора и ротора.

Уравнение электромеханической характеристики по току ротора согласно схеме замещения (рис. 1.39) будет иметь вид:

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (1.81)$$

Анализируя выражение (1.81), можно сделать следующие выводы:

- при  $S = 0$   $I_2' = 0$  (точка синхронной скорости  $\omega_0$ );

- при  $S \rightarrow \infty$   $I_2' \rightarrow I_{2\text{пр}}$ :

$$I_{2\text{пр}}' = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (1.82)$$

т.е. к предельному значению;

- при  $S \rightarrow -\infty$   $I_2'$  сначала стремится к максимальному значению:

$$I_{2\text{max}}' = \frac{U_\phi}{X_1 + X_2'}, \quad (1.83)$$

которое наступает в точке  $S_r = -\frac{R_2'}{R_1}$ , а затем к  $I_{2\text{пр}}'$ , но не снизу, как в зоне  $S > 0$ , а сверху (рис. 1.40).

Для расчета электромеханической характеристики статора воспользуемся векторной диаграммой (рис. 1.41).

Для схемы замещения (рис. 1.39) ток намагничивания  $I_\mu$  остается постоянным во всех режимах работы (с учетом принятых выше допущений).

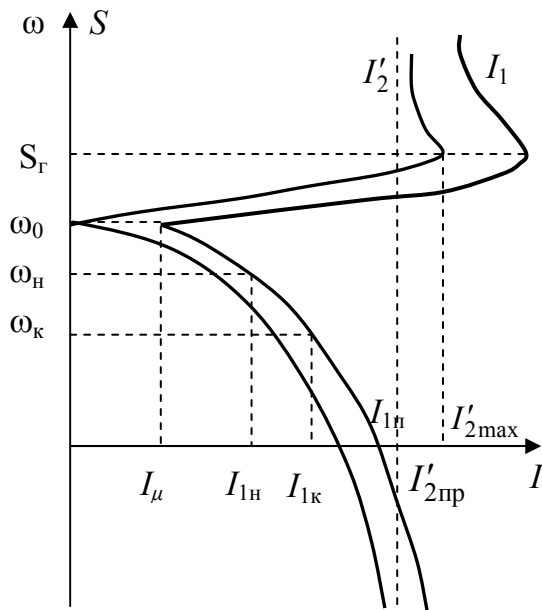


Рис. 1.40

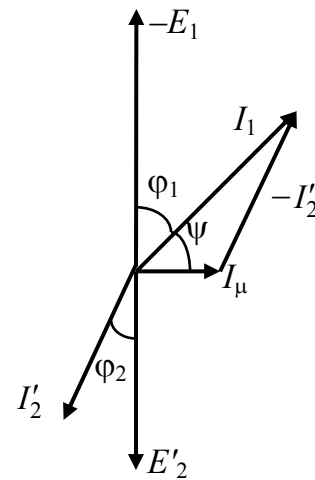


Рис. 1.41

Тогда модуль тока статора может быть определен из соотношения:

$$I_1^2 = (I_2')^2 + I_\mu^2 - 2I_2'I_\mu \cos \psi. \quad (1.84)$$

Из рис. 1.41 следует, что  $\cos \psi = -\sin \varphi_2$  и тогда

$$I_1^2 = (I_2')^2 \left( 1 + 2 \frac{I_\mu}{I_2'} \sin \varphi_2 \right) + I_\mu^2. \quad (1.85)$$

Зависимость  $\omega = f(I_1)$  показана на рис. 1.40.

Однако для расчета используют более простое выражение, полученное после ряда преобразований (здесь мы их не приводим):

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + I_2'^2 (1 + 2\alpha)}, \quad (1.86)$$

где  $\alpha = \frac{I_\mu}{I_2'пр} = 0,115 \dots 0,13$ ;  $\mu_k$  – кратность критического момента,

$\cos \varphi_n$  – коэффициент мощности.

Ток намагничивающего контура определяют по выражению:

$$I_\mu = I_{1н} \left( \sin \varphi_n - \frac{\cos \varphi_n}{2\mu_k} \right), \quad (1.87)$$

либо по выражению:

$$I_\mu = I_{1н} \left( \sin \varphi_n - \frac{\cos \varphi_n}{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1}} \right). \quad (1.88)$$

Однако для построения естественной электромеханической характеристики (ЕЭМХ) чаще используют выражение:

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + (I_{1н} - I_\mu)^2 \frac{Ms}{M_n S_n}}, \quad (1.89)$$



где  $I_{1H}$ ,  $M_H$ ,  $s_H$  – соответственно номинальные значения тока статора, момента и скольжения;  $M$ ,  $s$  – текущие значения момента и скольжения двигателя в установившемся режиме работы.

ЕЭМХ асинхронного электродвигателя можно построить по четырем точкам:

1.  $\omega = \omega_0$  (1.71),  $I = I_\mu$ ; уравнение (1.87) либо (1.88).

2.  $\omega = \omega_H = \frac{\pi n_H}{30}$ ,  $I = I_{1H}$ .

3.  $\omega = \omega_K = \omega_0 (1 - s_K)$ ,

где  $\omega_K$  – скорость при критическом моменте;  $s_K = s_H \left( \mu_K + \sqrt{\mu_K^2 - 1} \right)$  –

критическое скольжение;  $s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}$  – номинальное скольжение.

$$I = I_{1K} = \sqrt{I_\mu^2 + (I_{1H} - I_\mu)^2 \frac{M_K s_K}{M_H s_H}}. \quad (1.90)$$

4.  $\omega = 0$ ,  $I = I_{1\text{пуск}} = k_i I_{1H}$ .

**Вывод уравнения механической характеристики** осуществим путем составления баланса мощностей в двигателе. Мощность  $P_{эм}$ , передаваемую ротору магнитным полем статора, можно разделить на мощность, преобразуемую в механическую  $P_M$ , и мощность электрических потерь в обмотке ротора  $\Delta P_{эл2}$  и потерь в стали ротора  $\Delta P_{ст2}$ . Как правило, потерями в стали пренебрегают в виду их малой величины. Тогда

$$P_{эм} = P_M + \Delta P_{эл2}, \quad (1.91)$$

$$\Delta P_{эл2} = P_{эм} - P_M = M \omega_0 - M \omega = M (\omega_0 - \omega) = M \omega_0 s. \quad (1.92)$$

Учитывая, что  $\Delta P_{эл2} = 3(I'_2)^2 R'_2$ , получим

$$M \omega_0 s = 3(I'_2)^2 R'_2. \quad (1.93)$$

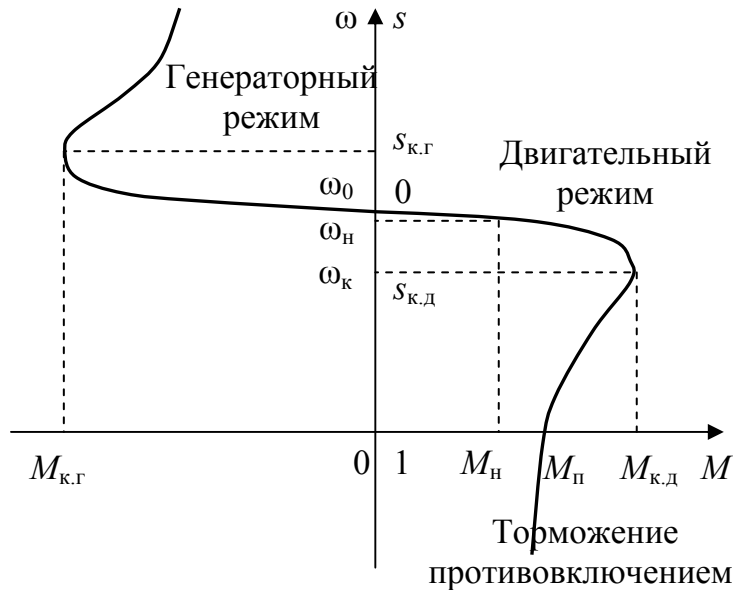
Отсюда получим выражение для момента двигателя:

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{\omega_0 s}. \quad (1.94)$$

Подставив значение тока  $I'_2$  из (1.81) в (1.94), получим уравнение механической характеристики:

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 s \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}. \quad (1.95)$$

Механическая характеристика, построенная по этому выражению (1.95), представлена на рис. 1.42.



**Рис. 1.42**

Она имеет два максимума. Дифференцируя (1.95) по  $S$  и приравняв  $dM/dS=0$ , находим значение скольжения, при котором момент двигателя максимальный (критический):

$$S_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (1.96)$$

Подставив в уравнение механической характеристики (1.95) значение критического скольжения  $S_k$ , получим:

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_o \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}. \quad (1.97)$$

Знак плюс в выражениях для  $S_k$  и  $M_k$  относится к двигательному режиму и режиму торможения противовключением, минус – к генераторному режиму.

Необходимо отметить, что абсолютные значения критического скольжения  $S_k$  в двигательном и генераторном режимах одинаковы, т.е.  $|S_{к.д}| = |S_{к.г}|$ .

Соотношение между критическими моментами в данных режимах определяется выражением:

$$M_{к.ген} = M_{к.дв} \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2}}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_k^2}}, \quad (1.98)$$

что следует из (1.97), или

$$M_{к.ген} = M_{к.дв} \frac{1 + \alpha |S_k|}{1 - \alpha |S_k|}, \quad (1.99)$$

где  $X_k = X_1 + X_2'$ ,  $\alpha = R_1 / R_2'$ .

Разделив уравнение (1.95) на уравнение (1.97) получим полную формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_k(1 + \alpha S_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2\alpha S_k}. \quad (1.100)$$

Подставив в это выражение номинальные значения момента и скольжения, получим выражение для критического скольжения:

$$S_k = S_H \frac{\mu_k \pm \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2S_H(\mu_k - 1)}}{1 - 2S_H(\mu_k - 1)}. \quad (1.101)$$

Если пренебречь активным сопротивлением статора, получим упрощенную формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}. \quad (1.102)$$

Подставив в это выражение номинальные значения момента и скольжения, получим выражение для критического скольжения:

$$S_k = S_H \left( \mu_k \pm \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right), \quad (1.103)$$

где  $\mu_k = \frac{M_k}{M_H}$  – кратность критического момента.

При расчетах в выражениях (1.101) и (1.103) следует брать знак плюс.

Используя выражение (1.102), обратимся к анализу формы механической характеристики. При  $S < (0,35 \dots 0,4)S_k$  можно пренебречь отношением  $S/S_k$ . Тогда механическая характеристика принимает вид прямой линии в соответствии с уравнением:

$$M = \frac{2M_k}{S_k} S. \quad (1.103)$$

При  $S \gg S_k$  можно пренебречь отношением  $S_k/S$ . В этом случае механическая характеристика будет представлять собой гиперболу, описываемую уравнением:

$$M = \frac{2M_k S_k}{S}. \quad (1.104)$$

Из графика (рис. 1.42) видно, что жесткость механической характеристики является переменной величиной, причем при  $S = S_k$  происходит изменение знака: при  $|S| < |S_k|$   $\beta < 0$ , а при  $|S| > |S_k|$   $\beta > 0$ .

Механическая характеристика АД с фазным ротором аналогична механической характеристике АД с короткозамкнутым ротором. Но в

отличие от короткозамкнутого АД, у двигателя с фазным ротором имеется возможность вводить дополнительное сопротивление  $R_{2x}$  в цепь ротора. Вследствие этого у АД с фазным ротором максимум кривой момента может смещаться в сторону больших скольжений, тогда как величина максимального момента  $M_k$  остается неизменной.

Анализ выражений (1.95), (1.96) и (1.97) показывает, что:

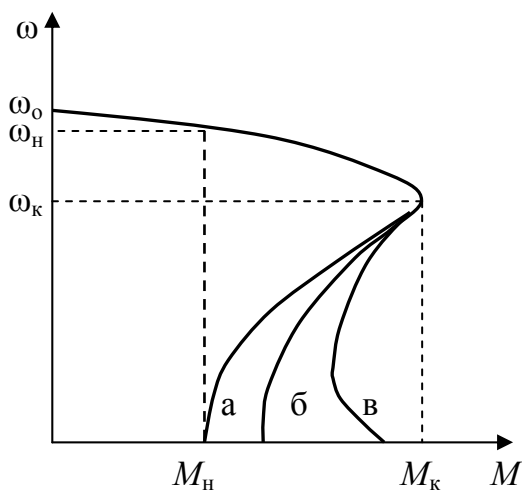
- момент АД пропорционален квадрату фазного напряжения сети ( $M \equiv U_\phi^2$ );

- критический момент  $M_k$  и критическое скольжение  $S_k$  уменьшаются с увеличением индуктивных сопротивлений  $X_1$  и  $X'_2$  и активного сопротивления  $R_1$  обмотки статора;

- критический момент не зависит от величины дополнительного сопротивления  $R_{2x}$  в цепи ротора, а  $S_k$  прямо пропорционально  $R_{2x}$ ;

- критическое скольжение не зависит от напряжения сети.

Построение естественной характеристики АД может быть произведено по паспортным данным с использованием полной, упрощенной формулам Клосса, по характерным точкам.



**Рис. 1.43**

а – по упрощенной формуле Клосса;

б – по полной формуле Клосса;

в – по характерным точкам

Следует отметить, что механические характеристики, полученные на основании как упрощенной, так и полной формулы Клосса, являются приближенными, так как формулы Клосса не описывают всех процессов, происходящих в АД, и дают наиболее точное совпадение с реальной характеристикой лишь в области малых величин скольжения. Примерное графическое соотношение механических характеристик, полученных расчетным путем, показано на рис. 1.43.

Для электродвигателя с короткозамкнутым ротором естественная механическая характеристика может быть построена по пяти характерным точкам (рис. 1.44):

$$\text{т. 1. } M_1 = 0; \omega_1 = \omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}, \quad (1.105)$$

где  $n_0$  – синхронная частота вращения;

$$\text{т. 2. } M_2 = M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \omega_2 = \omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (1.106)$$

где  $n_n$  – номинальная частота вращения;  $P_n$  – номинальная мощность;  $M_n$  – номинальный момент;

$$\text{т. 3. } M_3 = M_K = \mu_K M_H; \omega_3 = \omega_K = \omega_0 (1 - S_K), \quad (1.107)$$

где  $\mu_K$  – кратность критического момента.

Значение критического скольжения можно определить по выражению (1.103) при использовании упрощенной формулы Клосса или по выражению (1.101) при использовании полной формулы:

$$\text{т. 4. } M_4 = M_{\min} = \mu_{\min} M_H; \omega_4 = \omega_{\min} \approx \frac{\omega_0}{7}, \quad (1.108)$$

где  $\mu_{\min}$  – кратность минимального момента.

Чтобы понять, какое действие оказывают на вращающий момент двигателя высшие гармонические м.д.с., необходимо помнить, что все высшие гармонические м.д.с., создаваемые синусоидальным током, пульсируют с одной и той же частотой  $f$ , равной частоте этого тока, но имеют основания, обратно пропорциональные порядку гармонической. Так, 7-я гармоническая м.д.с. на рис. 1.45 имеет по сравнению с первой гармонической в 7 раз меньшее основание. Так как каждая полуволна высшей гармонической м.д.с. соответствует одному фиктивному полюсу, то можно сказать, что 7-я гармоническая м.д.с. имеет в 7 раз большее число полюсов, чем основная, т. е.  $p_7 = 7p$ .

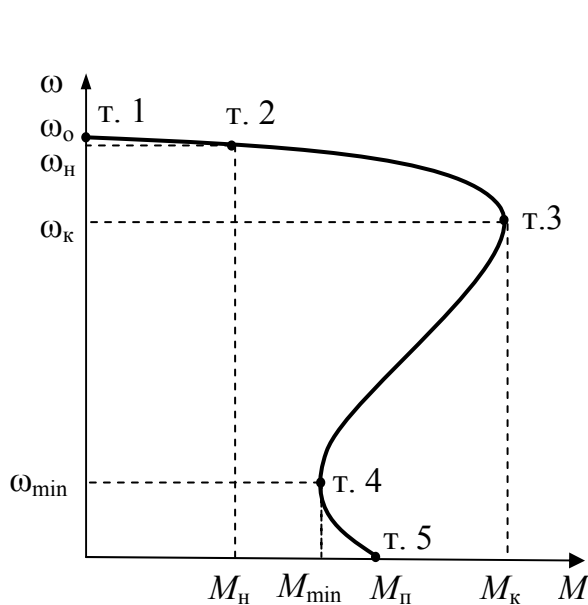


Рис. 1.44

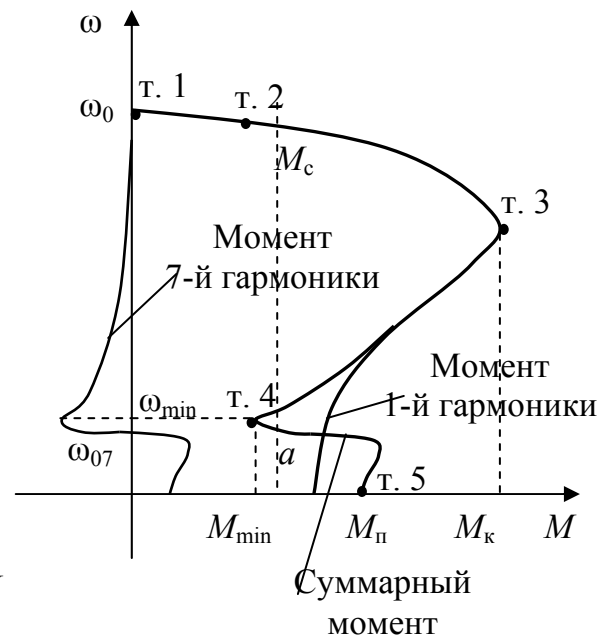


Рис. 1.45

В трехфазной машине высшие гармонические м.д.с. (за исключением 3-й и кратных ей) создают, так же как и основная м.д.с., вращающиеся магнитные поля. Но скорость вращения этих полей меньше, чем основного. Так, если поле основной гармонической м.д.с. вращается со скоростью  $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$ , то для 7-й гармонической м.д.с.  $\omega_{07} = \frac{2\pi f}{7p}$ . Кроме того, 7-я гармоническая м.д.с. вращается в ту же сторону, что и основная.

Так как ее поле вращается в ту же сторону, что и основное поле, то при пуске 7-я гармоническая м.д.с. создает момент, направленный согласно с моментом основного поля (рис. 1.45). В дальнейшем момент 7-й гармонической изменяется так же, что и момент основной гармонической, но в более узких пределах скольжения. Действительно, когда при пуске ротор достигает скорости  $\omega_0 = \frac{\omega_0}{7}$ , то он идет уже с синхронной скоростью относительно 7-й гармонической м.д.с.; следовательно, момент, развиваемый при этой скорости 7-й гармонической м.д.с., равен нулю. При дальнейшем увеличении скорости вращения ротор начнет обгонять поле 7-й гармонической, соответственно чему развиваемый ею момент станет отрицательным.

В результате этого в кривой результирующего момента появляется провал. Если он настолько велик, что вращающий момент двигателя окажется недостаточным для преодоления статического момента, то двигатель не перейдет через точку  $a$  и будет вращаться со скоростью, примерно  $\omega_{\min} \approx \frac{\omega_0}{7}$ .

$$\text{т. 5} - M_5 = M_{\text{п}} = \mu_{\text{п}} M_{\text{н}}; \omega_5 = 0, \quad (1.109)$$

где  $\mu_{\text{п}}$  – кратность пускового момента.

**Искусственные механические характеристики** асинхронного двигателя могут быть получены:

- изменением величины питающего напряжения;
- изменением частоты питающего напряжения;
- включением в цепь статора дополнительного активного сопротивления;
- включением дополнительного сопротивления в цепь ротора (справедливо только для двигателей с фазным ротором).

**Рассмотрим влияние на механическую характеристику асинхронного двигателя величины напряжения.** В пределах рабочей части механической характеристики эдс  $E_1$  статора двигателя незначительно отличается от напряжения сети:

$$U_1 \approx E_1 = 4,44k_{\text{обм}}f_1\Phi N_1, \quad (1.110)$$

где  $k_{\text{обм}}$  – обмоточный коэффициент;  $f_1$  – частота питающего напряжения;  $\Phi$  – магнитный поток;  $N_1$  – число витков на фазу.

Снижение напряжения приводит к уменьшению магнитного потока, что при постоянном моменте нагрузки на валу в соответствии с выражением  $M = k\Phi I_2 \cos\varphi_2$  приводит к возрастанию тока ротора, а, следовательно, и тока статора, т.е. к перегрузке обмоток двигателя по току при недоиспользованной стали.

Механическая характеристика при  $f_1 = \text{const}$  и  $U = \text{varia}$  показана на рис. 1.46. Ее форма определяется соотношениями (1.96) и (1.97), из которых следует, что критический момент уменьшается прямо пропорционально квадрату напряжения, а критическое скольжение остается неизменным. Синхронная скорость  $\omega_0$ , которая зависит от частоты и числа пар полюсов обмотки двигателя, также остается постоянной.

Механические характеристики АД при снижении напряжения питающей сети могут быть построены, исходя из квадратичной зависимости момента электродвигателя от напряжения на статоре при неизменной скорости.

Для построения данных характеристик необходимо произвести пересчет моментов для точек 2, 3, 4 и 5 (рис. 1.46) с номинального напряжения на заданное напряжение, указанные в задании, по выражению:

$$M_u = M_e \left( \frac{U_{\text{ф.зад}}}{U_{\text{фн}}} \right)^2, \quad (1.111)$$

где  $M_e$  – момент электродвигателя на естественной механической характеристике при том же значении скорости;  $U_{\text{ф.зад}}$  – фазное напряжение на статоре для искусственной характеристики;  $U_{\text{фн}}$  – фазное номинальное напряжение обмотки статора.

**Механические характеристики АД при изменении частоты напряжения** питающей сети. Изменение частоты  $f_1$  питающего напряжения приводит к изменению синхронной скорости  $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ . При регулировании частоты возникает необходимость регулирования напряжения источника питания, поскольку с изменением частоты изменяется и величина магнитного потока двигателя  $\Phi = \frac{E_1}{k_1 f_1} \approx \frac{U_1}{k_1 f_1}$ , что следует из (1.110).

Уменьшение частоты  $f_1$  приводит к возрастанию магнитного потока  $\Phi$  и тока намагничивания и как следствие к перегреву двигателя и ухудшению энергетических показателей. Увеличение частоты вызывает уменьшение потока, что приводит при постоянном моменте на валу к возрастанию тока ротора в соответствии с зависимостью  $M = k\Phi I_2' \cos\varphi_2$ ,

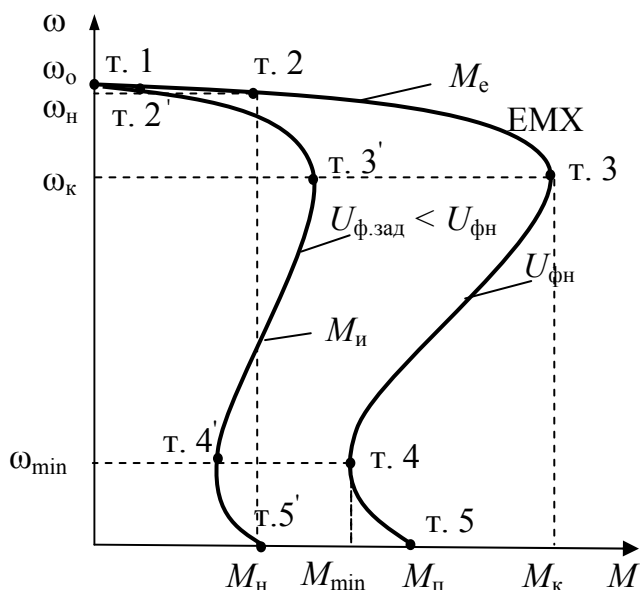


Рис. 1.46

т.е. к перегрузке обмоток по току. Кроме этого снижается критический момент и перегрузочная способность двигателя. Поэтому для лучшего использования двигателя одновременно с изменением частоты питающего напряжения необходимо изменять и величину этого напряжения с учетом характера нагрузки. Подробно этот вопрос рассмотрен в п. 2.4.4.

**Механические характеристики АД при включении в цепь статора дополнительного активного сопротивления.**

Схема включения АД представлена на рис. 1.47.

Механические характеристики АД при различных значениях дополнительного активного сопротивления  $R_{1x1} < R_{1x2}$  представлены на рис. 1.48.

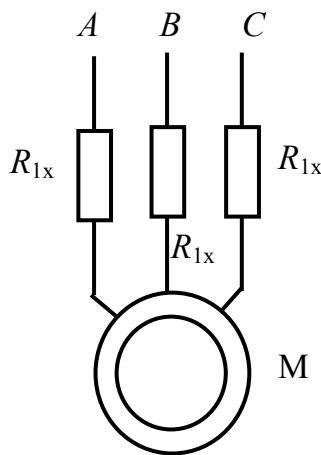


Рис. 1.47

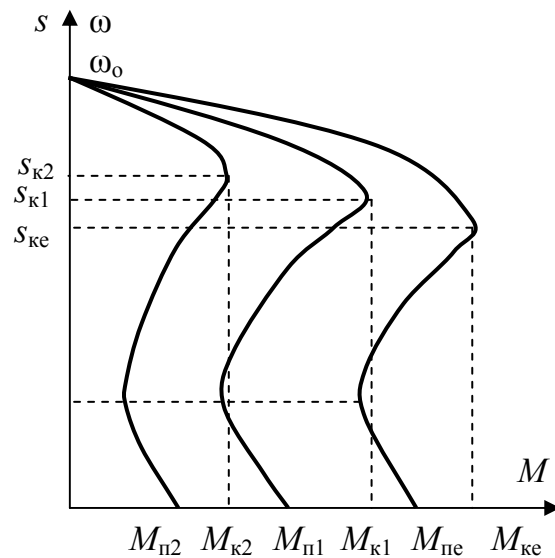


Рис. 1.48

Анализ механических характеристик и выражений (1.96) и (1.97) показывает:

1. Так как скорость идеального холостого хода АД не зависит от  $R_{1x}$ , все механические характеристики проходят через точку  $\omega_0$ .
2. Критический момент  $M_k$  и скольжение  $S_k$  обратно пропорциональны  $R_{1\Sigma} = R_1 + R_{1x}$ , поэтому с увеличением  $R_{1x}$  уменьшаются.
3. При увеличении  $R_{1x}$  пусковой момент  $M_{п}$  уменьшается.

Данный способ получения характеристик в основном используется для ограничения тока двигателя при пуске, реверсе или торможении. Он редко используется для регулирования скорости, так как не обеспечивает требуемых регулировочных характеристик АД.

**Механические характеристики АД при включении в цепь ротора дополнительного активного сопротивления (справедливо только для двигателей с фазным ротором).**

Включение дополнительных симметричных сопротивлений в цепь ротора (рис. 1.38) приводит к тому, что точка критического момента



смещается в сторону больших скольжений, но величина момента остается неизменной, что следует из выражений (1.96) и (1.97) и (рис. 1.49).

С целью получения формулы, необходимой для построения реостатных характеристик произведем некоторые преобразования, используя выражение (1.81). Из (1.81) следует, что

$$S = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{U_{\phi}}{I_2'}\right)^2 - X_{\kappa}^2 - R_1}} \times (R_2' + R_{2x}'), \quad (1.112)$$

т.е. при  $I_2' = \text{const}$  между скольжением и сопротивлением роторной цепи имеется линейная зависимость:

$$S \equiv (R_2' + R_{2x}').$$

Подставив (1.112) в (1.94), получим:

$$M = \frac{3I_2'^2 (R_2' + R_{2x}')}{\omega_0 S} = \frac{3}{\omega_0} I_2'^2 \left[ \sqrt{\left(\frac{U_{\phi}}{I_2'}\right)^2 - X_{\kappa}^2 - R_1} \right], \quad (1.113)$$

т.е. при  $I_2' = \text{const}$  и момент  $M = \text{const}$ , и между скольжением и сопротивлением роторной цепи сохраняется линейная зависимость  $S \equiv (R_2' + R_{2x}')$ .

Таким образом, для построения реостатной характеристики можно использовать соотношение  $\frac{S_{ei}}{S_{pi}} = \frac{R_{2H}'}{R_{2H}' + R_{2x}'}$ , из которого получаем:

$$S_{pi} = S_{ei} \frac{R_{2H}' + R_{2x}'}{R_{2H}'}, \quad (1.114)$$

где  $S_{pi}$  и  $S_{ei}$  – скольжение на реостатной и естественной характеристиках при одинаковом значении момента  $M_i$  двигателя;  $R_{2H}'$  – номинальное сопротивление фазы обмотки ротора;  $R_{2x}'$  – дополнительное сопротивление в цепи ротора.

Номинальное сопротивление фазы обмотки ротора определяют из выражения:

$$R_{2H}' = \frac{E_{2\kappa} S_H}{\sqrt{3} I_{2H}'}, \quad (1.115)$$

где  $E_{2\kappa}$  – линейная эдс на разомкнутой обмотке ротора при  $S = 1$ ;  $I_{2H}'$  – номинальный ток обмотки ротора.

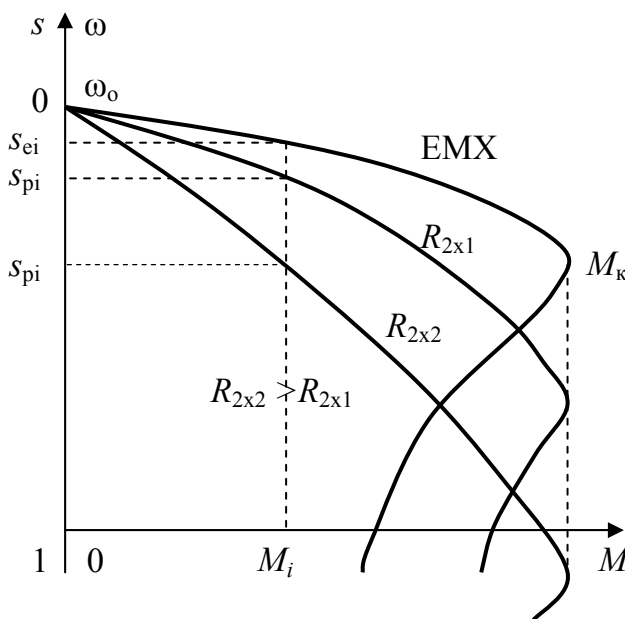


Рис. 1.49

По известным величинам  $S_{ei}$ ,  $R_{2н}$  и  $R_{2х}$  определяют скольжение  $S_{pi}$  на реостатной характеристике, соответствующее каждому значению момента  $M_i$  (рис. 1.49).

#### 1.4.2. Тормозные режимы работы асинхронного электродвигателя

Асинхронный электродвигатель может работать в следующих тормозных режимах:

1. Торможение противовключением:
  - изменением чередования фаз обмотки статора при реактивном статическом моменте  $M_c$ ;
  - тормозной спуск при активном статическом моменте  $M_c$  путем введения добавочного сопротивления  $R_{2х}$  в цепь ротора.
2. Генераторное (рекуперативное) торможение с отдачей энергии в сеть (генераторный режим работы параллельно с сетью).
3. *Динамическое* торможение:
  - с независимым возбуждением;
  - с самовозбуждением.

##### Торможение противовключением

Этот режим часто используется для остановки привода и ограничения скорости спуска груза крановых механизмов.

Торможение противовключением осуществляется в том случае, когда обмотки двигателя включены для одного направления вращения, а ротор двигателя под воздействием сил инерции или активного момента сопротивления вращается в противоположную сторону – против включения.

**Рассмотрим торможение противовключением изменением чередования фаз обмотки статора при реактивном статическом моменте  $M_c$ .**

Допустим, статорные обмотки АД подключены к напряжению сети с прямым порядком чередования фаз  $A-B-C$  (рис. 1.50). Данному подключению соответствует работа двигателя на ЕМХ в первом квадранте в точке  $a$  (рис. 1.50).

Затем статорные обмотки двигателя подключаются к сети с обратным порядком чередования фаз, например,  $A-C-B$  и работающий двигатель включается на противоположное направление. При этом изменяется направление вращения магнитного поля статора, а ротор двигателя под действием инерционных сил сохраняет направление вращения – вращается против поля. Изменяет направление вращающий момент двигателя, т.е. он становится тормозным. Двигатель из точки  $a$  переходит в точку  $b$  на механической характеристике АД для обратного вращения (рис. 1.50, 2-й квадрант). Под действием тормозного момента скорость двигателя будет снижаться до нуля и в точке  $c$  двигатель необходимо отключить от сети.

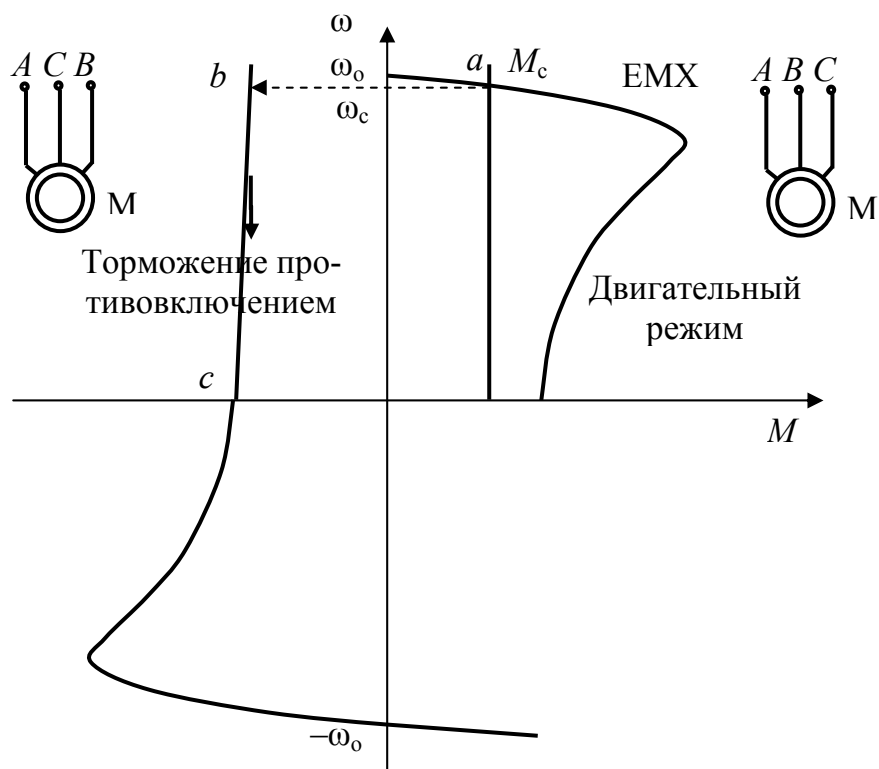


Рис. 1.50

Поскольку ротор двигателя вращается навстречу полю, частота, с которой вращающееся поле пересекает обмотку ротора, в два раза превышает частоту при пуске.

Наводимая в обмотке ротора эдс  $E_2$  в два раза превышает номинальную эдс  $E_{2н}$ , наводимую в обмотке ротора при пуске. Поэтому следует учитывать, что применение этого режима торможения связано со значительной токовой перегрузкой двигателя, так как ток обмотки статора в этом случае превышает значение пускового тока.

Такой режим широко используется для сокращения выбега рабочей машины с целью экономии времени или в целях повышения безопасности при аварийной остановке.

В электроприводах с активным статическим моментом  $M_c$ , например, в электроприводе подъемных механизмов, где активный  $M_c$  создает груз, подвешенный на крюке, режим торможения противовключением можно получить за счет изменения механической характеристики двигателя. Тормозной спуск возможен только для АД с фазным ротором при введении дополнительного сопротивления в цепь ротора.

Схема включения двигателя приведена на рис. 1.51, а механические характеристики двигателя на рис. 1.52.

Допустим, что двигатель со скоростью  $\omega_1$  работает в направлении подъема на естественной механической характеристике в точке  $a$  (рис. 1.52).

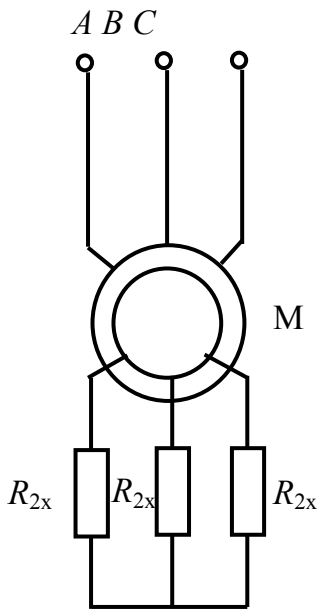


Рис. 1.51

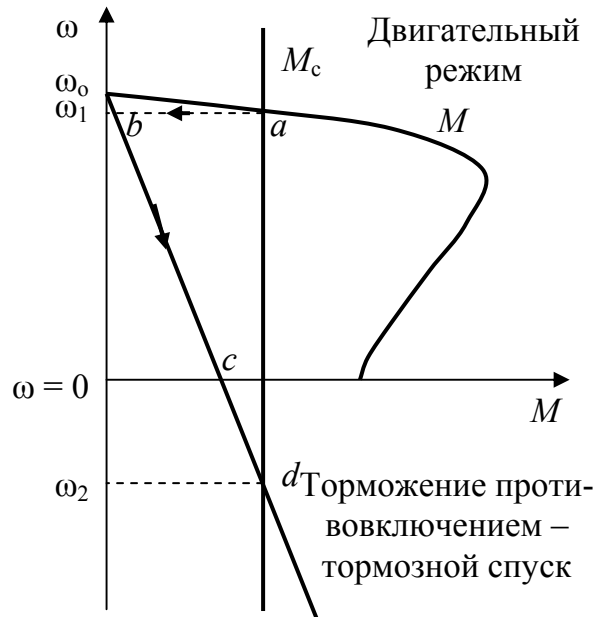


Рис. 1.52

При введении в цепь ротора сопротивления  $R_{2x}$  двигатель перейдет на характеристику в точку  $b$  с той же скоростью  $\omega_1$ . Момент двигателя  $M$  станет меньше  $M_c$  и скорость двигателя начинает снижаться. В точке  $c$  двигатель останавливается и поднимаемый груз удерживается в подвешенном состоянии за счет вращающего момента двигателя  $M$ .

Так как  $M < M_c$  поднятый груз начнет опускаться и двигатель, включенный для работы на подъем, под действием активного  $M_c$  будет вращаться в направлении опускания против магнитного поля статора. Момент двигателя становится тормозным. С увеличением скорости опускания груза он будет увеличиваться. При  $\omega = -\omega_2$  (точка  $d$  на рис. 1.52) величина тормозного момента двигателя  $M$  станет равной величине активного момента  $M_c$ . Двигатель перейдет в установившийся режим работы и увеличение скорости опускания груза прекратится. Такой режим торможения широко используется в электроприводах подъемных механизмов, так как он позволяет получить очень низкие «посадочные» скорости двигателя и устанавливать груз в требуемом месте без удара.

При торможении противовключением АД работает в режиме генератора, включенного последовательно с сетью. Он преобразует механическую энергию в электрическую, а также потребляет электрическую энергию из сети. Вся электроэнергия выделяется в виде тепла в двигателе и на сопротивлениях, включенных в цепь ротора. Поэтому торможение противовключением не экономично с точки зрения затрат энергии, однако по сравнению с другими видами оно обеспечивает минимальное время торможения.

АД с короткозамкнутым ротором в режиме тормозного спуска не используется ввиду невозможности получения устойчивой рабочей точки из-за особенности его механической характеристики в этом режиме.

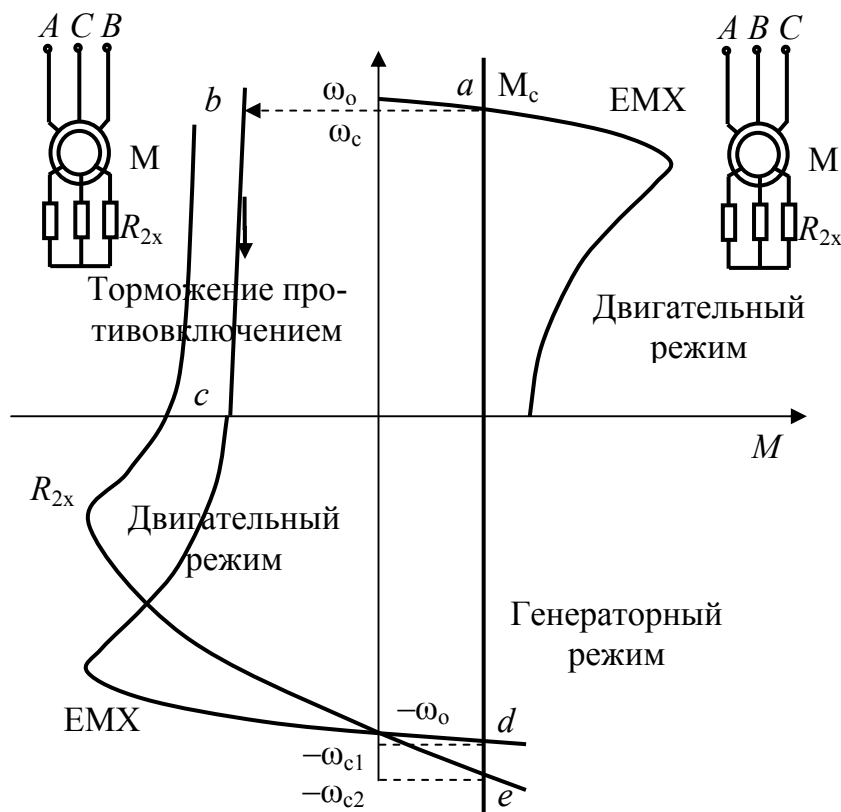
## Генераторное торможение

Режим генераторного или рекуперативного торможения АД возможен при угловой скорости ротора больше синхронной, то есть  $\omega > \omega_0$ . Увеличение  $\omega$  до значений, больших  $\omega_0$ , возможно под влиянием момента  $M_c$ , способствующего вращению двигателя.

Применяется режим рекуперативного торможения в электроприборах подъемных механизмов различных грузоподъемных машин

Допустим, статорные обмотки АД подключены к напряжению сети с прямым порядком чередования фаз  $A-B-C$  (рис. 1.53). Данному подключению соответствует работа двигателя на ЕМХ в двигательном режиме в точке  $a$  (рис. 1.53).

Затем статорные обмотки двигателя подключаются к сети с обратным порядком чередования фаз, например,  $A-C-B$  и работающий двигатель включается на противоположное направление. При этом изменяется направление вращения магнитного поля статора, а ротор двигателя под действием инерционных сил сохраняет направление вращения. Изменяет направление вращающий момент двигателя, т.е. он становится тормозным. Двигатель из точки  $a$  переходит в точку  $b$  на механической характеристике АД для обратного вращения (рис. 1.53).



**Рис. 1.52**

Под действием тормозного момента скорость двигателя будет снижаться до нуля (точка  $c$ ). Однако поднятый груз, создавая активный момент сопротивления  $M_c$ , раскручивает ротор двигателя в направле-

нии, соответствующем чередованию фаз  $A-C-B$ , и двигатель переходит в двигательный режим в направлении опускания груза.

Скорость двигателя, а значит и скорость опускания груза, будут увеличиваться под действием активного  $M_c$ . Когда скорость ротора превысит скорость поля ( $\omega > \omega_0$ ), момент двигателя изменит направление и станет тормозным.

Поскольку схема включения двигателя не изменяется, механические характеристики АД для режима рекуперативного торможения получаются продолжением характеристик для двигательного режима в третьем квадранте в четвертый.

С увеличением скорости двигателя будет расти величина тормозного момента  $M$ . При работе двигателя на естественной характеристике момент  $M$  станет равным моменту  $M_c$  при скорости  $-\omega_{c1}$  и двигатель перейдет в установившийся режим работы (точка  $d$ ). Груз будет опускаться с постоянной скоростью. При этом скольжение  $s$  становится отрицательным, что ведет к изменению направления активной мощности, которая в двигательном режиме передавалась к ротору, а в генераторном режиме отдается в сеть. Момент двигателя меняет свое направление и становится тормозным. Реактивную энергию АД продолжает потреблять из сети.

На реостатных характеристиках (при включении сопротивления  $R_{2x}$ ) скорость установившегося режима будет больше  $-\omega_{c2}$  (точка  $e$ ).

Генераторный режим применяется при использовании АД в качестве нагрузочного устройства, например, при горячей обкатке двигателей внутреннего сгорания (ДВС). По характеру обкатки различают два режима холодный и горячий.

При холодной обкатке электродвигатель работает в двигательном

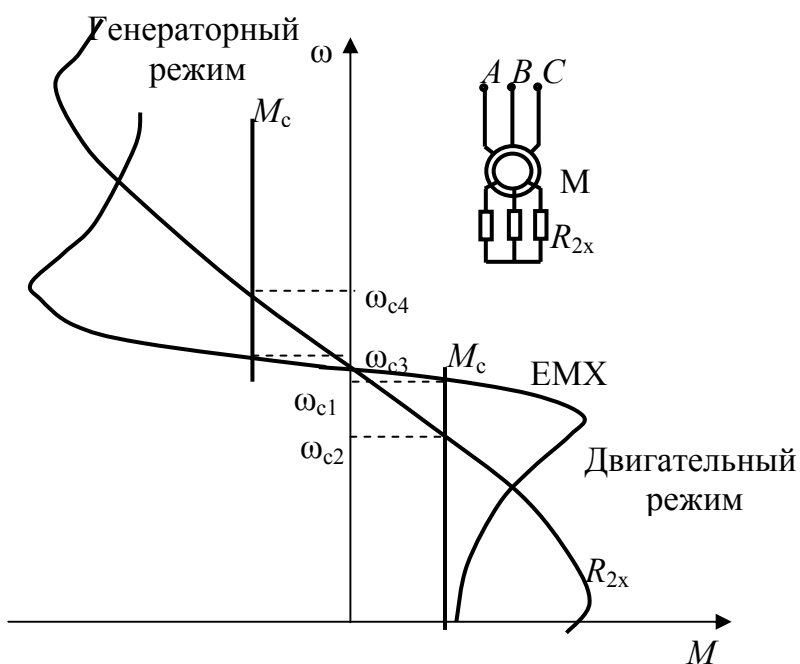


Рис. 1.54

режиме и приводит в движение ДВС со скоростью  $\omega_{c1}$  или  $\omega_{c2}$  (рис. 1.54), а при горячей обкатке АД выступает в качестве нагрузочного устройства для ДВС и работает в режиме генераторного торможения со скоростью  $\omega_{c3}$  или  $\omega_{c4}$ .

Генераторное торможение может быть реализовано в системе «преобразователь час-

тоты–двигатель» при остановке или снижении скорости АД путем перехода с характеристики на характеристику. Для этого осуществляется уменьшение частоты выходного напряжения ПЧ, а значит, и синхронной скорости  $\omega_0$ . В силу механической инерции текущая скорость  $\omega$  АД будет изменяться медленнее, чем скорость вращения магнитного поля  $\omega_0$ , т. е. будет постоянно ее превышать. За счет этого и возникает режим торможения с отдачей энергии в сеть. Отметим, что ПЧ должен быть способен при этом передать энергию от двигателя в сеть.

Кратковременное торможение может происходить также при переключении многоскоростного двигателя с меньшего числа полюсов на большее, т.е. с высшей скорости на низшую.

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным видом торможения АД.

### Динамическое торможение

Для осуществления динамического торможения АД необходимо обмотку статора отключить от сети переменного тока и подключить ее к источнику постоянного тока (рис. 1.55) или к трехфазной конденсаторной батарее (рис. 1.56).

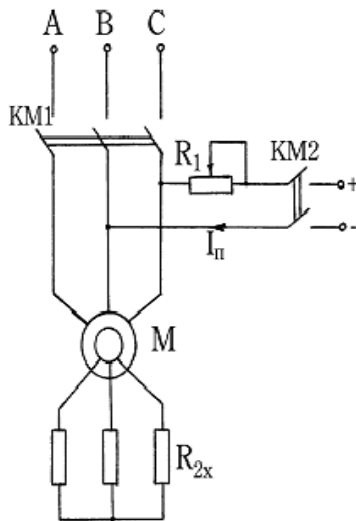


Рис. 1.55

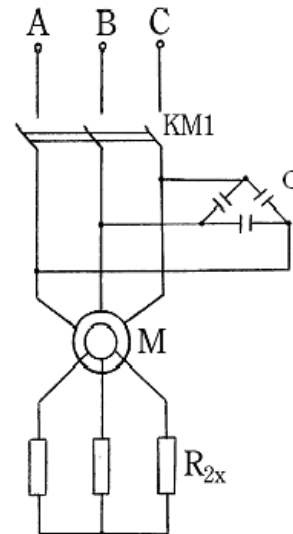


Рис. 1.56

В первом случае имеем режим динамического торможения с независимым возбуждением, во втором – с самовозбуждением.

### Динамическое торможение с независимым возбуждением

В двигательном режиме ротор АД движется в том же направлении, что и вращающееся магнитное поле статора, отставая по скорости на величину  $\omega_0 S$ . При питании обмотки от источника постоянного тока магнитное поле относительно статора будет неподвижным. В этом случае ротор вращается быстрее магнитного поля со скоростью  $(1 - S)\omega_0$ . Переменную  $(1 - S)$  обозначим через  $S$ , которая пропорциональна относительной скорости перемещения проводников относительно потока

или пропорциональна скорости  $\omega = \omega_0 S$ . Поэтому скольжение в режиме динамического торможения определяется выражением:

$$S = \omega / \omega_0. \quad (1.116)$$

Вследствие вращения ротора в его обмотке будет индуцироваться эдс, частота которой пропорциональна скольжению. Электродвижущая сила, в свою очередь, вызывает появление тока в обмотке ротора, величина которого определяется значением наводимой эдс и сопротивлением цепи ротора. Взаимодействие тока ротора с неподвижным магнитным полем приводит к возникновению тормозного момента.

Механические характеристики двигателя при динамическом торможении будут аналогичны механическим характеристикам при двигательном режиме работы. Они проходят через начало координат, так как при угловой скорости, равной нулю, отсутствует движение проводников обмотки ротора в магнитном поле и тормозной момент также равен нулю.

Механические характеристики при различном значении постоянного тока и различном сопротивлении роторной цепи изображены на рис. 1.57.

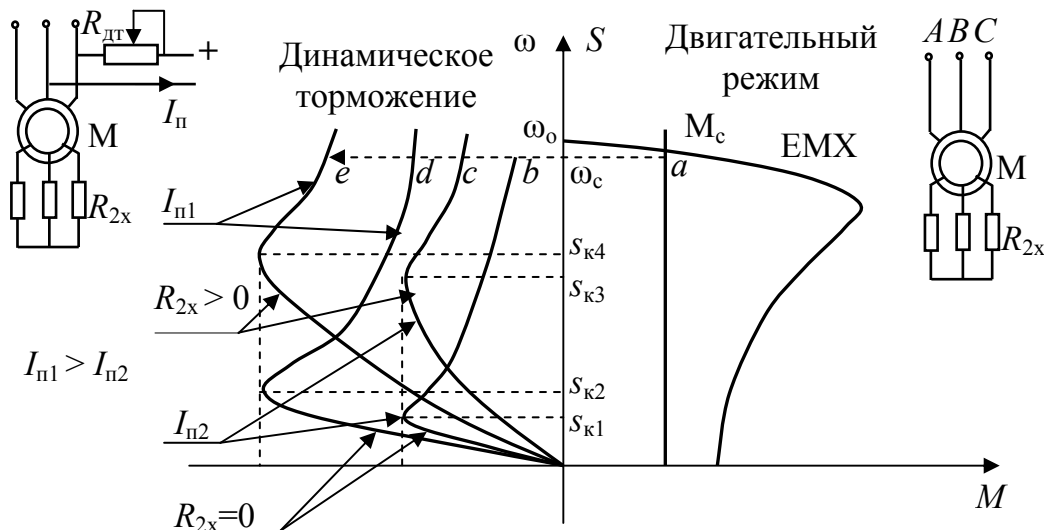


Рис. 1.57

Величина максимального тормозного момента увеличивается с ростом постоянного тока  $I_{п}$ , протекающего по обмотке статора. Вместе с ростом  $I_{п}$  увеличивается значение критического скольжения  $S_{дтк}$ , так как по мере насыщения двигателя уменьшается величина индуктивного сопротивления  $X_{ц}$  контура намагничивания.

При введении дополнительного сопротивления  $R_{2x}$  в цепь ротора АД максимум момента, оставаясь неизменным, перемещается в область больших угловых скоростей.

Механические характеристики определяются не только величиной постоянного тока  $I_{п}$ , но и схемой соединения фаз обмотки статора, наиболее часто используемые из которых представлены на рис. 1.58.



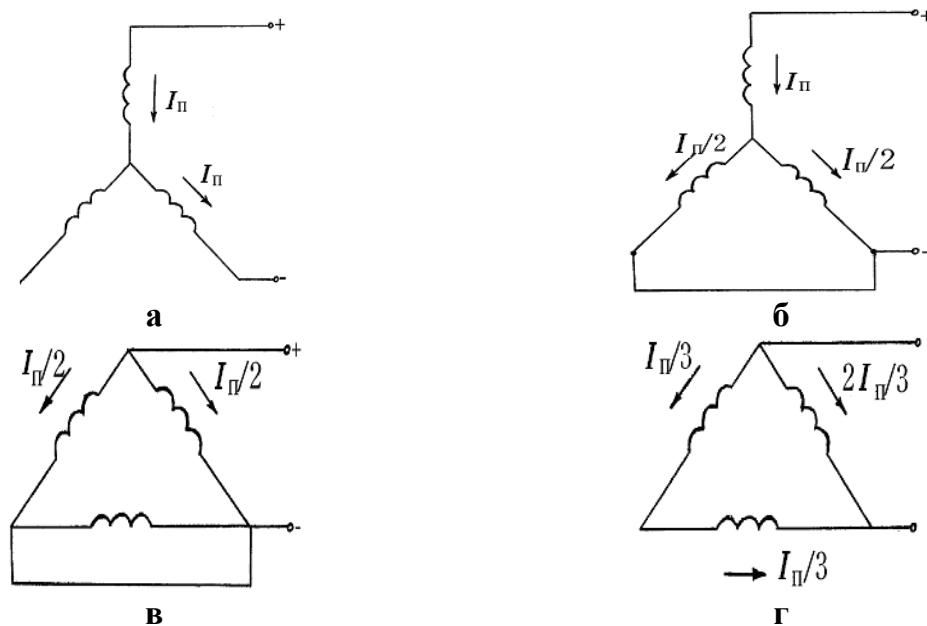


Рис. 1.58

В режиме динамического торможения реально в цепи статора протекает постоянный ток  $I_{\text{п}}$ . Однако в схеме замещения и в расчётных выражениях используется фиктивный, эквивалентный по намагничивающей силе ему трёхфазный переменный ток, фазное значение которого определяется через  $I_{\text{п}}$  и коэффициент, характеризующий схему включения обмотки статора (рис. 1.58):

$$I_1 = \kappa_{\text{сх}} I_{\text{п}}, \quad (1.117)$$

где  $\kappa_{\text{сх}}$  – коэффициент схемы.

Рассмотрим определение коэффициента схемы на примере рис. 1.58а.

Магнитодвижущая сила (МДС), создаваемая постоянным током  $I_{\text{п}}$  определяется по выражению:

$$F_{\text{п}} = 2I_{\text{п}} w_1 \cos 30^\circ = \frac{2I_{\text{п}} w_1 \sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_{\text{п}} w_1, \quad (1.118)$$

где  $w_1$  – количество витков обмотки фазы.

Амплитуда МДС, создаваемой переменным током  $I_1$  при протекании его по обмоткам статора:

$$F_{\text{пер}} = \frac{3}{2} I_{1\text{макс}} w_1 = \frac{3I_{\text{п}} w_1 \sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_1 w_1. \quad (1.119)$$

Исходя из условия эквивалентности, что  $F_{\text{п}} = F_{\text{пер}}$ , т.е.

$$\sqrt{3} I_{\text{п}} w_1 = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_1 w_1,$$

определяем значение переменного тока  $I_1$ , эквивалентного постоянному  $I_{\text{п}}$ :

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{\text{п}} = 0,81 I_{\text{п}}. \quad (1.120)$$

Таким образом, коэффициент схемы  $\kappa_{\text{сх}} = 0,81$ .

Тогда максимальное напряжение источника постоянного тока:

$$U = 2R_1 I_{II} = 2R_1 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_1 = \sqrt{2} R_1 \sqrt{3} I_1 = 2,45 I_1 R_1, \quad (1.121)$$

где  $R_1$  – активное сопротивление обмотки фазы.

Коэффициенты  $\kappa_{сх}$  для других схем определяются аналогично и равны: схема б –  $\kappa_{сх} = 0,71$ ; схема в –  $\kappa_{сх} = 0,47$ ; схема г –  $\kappa_{сх} = 0,41$ .

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем:

$$M = \frac{3I_1^2 X_\mu^2 R'_2 s}{\omega_0 \left[ R_2'^2 + (X_\mu + X_2')^2 s^2 \right]}, \quad (1.122)$$

где  $s$  – скольжение.

Из выражения для  $M$  видно, что момент при динамическом торможении определяется переменным током  $I_1$ , эквивалентным постоянному, протекающему по обмоткам статора.

Критическое скольжение определяется по выражению:

$$S_k = \frac{R'_2}{X_\mu + X_2'}, \quad (1.123)$$

а значение критического момента:

$$M_k = \frac{3I_1^2 X_\mu^2}{2\omega_0 (X_\mu + X_2')}. \quad (1.124)$$

Из выражения для  $M_k$  следует, что критический момент двигателя в режиме динамического торможения не зависит от активного сопротивления цепи ротора.

Для построения механической характеристики в режиме динамического торможения также можно использовать формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}, \quad (1.125)$$

предварительно определив  $S_k$  и  $M_k$  по выражениям (1.123) и (1.124) соответственно.

**Динамическое торможение с самовозбуждением** заключается в том, что статор двигателя отключается от сети и к его обмоткам подключается батарея конденсаторов (рис. 1.56). Двигатель будет работать самовозбужденным асинхронным генератором.

Первоначальный толчок для самовозбуждения создает эдс, индуцируемая в обмотках статора остаточным магнитным потоком вращающегося ротора.

Время переключения АД с момента отключения от сети и до присоединения емкости составляет 0,05...0,1 с. За это время поток ротора

не успевает затухнуть окончательно. Поэтому самовозбуждение АД после присоединения емкости развивается за сотые доли секунды следующим образом.

Эдс от остаточного магнитного потока  $E_0$ , приложенная к конденсаторам, обеспечивает протекание по обмоткам статора опережающего емкостного тока  $I_0$ .

Этот возникший в статоре ток  $I_0$  создает в генераторе вращающееся магнитное поле, которое увеличивает эдс и напряжение на зажимах статора. Напряжения на конденсаторах увеличивается до величины  $E_{01}$ . Это вызовет увеличение тока через конденсаторы до  $I_{\mu 1}$  и т. д. (рис. 1.59).

Процесс самовозбуждения будет продолжаться до тех пор, пока не наступит равновесие эдс генератора и напряжения на зажимах конденсаторов (точка  $A$ ), т. е. рост тока и эдс будет продолжаться до тех пор, пока не наступит насыщение магнитной системы АД.

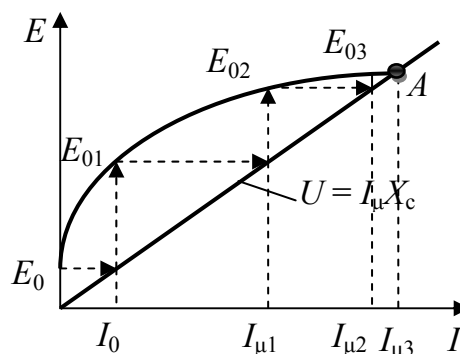


Рис. 1.59

Асинхронная машина возбуждается лишь при некотором конечном значении скорости ротора, которая зависит от параметров машины и емкости конденсаторов. Следовательно, существует нижняя граница конденсаторного самовозбуждения, которая называется нижней критической.

Для определения скорости ротора, при которой возникает самовозбуждение, воспользуемся упрощенной схемой замещения (рис. 1.60) для начального момента времени после отключения статора от сети и подключения батареи конденсаторов.

Уравнение равновесия эдс в обмотке статора для этого момента времени:

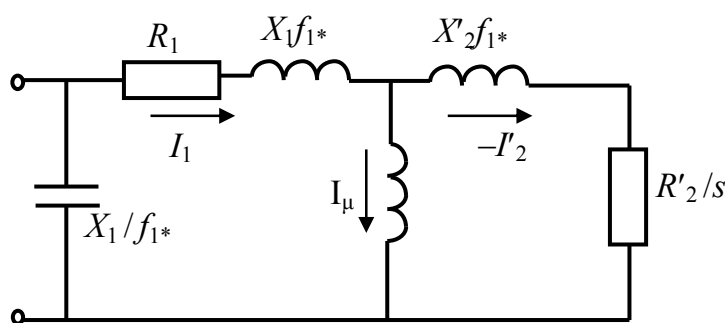


Рис. 1.60

$$I_1 \sqrt{R_1^2 + \left( X_1 f_{1*} - \frac{X_c}{f_{1*}} \right)^2} = I_\mu X_\mu f_{1*}, \quad (1.126)$$

где  $f_{1*} = \frac{f_1}{f_{1н}} = \frac{f_1}{50}$  — относительная частота тока в статоре.

В начале самовозбуждения тока в роторе нет и весь ток статора является намагничивающим, т. е.  $I_1 = I_\mu$ .

В этом случае выражение примет вид:

$$R_1^2 + \left( X_1 f_{\text{нач}^*} - \frac{X_c}{f_{\text{нач}^*}} \right)^2 = X_\mu^2 f_{\text{нач}^*}^2. \quad (1.127)$$

Пренебрегая активным  $R_1$  и реактивным сопротивлениями обмотки статора, получим:

$$f_{\text{нач}} = f_1 \sqrt{\frac{X_c}{X_\mu}}. \quad (1.128)$$

Учитывая, что  $\omega_{\text{нач}} = \frac{2\pi f_{\text{нач}}}{p}$  и  $\omega_{1\text{н}} = \frac{2\pi f_{1\text{н}}}{p}$ , можем записать:

$$\frac{f_{\text{нач}}}{f_{1\text{н}}} = \frac{\omega_{\text{нач}}}{\omega_{1\text{н}}}.$$

Тогда

$$\omega_{\text{нач}} = \omega_{1\text{н}} \sqrt{\frac{X_c}{X_\mu}} = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{2\pi f_{1\text{н}} C X_\mu}} = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{314 C X_\mu}}, \quad (1.129)$$

где  $\omega_{1\text{н}} = \omega_0$  – синхронная угловая скорость при частоте 50 Гц.

При работе двигателя в режиме самовозбуждения ток  $I_1$  сначала растет, достигает некоторого максимума, а при дальнейшем возрастании скорости ротора приближается к 0. Физически это означает, что вся реактивная мощность, генерируемая конденсаторами «потребляется» индуктивностями рассеяния. Иначе говоря, будет иметь место обмен реактивной энергией между конденсаторами и индуктивными полями рассеяния. При этом основной контур намагничивания в этом обмене энергии участия не принимает, что приводит к прекращению самовозбуждения. Таким образом, имеется и верхняя критическая граница существования режима самовозбуждения.

При  $I_\mu = 0$  эдс в обмотках статора и ротора, а также их сумма будут равны 0. Поэтому, пренебрегая активным сопротивлением обмоток статора и ротора, можно написать (рис. 1.60):

$$I_1 \left( X_1 f_{\text{кон}^*} - \frac{X_c}{f_{\text{кон}^*}} \right) + I_2' X_2' f_{\text{кон}^*} = 0, \quad (1.130)$$

где  $f_{\text{кон}}$  – относительная частота при исчезновении эдс в машине из-за уменьшения  $I_\mu$  до нулевого значения.

Так как  $I_\mu = 0$ , то  $I_1 = I_2'$ , при этом:

$$X_1 f_{\text{кон}^*} - \frac{X_c}{f_{\text{кон}^*}} + X_2' f_{\text{кон}^*} = 0. \quad (1.131)$$

Откуда конечная скорость ротора, при которой прекращается самовозбуждение:

$$\omega_{\text{кон}} = \omega_{1\text{н}} \sqrt{\frac{X_c}{X_1 + X'_2}} = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{2\pi f_{1\text{н}} C (X_1 + X'_2)}} = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{314C (X_1 + X'_2)}}. \quad (1.132)$$

С учетом активного сопротивления ротора и статора:

$$\omega_{\text{кон}} = \omega_0 \left( 1 + \frac{R'_2}{R_1} \right) \sqrt{\frac{1}{314C (X_1 + X'_2)}}. \quad (1.133)$$

Механические характеристики асинхронной машины в режиме торможения с самовозбуждением для различных значений емкости приведены на рис. 1.61.

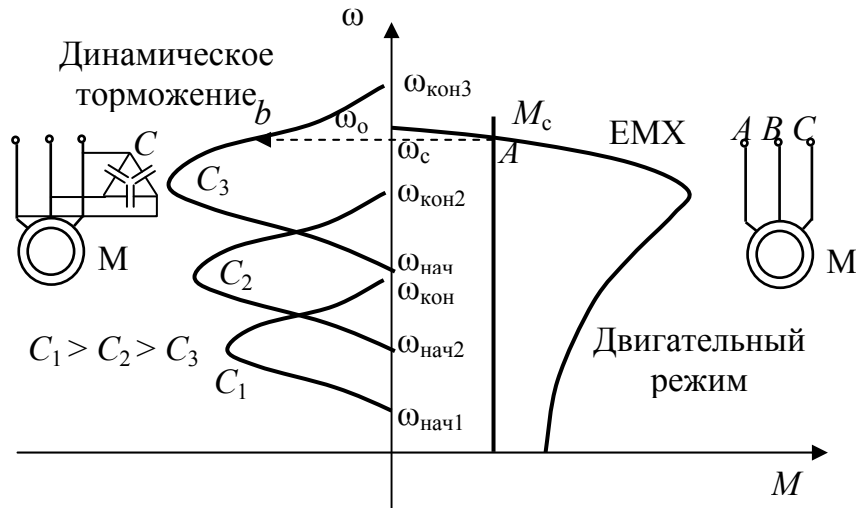


Рис. 1.61

Следует отметить, что изменение емкости конденсаторов приводит не только к сдвигу зоны торможения, но и к изменению максимального момента.

Максимум тормозного момента при уменьшении емкости перемещается в область более высоких скоростей, причем он может существенно превышать номинальный момент двигателя.

Недостатками динамического торможения с самовозбуждением является возникновение тормозного момента только при скорости  $\omega_{\text{нач}} > (0,3 \dots 0,5)\omega_0$ , срыв тормозного момента при  $\omega > \omega_{\text{кон}}$ , необходимость большой емкости для обеспечения тормозного эффекта при малых скоростях, ограниченность зоны торможения при каждой данной емкости.

Преимущество конденсаторного торможения перед другими способами заключается в том, что его можно применять без внешнего источника питания. Поэтому таким торможением пользуются чаще как аварийным.

### 1.4.3. Пуск асинхронных электродвигателей

Наиболее простым способом пуска двигателя с короткозамкнутым ротором является включение обмотки статора непосредственно в сеть на номинальное напряжение. Такой способ называется *прямым* (рис. 1.62).

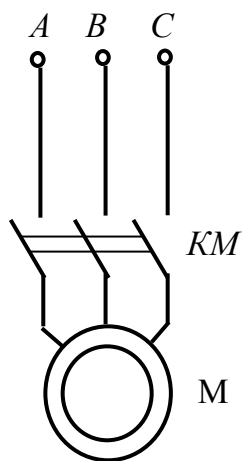


Рис. 1.62

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проектируются с таким расчетом, что могут выдерживать прямой пуск при токе, превышающем в (4...7,5) раз номинальный.

Современные энергетические сети обычно имеют такие мощности, что в подавляющем большинстве случаев позволяют осуществлять прямой пуск асинхронных двигателей, не вызывая недопустимо больших падений напряжения в сети.

Поэтому нормальным способом пуска двигателей с короткозамкнутым ротором является **прямой пуск**.

Однако часто встречаются ситуации, когда на объекте требуется подключить электродвигатель, который в пусковом режиме потребляет мощность, соизмеримую с мощностью подстанции. В этих случаях в период пуска мощных электродвигателей наблюдается значительное снижение напряжения, как на зажимах запускаемого электродвигателя, так и на других работающих нагрузках. Эта ситуация может привести к существенному увеличению продолжительности пуска электродвигателя, что приводит к его недопустимому нагреву, или остановке работавших электродвигателей (т.е. происходит их «опрокидывание»).

Если по условиям падения напряжения в сети прямой пуск двигателя невозможен (недопустим), применяются различные способы пуска при пониженном напряжении с учетом того, что при этом пропорционально квадрату напряжения на обмотках статора понижается также и пусковой момент, что является недостатком **непрямого** способа пуска. Поэтому, эти способы пуска применимы, когда возможен пуск двигателя на холостом ходу или при неполной нагрузке. Необходимость пуска на пониженном напряжении чаще всего встречается у мощных двигателей.

Применяются следующие способы облегчения пусковых режимов асинхронных двигателей на пониженном напряжении:

- переключением в период пуска обмоток статора двигателя по схеме «звезда – треугольник»;
- включение дополнительных сопротивлений на период пуска в цепь обмоток статора;
- автотрансформаторный пуск;
- применение устройств плавного пуска.

#### **Пуск переключением обмоток статора двигателя по схеме «звезда–треугольник»**

Для асинхронных двигателей, имеющих обмотки статора с рабочим напряжением 380/660 В и предназначенных для подключения к

сети 380 В по схеме «треугольник», используется схема пуска, приведенная на рис. 1.63.

Вначале включаются магнитные пускатели  $KM1$  и  $KM2$  – это схема соединения обмоток статора «звезда». Происходит пуск электродвигателя и его разбег до частоты вращения, близкой к номинальной по характеристике  $M_Y$ . Затем отключается магнитный пускатель  $KM1$ , включается –  $KM3$ , это схема соединения обмоток статора «треугольник», двигатель переходит на характеристику  $M_{\Delta}$  и разбег продолжается до точки  $a$  (рис. 1.64). Момент переключения схемы соединения обмоток статора электродвигателя определяется либо по скорости (используют датчик числа оборотов ротора), либо по времени (используют реле времени). Для правильного пуска электродвигателя необходимо определить скорость  $\omega_{пер}$  или время переключения.

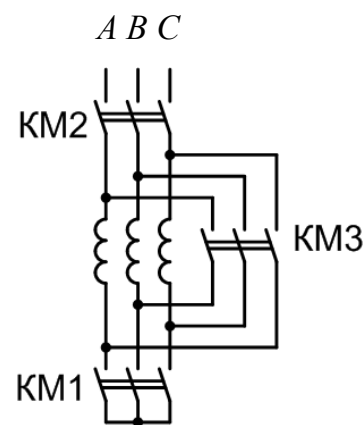


Рис. 1.63

Отношение линейных токов и моментов на валу электродвигателя при пуске по этой схеме включения составляет:

$$\frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{M_Y}{M_{\Delta}} = \frac{1}{3}, \quad (1.134)$$

где  $I_Y$  и  $I_{\Delta}$  – линейные токи при схемах включения «звезда» и «треугольник» соответственно;  $M_Y$  и  $M_{\Delta}$  – моменты при схемах включения «звезда» и «треугольник» соответственно.

#### Включение дополнительных сопротивлений в цепь обмотки статора

Для асинхронных двигателей можно использовать включение на время пуска дополнительных активных сопротивлений в обмотку статора (рис. 1.65).

Пуск электродвигателя с включением добавочных активных сопротивлений

в цепь обмоток статора применяется при пуске в режиме холостого хода, либо при небольшом моменте сопротивления исполнительного органа рабочей машины. Вначале включается магнитный пускатель  $KM1$ , происходит пуск электродвигателя и его разбег по характеристике  $M_R$  до скорости переключения  $\omega_{пер}$ , близкой к номинальной. Затем отключается магнитный пускатель  $KM1$  и включается  $KM2$ , двигатель переходит на естественную механическую характеристику (EMX) и разбег продолжается до точки  $a$  (рис. 1.66).

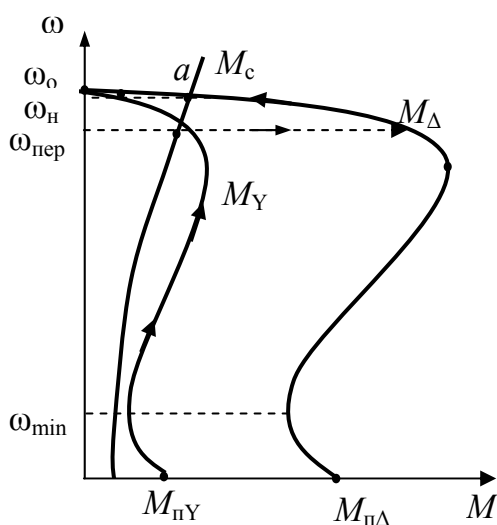


Рис. 1.64

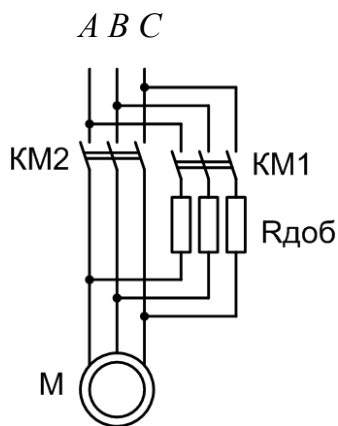


Рис. 1.65

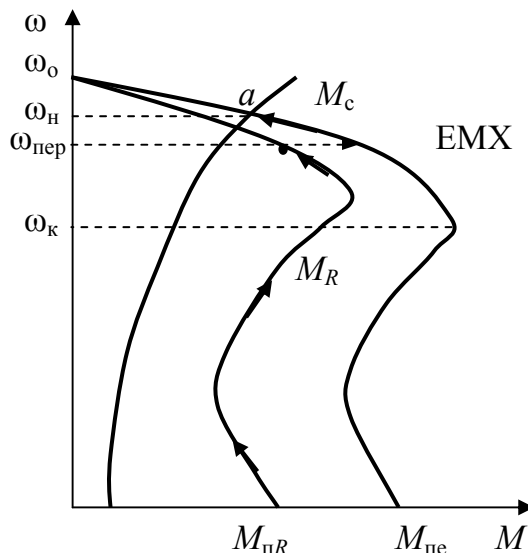


Рис. 1.66

Величину дополнительного сопротивления  $R_{доб}$  определяют расчетным путем, исходя из требуемого значения уменьшения пускового тока  $I_{пR}$  и с учетом допустимого снижения пускового момента  $M_{пR}$ :

$$\alpha = \frac{I_{пR}}{I_{п}} = \sqrt{\frac{M_{пR}}{M_{п}}}. \quad (1.135)$$

Чтобы уменьшить в  $\alpha$  раз пусковой ток, необходимо пропорционально увеличить сопротивление цепи статора электродвигателя:

$$R_{доб} = \sqrt{\left(\frac{Z_{к}}{\alpha}\right)^2 - X_{к}^2 - R_{к}}, \quad (1.136)$$

где  $Z_{к}$ ,  $R_{к}$  и  $X_{к}$  – полное, активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания электродвигателя соответственно.

### Автотрансформаторный пуск

Автотрансформаторный пуск осуществляется по схеме, приведенной на рис. 1.68 в такой последовательности. Сначала включаются магнитные пускатели  $KM1$  и  $KM2$ . На двигатель через автотрансформатор  $ATV$  подается пониженное напряжение, происходит пуск электродвигателя и его разбег по характеристике  $M_U$ . После достижения двигателем скорости  $\omega_{пер}$ , близкой к номинальной, отключается магнитный пускатель  $KM2$ , включается магнитный пускатель  $KM3$ , двигатель подключается на полное напряжение, переходит на естественную механическую характеристику (EMX) и разбег продолжается до точки  $a$  (рис. 1.69).

Если автотрансформатор понижает пусковое напряжение двигателя в  $k$  раз, то пусковой ток  $I_{п}$  в двигателе или на стороне низкого напряжения автотрансформатора  $ATV$  уменьшается также в  $k$  раз, а пусковой ток  $I_{пс}$  на стороне высокого напряжения уменьшается в  $k^2$  раз (рис. 1.67).



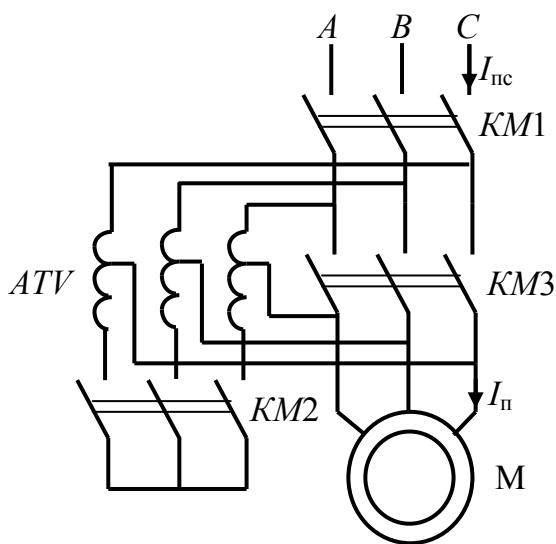


Рис. 1.67

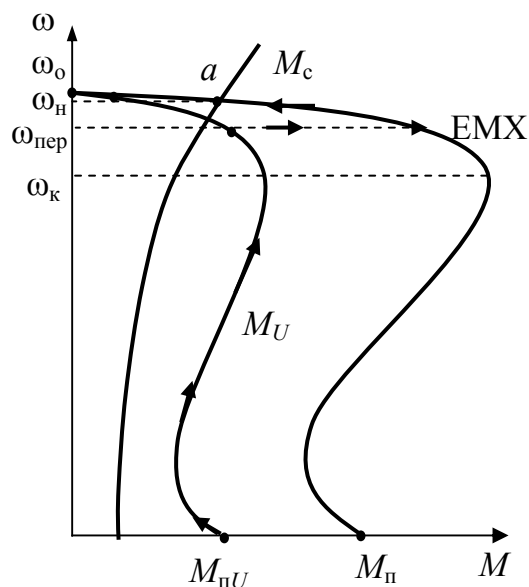


Рис. 1.68

Пусковой момент  $M_{пU}$ , пропорциональный квадрату напряжения на зажимах двигателя, также уменьшается в  $k^2$  раз. При одинаковых значениях пусковой момент при автотрансформаторном пуске будет больше, чем при реостатном пуске. Однако это преимущество автотрансформаторного пуска достигается ценой значительного усложнения и удорожания пусковой аппаратуры.

### Устройства плавного пуска

Устройства плавного пуска (УПП) это электронные пускатели. Они уменьшают величину напряжения на обмотках статора электродвигателя и позволяют плавно запустить и разогнать электродвигатель до его номинальных оборотов.

Устройства плавного пуска позволяют задавать величину начального пускового напряжения, как правило, в диапазоне 20...100 % от номинального напряжения, время нарастания этого напряжения до величины напряжения сети, задается обычно в диапазоне 0,5...20 с. При большем времени разгона пусковой ток будет минимальным. Однако следует выбирать его оптимальным, обычно 10...20 с, в зависимости от типа нагрузки. За счет этих регулировок обеспечиваются широкие функциональные возможности устройств плавного пуска, т.е. одно и то же устройство можно использовать для рабочих машин, имеющих различные механические характеристики.

Для регулирования величины напряжения на обмотках статора электродвигателя в устройствах плавного пуска в двух (рис. 1.69) или в трех фазах (рис. 1.70) обмотки установлены два встречно-параллельно включенных тиристора  $VS1-VS2$ ,  $VS3-VS4$  и  $VS5-VS6$ .

После окончания режима пуска электродвигателя тиристоры  $VS1-VS6$  блокируются силовыми контактами магнитного пускателя  $KM$ , эта блокировка называется «байпас».

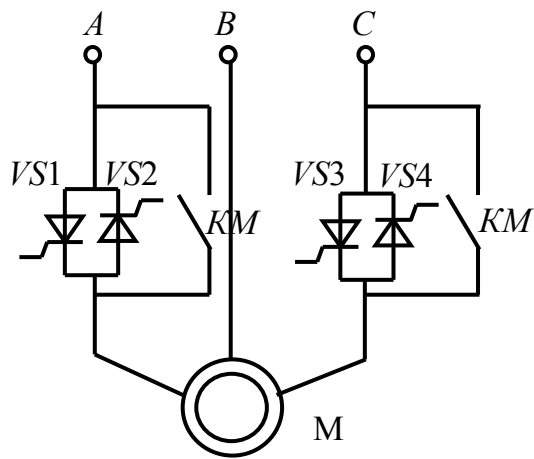


Рис. 1.69

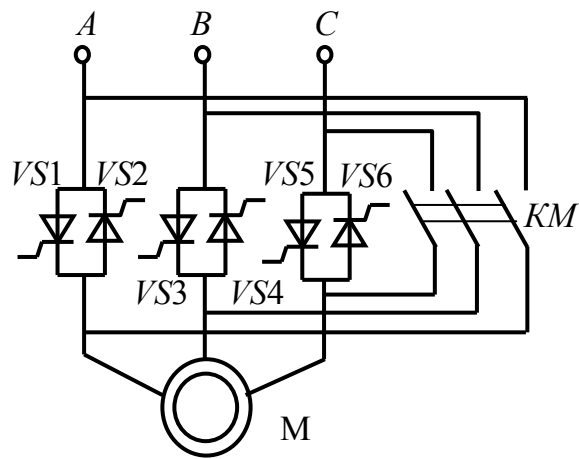


Рис. 1.70

Управление работой тиристорov осуществляется регулируемой фазовой отсечкой, этот сигнал вырабатывается электронным блоком. Сначала подается на обмотки электродвигателя пониженное напряжение, затем напряжение плавно повышается до номинального значения. После разгона двигатель работает от сетевого напряжения. Временные диаграммы работы тиристорov для одной фазы питающего напряжения приведены на рис. 1.71.

Тиристор находится в проводящем состоянии только после подачи сигнала на его управляющий электрод. Он проводит только одну полуволну переменного напряжения:  $VS1$  – положительную полуволну;  $VS2$  – отрицательную полуволну. Поэтому тиристоры  $VS1$  и  $VS2$  включены встречно-параллельно (рис. 1.69, 1.70), за счет этого они могут работать в цепях переменного напряжения.

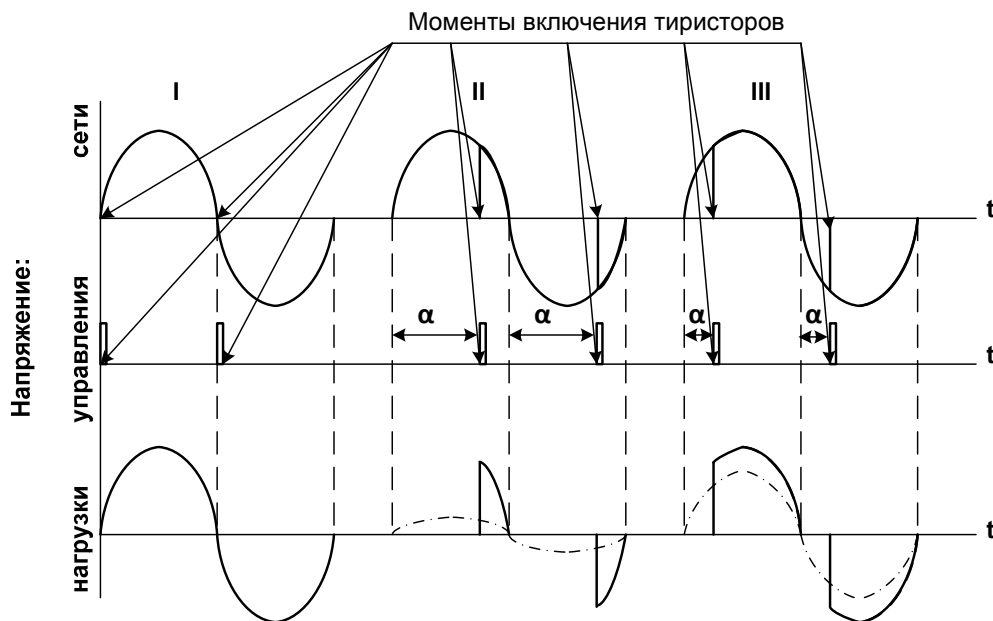


Рис. 1.71

Схема управления тиристорами вырабатывает импульсные сигналы для их включения, эти сигналы синхронизированы с фазой питаю-

щего напряжения сети. Включение тиристора происходит при подаче на его управляющий электрод импульсного сигнала (рис. 1.71). Включенный тиристор может отключиться только в момент перехода через ноль полуволны входного напряжения. Изменяя момент подачи управляющего сигнала можно регулировать напряжение на нагрузке, т.е. на обмотке статора электродвигателя.

На рис. 1.71 показаны три режима работы тиристоров:

I – угол отсечки равен нулю ( $\alpha = 0$ ), на нагрузку подается все напряжение сети;

II – угол отсечки более  $90^\circ$  ( $\alpha > 0$ ), на нагрузку подается менее половины напряжения сети;

III – угол отсечки менее  $90^\circ$  ( $\alpha < 0$ ), на нагрузку подается более половины напряжения сети.

Там же показаны эпюры напряжения на нагрузке при различных углах отсечки (сплошные линии) и эквивалентное синусоидальное напряжение на нагрузке во всех трех вариантах (штрих – пунктирные линии).

Устройства плавного пуска применяются для управления электроприводами вентиляторов, насосов, сепараторов, транспортеров, установок кондиционирования, воздуходувок, компрессоров и холодильников и др.

При выборе УПП необходимо учитывать характер работы механизма, т.е. необходимо согласовывать механические характеристики рабочей машины и электродвигателя, например, транспортера (рис. 1.72) или вентилятора (рис. 1.73). Задаются начальное напряжение и время пуска, электродвигатель запускается на искусственной механической характеристике (пунктирные линии), которая формируется в период пуска повышением напряжения, обеспечивая при этом постоянный

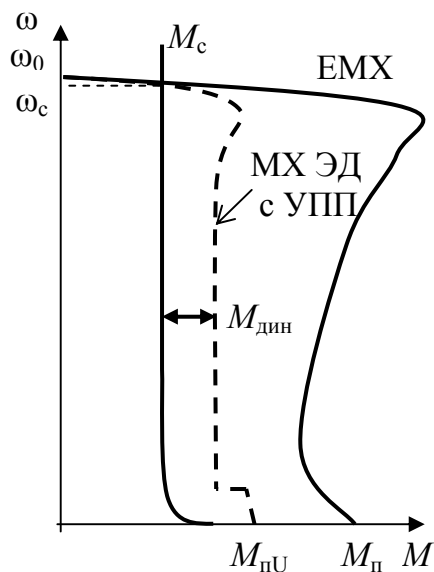


Рис. 1.72

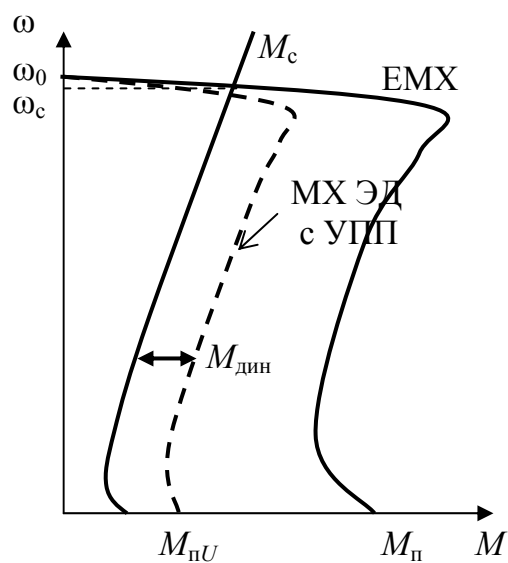


Рис. 1.73

динамический момент  $M_{дин}$ , как правило, в пределах  $0,2...0,3$  номинального момента двигателя. Для уменьшения пускового тока начальное напряжение лучше устанавливать минимально возможным. Однако в зависимости от конкретного случая может потребоваться большой пусковой момент  $M_{пU}$ , чтобы двигатель мог тронуться с места (рис. 1.72). В этом случае двигатель запускается при повышенном напряжении, затем напряжение снижается и далее повышается, обеспечивая пуск с постоянным динамическим моментом  $M_{дин} = (0,2...0,3)M_n$ . При достижении двигателем скорости  $\omega_c$  тиристоры  $VS1-VS6$  блокируются силовыми контактами магнитного пускателя  $KM$ , эта блокировка называется «байпас», двигатель переходит на естественную механическую характеристику (EMX).

### Включение дополнительных сопротивлений в цепь обмотки ротора

Для осуществления данного способа пуска используют асинхронные двигатели с фазным ротором, в цепь которого включается пусковой реостат. Этот способ применяют при тяжелых условиях пуска – при большой нагрузке на валу, когда требуется большой пусковой момент, либо при большом моменте инерции механизма, когда требуется

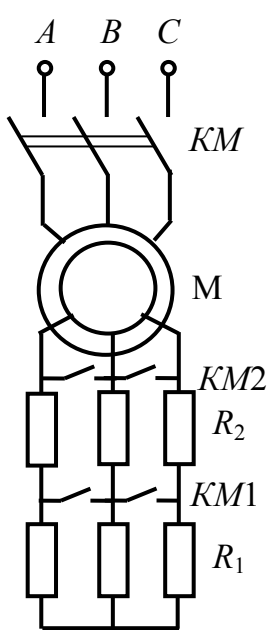


Рис. 1.74

снижение пускового тока, позволяющего существенно снизить потери при продолжительном пуске. Включение пускового реостата в цепь ротора двигателя не только снижает начальный пусковой ток, но одновременно увеличивает начальный пусковой момент, который может достигнуть критического. По мере разгона двигателя пусковой реостат выводится и после окончания пуска обмотка ротора оказывается замкнутой накоротко.

Схема силовой цепи двигателя при пуске в две ступени пусковых сопротивлений приведена на рис. 1.74.

Отличие расчета пусковых сопротивлений АД от расчета для ДПТ заключается лишь в том, что при пуске максимальные пики момента в ДПТ ограничивались коммутацией, а для АД – динамическими усилиями в обмотках и их нагревом от увеличенных токов при больших скольжениях. Поэтому максимальное значение пускового момента нужно принимать не более  $0,85$  от критического.

Для расчета пускового реостата чаще используется графоаналитический способ.

Рассмотрим построение диаграммы для расчета сопротивлений ступеней пускового реостата (рис. 1.75).

1. Построить естественную механическую характеристику (EMX) электродвигателя.

2. Построить механическую характеристику рабочей машины  $M_c$ .

3. В зависимости от требуемых пусковых условий задаются максимальным и минимальным (переключающим) моментами:

$$M_{\max} = (0,8 \dots 0,85) M_k; \quad M_{\min} = (1,1 \dots 1,3) M_c. \quad (1.137)$$

4. Через точки  $a$  и  $b$  строится прямая до пересечения в точке  $O$  с перпендикуляром, проведенным из точки  $\omega_0$ .

5. Из точки  $O$  строится первая пусковая механическая характеристика 1, проходящая через максимальный момент при скорости, равной нулю:

- в точке с координатами  $(M_{\min}, \omega_1)$  происходит закорачивание первого пускового сопротивления  $R_1$  и двигатель переходит на пусковую характеристику 2.

- в точке с координатами  $(M_{\min}, \omega_2)$  происходит закорачивание второго пускового сопротивления  $R_{x2}$  и двигатель переходит на EMX.

Бросок момента при переходе двигателя на естественную характеристику должен быть равен допустимому моменту  $M_{\max}$ , т.е. двигатель должен перейти в точку  $b$ . Если это не происходит, то необходимо изменить либо момент переключения  $M_{\min}$ , либо максимальный  $M_{\max}$  в пределах указанных ранее значений (1.137).

По пусковой диаграмме отрезки  $eb$ ,  $bc$  и  $cd$  пропорциональны сопротивлениям роторной цепи. Масштаб сопротивлений определяют по отрезку  $ab$ , который пропорционален сопротивлению якоря:

$$m_R = \frac{R_{2H}}{\overline{ab}}, \quad (1.138)$$

где  $R_{2H} = \frac{E_{2K} S_H}{\sqrt{3} I_{2H}}$  – номинальное сопротивление ротора,  $\overline{ab}$  – отрезок на пусковой диаграмме, соответствующий номинальному сопротивлению ротора, мм.

Тогда сопротивления ступеней пускового реостата равны:

$$R_1 = m_R \overline{cd}; \quad R_2 = m_R \overline{bc}; \quad (1.139)$$

всего реостата:

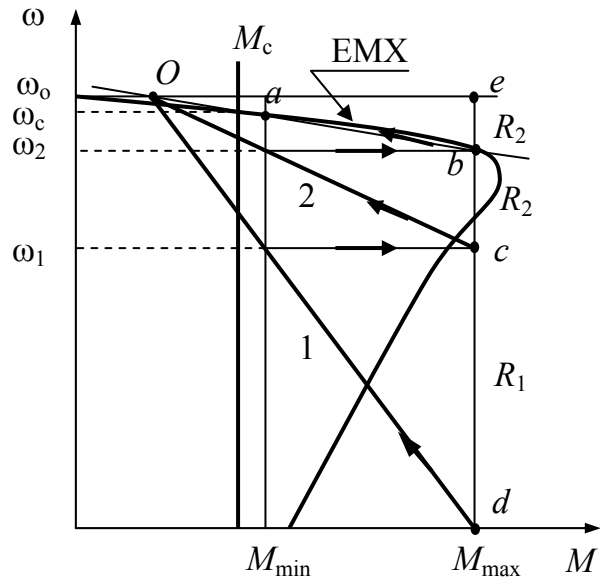


Рис. 1.75

$$R_{\text{реост}} = m_R \overline{bd} = R_1 + R_2. \quad (1.140)$$

Схема силовой цепи двигателя при пуске в две ступени пусковых сопротивлений приведена на рис. 1.74.

В начальный момент пуска на статор двигателя при замыкании контакта *КМ* подается напряжение, при этом величина добавочного сопротивления максимальна  $R_1 + R_2$ , происходит бросок момента до момента равного  $M_{\max}$  (рис. 1.75). Двигатель начинает разгон по характеристике 1. По мере разгона двигателя до скорости  $\omega_1$  и снижения момента до значения  $M_{\min}$  контактами *КМ1* шунтируется резистор  $R_1$ , и двигатель переходит на характеристику 2 с добавочным сопротивлением  $R_2$ . Момент снова скачком увеличивается до максимального  $M_{\max}$ , двигатель разгоняется до скорости  $\omega_2$ , момент снижется до значения  $M_{\min}$  и контактом *КМ2* шунтируется резистор  $R_2$ . Если расчет сопротивлений ступеней пускового реостата сделан правильно, то на всех характеристиках максимальный  $M_{\max}$  и минимальный  $M_{\min}$  моменты получатся одинаковыми. Процесс пуска заканчивается установившимся режимом в точке  $\omega_c$ , где момент двигателя уравнивается моментом сопротивления механизма  $M_c$ .

### Контрольные вопросы

1. Начертите схему замещения асинхронного электродвигателя (АД) и назовите основные допущения, принятые при выводе уравнений электромеханической и механической характеристик.

2. Начертите электромеханическую характеристику АД и назовите ее характерные точки.

3. Построение естественной электромеханической характеристики асинхронного двигателя.

4. Начертите механическую характеристику АД с фазным ротором.

5. Назовите основные способы построения естественной механической характеристики АД.

6. В каких диапазонах изменяется скольжение АД в двигательном режиме, в режиме генераторного и динамического торможения, в режиме торможения противовключением?

7. Что такое перегрузочная способность АД, какова ее зависимость от величины напряжения питающей сети?

8. Как изменится форма механической характеристики АД при увеличении активного сопротивления: а) в цепи ротора; б) в цепи статора; в) при уменьшении напряжения питающей сети?

9. Построение механических характеристик.

10. Особенности работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.

11. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме рекуперативного торможения.
12. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме торможения противовключением переменной чередования фаз.
13. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме торможения противовключением (тормозной спуск).
14. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением.
15. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с самовозбуждением.
16. Особенности, достоинства, недостатки и применение прямого пуска асинхронных двигателей.
17. Каким образом можно увеличить величину пускового момента в асинхронных двигателях с короткозамкнутым и фазным ротором?
18. Особенности, достоинства, недостатки и применение автотрансформаторного пуска асинхронных двигателей.
19. Особенности, достоинства, недостатки и применение способа пуска путем переключения обмоток статора со звезды на треугольник асинхронных двигателей.
20. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором.
21. Расчет сопротивлений ступеней пускового реостата.
22. Пуск асинхронных двигателей с помощью устройств плавного пуска.

## Глава 2 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1. Основные показатели регулирования скорости электропривода

Регулированием скорости электропривода называется ее целенаправленное изменение в соответствии с требованиями технологического процесса. Регулирование скорости возможно изменением угловой скорости электродвигателя либо изменением передаточного числа механического устройства, устанавливаемого между электродвигателем и рабочей машиной. В настоящее время наибольшее применение находит первый способ – регулирование скорости приводного электродвигателя.

Для оценки различных способов регулирования скорости и сопоставления их между собой используются основные показатели:

- диапазон регулирования скорости;
- направление регулирования скорости;
- плавность регулирования;
- стабильность скорости;
- экономичность;
- допустимая нагрузка при регулировании скорости.

1. **Диапазон регулирования скорости** определяется отношением средних значений максимальной  $\omega_{\text{ср. max}}$  и минимальной  $\omega_{\text{ср. min}}$  скоростей при заданных пределах изменения нагрузки на валу двигателя и точности регулирования:

$$D = \frac{\omega_{\text{ср. max}}}{\omega_{\text{ср. min}}}. \quad (2.1)$$

Верхний предел регулирования ограничивается максимально допустимым или максимально реализуемым значением скорости, нижний – минимально реализуемым значением скорости или требуемой точностью регулирования.

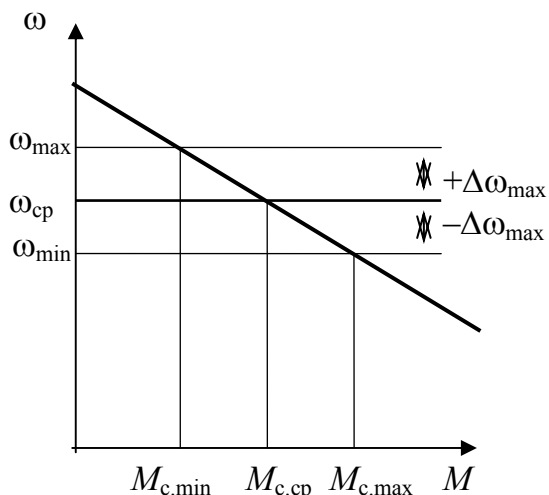


Рис. 2.1

Точность регулирования скорости определяется возможными отклонениями ее от заданного значения под действием возмущающих факторов, например изменения нагрузки на валу двигателя (рис. 2.1).

Количественной оценкой точности регулирования может служить отношение наибольшего отклонения скорости  $\Delta\omega_{\text{max}}$  к среднему значению  $\omega_{\text{ср}}$ :



$$\Delta\omega_{\max*} = \frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_{\text{ср}}}, \quad (2.2)$$

при этом должно выполняться условие:

$$\Delta\omega_{\max*} \leq \Delta\omega_{\text{доп}*}, \quad (2.2a)$$

где  $\Delta\omega_{\text{доп}*}$  – относительная допустимая ошибка регулирования.

Влияние точности на диапазон регулирования поясняется характеристиками на рис. 2.2.

На рис. 2.2 показаны максимальное среднее  $\omega_{\text{ср.max}}$  и минимальное среднее  $\omega_{\text{ср.min}}$  допустимые значения скорости и ее отклонения  $\Delta\omega_{\max1}$  и  $\Delta\omega_{\max2}$ . Скорость  $\omega_{\text{ср.min}}$  принята по условию точности регулирования, чтобы выполнялось соотношение:

$$\Delta\omega_{\max2*} = \frac{\Delta\omega_{\max2}}{\omega_{\text{ср.min}}} \leq \Delta\omega_{\text{доп}}.$$

В тех случаях, когда не задана  $\Delta\omega_{\text{доп}*}$  при регулировании, обычно принимают зону изменения момента статической нагрузки от 0 до  $(1,5 \dots 2)M_c$ , где  $M_c$  – расчетное значение момента статической нагрузки (рис. 2.3). При этом нижний предел угловой скорости равен  $\omega_{\text{ср.min}}$ .

Диапазон регулирования выражается, как правило, в виде отношения, например: 2:1, 10:1 и т.д.

## 2. Направление регулирования скорости определя-

ется расположением получаемых искусственных механических характеристик относительно естественной. Если они располагаются выше естественной, то это регулирование скорости  $\omega_{c1}$  вверх от основной, если ниже, т.е.  $\omega_{c2}$  – вниз от основной (рис. 2.4).

Направление регулирования определяется способом регулирования и может быть однозонным (вверх или вниз) либо двухзонным (вверх и вниз).

**3. Плавность регулирования** характеризуется разностью двух последовательных значений скорости, получаемых на искусственных характеристиках, и определяется их числом в данном диапазоне регулирования. Плавность оценивается коэффициентом, который находят-

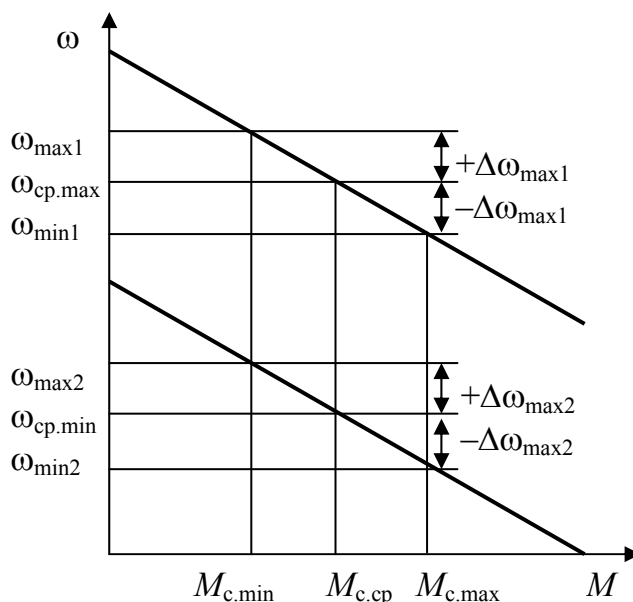


Рис. 2.2

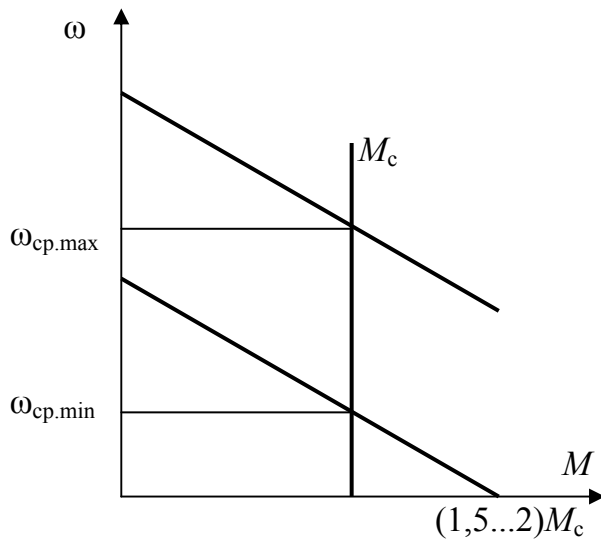


Рис. 2.3

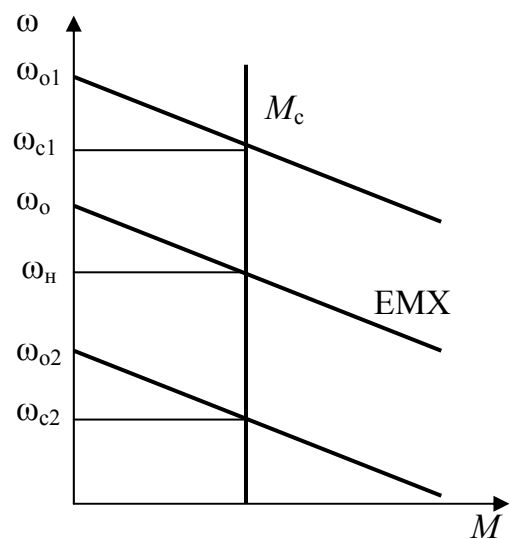


Рис. 2.4

ся как отношение скоростей на соседних механических характеристиках (рис. 2.5):

$$k_{\text{пл}} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}}, \quad (2.4)$$

где  $\omega_i$  и  $\omega_{i-1}$  – скорости на  $i$ -й и  $(i - 1)$ -й механических характеристиках, причем  $\omega_i > \omega_{i-1}$ .

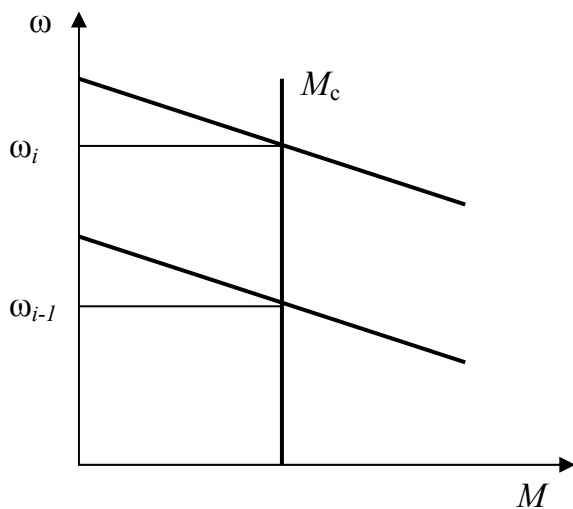


Рис. 2.5

при наличии изменений нагрузочного момента в пределах от  $M_{c,\text{min}}$  до  $M_{c,\text{max}}$  отклонение угловой скорости  $\Delta\omega_{\text{max}2}$  будет больше  $\Delta\omega_{\text{max}1}$ .

**5. Важным показателем регулируемого электропривода является его экономичность, кото-**

**4. Стабильность скорости** характеризуется изменением скорости  $\Delta\omega$  двигателя при заданном отклонении момента нагрузки на валу и зависит от жесткости  $\beta$  механической характеристики (рис. 2.6). Стабильность тем ниже, чем меньше жесткость характеристики, так как

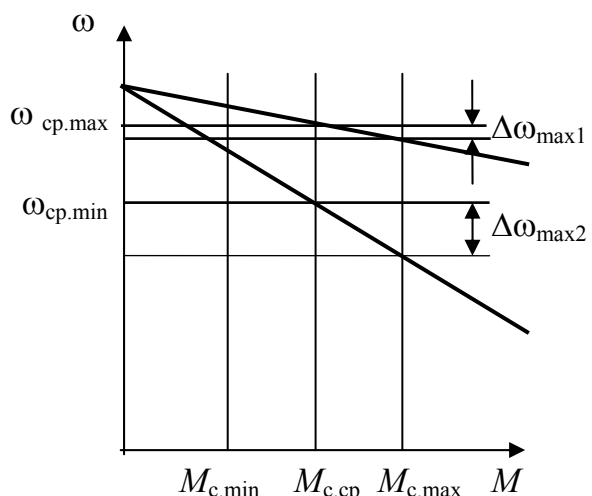


Рис. 2.6

рая определяется технико-экономическим расчетом, учитывающим капитальные и эксплуатационные затраты, надежность работы установки и т.д.

Эксплуатационные затраты, как правило, оцениваются по технико-энергетическим показателям: КПД и коэффициенту мощности. При работе двигателя с различными скоростями определяют средневзвешенный КПД:

$$\eta_{св} = \frac{\sum_1^n P_{2i} t_i}{\sum_1^n (P_{2i} + \Delta P_i) t_i}, \quad (2.5)$$

где  $P_{2i}$ ,  $\Delta P_i$ ,  $t_i$  – соответственно мощность на валу, потери мощности и время работы двигателя на  $i$ -й скорости;  $n$  – число ступеней скорости.

Средневзвешенное значение коэффициента мощности определяют по выражению

$$\cos \varphi_{св} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\sum_1^n \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}, \quad (2.6)$$

где  $P_i$ ,  $Q_i$  – соответственно активная и реактивная потребляемые мощности.

Для регулируемых электроприводов с вентильными преобразователями (тиристорные, транзисторные), которые вносят искажения в форму потребляемого из сети тока, коэффициент мощности

$$\chi = v \cos \varphi_1, \quad (2.7)$$

где  $\varphi_1$  – сдвиг по фазе между первой гармоникой потребляемого тока и напряжением сети;  $v$  – коэффициент искажений, характеризующий отношение эффективного значения первой гармоники тока к эффективному значению реальной кривой потребляемого тока, содержащей высшие гармонические составляющие.

**6. Допустимая механическая нагрузка** на валу электродвигателя при различных значениях скорости определяется его нагревом, который зависит от величины тока, протекающего по обмоткам двигателя, и условий охлаждения. Если предположить, что условия охлаждения двигателя остаются неизменными на любой скорости, то двигатель будет загружен полностью при токе, равном номинальному значению. Таким образом, для определения допустимого момента необходимо найти его величину, соответствующую номинальному току электродвигателя при различных значениях скорости. В других случаях при ухудшении условий охлаждения двигателя при снижении скорости следует снижать ток в обмотках.

## 2.2. Способы регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого возбуждения

Проанализировав уравнение механической характеристики

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{(k\Phi)^2} M, \quad (2.8)$$

укажем следующие способы регулирования скорости двигателя:

- изменением дополнительного сопротивления  $R_{\text{х}}$  в цепи якоря (реостатный);

- изменением магнитного потока  $\Phi$  двигателя;

- изменением подводимого к якорю двигателя напряжения  $U$ .

Семейство регулировочных характеристик двигателя при всех способах можно получить, проанализировав, как изменяется скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  и жесткость механических характеристик  $\beta$ :

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}; \quad \beta = \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}. \quad (2.9)$$

### 2.2.1. Реостатный способ регулирования скорости

При реостатном способе регулирования  $\omega_0$  не зависит от  $R_{\text{х}}$ , а жесткость механических характеристик с увеличением  $R_{\text{х}}$  уменьшается (рис. 2.7), т.е. они становятся более мягкими.

Построение реостатных механических характеристик при заданных значениях  $R_{\text{х}}$  производится по выражениям (1.28) и (1.30). Иногда в качестве второй точки определяют значение момента короткого замыкания:

$$M_{\text{кз}} = k\Phi_{\text{н}} \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}. \quad (2.10)$$

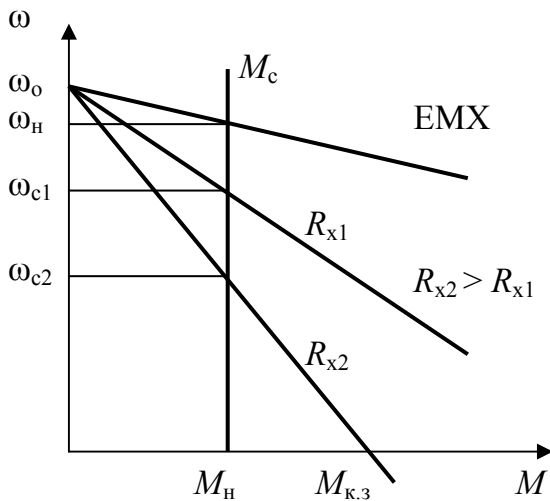


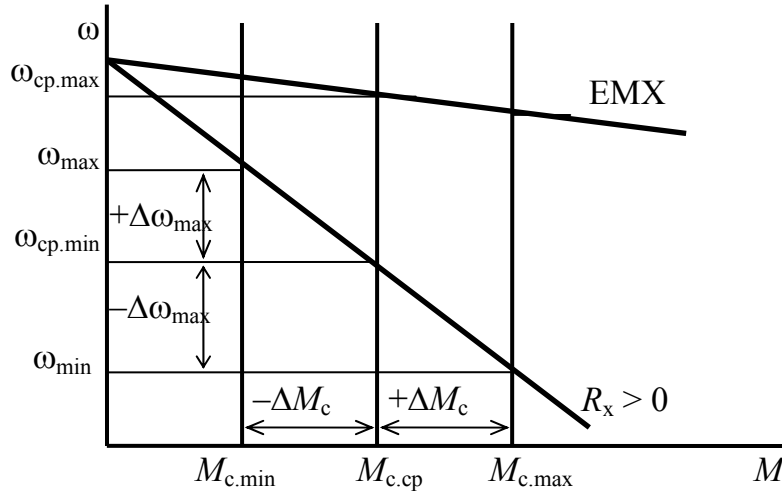
Рис. 2.7

Оценим данный способ регулирования скорости двигателя по основным показателям.

1. Диапазон регулирования скорости небольшой и обычно составляет  $D = 1,5 \dots 2,5$  даже при невысокой требуемой точности регулирования. Введение сопротивления  $R_{\text{х}}$  приводит к снижению средней скорости от  $\omega_{\text{ср.макс}}$  до  $\omega_{\text{ср.мин}}$  (рис. 2.8) при моменте сопротивления  $M_{\text{с.ср.}}$ .

При изменении статической нагрузки в пределах от  $M_{\text{с.мин}}$  до  $M_{\text{с.макс}}$  абсолютная ошибка регулирования составит:

$$\Delta\omega_{\max} = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{2}. \quad (2.11)$$



**Рис. 2.8**

Учитывая, что модуль жесткости

$$\beta_R = \frac{\Delta M_c}{\Delta \omega_{\max}} = \frac{M_{c.\max} - M_{c.\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}},$$

получим:

$$\Delta\omega_{\max} = \frac{M_{c.\max} - M_{c.\min}}{2\beta_R}, \quad (2.12)$$

где  $\beta_R$  – модуль жесткости реостатной характеристики.

Тогда относительная ошибка регулирования:

$$\Delta\omega_{\max*} = \frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_{\text{ср}}} = \frac{M_{c.\max} - M_{c.\min}}{2\beta_R \omega_{\text{ср}}}. \quad (2.13)$$

Таким образом, по мере увеличения сопротивления  $R_x$  абсолютная и относительная ошибки регулирования увеличиваются из-за уменьшения  $\beta_R$  и  $\omega_{\text{ср}}$ , что существенно ограничивает диапазон регулирования скорости.

Возможный диапазон регулирования  $D$  при заданной точности  $\Delta\omega_{\max} = \Delta\omega_{\text{доп}}$  можно получить из выражения (2.13), если принять, что  $\omega_{\text{ср}} = \omega_{\text{ср.мин}}$ ,  $\omega_{\text{ср.маx}} = \omega_{\text{ном}}$  (при  $M_{\text{с.сп}} = M_{\text{ном}}$ ). С учетом того, что

$$D = \frac{\omega_{\text{ср.маx}}}{\omega_{\text{ср.мин}}} = \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ср.мин}}}, \quad (2.14)$$

а отсюда  $\omega_{\text{ср.мин}} = \frac{\omega_{\text{ном}}}{D}$ ,

получим:

$$\Delta\omega_{\text{доп}*} = \frac{M_{c.\max} - M_{c.\min}}{2\beta_R \omega_{\text{ном}}} D. \quad (2.15)$$

Отсюда диапазон регулирования:

$$D = \frac{2\beta_R \omega_{\text{НОМ}} \Delta\omega_{\text{доп}^*}}{M_{\text{с.маx}} - M_{\text{с.мин}}} = \frac{\beta_R \omega_{\text{НОМ}} \Delta\omega_{\text{доп}^*}}{\Delta M_{\text{с}}}, \quad (2.16)$$

так как  $\Delta M_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с.маx}} - M_{\text{с.мин}}}{2}$ .

Из (2.16) следует, что диапазон регулирования определяется допустимой точностью  $\Delta\omega_{\text{доп}^*}$ , жесткостью реостатной механической характеристики  $\beta_R$  и величиной отклонения  $\Delta M_{\text{с}}$  статической нагрузки от среднего значения. Чем выше требуемая точность регулирования  $\Delta\omega_{\text{доп}}$ , тем меньше диапазон регулирования. Диапазон регулирования также уменьшается при увеличении пределов изменения статической нагрузки, т.е. с ростом  $\Delta M_{\text{с}}$ .

2. Из анализа уравнения механической характеристики (2.8) и рис. 2.7 следует, что при реостатном регулировании направление регулирования скорости – вниз от основной, так как все характеристики расположены ниже естественной.

3. Плавность регулирования скорости зависит от способа изменения величины сопротивления резистора  $R_x$ . При малой мощности электродвигателя возможно плавное изменение сопротивления, например с помощью ползункового реостата. Обычно сопротивление  $R_x$  изменяется ступенчато с помощью контакторов. В этом случае плавность регулирования зависит от числа ступеней. Обычно число ступеней составляет 3–6 и определяется стремлением уменьшить стоимость системы управления.

4. Стабильность скорости снижается по мере увеличения сопротивления  $R_x$ , так как увеличивается отклонение скорости от среднего значения при заданном изменении момента на валу двигателя ( $\Delta\omega_{\text{маx2}} > \Delta\omega_{\text{маx1}}$ , рис. 2.9). Относительный перепад скорости  $\Delta\omega_{\text{маx2}} / \omega_{\text{ср.мин}}$  также увеличивается.

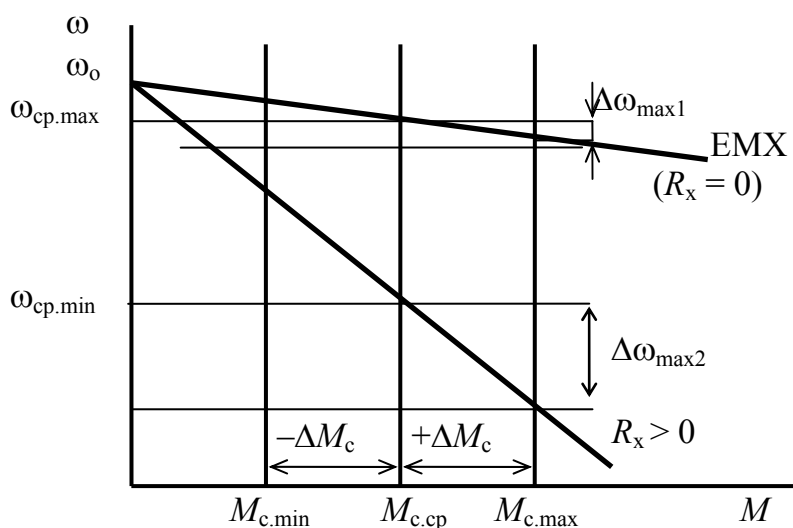


Рис. 2.9

5. Недостатком реостатного способа регулирования является увеличение потерь энергии в цепи якоря при снижении скорости, что ведет к снижению КПД и увеличению расхода электроэнергии.

Запишем для ДПТ уравнение баланса мощностей для

двигательного режима без учета потерь на возбуждение и механических потерь:

$$P_c = P_{эм} + \Delta P, \quad (2.17)$$

где  $P_c = UI$  – мощность, потребляемая двигателем из сети,  $P_{эм} = EI$  – электромагнитная мощность;  $\Delta P$  – потери мощности в якорной цепи.

Отсюда

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_c - P_{эм} = UI - EI = k\Phi\omega_0 I - k\Phi\omega I = k\Phi I (\omega_0 - \omega) = \\ &= M (\omega_0 - \omega) = M\omega_0 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = M\omega_0 \delta. \end{aligned}$$

Итак,

$$\Delta P = M\omega_0 \delta, \quad (2.18)$$

где  $\delta = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$  – относительный перепад скорости.

Таким образом, потери мощности в якорной цепи при снижении скорости увеличиваются.

Кпд можно определить по выражению:

$$\eta = \frac{P_{эм}}{P_c} = \frac{P_c - \Delta P}{P_c} = \frac{M\omega_0 - M\omega_0 \delta}{M\omega_0} = \frac{M\omega_0 (1 - \delta)}{M\omega_0}. \quad (2.19)$$

В случае регулирования скорости при  $M = \text{const}$ :

$$\eta = 1 - \delta. \quad (2.20)$$

Из (2.20) видно, что при снижении скорости, например, в 2 раза по сравнению с номинальной при  $M = \text{const}$ , т.е. при  $\delta \approx 0,5$  и  $D \approx 2$ , КПД составит не более 50 %. При больших диапазонах  $\eta$  снижается еще в большей степени. Поэтому диапазон регулирования при реостатном способе, как правило, не превышает 2...2,5.

Капитальные затраты при реализации данного способа невелики. Поэтому, несмотря на невысокие энергетические показатели, реостатное регулирование скорости из-за простоты используется достаточно широко, когда требуется небольшой диапазон регулирования и кратковременный характер работы на пониженных скоростях (подъемные краны, металлорежущие станки, мобильные кормораздатчики).

6. Допустимую нагрузку на электродвигатель на регулировочных характеристиках определим из предположения, что двигатель имеет независимую вентиляцию, магнитный поток  $\Phi = \Phi_n$  и ток якоря  $I = I_n$ .

Тогда допустимый момент при регулировании

$$M_{доп} = k\Phi_n I_n = M_n = \text{const}, \quad (2.21)$$

т.е. равен номинальному моменту электродвигателя.

Таким образом, реостатное регулирование скорости с точки зрения полного использования двигателя по нагреву – есть регулирование

при постоянном допустимом моменте статической нагрузки. Поэтому данный способ наиболее целесообразно использовать для машин, у которых момент нагрузки не зависит от скорости:  $M_c = \text{const}$ .

В случаях, когда двигатель охлаждается за счет собственного вентилятора на валу, при снижении скорости ухудшается охлаждение и требуется существенное снижение нагрузки.

### 2.2.2. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением магнитного потока

Изменение магнитного потока при данном способе регулирования возможно только в сторону его уменьшения по сравнению с номинальным за счет уменьшения тока возбуждения по следующим причинам:

- магнитная система электродвигателя уже при номинальном потоке близка к насыщению;
- обмотка возбуждения двигателя рассчитывается по нагреву на ток, необходимый для получения номинального потока.

Ток возбуждения регулируется: у двигателей малой и средней мощности с помощью резистора  $R_B$  (рис. 2.10а), у двигателей большей мощности – с помощью регулятора напряжения УВ (рис. 2.10б).

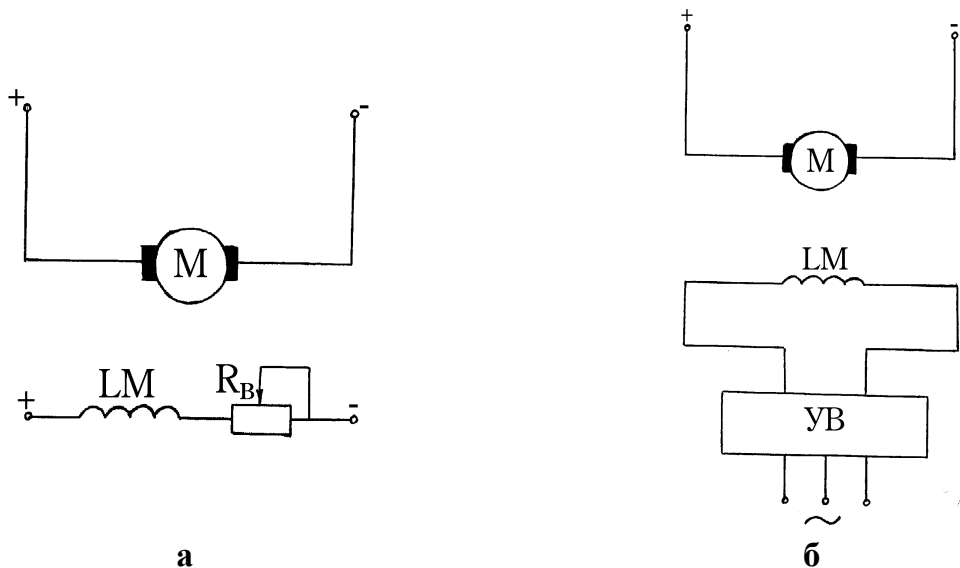


Рис. 2.10

Для анализа электромеханических и механических характеристик воспользуемся выражениями (1.19), (1.20), (2.9), из которых следует, что с уменьшением потока возбуждения растет скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = U/k\Phi$ , остается неизменным ток короткого замыкания  $I_{к.з} = U/R_{я}$ , снижаются момент короткого замыкания  $M_{к.з} = k\Phi I_{к.з}$  и модуль жесткости  $\beta_{\Phi}$  механических характеристик.

Таким образом, все искусственные электромеханические характеристики (рис. 2.11а) пересекаются в одной точке с координатами ( $\omega = 0$ ,  $I = I_{к.з}$ ), а механические характеристики в различных (рис. 2.11б). Меха-



нические и электромеханические характеристики имеют одинаковые значения угловых скоростей идеального холостого хода.

Оценим рассмотренный способ регулирования скорости двигателя, используя основные показатели.

1. Диапазон регулирования скорости ограничивается следующими факторами:

- ухудшением условий коммутации с возрастанием скорости;
- механической прочностью якоря и коллектора;
- снижением модуля жесткости  $\beta_\Phi$  механических характеристик при увеличении скорости (2.16);

• насыщением магнитной системы двигателя, поэтому минимально возможная скорость соответствует скорости на естественной характеристике при нагрузке  $M_c$ .

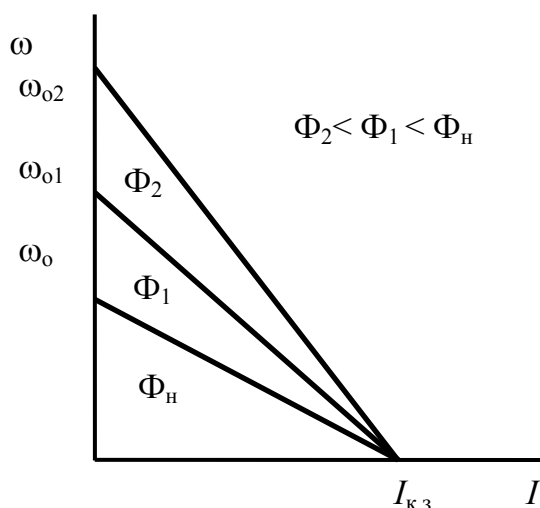


Рис. 2.11а

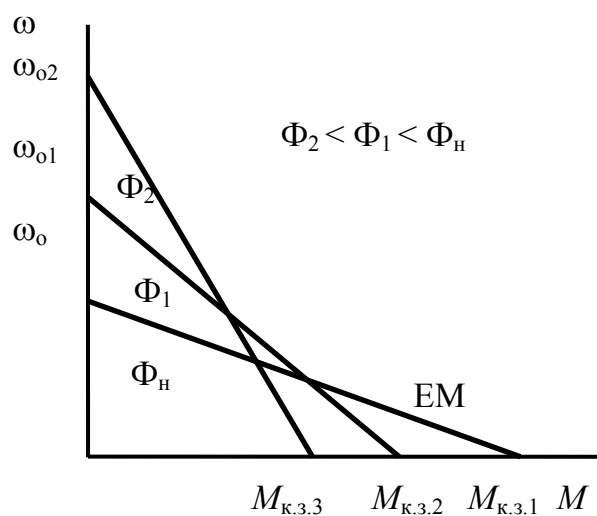


Рис. 2.11б

Эти факторы ограничивают возможный диапазон регулирования скорости для двигателей нормального исполнения до 2...3. Специальные двигатели обеспечивают диапазон регулирования  $D = 8$ .

Несмотря на то что модуль жесткости  $\beta_\Phi$  при ослаблении потока уменьшается, точность регулирования  $\Delta\omega_{\text{доп}^*} = \frac{\Delta M_c}{\beta_\Phi \omega_H} = \frac{\Delta M_c}{\beta_\Phi \omega_{\text{ср.max}}} D$  в

соответствии с (2.15) во всем диапазоне ( $D = \frac{\omega_{\text{ср.max}}}{\omega_H}$ ) остается доста-

точно высокой из-за увеличения средней скорости  $\omega_{\text{ср}}$  с  $\omega_{\text{ср.min}}$  до  $\omega_{\text{ср.max}}$  (рис. 2.12).

2. Направление регулирования скорости при ослаблении потока возбуждения – вверх от основной, так как все искусственные механические характеристики в зоне допустимых нагрузок расположены выше естественной характеристики (рис. 2.11б).

3. Плавность регулирования скорости определяется количеством ступеней регулировочного реостата  $R_B$  и его типом, а также типом регулятора напряжения УВ (рис. 2.10). При малой мощности двигателя посредством ползункового реостата, а при большой – с помощью тиристорных или транзисторных регуляторов напряжения можно получить плавное регулирование.

4. Стабильность скорости при регулировании определяется точностью:

$$\Delta\omega_{\max*} = \frac{\Delta M_c}{\beta_\Phi \omega_{\text{ср.маx}}} D, \quad (2.22)$$

которая во всем диапазоне остается достаточно высокой. Поэтому, несмотря на увеличение перепада скорости с  $\Delta\omega_{\max1}$  до  $\Delta\omega_{\max2}$  (рис. 2.12), угловая скорость достаточно стабильна.

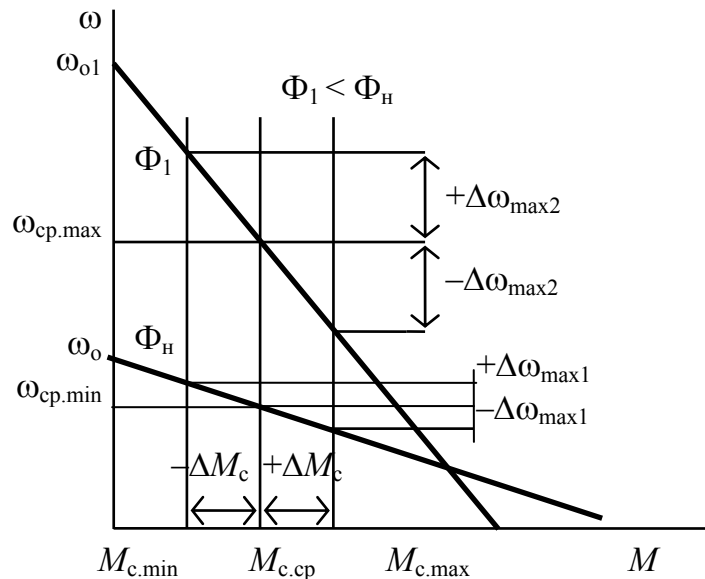


Рис. 2.12

5. Техничко-экономические показатели рассматриваемого способа регулирования высоки. Потери мощности якорной цепи двигателя и его КПД такие же, как и при работе на естественной механической характеристике. В связи с относительно малой мощностью цепи обмотки возбуждения по сравнению с номинальной мощностью двигателя капитальные затраты на реостаты или регуляторы напряжения невелики.

6. Допустимая нагрузка на валу двигателя определяется при условии: ток якоря при регулировании остается неизменным и равным номинальному, т.е.

$$M_{\text{доп}} = k\Phi I_n. \quad (2.23)$$

Так как  $\Phi < \Phi_n$ , то нагрузку на валу двигателя необходимо снижать.

Учитывая, что  $k\Phi = \frac{E}{\omega}$ , получаем:

$$M_{\text{доп}} = \frac{E}{\omega} I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} R_{\text{я}}}{\omega} I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{Эн}}}{\omega}, \quad (2.24)$$

где  $P_{\text{Эн}}$  – номинальная электромагнитная мощность двигателя.

Умножив (2.24) на  $\omega$ , получим:

$$M_{\text{доп}} \omega = P_{\text{Эн}} = P_{\text{доп}} = \text{const.} \quad (2.25)$$

Таким образом, регулирование скорости изменением магнитного потока осуществляется при постоянной мощности и зависимость допустимого момента нагрузки от скорости представляет собой гиперболу (рис. 2.13).

Простота, экономичность рассмотренного способа регулирования и благоприятные регулировочные характеристики определяют его широкое использование (металлорежущие станки, наматывающие устройства и т.д.).

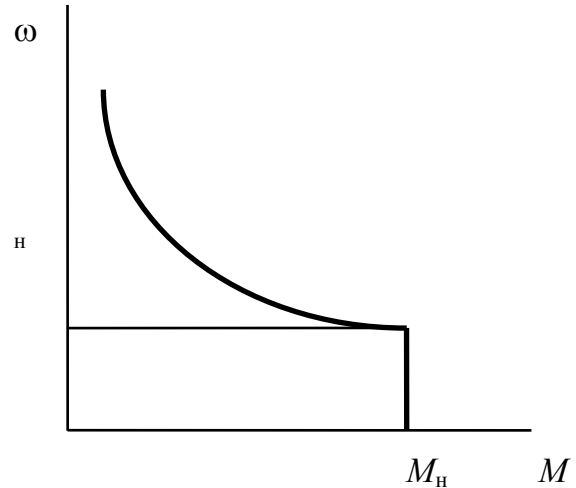


Рис. 2.13

### 2.2.3. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения изменением подводимого к якорю напряжения

Регулирование скорости данным способом осуществляется по схеме (рис. 2.14). Якорь двигателя питается от источника регулируемого напряжения, например, управляемого выпрямителя (УВ). Обмотка возбуждения питается от отдельного источника, например, неуправляемого выпрямителя (НУВ).

Данный способ в регулируемом электроприводе постоянного тока является основным. Как правило, изменение напряжения возможно только в сторону уменьшения по сравнению с номинальным.

Как следует из (2.8) и (2.9), при изменении напряжения пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = U/k\Phi_{\text{н}}$ , а жесткость механических характеристик остается постоянной.

Поэтому механические характеристики располагаются параллельно друг другу (рис. 2.15).

1. Диапазон регулирования скорости для рассматриваемого способа составляет  $D = 8 \dots 10$  в разомкнутых системах и может достигать значения  $D = 1000$  в замкнутых системах регулирования. Ограничение диапазона связано с увеличением относительной ошибки регулирования  $\Delta\omega_{\text{max}}$  (2.13) при снижении скорости с  $\omega_{\text{ср. max}}$  до  $\omega_{\text{ср. min}}$  (рис. 2.16). При этом абсолютная ошибка остается неизменной ( $\Delta\omega_{\text{max1}} = \Delta\omega_{\text{max2}}$ ).

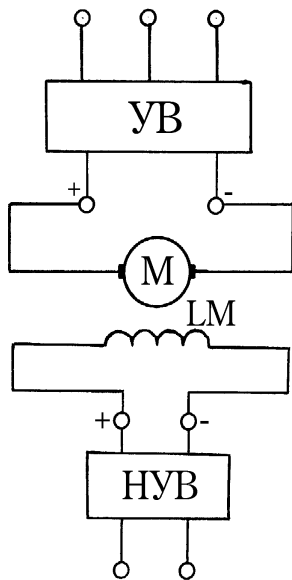


Рис. 2.14

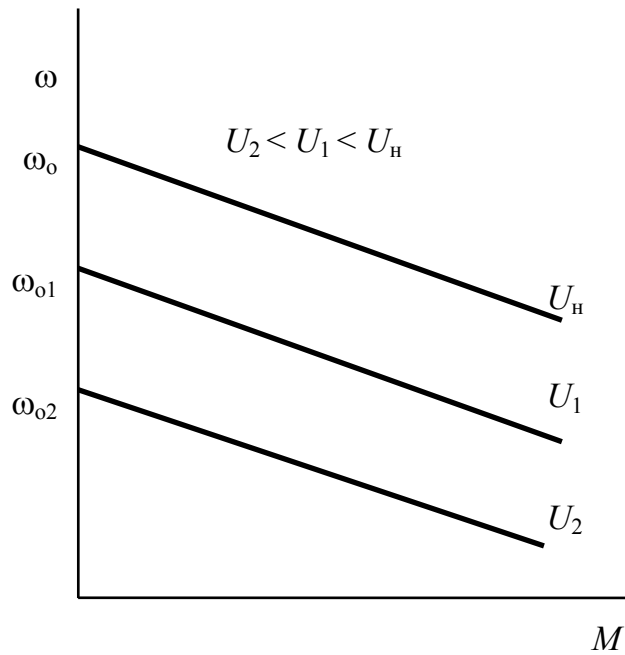


Рис. 2.15

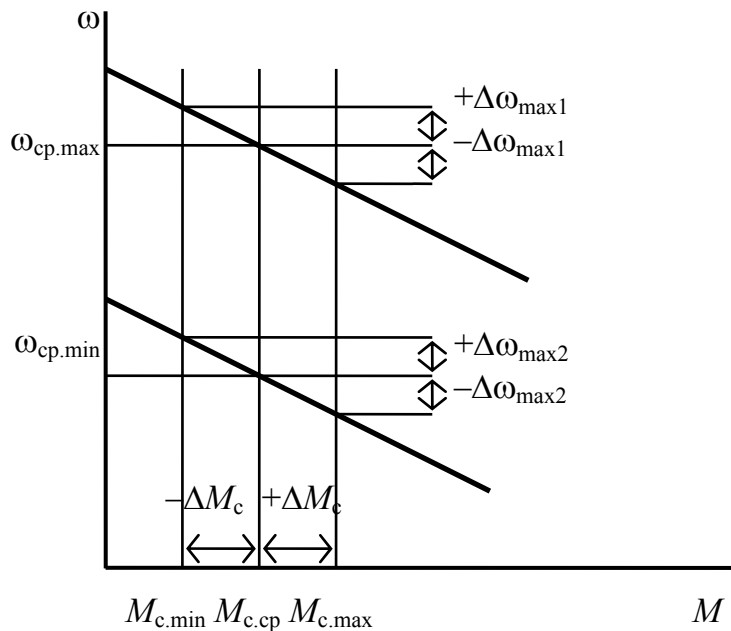


Рис. 2.16

Нижний предел скорости ограничивается условием  $\Delta\omega_{\max 2}^* \leq \Delta\omega_{\text{доп}}^*$ .

2. Направление регулирования скорости при изменении напряжения на якоре – вниз от основной, так как все искусственные механические характеристики располагаются ниже естественной ввиду того, что в большинстве случаев напряжение может изменяться только вниз от номинального.

3. Плавность регулирования определяется плавностью изменения напряжения питания и, например, в случае использования управляемых полупроводниковых выпрямителей коэффициент плавности стремится к единице ( $k_{\text{пл}} \rightarrow 1$ ).

4. Стабильность скорости при регулировании ухудшается, так как увеличивается относительная ошибка регулирования:

$$\Delta\omega_{\max*} = \frac{\Delta M_c}{\beta_U \omega_{\text{ср. min}}} D. \quad (2.26)$$

5. Кпд двигателя при данном способе регулирования падает по мере снижения скорости. Объяснение этому следующее. В случае регулирования скорости при  $M_c = \text{const}$  потери мощности в якорной цепи  $\Delta P = M(\omega_0 - \omega) = M\Delta\omega$  остаются неизменными и равными потерям при работе на естественной характеристике, так как  $\Delta\omega = \text{const}$  ввиду параллельности механических характеристик (рис. 2.15). Однако полезная мощность  $P_{\text{эм}} = M\omega$  при снижении скорости уменьшается, а следовательно, падает кпд. При определении технико-экономических показателей необходимо учитывать потери мощности в регуляторе напряжения и его стоимость, а также затраты на установку и монтаж.

6. Допустимая нагрузка на валу двигателя без учета ухудшения условия охлаждения при регулировании скорости остается постоянной:

$$M_{\text{доп}} = k\Phi_n I_n = \text{const}, \quad (2.27)$$

так как ток и поток во всем диапазоне регулирования остаются неизменными и равными номинальным значениям.

### 2.3. Способы регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения осуществляется теми же способами, что и ДПТ независимого возбуждения:

- реостатное регулирование;
- изменением магнитного потока  $\Phi$  двигателя;
- изменением напряжения  $U$ , подводимого к якорю двигателя.

#### 2.3.1. Реостатное регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения

Регулирование скорости осуществляется по схемам рис. 2.17 путем изменения величины сопротивления резистора  $R_x$ . Схема рис. 2.17а обеспечивает плавное регулирование скорости, схема рис. 2.17б – ступенчатое.

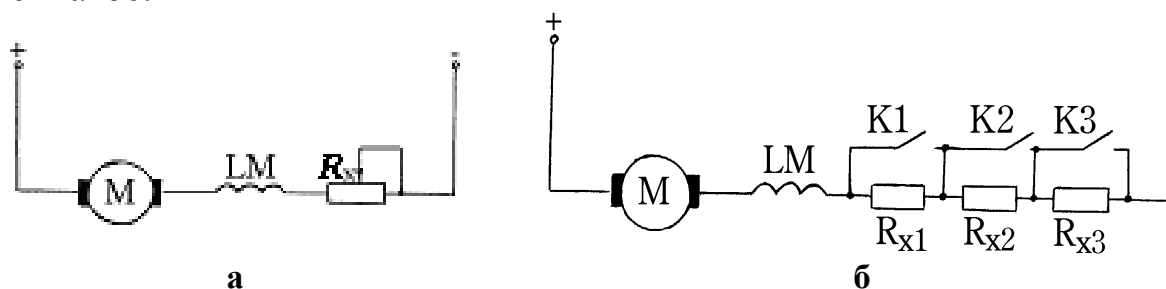


Рис. 2.17

Механические характеристики имеют вид рис. 2.18. Построение данных характеристик рассмотрено в п. 1.2.

Регулирование скорости этим способом характеризуется такими же количественными и качественными показателями, что и для ДПТ независимого возбуждения (см. п. 2.2.1).

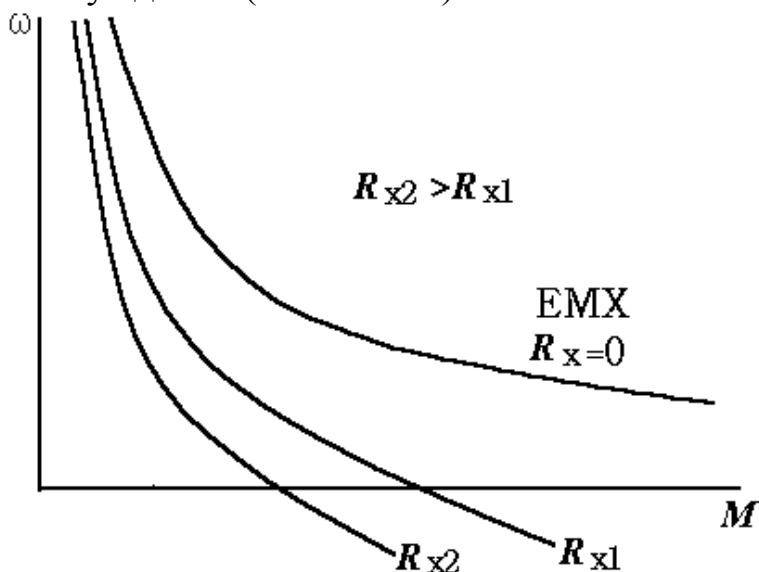


Рис. 2.18

Анализ характеристик показывает, что при малых значениях момента реостатное регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения неэффективно. Следует отметить, что жесткость механических характеристик меньше, чем у ДПТ независимого возбуждения, поэтому диапазон регулирования при одинаковой точности меньше. В силу этого данный способ регулирования находит широкое применение в тяговых установках (электрокары, электропогрузчики), где не требуется высокой точности регулирования.

### 2.3.2. Регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения изменением магнитного потока

С целью ослабления магнитного потока параллельно обмотке возбуждения включается шунтирующий реостат  $R_{ш}$  (рис. 2.19), сопротивление которого может изменяться

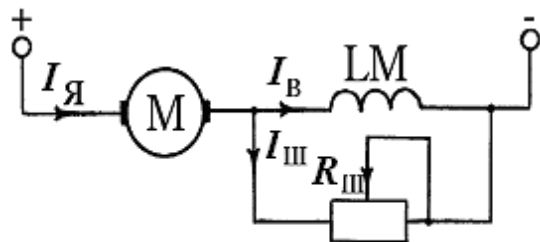


Рис. 2.19

плавно (ползунковый реостат) при малой мощности двигателя либо ступенчато.

При фиксированном моменте нагрузки, а, следовательно, и фиксированном токе якоря двигателя, ток в обмотке возбуждения  $I_{в} = I_{я} - I_{ш}$ . В соответствии с законом Ома при уменьшении  $R_{ш}$  увеличивается ток  $I_{ш}$ , а ток возбуждения  $I_{в}$  уменьшается:

$$I_B = \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_B} I_A, \quad (2.28)$$

что, в свою очередь, ведет к уменьшению потока  $\Phi$  и в соответствии с (1.57) – к увеличению скорости двигателя. Поэтому механические характеристики ДПТ располагаются выше естественной (рис. 2.20), т.е. регулирование скорости осуществляется вверх от основной. Со снижением потока  $\Phi$  (уменьшением  $R_{ш}$ ) падает модуль жесткости механических характеристик, что ограничивает пределы регулирования.

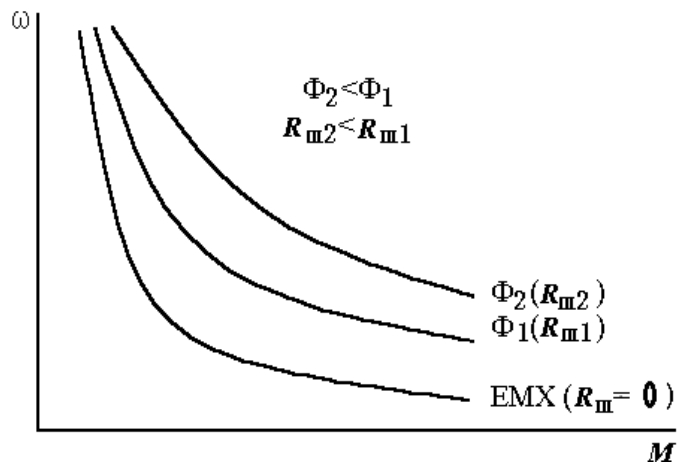


Рис. 2.20

Показатели регулирования скорости ослаблением потока для ДПТ последовательного возбуждения аналогичны таковым для ДПТ независимого возбуждения (см. п. 2.2.2).

### 2.3.3. Регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения изменением подводимого напряжения

Регулирование скорости ДПТ последовательного возбуждения осуществляется с помощью источника регулируемого напряжения, например, тиристорного преобразователя (рис. 2.21).

Механические характеристики двигателя, соответствующие различным значениям выходного напряжения преобразователя, приведены на рис. 2.22.

При снижении напряжения скорость двигателя при данной нагрузке снижается (1.57) без изменения соответствующей этой нагрузке

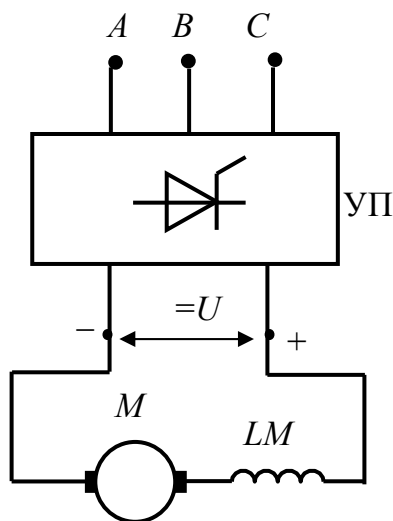


Рис. 2.21

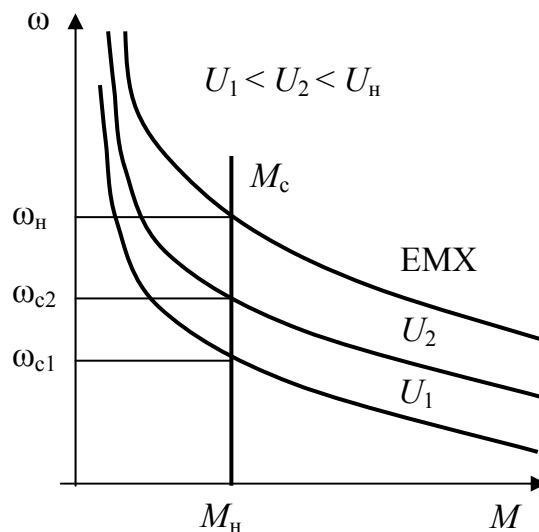


Рис. 2.22

жесткости механической характеристики. Характеристики располагаются ниже естественной, т.е. регулирование скорости осуществляется вниз от основной.

Построение искусственных механических характеристик осуществляется по точкам на основе естественной характеристики по выражению (1.66), (см. п. 1.2 и рис. 1.23) при заданном значении тока якоря  $I_a$ , при котором магнитный поток и момент двигателя имеют неизменное значение на естественной и искусственной характеристиках, т.е. не зависят от напряжения  $U$ .

Показатели регулирования скорости изменением подводимого напряжения в основном соответствуют таковым для двигателей независимого возбуждения (см. п. 2.2.3).

Регулирование скорости двигателя постоянного тока смешанного возбуждения осуществляется теми же способами, что и регулирование скорости ДПТ независимого и последовательного возбуждения:

- реостатное регулирование;
- изменением магнитного потока  $\Phi$  двигателя;
- изменением напряжения  $U$ , подводимого к якорю двигателя.

Показатели регулирования скорости в основном соответствуют таковым для двигателей независимого и последовательного возбуждения.

## 2.4. Способы регулирования скорости асинхронного электродвигателя

Возможность регулирования скорости асинхронного двигателя следует непосредственно из выражения

$$\omega = \frac{2\pi f}{p}(1 - S). \quad (2.29)$$

Наибольшее распространение получили следующие способы регулирования скорости:

- реостатное регулирование;
- изменение напряжения на статоре двигателя;
- изменение частоты питающего напряжения;
- изменение числа пар полюсов обмотки статора.

Анализ семейства получаемых при каждом способе регулирования механических характеристик проведем, используя следующие выражения:

- для скорости идеального холостого хода (синхронной):

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}; \quad (2.30)$$

- для критического момента:



$$M_k = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}; \quad (2.31)$$

- для критического скольжения

$$S_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (2.32)$$

### 2.4.1. Реостатное регулирование скорости асинхронного электродвигателя

Реостатное регулирование скорости АД может осуществляться симметричным либо несимметричным включением резисторов последовательно с обмоткой статора или ротора.

Наиболее распространенным и эффективным является способ симметричного включения резисторов  $R_{2x}$  в обмотку ротора. Возможно включение плавно регулируемых резисторов (рис. 2.23) и резисторов, переключаемых с помощью контакторов (рис. 2.24).

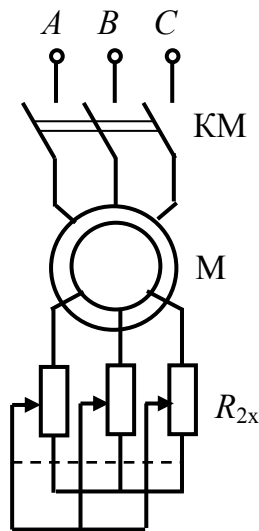


Рис. 2.23

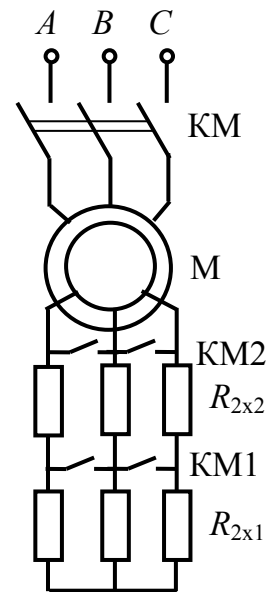


Рис. 2.24

На основании анализа выражений (2.30), (2.31) и (2.32) отметим следующее:

- скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  и критический момент  $M_k$  при регулировании  $R_{2x}$  не изменяются;
- критическое скольжение  $S_k$  при увеличении  $R_{2x}$  увеличивается.

Семейство реостатных механических характеристик показано на рис. 2.25.

Методика построения данных механических характеристик представлена в п. 1.3.

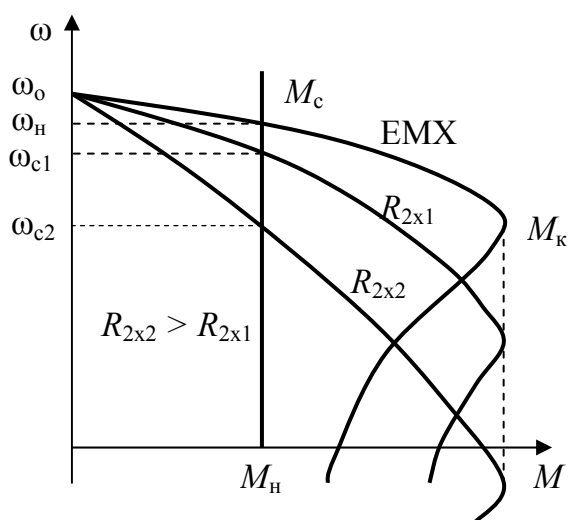


Рис. 2.25

Если считать, что рабочий участок механической характеристики линеен, то можно распространить полученные в п. 2.2.1. выводы для ДПТ независимого возбуждения в части основных показателей регулирования на АД при реостатном регулировании.

1. Диапазон регулирования скорости небольшой –  $D = 2 \dots 3$ , что определяется:

- снижением жесткости ме-

ханических характеристик:

$$\beta_R = \frac{M_H}{\omega_0 S_{\text{нр}}}, \quad (2.33)$$

где  $S_{\text{нр}}$  – скольжение на реостатной характеристике, соответствующее номинальному моменту;

- ростом потерь в роторе по мере снижения скорости:

$$\Delta P_{\text{э2}} = M \omega_0 S; \quad (2.34)$$

- требуемой точностью регулирования  $\Delta \omega_{\text{доп}^*}$ .

Определить диапазон регулирования скорости можно по выражению (2.16).

2. Направление регулирования скорости – вниз от основной.

3. Плавность регулирования скорости невелика и определяется типом используемого реостата: ползунковый реостат или ступенчатый (подробнее см. п. 2.2.1).

4. Стабильность регулирования скорости невысока и снижается с увеличением сопротивления  $R'_{2x}$  (подробнее см. п. 2.2.1).

5. Затраты, связанные с реализацией данного способа регулирования, невелики, так как обычно используются простые и дешевые ящики металлических резисторов. Однако эксплуатационные затраты велики, поскольку значительны потери энергии.

Для оценки энергетических показателей АД необходимо определить не только КПД, но и коэффициент мощности. Коэффициент полезного действия роторной цепи можно определить по выражению:

$$\eta_2 = \frac{P_M}{P_{\text{эм}}} = \frac{M \omega}{M \omega_0} = \frac{\omega}{\omega_0} = 1 - S, \quad (2.35)$$

где  $P_M$  – мощность на валу АД;  $P_{\text{эм}}$  – электромагнитная мощность, передаваемая от статора ротору АД.

Отсюда следует, что с увеличением скольжения, т.е. с увеличением сопротивления  $R_{2x}$ , кпд ротора снижается. Коэффициент полезного действия двигателя может быть определен следующим образом:

$$\eta = \frac{P_M}{P_c}, \quad (2.36)$$

где  $P_c$  – активная мощность, потребляемая двигателем из сети.

Основываясь на схеме замещения двигателя (рис. 1.39), запишем:

$$P_c = 3I_2'^2 \left( R_1 + \frac{R_2' + R_{2x}'}{S} \right). \quad (2.37)$$

С другой стороны, с учетом (1.38)

$$\begin{aligned} P_M = M\omega &= 3I_2'^2 \frac{R_2' + R_{2x}'}{\omega_0 S} \omega = 3I_2'^2 \frac{R_2' + R_{2x}'}{\omega_0 S} \omega_0 (1-S) = \\ &= 3I_2'^2 \frac{R_2' + R_{2x}'}{S} (1-S). \end{aligned} \quad (2.38)$$

Тогда

$$\eta = \frac{P_M}{P_c} = \frac{1-S}{\alpha S + 1}, \quad (2.39)$$

где  $\alpha = \frac{R_1}{R_2'}$ .

Значение кпд, рассчитанное по (2.39), не учитывает потери в стали статора и ротора, механические потери. Однако данные потери не зависят от нагрузки и скорости, относительно невелики. Поэтому приведенное выражение позволяет оценить значение кпд двигателя при реостатном регулировании в целом.

Коэффициент мощности двигателя при реостатном регулировании с постоянным моментом нагрузки ( $M_c = \text{const}$ ) и неизменным магнитным потоком, т.е.  $U_\phi = \text{const}$ , остается постоянным.

Если на валу АД имеет место вентиляторная нагрузка, то с уменьшением угловой скорости коэффициент мощности падает, так как со снижением момента нагрузки уменьшается ток ротора и, соответственно, потребляемая двигателем активная мощность, а значение намагничивающего тока и, соответственно, потребляемой двигателем реактивной мощности останется неизменными.

6. Допустимая нагрузка АД при реостатном регулировании и независимой вентиляции может быть определена из выражения (1.113). Из него следует, что при постоянном значении тока  $I_2$  момент АД постоянный и не зависит от сопротивления цепи ротора. В частности, при  $I_2 = I_{2н}$   $M_{доп} = M_{н}$ , т.е. при регулировании скорости асинхронного двигателя изменением сопротивления в цепи ротора допустимый момент остается постоянным и равным номинальному. Поэтому данный способ регулирования по усло-

вию допустимой нагрузки наиболее целесообразен для механизмов, у которых момент нагрузки не зависит от скорости,  $M_c = \text{const}$ .

Допустимый момент самовентилируемого двигателя должен быть снижен по сравнению с номинальным при снижении скорости примерно до  $0,4\omega_n$  в соответствии с равенством:

$$M_{\text{доп}} \approx M_n \sqrt{\frac{\omega}{\omega_n}}. \quad (2.40)$$

Если момент нагрузки при регулировании скорости остается неизменным и равным номинальному, то следует использовать двигатель с большей номинальной мощностью, т.е. завысить мощность двигателя.

#### 2.4.2. Регулирование скорости асинхронного электродвигателя изменением напряжения

Схема для регулирования напряжения на зажимах статора представлена на рис. 2.26. В качестве преобразователя напряжения (ПН) могут использоваться различные устройства: автотрансформаторы, дроссели насыщения, тиристорные регуляторы напряжения и др.

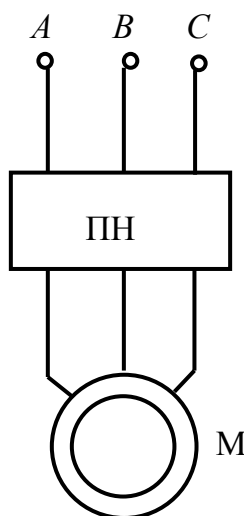


Рис. 2.26

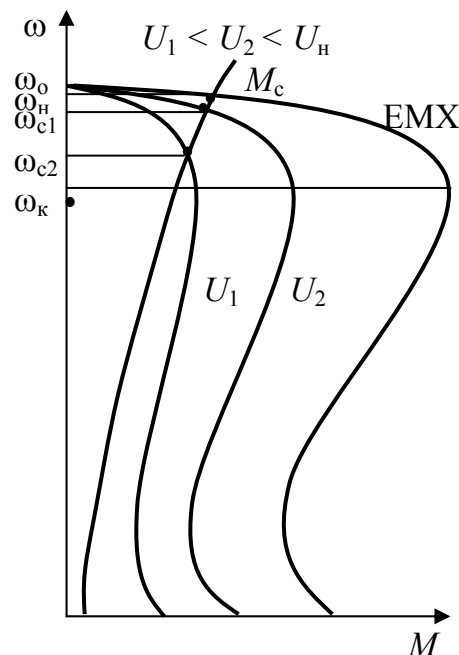


Рис. 2.27

Отвлекаясь от влияния параметров преобразователя напряжения на характеристики двигателя, отметим, что изменение напряжения на статоре АД приводит к снижению критического момента пропорционально квадрату напряжения (2.31), тогда как критическое скольжение (2.32) и синхронная скорость (2.30) остаются неизменными. На рис. 2.27 показаны механические характеристики двигателя при различных значениях напряжения на зажимах статора. Со снижением напряжения уменьшается модуль жесткости механических характеристик.

Построение механических характеристик при изменении напряжения производится с помощью выражения (1.111).

Рассмотрим основные показатели регулирования скорости для данного способа с учетом того, что рабочий участок механической характеристики линейен (см. п. 2.2.1 и п. 2.4.1).

1. Диапазон регулирования скорости невелик и составляет  $D = 2 \dots 3$ , что определяется:

- характером момента сопротивления рабочей машины;
- снижением жесткости рабочего участка механической характеристики ( $\beta = \frac{M_k}{\omega_0 S_k}$ ) из-за уменьшения критического момента;

- ростом потерь в роторе по мере снижения скорости

$$\Delta P_{\omega 2} = M \omega_0 S; \quad (2.41)$$

- требуемой точностью регулирования  $\Delta \omega_{\text{доп}^*}$ .

Некоторого увеличения диапазона регулирования можно добиться при использовании АД с повышенным скольжением либо асинхронного двигателя с фазным ротором. Однако при этом снижается точность регулирования. Повышение точности и расширения диапазона регулирования до  $D = 5 \dots 10$  достигается в замкнутых системах.

Определить диапазон регулирования скорости можно по выражению (2.16).

2. Направление регулирования скорости – вниз от основной, так как все механические характеристики располагаются ниже естественной.

3. Плавность регулирования определяется плавностью изменения напряжения. При применении тиристорного регулятора напряжения скорость регулируется бесступенчато и  $k_{\text{пл}} \rightarrow 1$ .

4. Стабильность регулирования скорости невысока и снижается при уменьшении напряжения, так как ( $\Delta \omega_{\text{max}2} > \Delta \omega_{\text{max}1}$ , рис. 2.28).

5. Энергетические показатели при регулировании скорости АД изменением напряжения со снижением скорости ухудшаются КПД и коэффициент мощности уменьшаются.

6. Очень важным вопросом для рассматриваемого способа регулирования является определение допустимых нагрузок двигателя при изменении скорости. Это связано прежде всего с тем, что в данном случае потери скольжения  $\Delta P_{\text{эл}2} = M \omega_0 S$  выделяются только в самом двигателе,

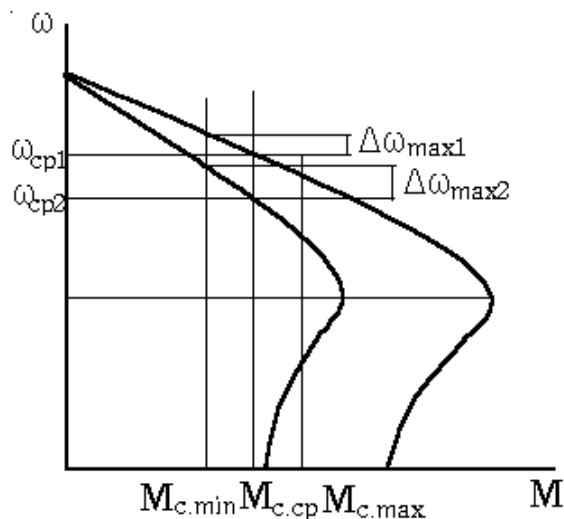


Рис. 2.28

тогда как при изменении сопротивления в цепи ротора часть этих потерь выделяется во внешних регулировочных резисторах.

Полагая, что при регулировании скорости при независимой вентиляции двигателя  $I'_{2\text{доп}} = I'_{2\text{н}}$ , находим из (1.94) с учетом, что  $\Delta P_{\text{эл}2\text{н}} = M_{\text{н}} \omega_0 S_{\text{н}} = 3I'_{2\text{н}}{}^2 R'_2$ , допустимый момент:

$$M_{\text{доп}} = \frac{3I'_{2\text{н}}{}^2 R'_2}{\omega_0 S} = \frac{M_{\text{н}} S_{\text{н}}}{S}. \quad (2.42)$$

или

$$M_{\text{доп}} = M_{\text{н}} \frac{\omega_0 - \omega_{\text{н}}}{\omega_0 - \omega}. \quad (2.43)$$

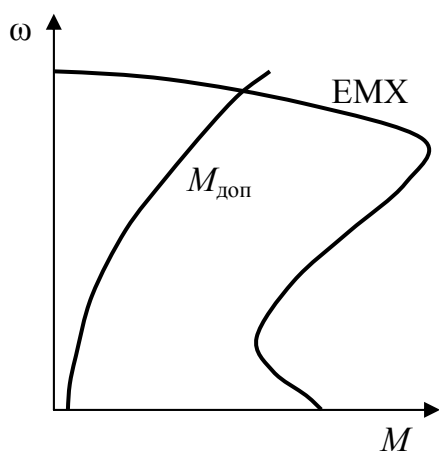


Рис. 2.29

Следовательно, для того чтобы при продолжительной работе с малой скоростью двигатель не нагревался сверх допустимой температуры, необходимо снижать его нагрузку в обратно пропорциональной зависимости от скольжения (рис. 2.29). Для двигателей с самовентиляцией это снижение должно быть больше с учетом ухудшения условий охлаждения по мере снижения скорости.

Этот недостаток ограничивает применение данного способа при регулировании скорости механизмов, имеющих постоянный момент сопротивления.

Поэтому регулирование скорости изменением напряжения предпочтительно в том случае, когда момент сопротивления рабочей машины при снижении скорости существенно меньше номинального, т.е. для привода насосов и вентиляторов.

### 2.4.3. Регулирование скорости асинхронного электродвигателя изменением числа пар полюсов

Возможность регулирования скорости АД данным способом следует непосредственно из выражения для синхронной скорости

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}. \quad (2.44)$$

Этот способ используется практически для регулирования скорости АД с короткозамкнутым ротором, так как изменение числа пар полюсов  $p$  производится путем переключения обмотки статора, а число пар полюсов короткозамкнутого ротора изменяется автоматически. Двигатели, допускающие регулирование скорости этим способом, получили название многоскоростных.

Для изменения числа пар полюсов необходимо, чтобы в пазы статора были уложены две или несколько независимых обмоток с различными значениями  $p$  или при одной обмотке статора имелась бы возможность изменения схемы соединения секций. Первый способ имеет существенные недостатки: неэффективное использование обмоточного провода (в работе находится только одна из обмоток), увеличенные габариты и масса.

Значительно чаще изменение числа пар полюсов достигается переключением схемы соединения обмотки статора. На рис. 2.30 показана в качестве примера простейшая схема (для одной фазы), позволяющая изменить число пар полюсов обмотки статора. С этой целью обмотки статора каждой фазы разделяют на две равные части (секции).

Изменение числа пар полюсов достигается путем переключения, например, с последовательно-согласного (рис. 2.30) на встречно-параллельное (рис. 2.31) включение секций. В этом случае число пар полюсов уменьшается вдвое, соответственно синхронная скорость возрастает в 2 раза.

На практике наиболее часто применяются две схемы переключения статорной обмотки АД (схемы Даландера):

- со «звезды» (Y) на «двойную звезду» (YY) (рис. 2.32);
- с «треугольника» ( $\Delta$ ) на «двойную звезду» (рис. 2.33).

При переходе от одной частоты вращения к другой изменяется направление тока в половине полуобмоток фаз статора. Для того чтобы направление вращения поля при этом осталось неизменным, необходимо также переключить выводы двух фаз обмотки (например, фазы B и C).

Механические характеристики многоскоростных АД для каждой возможной схемы соединения обмоток могут быть получены на основании анализа выражений для обычного АД с короткозамкнутым ротором (2.30)–(2.32).

В схеме на рис. 2.32 обмотка статора переключается по схеме «звезда» (Y) – «двойная звезда» (YY). Механические характеристики для этой схемы приведены на рис. 2.34. Для схемы «звезда» за счет увеличения числа пар полюсов скорость поля  $\omega_{0Y}$  вдвое

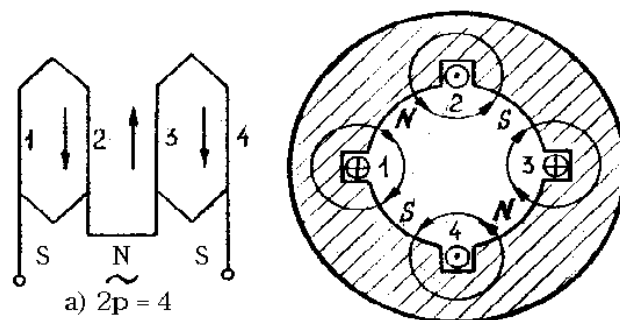


Рис. 2.30

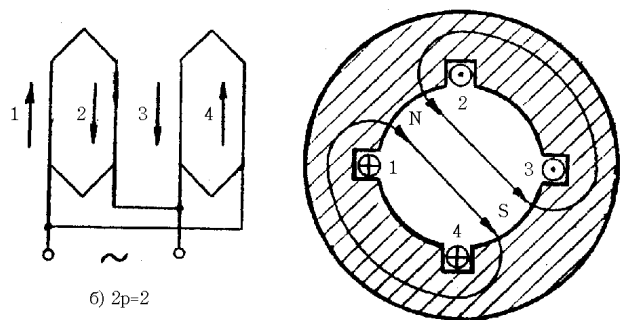


Рис. 2.31

меньше скорости поля для схемы «двойная звезда»  $\omega_{OYU} = 2\omega_{OY}$ , а сопротивления обмотки за счет переключения с встречно-параллельного (YY) на согласно-последовательное (Y) соединение секций возрастают в 4 раза. При этом фазное напряжение для обеих схем одинаковое.

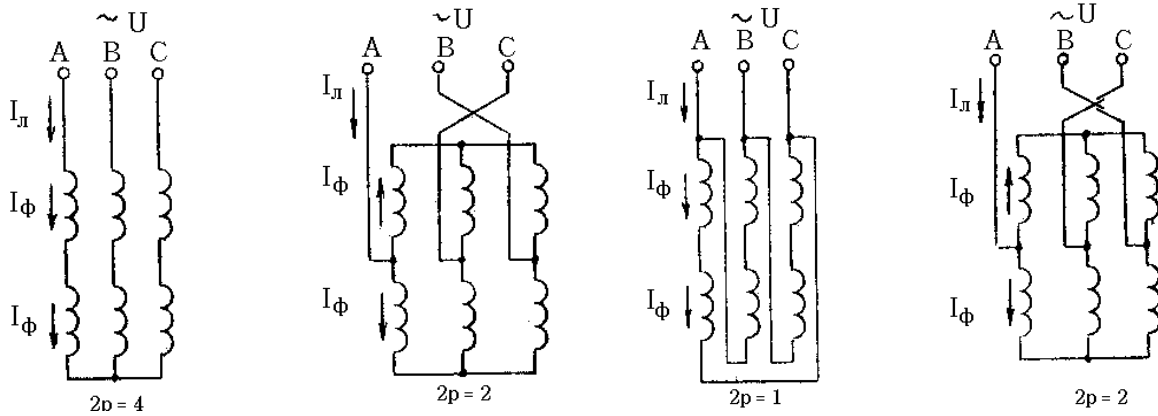


Рис. 2.32

Рис. 2.33

Тогда, согласно выражению (2.31), соотношение между критическими моментами для данной схемы  $M_{KYU} = 2M_{KY}$ , критическое скольжение при переходе от одной схемы к другой не изменяется (2.32), т.е.  $S_{KY} = S_{KYU}$ .

Механические характеристики двигателя при переключении обмоток статора по схемам «треугольник» – «двойная звезда» (рис. 2.33) показаны на рис. 2.35.

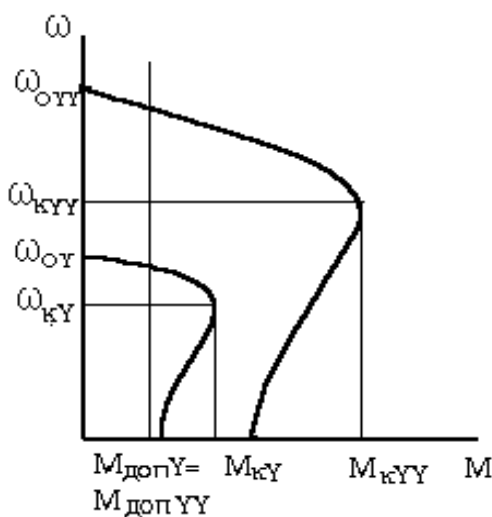


Рис. 2.34

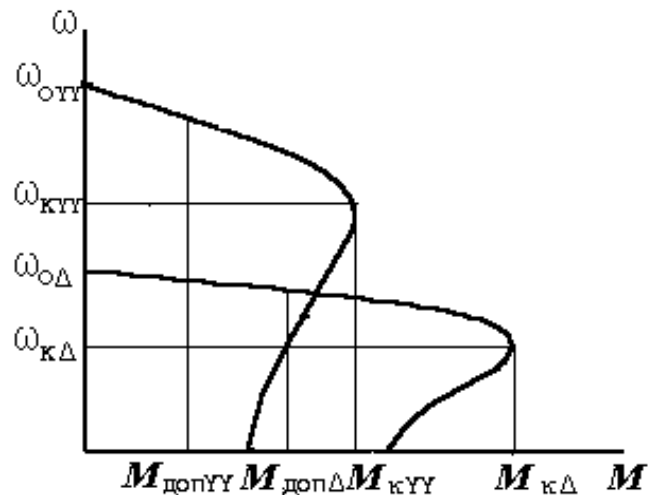


Рис. 2.35

Переход от согласно последовательного соединения секций в схеме «треугольника» к встречно-параллельному их соединению в схеме «двойной звезды» приводит к уменьшению в  $\sqrt{3}$  раз напряжения, приложенного к фазе обмотки статора, и снижению в 4 раза сопротивления обмотки.

Подстановка полученных значений в (2.31) с учетом соотношения  $\omega_{OYU} = 2\omega_{OΔ}$  дает:



$$M_{\text{КУУ}} = \frac{2}{3} M_{\text{КЛ}}. \quad (2.45)$$

Подстановка тех же величин в (2.32) дает  $S_{\text{КУ}} = S_{\text{КЛ}}$ .

Помимо рассмотренных двухскоростных применяются трех- и четырехскоростные АД. Первые из них помимо переключаемой обмотки статора, выполняемой аналогично рассмотренной выше, имеют также и одну непереключаемую обмотку. Четырехскоростные электродвигатели имеют две полюсопереключаемые обмотки.

Механические характеристики многоскоростного АД для каждой схемы включения могут быть построены по паспортным данным (по формулам Клосса или по характерным точкам).

Оценим положительные и отрицательные стороны данного способа регулирования с помощью основных показателей регулирования.

1. Диапазон регулирования скорости однообмоточных двигателей с переключаемыми секциями обычно равен 2, для двухобмоточных двигателей его значение может достигать 12. Минимальная синхронная частота вращения, с которой выпускаются полюсопереключаемые двигатели широкого назначения, равна 500 об/мин. Двигатели специального назначения имеют меньшую частоту вращения. Максимальная частота вращения составляет 3000 об/мин. Поэтому практически диапазон регулирования не превышает 6 (3000 / 500 об/мин).

2. Направление регулирования является условным и зависит от того, при каком числе пар полюсов угловая скорость рабочей машины принята номинальной. Поэтому регулирование может быть как вверх, так и вниз от основной.

3. Регулирование скорости является ступенчатым. Основным недостатком следует считать ограниченное число скоростей в заданном диапазоне регулирования: для однообмоточных двигателей – обычно две, для двухобмоточных – три или четыре.

4. Механические характеристики многоскоростных АД отличаются большой жесткостью при любой схеме включения, что позволяет обеспечить высокую стабильность скорости при работе АД на всех характеристиках. При этом точность регулирования практически не изменяется, так как

$$\Delta\omega_{\text{max}1*} = \frac{\Delta\omega_{\text{max}1}}{\omega_{\text{cp}1}} \approx \Delta\omega_{\text{max}2*} = \frac{\Delta\omega_{\text{max}2}}{\omega_{\text{cp}2}}, \quad (2.46)$$

ввиду того, что  $\Delta\omega_{\text{max}1} \approx 2\Delta\omega_{\text{max}2}$  и  $\omega_{\text{cp}1} \approx 2\omega_{\text{cp}2}$  (рис. 2.36).

5. Регулирование скорости изменением числа пар полюсов не сопровождается выделением в роторной цепи дополнительных потерь энергии скольжения, вызывающих излишний нагрев двигателя и ухудшающих его КПД. При этом при номинальной нагрузке АД на каждой скорости можно считать, что

$$\eta_{\Delta} \approx \eta_Y \approx \eta_{YY} \text{ и } \cos\varphi_{\Delta} \approx \cos\varphi_Y \approx \cos\varphi_{YY}.$$

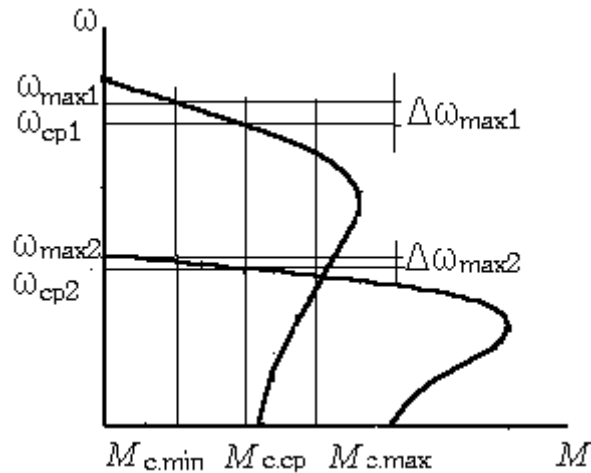


Рис. 2.36

6. Учитывая, что допустимый ток в секции обмотки статора  $I_{\phi} = I_{\text{доп}} = I_n$  остается неизменным при переключении числа пар полюсов, допустимую первичную мощность определим:

- для схемы «звезда» (рис. 2.32):

$$P_{Y\text{доп}} = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I_n \cos\varphi_Y; \quad (2.47)$$

- для схемы «треугольник» (см. рис. 2.33):

$$P_{\Delta\text{доп}} = 3UI_n \cos\varphi_{\Delta}; \quad (2.48)$$

- для схемы «двойная звезда» (рис. 2.32, 2.33):

$$P_{YY\text{доп}} = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} 2I_n \cos\varphi_{YY}. \quad (2.49)$$

Учитывая, что  $\omega_{OYY} = 2\omega_{OY}$ ,  $\omega_{OYY} = 2\omega_{O\Delta}$  и  $M_{\text{доп}} \approx P_{\text{доп}} / \omega_o$ , можно показать, что при переключении со «звезды» на «двойную звезду» остается постоянным допустимый момент, а при переключении с «треугольника» на «двойную звезду» – допустимая мощность.

#### 2.4.4. Частотное регулирование скорости асинхронного электродвигателя

Благодаря успехам электроники частотно-регулируемый электропривод становится основным типом регулируемого электропривода.

В настоящее время применяются два типа преобразователей частоты:

- преобразователи частоты с непосредственной связью сети с нагрузкой, статорными обмотками АД, через группы тиристоров;
- преобразователи частоты с явно выраженным звеном постоянного тока, в которых происходит двойное преобразование параметров электрической энергии.

Более совершенным и наиболее распространенным является применение преобразователей частоты с явно выраженным звеном постоянного тока.

Большинство таких современных преобразователей частоты построены одинаково (рис. 2.37): сеть переменного тока ( $A-B-C$ ) – неуправляемый или управляемый выпрямитель УВ – шины постоянного тока ( $=U$ ) – звено постоянного тока с  $LC$ -фильтром – автономный инвертор напряжения УИ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) – асинхронный двигатель  $M$ , к которому приложено переменное 3-фазное напряжение с регулируемой частотой  $f = \text{varia}$  и амплитудой  $U = \text{varia}$ .

Выпрямитель и инвертор выполнены в большинстве случаев на базе мостовых схем с использованием IGBT модулей.

С помощью системы управления СУУВ выпрямленное напряжение можно регулировать в широких пределах. Выпрямленное и регулируемое напряжение  $U$  подается на вход инвертора УИ, который преобразует напряжение постоянного тока  $=U$  в трехфазное переменное напряжение  $U_{\text{пер}}$  регулируемой частоты  $f_{\text{пер}}$ , которая задается системой управления СУУИ в зависимости от сигнала управления.

Регулирование выходной частоты и напряжения осуществляется в инверторе за счет высокочастотного широтно-импульсного управления транзисторами IGBT модулей. Оно характеризуется периодом модуляции, внутри которого обмотка статора подключается поочередно к положительному и отрицательному полюсам выпрямителя. Длительность этих состояний внутри периода широтно-импульсной модуляции (ШИМ) изменяется по синусоидальному закону. При высоких частотах коммутаций, 20 кГц и выше, в обмотках статора протекают практически синусоидальные токи.

Принцип частотного регулирования скорости заключается в том, что, изменяя частоту  $f$  питающего напряжения, можно в соответствии с выражением  $\omega_0 = 2\pi f/p$  изменять его синхронную скорость, получая тем самым различные искусственные характеристики.

При регулировании частоты необходимо изменять величину питающего напряжения. Действительно, пренебрегая падением напряжения на сопротивлениях обмотки статора, т.е.  $\Delta U_1 = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \approx 0$ , можно записать:  $U_1 \approx E_1$  или с учетом, что  $E_1 = k\Phi f$ :

$$U_1 \approx k\Phi f. \quad (2.50)$$

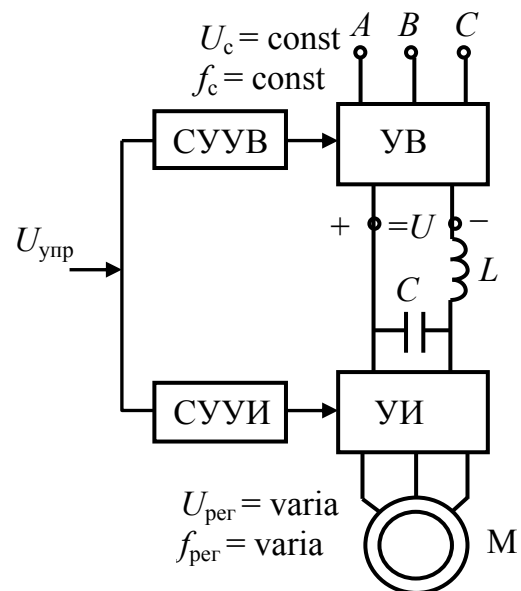


Рис. 2.37

Отсюда следует, что при неизменном напряжении  $U_1$  источника питания и регулировании его частоты  $f$  изменяется магнитный поток двигателя, что приводит к ухудшению его энергетических показателей ( $\cos\varphi$  и кпд).

Для наилучшего использования асинхронного двигателя при частотном регулировании скорости необходимо изменять напряжение одновременно в функции частоты и момента сопротивления  $M_c$  рабочей машины. Чаще всего при этом исходят из условия сохранения перегрузочной способности  $\lambda$  двигателя, которая определяется отношением критического момента  $M_k$  двигателя к моменту сопротивления  $M_c$  для всех искусственных механических характеристик:

$$\lambda = \frac{M_k}{M_c} = \text{const.} \quad (2.51)$$

Учитывая выражение (1.97) для критического момента и, что  $\Delta U_1 = 0$ ,  $\omega_o = 2\pi f/p$  и  $X_k = 2\pi Lf$ , можно найти:

$$\lambda = \frac{3U_1^2}{2\omega_o X_k M_c} = A \frac{U_1^2}{f^2 M_c}, \quad (2.52)$$

где  $A = \frac{3p}{8\pi^2 L}$  – коэффициент, не зависящий от напряжения и частоты.

Из (2.52) следует, что для любых двух значений частоты  $f_i$  и  $f_k$  можно записать следующее соотношение:

$$\frac{U_{1i}^2}{f_i^2 M_c(\omega_i)} = \frac{U_{1k}^2}{f_k^2 M_c(\omega_k)}. \quad (2.53)$$

Отсюда получаем основной закон изменения напряжения при частотном регулировании скорости АД (формула Костенко):

$$\frac{U_{1i}}{U_{1k}} = \frac{f_i}{f_k} \sqrt{\frac{M_c(\omega_i)}{M_c(\omega_k)}}. \quad (2.54)$$

Принимая один из режимов работы двигателя за номинальный, основной закон можно записать в виде:

$$\frac{U_{1i}}{U_{1k}} = \frac{f_i}{f_k} \sqrt{\frac{M_c(\omega_i)}{M_H}}, \quad (2.55)$$

или в относительных единицах:

$$U_{1i*} = f_{i*} \sqrt{M_{ci*}}, \quad (2.56)$$

где  $U_{1i*}$ ,  $M_{ci*}$  – напряжение на статоре и момент сопротивления рабочей машины при частоте  $f_{i*}$ .

Для многих рабочих машин механическая характеристика может быть представлена выражением:

$$M_{ct} = M_{co} + (M_{ch} - M_{co}) \left( \frac{\omega_t}{\omega_H} \right)^x, \quad (2.57)$$

где  $M_{ct}$  – момент сопротивления рабочей машины при скорости  $\omega_t$ ;  $M_{co}$  – момент сопротивления трения в движущихся частях;  $M_{ch}$  – момент сопротивления рабочей машины при номинальной скорости  $\omega_H$ ;  $X$  – показатель степени, характеризующий изменение момента сопротивления при изменении скорости.

В относительных единицах

$$M_{ct*} = M_{co*} + (1 - M_{co*}) \omega_{t*}^x. \quad (2.58)$$

Пренебрегая  $M_{co*}$  ввиду его малой величины получим:

$$M_{ct*} = \omega_{t*}^x. \quad (2.59)$$

Учитывая, что  $\omega \equiv f$ , а значит  $\omega_{t*} = f_{t*}$ , имеем

$$M_{ct*} = f_{t*}^x. \quad (2.60)$$

После подстановки (2.60) в (2.56) основной закон изменения напряжения при частотном регулировании можно записать в виде:

$$U_{1t*} = f_{t*} \sqrt{f_{t*}^x}. \quad (2.61)$$

С помощью выражения (2.61) могут быть получены частные законы изменения напряжения и частоты для трех наиболее часто встречающихся типов рабочих машин.

Для рабочих машин с постоянным моментом сопротивления ( $x = 0$ ):

$$U_{1t*} = f_{t*} \text{ или } \frac{U_1}{f} = \text{const}. \quad (2.62)$$

При вентиляторном моменте сопротивления ( $x = 2$ ):

$$U_{1t*} = f_{t*}^2 \text{ или } \frac{U_1}{f^2} = \text{const}. \quad (2.63)$$

При моменте сопротивления, обратно пропорциональном скорости ( $x = -1$ ):

$$U_{1t*} = \sqrt{f_{t*}} \text{ или } \frac{U_1}{\sqrt{f}} = \text{const}. \quad (2.64)$$

Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании по приведенным выше законам представлены соответственно на рис. 2.38, 2.39, 2.40.

Однако, законы (2.62)–(2.64) справедливы лишь для двигателей относительно большой мощности, когда активным сопротивлением статора  $R_1$  можно пренебречь. В действительности, при малых значениях частоты  $f < (0,4 \dots 0,5)f_{1H} < 20 \dots 25$  Гц, падение напряжения на сопротивлении  $R_1$  существенно снижает величину напряжения, приклады-

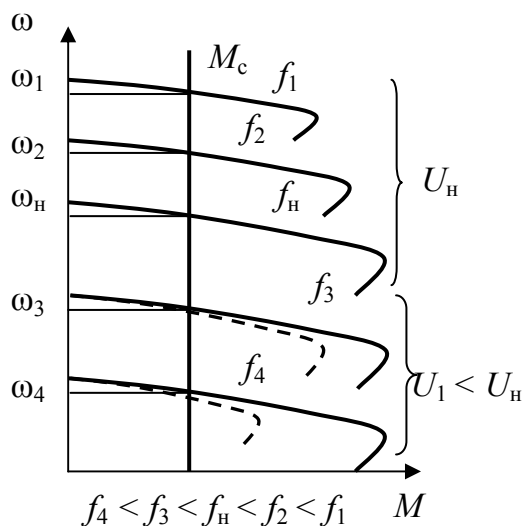


Рис. 2.38

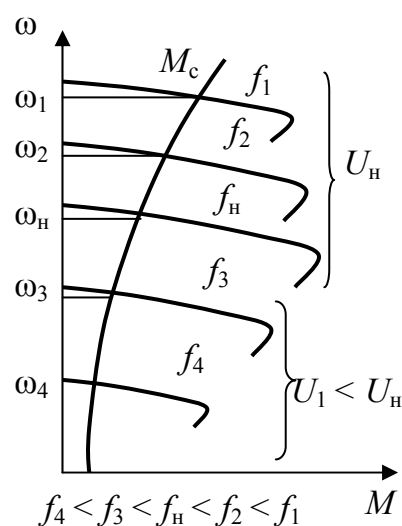


Рис. 2.39

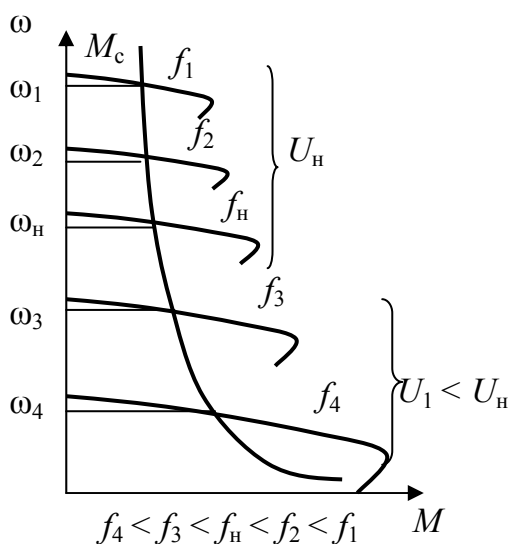


Рис. 2.40

ваемого к контуру намагничивания, и критический момент асинхронного двигателя уменьшается.

Действительно, в случае снижения частоты  $f$  будет пропорционально снижаться индуктивное сопротивление цепи намагничивания  $X_\mu$  ( $X_\mu = 2\pi f L_\mu$ ), тогда как значение  $R_1$  от частоты не зависит. При этом со снижением частоты  $f$  будет увеличиваться относительная величина падения напряжения на сопротивлении  $R_1$  ( $I_\mu R_1 = \Delta U$ ) за счет увеличения тока намагничивания, что приводит к

уменьшению эдс  $E_1$ , а следовательно, магнитного потока асинхронного двигателя.

Поэтому в классе рассмотренных выше законов  $U_1/f$  невозможно одновременно обеспечить удовлетворительные механические и энергетические характеристики в широком диапазоне скоростей и изменения нагрузки. В частности, при низких частотах происходит снижение критического момента АД (рис. 2.38, пунктирные линии).

Поэтому с целью компенсации этого влияния следует с уменьшением частоты  $f$  снижать напряжение  $U_1$  в меньшей степени, чем предусматривается законами (2.62)–(2.64).

В асинхронных частотно-регулируемых электроприводах со скалярным управлением, кроме законов регулирования класса  $U_1/f$ , получили применение и другие законы регулирования.

Наибольшее распространение получили такие законы частотного регулирования скорости, как

$$\frac{E_1}{f} = \text{const}; \quad \frac{E_1}{f^2} = \text{const}; \quad \frac{E_1}{\sqrt{f}} = \text{const}.$$

При регулировании скорости в классе законов  $E_1/f_1$  необходимо повышать фазное напряжение  $U_1 = E_1 + I_1 R_1$  только на величину падения напряжения  $I_1 R_1$  на активном сопротивлении обмотки статора, а способ регулирования скорости асинхронного двигателя получил название – частотное регулирование с  $IR$ -компенсацией.

Реализация управления компенсирующего падения напряжения на активном сопротивлении статора возможна со скалярной или векторной  $IR$ -компенсацией.

При скалярной компенсации меняется только модуль напряжения  $U_1$  обмотки статора асинхронного двигателя без изменения фазового угла, что приводит к непостоянству векторов эдс  $E_1$  и потокосцепления  $\psi_1$ . Возможны дополнительные возмущения в системе, связанные с изменением фазового угла вектора  $\psi_1$ .

Несмотря на этот недостаток, разомкнутые структуры частотного регулирования скорости на основе автономных инверторов напряжения со скалярной  $IR$ -компенсацией находят широкое применение в приводах длительного режима работы с диапазоном регулирования  $D = 1: 50$ .

При векторной  $IR$ -компенсации векторы эдс  $E_1$  и потокосцепления  $\psi_1$  остаются постоянными при изменении нагрузки, а модуль вектора напряжения  $|U_1|$  и его фазовый угол меняются. В электроприводах с микропроцессорным управлением векторная  $IR$ -компенсация дополнительной настройкой, как правило, не требует, то есть при выборе такого закона регулирования настройка производится по заложенной в электропривод программе автоматически.

Рассмотрим основные показатели регулирования скорости с учетом линейности рабочего участка механической характеристики двигателя (см. п. 2.2.1 и п. 2.4.1).

1. Диапазон регулирования скорости АД при частотном регулировании может достигать  $D = 30$ . Верхний предел скорости двигателя ограничивается прежде всего прочностью ротора, а также ростом потерь мощности в стали с увеличением частоты. Поэтому скорость электродвигателя обычно не превышает номинального больше чем в 2 раза. Нижний предел скорости ограничен технической сложностью выполнения преобразователя с низкой частотой, нестабильностью скорости электродвигателя, т.е. требуемой точностью регулирования  $\Delta\omega_{\text{доп*}}$  (см. п. 2.2.3, рис. 2.16). Поэтому снижение скорости осуществляется, как правило, в 10...15 раз. Использование АД специальной конструкции и

введение в схему управления различных обратных связей позволяет расширить диапазон регулирования скорости.

2. Направление регулирования скорости электродвигателя происходит как вверх, так и вниз от основной.

3. Плавность регулирования скорости определяется плавностью изменения частоты питающего напряжения. При применении тиристорных и транзисторных преобразователей частоты скорость двигателя возможно регулировать с коэффициентом плавности, близким к единице ( $k_{пл} \rightarrow 1$ ).

4. Стабильность скорости при регулировании достаточно высока во всем диапазоне регулирования. Однако с уменьшением частоты она несколько снижается (рис. 2.41) ввиду того, что

$$\Delta\omega_{\max 2*} = \frac{\Delta\omega_{\max 2}}{\omega_{\text{ср}2}} > \Delta\omega_{\max 1*} = \frac{\Delta\omega_{\max 1}}{\omega_{\text{ср}1}} \quad (2.65)$$

при  $\Delta\omega_{\max 1} \approx \Delta\omega_{\max 2}$ , так как со снижением частоты  $f$  жесткость механических характеристик практически не изменяется, но  $\omega_{\text{ср}2} < \omega_{\text{ср}1}$ .

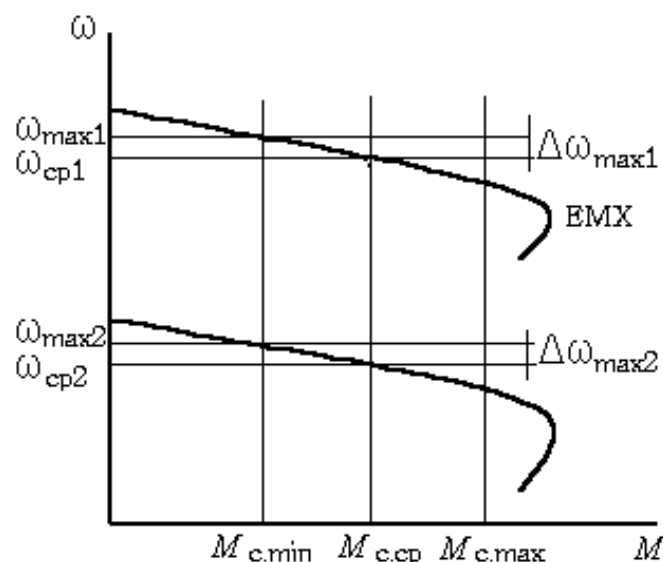


Рис. 2.41

5. Машинные и полупроводниковые (статические) преобразователи частоты являются сравнительно дорогими устройствами, что часто сводит на нет экономию средств, полученных за счет использования наиболее дешевых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Однако на базе статических преобразователей частоты могут быть разработаны регулируемые электроприводы с такими показателями точности и надежности, которые никогда раньше не могли быть достигнуты, а первоначальные капитальные затраты быстро окупаются за счет улучшения качества работы и снижения эксплуатационных расходов. Особенно это относится к системам, в которых от одного преобразователя частоты одновременно питается большое количество



двигателей небольшой мощности, например системы вентиляции в животноводческих и других сельскохозяйственных помещениях. Одиночные электроприводы с частотным управлением используются в тех случаях, когда другие варианты регулируемого электропривода не обеспечивают требуемой точности регулирования.

Большинство статических преобразователей частоты формирует на выходе несинусоидальное напряжение, содержащее основную составляющую и ряд высших гармоник. Наличие высших гармоник тока приводит к увеличению потерь в обмотках статора и ротора.

Потери в статоре пропорциональны квадрату действующего значения полного тока:

$$\Delta P_{\text{эл1}} = m_1 I^2 R_1, \quad (2.66)$$

где  $m_1$  – число фаз статора;  $R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;  $I$  – полный ток статора:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_{\text{гар}}^2}, \quad (2.67)$$

где  $I_1$  – действующее значение тока 1-й гармоники;  $I_{\text{гар}}$  – действующее значение гармонических составляющих токов:

$$I_{\text{гар}} = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots + I_k^2} = \sqrt{\sum_5^{\infty} I_k^2}, \quad (2.68)$$

где  $I_k$  – действующее значение тока  $k$ -й гармоники.

Таким образом,

$$\Delta P_{\text{эл1}} = m_1 (I_1^2 + I_{\text{гар}}^2) R_1. \quad (2.69)$$

Так как сопротивление ротора зависит от частоты и существенно увеличивается вследствие поверхностного эффекта, то потери в роторе определяются для каждой гармоники:

$$\Delta P_{\text{эл2к}} = m_1 I_{2к}^2 R_{2к}, \quad (2.70)$$

где  $I_{2к}$  – ток ротора  $k$ -й гармоники;  $R_{2к}$  – соответствующее сопротивление фазы ротора с учетом поверхностного эффекта.

Полные потери в роторе получаем суммированием всех составляющих.

Наличие гармонических составляющих питающего напряжения приводит также к увеличению потерь в стали асинхронного двигателя.

Однако большинство статических преобразователей частоты не вырабатывают гармоник ниже 5-й, а амплитуды гармоник большей кратности обычно малы. Поэтому кпд двигателей в таких случаях снижается незначительно. Для обычных АД с номинальным кпд, равным 90 %, суммарные потери от высших гармоник составляют 10...12 %, и его кпд уменьшается не более чем на 2 %.

Увеличение потерь скольжения ( $\Delta P_{эл2} = M\omega_0 S$ ) в АД не происходит, так как двигатель работает на линейном участке механической характеристики при малом скольжении. Поэтому частотный способ регулирования скорости АД является наиболее экономичным.

При несинусоидальной форме токов необходимо различать коэффициенты мощности  $\chi$  сдвига  $\cos\varphi$  и искажения  $\nu$ .

Коэффициент мощности  $\chi$ , в этих случаях определяется как отношение активной мощности к полной:

$$\chi = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos\varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos\varphi_1 = \nu \cos\varphi_1, \quad (2.71)$$

где  $\nu = I_1/I$  – коэффициент искажения;  $\cos\varphi_1$  – коэффициент сдвига, являющийся одновременно коэффициентом мощности для основной составляющей, так как угол  $\varphi_1$  определяет фазовый сдвиг между первыми гармониками тока и напряжения.

Так как  $\nu < 1$ , то всегда  $\chi < \cos\varphi_1$ , т.е. коэффициент мощности при частотном регулировании скорости ниже коэффициента мощности при питании от источника с синусоидальным напряжением.

6. Частотное регулирование скорости АД возможно как при постоянном допустимом моменте, так и при постоянной допустимой мощности.

Момент АД определяется по выражению:

$$M = k\Phi I_2' \cos\varphi_2, \quad (2.72)$$

где  $\varphi_2$  – угол между эдс и током ротора.

При малых скольжениях  $\cos\varphi_2 \approx 1$ , поэтому можно записать:

$$M = k\Phi I_2'.$$

Так как  $U_1 \approx E_1 = k_1 \Phi f$ , получим:

$$M = k \frac{U_1}{k_1 f} I_2' = k_2 \frac{U_1}{f} I_2'. \quad (2.73)$$

или в относительных единицах:

$$M_* = \frac{U_{1*}}{f_*} I_{2*}'. \quad (2.74)$$

Допустимую нагрузку на искусственных характеристиках найдем при условии, что  $I_2' = I_{2н}'$ , т.е.  $I_{2*}' = 1$ . Тогда выражение (2.74) можно записать в виде:

$$M_{\text{доп}*} = \frac{U_{1*}}{f_*}. \quad (2.75)$$

Если регулирование напряжения осуществляется по закону  $U_{1*} = f_*$ , то

$$M_{\text{доп}*} = \frac{U_{1*}}{f_*} = \frac{f_*}{f_*} = 1 = \text{const}, \quad (2.76)$$

т.е. в этом случае регулирование скорости АД осуществляется при постоянном допустимом моменте.

При вентиляторной нагрузке  $U_{1*} = f_*^2$ , тогда

$$M_{\text{доп}*} = \frac{U_{1*}}{f_*} = \frac{f_*^2}{f_*} = f_* \approx \omega_*, \quad (2.77)$$

т.е. допустимый момент прямо пропорционален скорости.

### Контрольные вопросы и задания

1. Показатели регулирования скорости электродвигателей.
2. Начертите схему подключения ДТНВ и ДТПВ при регулировании скорости введением добавочных сопротивлений в цепь якоря.
3. Начертите схему подключения ДПТНВ и ДПТПВ при регулировании угловой скорости изменением напряжения на якоре. Каким при этом будет длительно допустимый момент двигателя?
4. Какой диапазон регулирования можно получить при регулировании скорости ДПТ изменением напряжения на якоре?
5. Начертите схему подключения ДПТНВ и ДПТПВ при регулировании скорости ослаблением потока возбуждения.
6. Чем ограничивается диапазон регулирования скорости ДПТНВ ослаблением потока возбуждения?
7. Как изменяются длительно допустимый момент и мощность ДПТ при регулировании скорости изменением потока возбуждения?
8. Начертите схему пуска и пусковую диаграмму ДПТНВ при введении добавочных сопротивлений в цепь якоря.
9. Какие существуют способы регулирования скорости асинхронного двигателя (АД)?
10. Реостатное регулирование скорости АД с фазным ротором, преимущества и недостатки.
11. Регулирование скорости АД изменением напряжения сети.
12. Основные схемы включения при регулировании скорости АД изменением числа пар полюсов.
13. Механические характеристики АД при изменении числа пар полюсов.
14. Преимущества и недостатки регулирования скорости АД изменением числа пар полюсов.
15. В чем заключается сущность частотного регулирования скорости асинхронного двигателя?
16. В чем преимущества частотного регулирования скорости над другими способами регулирования?

17. Назовите основные типы преобразователей частоты. Преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока.
18. Запишите основной закон при частотном регулировании.
19. Начертите механические характеристики при управлении напряжением преобразователя по законам  $U/f = \text{const}$ ,  $U/f^2 = \text{const}$ .
20. В чем заключается принцип скалярного управления при частотном регулировании?

## Глава 3

# МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА.

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

### 3.1. Расчетные схемы механической части электропривода

Задача электропривода состоит в выполнении заданных технологическими требованиями законов движения исполнительных органов рабочей машины. При этом механическое движение от электродвигателя к исполнительному органу передается с помощью механического передаточного устройства (МПУ), к которым относятся редукторы, цепные, ременные, винтовые передачи, муфты и т.п. Анализ механического движения производится с помощью расчетных схем электропривода с использованием законов электромеханики (рис. 3.1а).

Допустим, что указанная схема состоит из абсолютно жестких, недеформируемых элементов и не содержит воздушных зазоров. В этом случае движение одного элемента дает полную информацию о движении всех остальных элементов и от движения одного элемента можно перейти по заранее известной взаимосвязи между координатами к движению любого другого элемента. Поэтому движение электропривода можно рассматривать на каком-либо одном элементе механической части, к которому приведены все внешние моменты сопротивления и инерции. Как правило, этим элементом является вал электродвигателя. В результате приведения реальная кинематическая схема (рис. 3.1а) заменяется расчетной энергетически эквивалентной схемой (рис. 3.1б), в которой подлежат определению приведенные значения  $M_c$  и момента инерции  $J$ .

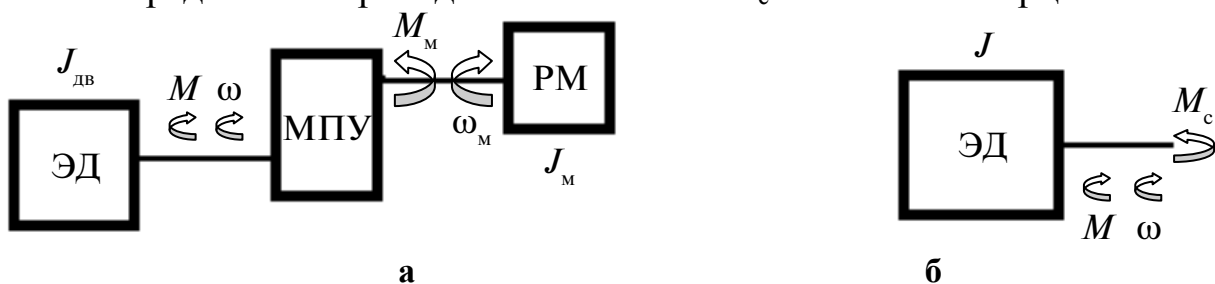


Рис. 3.1

Условием приведения момента сопротивления  $M_m$  рабочей машины является равенство мощностей на валу электродвигателя в реальной (рис. 3.1а) и приведенной (рис. 3.1б) схемах. При этом потери мощности в механическом передаточном устройстве учитываются его КПД –  $\eta_{п}$ .

В реальной схеме мощность на валу двигателя:

$$P_{вр} = \frac{M_m \omega_m}{\eta_{п}}. \quad (3.1)$$

Мощность на валу двигателя в приведенной схеме:

$$P_{впр} = M_c \omega. \quad (3.2)$$

Тогда

$$M_c \omega = \frac{M_M \omega_M}{\eta_{\Pi}}.$$

Откуда

$$M_c = \frac{M_M \omega_M}{\omega \eta_{\Pi}} = \frac{M_M}{\iota \eta_{\Pi}}, \quad (3.3)$$

где  $M_M$  – момент сопротивления рабочей машины;  $M_c$  – тот же момент сопротивления, приведенный к валу двигателя;  $\omega_M$  – угловая скорость рабочей машины;  $\omega$  – угловая скорость электродвигателя,  $\iota = \frac{\omega}{\omega_M}$  – пе-

редаточное число.

В случае если рабочая машина совершает поступательное движение:

$$M_c = \frac{F_M v_M}{\omega \eta_{\Pi}}, \quad (3.4)$$

где  $F_M$  – усилие сопротивления рабочей машины;  $v_M$  – линейная скорость рабочей машины.

Выражения (3.3) и (3.4) справедливы для двигательного режима, когда энергия передается от электродвигателя рабочей машине. При передаче энергии от рабочей машины к двигателю (тормозные режимы работы) указанные выражения примут вид:

- для вращательного движения:

$$M_c = \frac{M_M \eta_{\Pi}}{\iota}, \quad (3.5)$$

- для поступательного движения:

$$M_c = \frac{F_M v_M \eta_{\Pi}}{\omega}. \quad (3.6)$$

Если между двигателем и рабочей машиной несколько передач различного вида (редуктор, цепная или ременная и т.д.), то передаточное число и КПД будут равны:

$$\iota = \iota_1 \iota_2 \dots \iota_n, \quad (3.7)$$

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n. \quad (3.8)$$

Условием приведения моментов инерции и масс к валу двигателя является равенство запаса кинетической энергии в реальной ( $A_{кр}$ ) и приведенной ( $A_{кпр}$ ) расчетной схемах, которые соответственно равны:

$$A_{кр} = J_{дв} \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2} + J_M \frac{\omega_M^2}{2} \text{ и } A_{кпр} = J \frac{\omega^2}{2},$$

где  $J_{\text{дв}}$  – момент инерции ротора двигателя и первого ведущего элемента передачи;  $J_1$  – момент инерции второго и третьего элемента передачи, соответствующий скорости  $\omega_1$ ;  $J_n$  – момент инерции  $(n - 1)$  и  $n$ -го элемента передачи, соответствующий скорости  $\omega_n$ ;  $J_M$  – момент инерции рабочей машины и последнего элемента передачи.

Согласно условию  $A_{\text{кр}} = A_{\text{кпр}}$ , откуда находим:

$$\begin{aligned} J &= J_{\text{дв}} + \frac{J_1}{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} + \frac{J_2}{\left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2} + \dots + \frac{J_n}{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} + \frac{J_M}{\left(\frac{\omega}{\omega_M}\right)^2} = \\ &= J_{\text{дв}} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_2^2} + \dots + \frac{J_n}{i_n^2} + \frac{J_M}{i^2} \end{aligned}$$

или

$$J = J_{\text{дв}} + \sum_1^n \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_M}{i^2}. \quad (3.9)$$

Если в качестве механического передаточного устройства используется редуктор, то его момент инерции можно принять равным  $(0,1 \dots 0,3)J_{\text{дв}}$ , т.е.  $\sum_1^n \frac{J_1}{i_1^2} = (0,1 \dots 0,3)J_{\text{дв}}$ .

Таким образом, окончательно

$$J = (1,1 \dots 1,3)J_{\text{дв}} + \frac{J_M}{i^2}. \quad (3.10)$$

При поступательном движении рабочего органа машины:

$$J = (1,1 \dots 1,3)J_{\text{дв}} + \frac{mV_M^2}{\omega^2}, \quad (3.11)$$

где  $m$  – масса поступательно движущихся частей рабочей машины.

В старых справочниках для двигателя обычно указывается значение махового момента  $GD^2$  в килограммах на метр в квадрате ( $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ). Для получения момента инерции ротора в системе СИ следует воспользоваться выражением:

$$J = \frac{GD^2}{4}. \quad (3.12)$$

### 3.2. Уравнение движения электропривода

Движение электропривода определяется действием двух моментов: момента двигателя и момента сопротивления рабочей машины. Моменты сопротивления разделяют на реактивные и активные. Реак-

тивный момент сопротивления проявляется как реакция рабочей машины на движение и создается силами реакции среды на движущееся тело. Реактивный момент всегда имеет знак, противоположный знаку скорости, который изменяется вместе с направлением вращения. К реактивным относятся моменты сопротивления от сжатия, резания, моменты трения и др. Активный момент сопротивления создается внешними источниками механической энергии и появляется независимо от движения электропривода. При изменении направления вращения знак этого момента не изменяется. К активным относятся моменты, обусловленные весом груза, силой ветра и др.

При изучении движения электропривода возникает необходимость нахождения зависимостей скорости, ускорения, момента, силы, пути, угла поворота от времени, а также определения продолжительности переходного процесса.

Все указанные зависимости можно определить из закона сохранения энергии:

$$\mathcal{E}_д = \mathcal{E}_с + \mathcal{E}_j, \quad (3.13)$$

где  $\mathcal{E}_д$  – энергия, отдаваемая электродвигателем;  $\mathcal{E}_с$  – энергия, потребляемая рабочей машиной;  $\mathcal{E}_j$  – кинетическая энергия, запасенная в движущихся частях системы «двигатель–рабочая машина».

Для вращательного движения:

$$\mathcal{E}_j = J \frac{\omega^2}{2}, \quad (3.14)$$

где  $J$  – приведенный момент инерции системы «двигатель–рабочая машина»;  $\omega$  – скорость электродвигателя.

Тогда

$$\mathcal{E}_д - \mathcal{E}_с = J \frac{\omega^2}{2}. \quad (3.15)$$

Дифференцируем данное выражение:

$$\frac{d\mathcal{E}_д}{dt} - \frac{d\mathcal{E}_с}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (3.16)$$

Учитывая, что  $\frac{d\mathcal{E}}{dt} = P$  есть мощность, запишем:

$$P_д - P_с = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (3.17)$$

Разделив левую и правую части на  $\omega$ , получим:

$$M_д - M_с = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (3.18)$$



Полученное выражение есть уравнение движения электропривода для вращательного движения. Правую часть уравнения (3.18) называют динамическим моментом:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (3.19)$$

Динамический момент складывается из двух составляющих:

- первая –  $J \frac{d\omega}{dt}$  – связана с изменением угловой скорости;
- вторая –  $\frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}$ , или  $\frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}$  – связана с изменением момента

инерции в зависимости от времени  $t$ , угла поворота  $\alpha$  или пути.

Большинство рабочих машин имеет практически постоянное значение момента инерции и тогда уравнение движения можно записать в виде:

$$M_{\text{д}} - M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.20)$$

Откуда

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon, \quad (3.21)$$

где  $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$  – ускорение электропривода.

Таким образом, направление динамического момента всегда совпадает с направлением ускорения электропривода. Уравнения (3.19) и (3.20) соответствуют работе электропривода в двигательном режиме.

Знак динамического момента определяет характер движения электропривода. В зависимости от знака динамического момента различают следующие режимы работы электропривода:

- $M_{\text{дин}} > 0$ , т.е.  $\varepsilon > 0$ , разбег двигателя с рабочей машиной при  $\omega > 0$  и торможение при  $\omega < 0$ ;
- $M_{\text{дин}} < 0$ , т.е.  $\varepsilon < 0$ , торможение при  $\omega > 0$ , разбег при  $\omega < 0$ ;
- $M_{\text{дин}} = 0$ , т.е.  $\varepsilon = 0$ ,  $\omega = \text{const}$ , т.е. установившийся режим работы электропривода.

В общем случае уравнение движения электропривода может быть записано:

$$\pm M \mp M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.22)$$

Знаки перед моментами зависят от режима работы двигателя и характера моментов сопротивления рабочей машины.

### 3.3. Виды переходных процессов в электроприводах. Причины их возникновения

Как было отмечено в п. 3.2, электропривод может работать в одном из двух режимов – установившемся или переходном. Условием установившегося режима является равенство нулю динамического момента. Переходный процесс электропривода имеет место при переходе из одного установившегося режима в другой. В связи с наличием в системе электропривода элементов, обладающих механической, электромагнитной и тепловой инерциями, при изменении внешних возмущающих воздействий этот переход электропривода протекает во времени, а процесс называется переходным.

В зависимости от вида инерции различают механические, электромагнитные и тепловые переходные процессы, которые взаимосвязаны между собой. Тепловые процессы, как правило, протекают значительно медленнее механических и электромагнитных и не оказывают на них существенного влияния, а поэтому в теории электропривода рассматриваются чаще всего отдельно. В тех случаях, когда механическая инерционность существенно больше электромагнитной, последнюю не учитывают, и переходные процессы называют механическими. В случае, если механическая и электромагнитная инерционность сопоставимы, переходный процесс называется электромеханическим.

Таким образом, причины возникновения переходных процессов в электроприводах можно разделить на внешние и внутренние. Внешние причины: пуск, торможение электродвигателя, регулирование скорости, сброс и наброс нагрузки. Внутренней причиной являются механическая и электромагнитная инерционность, препятствующие мгновенному изменению запаса кинетической энергии в механических звеньях электропривода и электромагнитной энергии в обмотках электродвигателя и аппаратов.

Целью изучения переходных процессов является получение законов изменения во времени тока, момента, скорости, ускорения и т.д. Знание законов позволяет установить соответствие динамических характеристик электропривода требованиям технологического процесса, т.е. определить время протекания переходного процесса, оценить допустимость значений тока, момента, скорости, ускорения, правильность выбора электродвигателя. Для некоторых рабочих машин наряду с необходимостью ограничения момента и ускорения предъявляется требование повышенной плавности протекания переходного процесса

путем ограничения производной момента  $\left(\frac{dM}{dt}\right) \leq \left(\frac{dM}{dt}\right)_{\text{доп}}$  или так

называемого рывка  $\rho = \frac{d\varepsilon}{dt} \leq \rho_{\text{доп}}$ .

Для электроприводов позиционных механизмов, осуществляющих заданные перемещения, в ряде случаев нагрев двигателя ограничивает производительность, при этом требуется, чтобы электропривод обрабатывал заданное перемещение при условии минимума выделяющихся в двигателе потерь.

Однако чаще всего при рассмотрении переходных процессов достаточно построить зависимости  $t = f(t)$ ,  $M = \varphi(t)$ ,  $\omega = \psi(t)$ .

### 3.4. Механические переходные процессы в электроприводах при постоянном динамическом моменте

Рассмотрение переходных процессов при наличии только механической инерционности и постоянном динамическом моменте относится к простейшему случаю. Такой переходный процесс возможен, когда механические характеристики двигателя и рабочей машины параллельны, например, как показано на рис. 3.2.

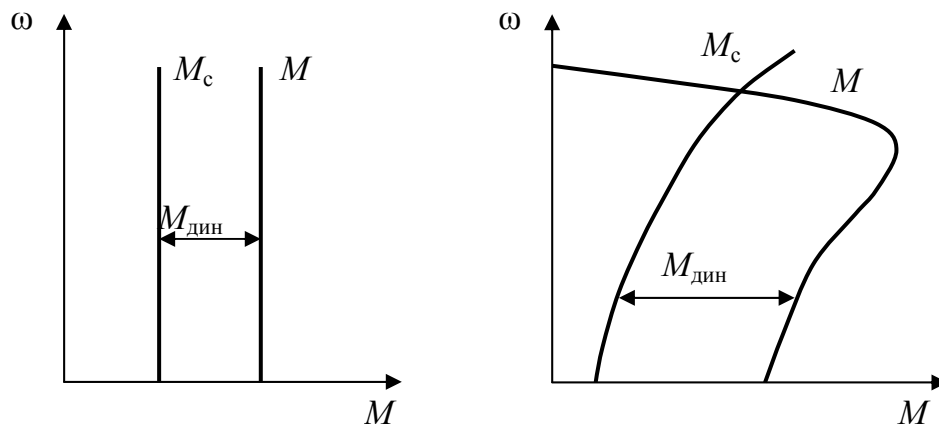


Рис. 3.2

Рассмотрим переходный процесс электропривода при  $M = \text{const}$  и  $M_c = \text{const}$ .

Запишем уравнение движения  $M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$  относительно дифференциала скорости:

$$d\omega = \frac{M - M_c}{J} dt = \varepsilon dt, \quad (3.23)$$

где  $\varepsilon = \frac{M - M_c}{J}$  – ускорение электропривода.

Решение данного уравнения имеет вид:

$$\omega = \varepsilon t + C. \quad (3.24)$$

Постоянная интегрирования  $C$  определяется из начальных условий: при  $t = 0$   $\omega = \omega_{\text{нач}}$  и тогда  $C = \omega_{\text{нач}}$ .

Окончательно получаем известную формулу равномерно ускоренного или замедленного (в зависимости от знака  $\varepsilon$ ) движения:

$$\omega = \omega_{\text{нач}} + \varepsilon t. \quad (3.25)$$

На рис. 3.3 в качестве примера показан процесс пуска двигателя. В момент  $t = 0$  момент двигателя скачком увеличивается до значения  $M = M_1 > M_c$  и двигатель начинает ускоряться с  $\varepsilon = (M_1 - M_c)/J$ . При достижении электроприводом заданной скорости обеспечивается снижение момента двигателя до  $M = M_c$ , ускорение уменьшается до нуля и наступает статический установившийся режим с  $\omega = \omega_{\text{кон}}$ . Время пуска до скорости  $\omega = \omega_{\text{кон}}$ .

$$t_{\text{п}} = \frac{\omega_{\text{кон}}}{\varepsilon} = \frac{J\omega_{\text{кон}}}{M_1 - M_c}. \quad (3.26)$$

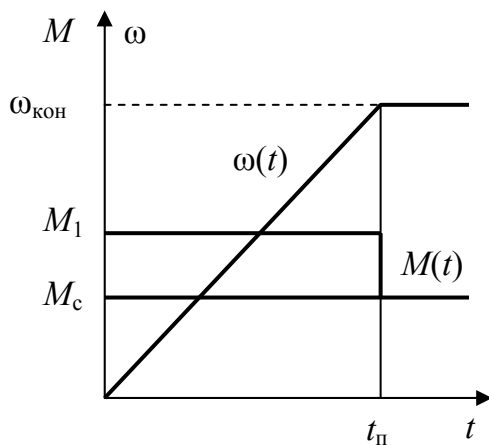


Рис. 3.3

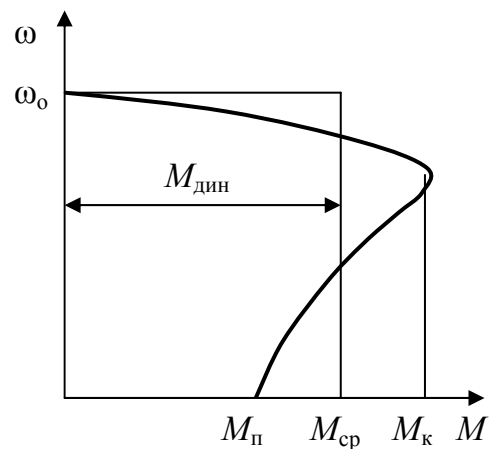


Рис. 3.4

Полученные выражения часто используют при выполнении различных приближенных расчетов переходных процессов в электроприводах, в частности, когда требуется ориентировочно оценить время пуска. Например, время пуска АД вхолостую ( $M_c = 0$ ) согласно рис. 3.4, можно ориентировочно определить по выражению:

$$t_{\text{п}} \approx \frac{J\omega_0}{M_{\text{дин}}}, \quad (3.27)$$

где  $M_{\text{дин}} = M_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{к}} + M_{\text{п}}}{2}$ .

### 3.5. Переходные процессы в электроприводах с динамическим моментом, линейно зависящим от скорости

Рассматриваемый вид переходных процессов является достаточно распространенным. Это справедливо для двигателей постоянного тока независимого возбуждения и частично для асинхронных двигателей (для рабочего участка механической характеристики,  $0 < S < S_k$ ), приводящих в движение рабочие машины с линейной механической характеристикой (например, рис. 3.5).

При этом переходные процессы в рассматриваемой системе можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \\ M = M_{к.з} - \beta\omega - T_э \frac{dM}{dt}; \\ M_c = M_{с0} + \beta_c\omega, \end{cases} \quad (3.28)$$

где  $M_{к.з}$ ,  $M_{с0}$  – моменты электродвигателя и рабочей машины при  $\omega = 0$ ;  $\beta$ ,  $\beta_c$  – модули жесткости механических характеристик двигателя и рабочей машины;  $T_э$  – электромагнитная постоянная времени ( $T_э = \frac{L_я}{R_я}$  – для ДПТ с независимым возбуждением,  $T_э = \frac{1}{\omega_0 S_k}$  – для асинхронного электродвигателя).

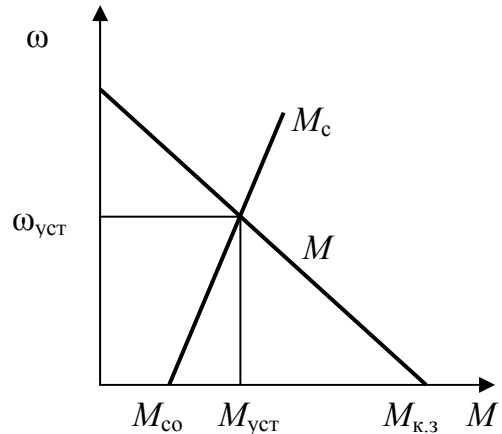


Рис. 3.5

Подставив второе и третье уравнение в первое и сделав несложные преобразования, получим исходное дифференциальное уравнение для скорости:

$$T_э J \frac{d^2\omega}{dt^2} + J \frac{d\omega}{dt} + (\beta + \beta_c)\omega = M_{к.з} - M_{с0} - T_э \frac{dM_c}{dt}. \quad (3.29)$$

Разделив уравнение (3.29) почленно на  $(\beta + \beta_c)$  получим дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$T_э T_M \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{M_{к.з} - M_{с0}}{\beta + \beta_c} - \frac{T_э}{\beta + \beta_c} \frac{dM_c}{dt}, \quad (3.30)$$

где  $T_M = \frac{J}{\beta + \beta_c}$  – электромеханическая постоянная времени электропривода;

да;  $\omega_{уст} = \frac{M_{к.з} - M_{с0}}{\beta + \beta_c} - \frac{T_э}{\beta + \beta_c} \frac{dM_c}{dt}$  – установившееся значение скорости.

Аналогично получим дифференциальное уравнение для момента электродвигателя:

$$T_э T_M \frac{d^2M}{dt^2} + T_M \frac{dM}{dt} + M = M_{уст}, \quad (3.31)$$

где  $M_{уст}$  – установившееся значение момента электродвигателя.

Решение уравнений (3.30), (3.31) и вид переходных процессов зависят от соотношения постоянных времени  $T_\omega$  и  $T_M$ , которые являются важными параметрами электропривода, определяющими темп и характер изменения момента, тока и угловой скорости двигателя в переходных режимах.

Для многих электроприводов малой мощности можно пренебречь электромагнитной инерцией, так как  $T_M \gg T_\omega$ . В этом случае переходные процессы называются механическими. В случае, если нельзя пренебречь электромагнитной инерцией, переходные процессы называются электромеханическими.

### 3.5.1. Механические переходные процессы

В случае механических переходных процессов, когда  $T_\omega = 0$ , уравнение (3.30) принимает вид:

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст}, \quad (3.32)$$

Решение данного уравнения представляет собой:

$$\omega = \omega_{уст} + Ce^{pt}, \quad (3.33)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования;  $p = -\frac{1}{T_M}$  – корень характеристического уравнения  $T_M p + 1 = 0$ .

Постоянную интегрирования  $C$  находим из начальных условий: при  $t = 0$ ,  $\omega = \omega_{нач}$  и  $C = \omega_{нач} - \omega_{уст}$ .

В окончательном виде имеем:

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) e^{-t/T_M}. \quad (3.34)$$

Аналогично будет выглядеть решение уравнения (3.31) для момента двигателя:

$$M = M_{уст} + (M_{нач} - M_{уст}) e^{-t/T_M}. \quad (3.35)$$

Полученные выражения для скорости и момента при принятых допущениях справедливы для различных переходных процессов (пуск, сброс и наброс нагрузки, торможение) при условии линейности механических характеристик двигателя и рабочей машины. В каждом конкретном случае в выражения (3.34) и (3.35) подставляются соответствующие значения скорости  $\omega_{нач}$ ,  $\omega_{уст}$ , момента  $M_{нач}$ ,  $M_{уст}$  и электромеханической постоянной времени. В частности, при  $M_c = \text{const}$   $\beta_c = 0$  и тогда электромеханическую постоянную можно определить по следующим выражениям:

- для двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

$$T_M = \frac{J}{\beta} = \frac{JR_{\text{я}}}{(k\Phi)^2}; \quad (3.36)$$

• для асинхронного электродвигателя: в случае, если принимать линейной механическую характеристику при скольжениях  $0 < S \leq S_K$ :

$$T_M = \frac{J}{\beta} = \frac{J\omega_0 S_K}{M_K}; \quad (3.37)$$

• при скольжениях  $0 < S \leq S_H$ :

$$T_M = \frac{J\omega_0 S_H}{M_H}. \quad (3.38)$$

На рис. 3.6 представлены кривые изменения скорости и момента ДПТ с независимым возбуждением при набросе нагрузки с  $M_{c1}$  до  $M_{c2}$ .

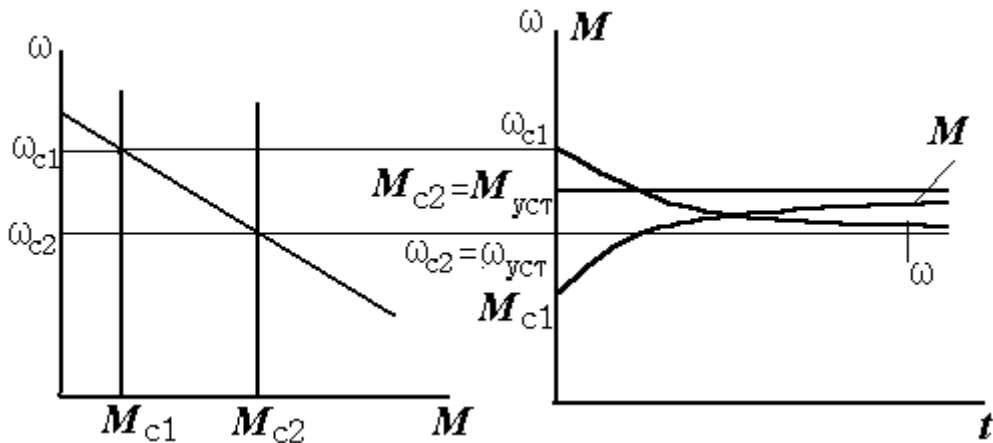


Рис. 3.6

При пуске данного двигателя под нагрузкой из неподвижного состояния ( $\omega_{\text{нач}} = 0$ ) уравнение (3.34) примет вид:

$$\omega = \omega_{\text{уст}} \left(1 - e^{-t/T_M}\right). \quad (3.39)$$

Соответствующие кривые  $\omega(t)$  и  $M(t)$  показаны на рис. 3.7.

Согласно (3.34), (3.35) и (3.39) скорость и момент в переходном режиме достигают своих установившихся значений через бесконечно большое время. Однако практически можно считать переходный процесс закончившимся при  $t_{\text{пп}} = (3 \dots 4)T_M$ , так как при этом скорость и момент составляют 0,95...0,98 от установившегося значения.

Если провести касательную к экспонентам  $\omega(t)$  и  $M(t)$  в точке

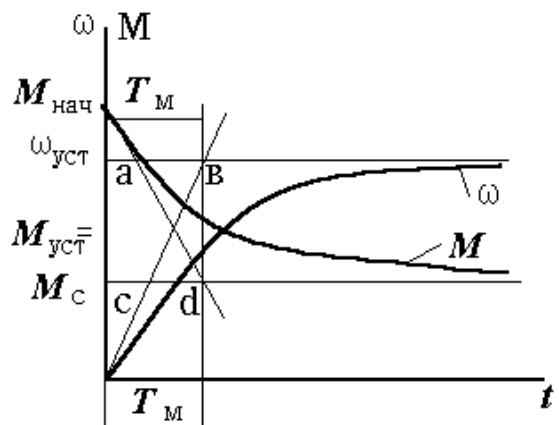


Рис. 3.7

$t = 0$  (рис. 3.7), то отрезки  $\overline{av}$  и  $\overline{cd}$  в масштабе времени будут равны электромеханической постоянной времени  $T_M$ .

Для определения продолжительности переходных процессов необходимо выражения (3.34) и (3.35) записать относительно времени  $t$ , подставив в них соответствующие значения  $\omega_{\text{нач}}$ ,  $\omega_{\text{уст}}$ ,  $M_{\text{нач}}$ ,  $M_{\text{уст}}$  и  $T_M$ .

### 3.5.2. Электромеханические переходные процессы

В случае, когда электромеханическая  $T_M$  и электромагнитная  $T_3$  постоянные времени электропривода соизмеримы, имеют место электромеханические переходные процессы, которые описываются дифференциальными уравнениями (3.30) и (3.31).

Характеристическое уравнение для них имеет вид:

$$T_3 T_M p^2 + T_M p + 1 = 0. \quad (3.40)$$

Корни характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_3} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_3^2} - \frac{1}{T_3 T_M}} = -\frac{1}{2T_3} \pm \frac{\sqrt{1 - 4\frac{T_3}{T_M}}}{2T_3} = -\frac{1}{2T_3} \pm \frac{\sqrt{1 - \frac{4}{m}}}{2T_3}, \quad (3.41)$$

где  $m = \frac{T_M}{T_3}$  – отношение постоянных времени электропривода.

Если  $m > 4$  ( $T_M > 4T_3$ ), то корни вещественные и отрицательные:

$$p_{1,2} = \alpha_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - \frac{4}{m}}}{2T_3}. \quad (3.42)$$

В этом случае общее решение уравнения (3.30) будет иметь вид:

$$\omega = \omega_{\text{уст}} + Ae^{-\alpha_1 t} + Be^{-\alpha_2 t}. \quad (3.43)$$

Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  определим, подставив в (3.43) начальные условия:  $t = 0$ ,  $\omega = \omega_{\text{нач}}$ ,  $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\text{нач}} = \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}}{J}$  в соответствии с первым уравнением системы (3.28).

Получаем  $\omega_{\text{нач}} = \omega_{\text{уст}} + A + B$ ;

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\text{нач}} = \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}}{J} = -A\alpha_1 - B\alpha_2. \quad (3.44)$$

Откуда

$$A = \frac{\alpha_2 (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}}) + \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}}{J}}{\alpha_2 - \alpha_1};$$



$$B = -\frac{\alpha_1 \left( \omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}} \right) + \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}}{J}}{\alpha_2 - \alpha_1}. \quad (3.45)$$

Определив  $A$  и  $B$  и подставив их в выражение (3.43), получим решение дифференциального уравнения (3.30):

$$\omega = \omega_{\text{уст}} + \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \left\{ \left[ \alpha_2 \left( \omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}} \right) + \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}}{J} \right] e^{-\alpha_1 t} - \left[ \alpha_1 \left( \omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}} \right) + \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}}{J} \right] e^{-\alpha_2 t} \right\}. \quad (3.46)$$

При  $m > 4$  ( $T_m > 4T_\vartheta$ ) общее решение уравнения (3.31) будет иметь вид:

$$M = M_{\text{уст}} + A_1 e^{-\alpha_1 t} + B_1 e^{-\alpha_2 t}. \quad (3.47)$$

Для нахождения коэффициентов  $A_1$  и  $B_1$  определим начальные значения  $\omega$ ,  $M$  и  $dM/dt$ . При  $t = 0$   $M = M_{\text{нач}}$ ,  $\omega = \omega_{\text{нач}}$  и второе уравнение системы (3.28) примет вид:

$$M_{\text{нач}} = M_{\text{кз}} - \beta \omega_{\text{нач}} - T_\vartheta \left( \frac{dM}{dt} \right)_{\text{нач}}$$

$$\text{или } M_{\text{нач}} = \beta (\omega_0 - \omega_{\text{нач}}) - T_\vartheta \left( \frac{dM}{dt} \right)_{\text{нач}}.$$

Откуда

$$\left( \frac{dM}{dt} \right)_{\text{нач}} = \frac{\beta \Delta \omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}}{T_\vartheta},$$

где  $\Delta \omega_{\text{нач}} = (\omega_0 - \omega_{\text{нач}})$ .

В результате подстановки начальных условий в (3.47) имеем:

$$M_{\text{нач}} = M_{\text{уст}} + A_1 + B_1,$$

$$\frac{\beta \Delta \omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}}{T_\vartheta} = -\alpha_1 A_1 - \alpha_2 B_1. \quad (3.48)$$

Решив уравнения относительно  $A_1$  и  $B_1$  и подставив в (3.47), получим:

$$M = M_{\text{уст}} + \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \left\{ \left[ \alpha_2 \left( M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}} \right) + \frac{\beta \Delta \omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}}{J} \right] e^{-\alpha_1 t} - \left[ \alpha_1 \left( M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}} \right) + \frac{\beta \Delta \omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}}{J} \right] e^{-\alpha_2 t} \right\}. \quad (3.49)$$

Для примера на рис. 3.8 показаны кривые изменения момента и скорости ДПТ с независимым возбуждением при пуске под нагрузкой ( $M_c = \text{const}$ ) из неподвижного состояния ( $\omega_{\text{нач}} = 0$ ,  $M_{\text{нач}} = 0$ ).

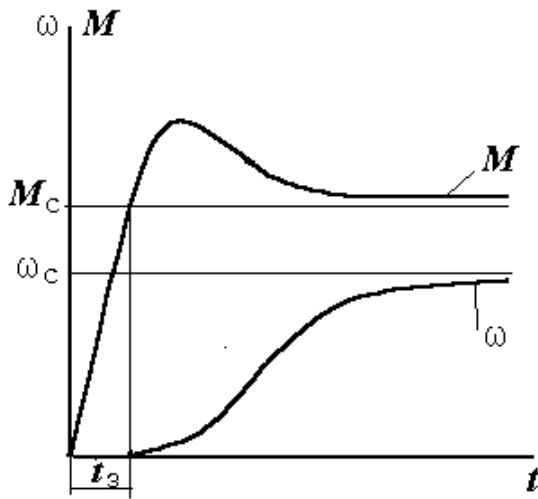


Рис. 3.8

В отличие от рис. 3.7 пуск электродвигателя состоит из двух этапов. На первом этапе двигатель неподвижен пока его момент не достигнет момента трогания ( $M_c$ ). Увеличение момента двигателя зависит от скорости протекания электромагнитного процесса, который описывается уравнением:

$$T_9 \frac{dM}{dt} + M = \beta \omega_0 = M_{к.з.} \quad (3.50)$$

Решение данного уравнения имеет вид:

$$M = M_{к.з.} (1 - e^{-t/T_9}), \quad (3.51)$$

т.е. момент двигателя в пределах времени запаздывания  $t_3$  изменяется по экспоненте, а скорость его изменения определяется электромагнитной постоянной времени  $T_9$  электропривода.

Время запаздывания можно определить из (3.51) при  $M = M_c$ :

$$t_3 = T_9 \ln \frac{M_{к.з.}}{M_{к.з.} - M_c}. \quad (3.52)$$

По истечении времени  $t_3$  двигатель начнет вращаться и будет протекать совместно электромагнитный и механический процесс, составляя единый электромеханический процесс, описываемый уравнениями (3.46) и (3.49).

Если  $m < 4$  ( $T_m < 4T_9$ ), то корни характеристического уравнения (3.40) комплексные сопряженные с отрицательной вещественной частью:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\delta, \quad (3.53)$$

где  $\alpha = \frac{1}{2T_9}$ ,  $\delta = \frac{\sqrt{\frac{4}{m} - 1}}{2T_9}$ .

Решение уравнения (3.30) в этом случае будет иметь вид:

$$\omega = \omega_{уст} + e^{-\alpha t} (A_2 \cos \delta t + B_2 \sin \delta t). \quad (3.54)$$

Значения  $A_2$  и  $B_2$  определяются аналогично  $A$  и  $B$  в (3.40) при тех же начальных условиях. При подстановке  $A_2$  и  $B_2$  в (3.54) получим:

$$\omega = \omega_{уст} + e^{-\alpha t} \left[ (\omega_{нач} - \omega_{уст}) \cos \delta t + \frac{J\alpha (\omega_{нач} - \omega_{уст}) + (M_{нач} - M_{уст})}{J\delta} \sin \delta t \right]. \quad (3.55)$$

Таким же образом, при  $m < 4$  ( $T_M < 4T_\Theta$ ) получаем общее решение уравнения (3.31):

$$M = M_{уст} + e^{-\alpha t} \left[ (M_{нач} - M_{уст}) \cos \delta t + \frac{\beta \Delta \omega_{нач} - M_{нач} (1 - \alpha T_\Theta) - \alpha T_\Theta M_c}{\delta T_\Theta} \sin \delta t \right]. \quad (3.56)$$

Из (3.55) и (3.56) следует, что переходный процесс имеет колебательный характер с затуханием. В качестве примера на рис. 3.9 приведены зависимости  $\omega(t)$  и  $M(t)$  при пуске под нагрузкой ( $M_c = \text{const}$ ) из неподвижного состояния ( $\omega_{нач} = 0$ ).

Из-за колебательного характера переходного процесса увеличивается время пуска, возникает перерегулирование скорости ( $\omega_{max} > \omega_c$ ), снижается эффективность ограничения пускового тока и момента. Колебания затухают за счет электрических и механических потерь в системе электропривода. После нескольких колебаний момент и угловая скорость достигнут установившихся значений  $\omega_c$  и  $M_c$ .

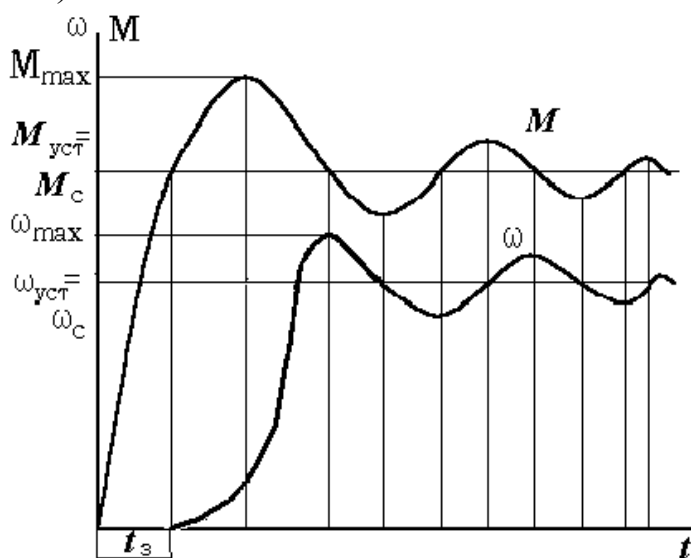


Рис. 3.9

Итак, анализ электромеханических переходных процессов на примере пуска двигателя показывает, что в начале переходного процесса момент (3.51) двигателя определяется переходными токами, обусловленными в основном коммутационными операциями, а далее зависимости  $\omega(t)$  и  $M(t)$  определяются соотношением механической и электромагнитной инерций электропривода, т.е. соотношением электромеханической и электромагнитной постоянных времени, определяющим характер и длительность переходного процесса.

### 3.6. Переходные процессы в электроприводах при произвольной зависимости динамического момента от скорости

Рассматриваемый случай произвольной зависимости динамического момента от скорости возможен в следующих случаях:

- механические характеристики электродвигателя и рабочей машины нелинейные (асинхронные электродвигатели и ДПТ с последовательным возбуждением, вентиляторы, насосы, металлорежущие станки и т.д.);

- механическая характеристика двигателя нелинейная, а рабочей машины – линейная (подъемно-транспортные машины);
- механическая характеристика двигателя линейная (ДПТ с независимым возбуждением, АД в рабочей части), а рабочей машины – нелинейная.

Нахождение зависимостей  $\omega(t)$ ,  $M(t)$  и времени переходного процесса связано с решением уравнения движения (3.20). При известных законах изменения моментов двигателя и рабочей машины основные проблемы связаны с аналитическим решением уравнения (3.20). Когда законы изменения моментов не заданы аналитически или точное решение (3.20) невозможно, используются приближенные способы решения: численные или графоаналитические.

Из графоаналитических методов наибольшее распространение получили метод площадей и метод пропорций. Рассмотрим использование метода площадей на примере пуска АД привода рабочей машины с постоянным моментом сопротивления (рис. 3.10). Известными спосо-

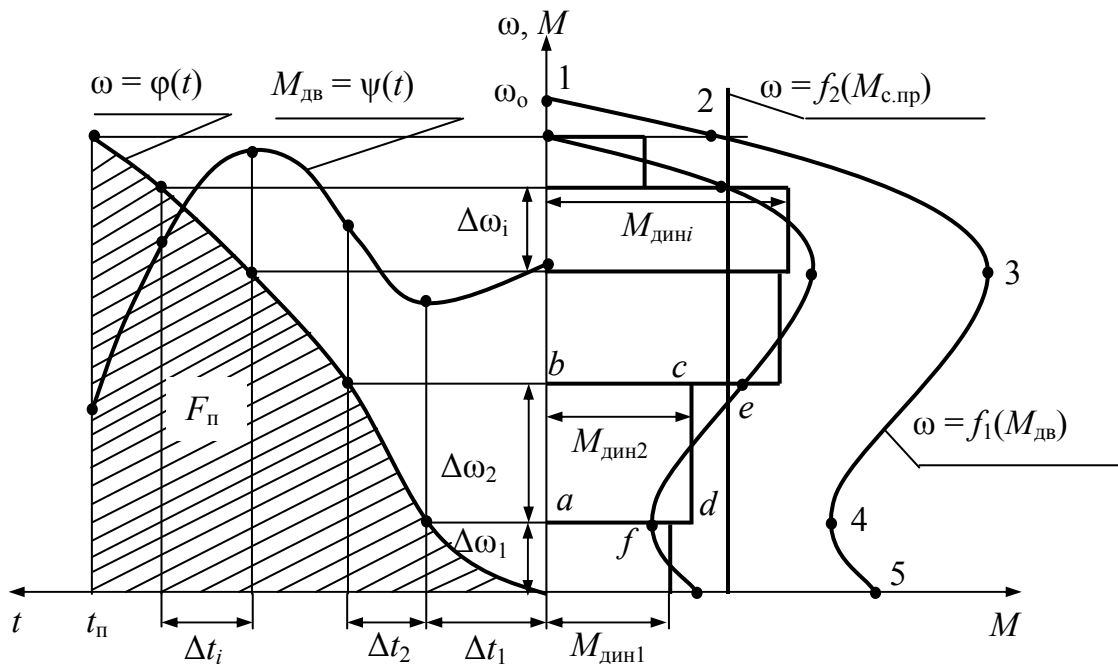


Рис. 3.10

бами в первом квадранте строятся механические характеристики двигателя  $M$  и рабочей машины  $M_c$ . Графически находится их разность  $(M - M_c)$ , т.е. кривая динамического момента  $M_{дин}$ , которая изображается в том же квадранте. Кривая динамического момента разбивается на ряд участков, на каждом из которых момент предполагается постоянным. Величина момента  $M_{динi}$  определяется из равенства площадей:  $S_{abcd} = S_{avef}$ . В уравнении движения (3.20) дифференциалы переменных заменяют их приращениями. Тогда для каждого участка уравнение движения будет иметь вид:

$$M_{\text{динн}} = J \frac{\Delta\omega_i}{\Delta t_i}, \quad (3.57)$$

откуда

$$\Delta t_i = J \frac{\Delta\omega_i}{M_{\text{динн}}}. \quad (3.58)$$

Для построения зависимости  $\omega(t)$  определяют текущие значения скорости и времени как сумму приращения и значения переменной на предыдущем участке, т.е.  $\omega_i = \omega_{i-1} + \Delta\omega_i$  и  $t_i = t_{i-1} + \Delta t_i$ .

Общее время пуска:

$$t_{\text{п}} = \sum_i^n \Delta t_i, \quad (3.59)$$

где  $n$  – число участков.

При известной зависимости  $\omega(t)$  зависимость  $M(t)$  строится с помощью статической механической характеристики  $\omega(M)$ .

Из численных методов интегрирования дифференциальных уравнений широко используются методы Эйлера, Рунге-Кутты и др.

Метод Эйлера заключается в замене дифференциалов переменных в уравнении движения электропривода их приращениями. В результате уравнение можно записать в виде:

$$M_i - M_{\text{сн}} = J \frac{\Delta\omega_i}{\Delta t_i}. \quad (3.60)$$

При использовании вычислительной техники ось скорости разбивают на ряд равных интервалов  $\Delta\omega_i$ , на которых моменты электродвигателя и рабочей машины (рис. 3.11) заменяются постоянными и равными среднему значению:

$$\begin{aligned} M_{\text{ср}i} &= \frac{M_{i+1} + M_i}{2}; \\ M_{\text{с.ср}i} &= \frac{M_{\text{с}(i+1)} + M_{\text{с}i}}{2}. \end{aligned} \quad (3.61)$$

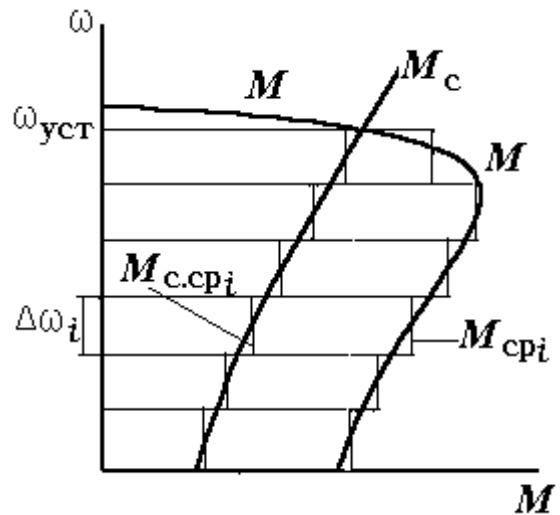


Рис. 3.11

Тогда в соответствии с уравнением движения (3.58) время в интервале  $\Delta t_i$  определяется по выражению:

$$\Delta t_i = J \frac{\Delta\omega_i}{M_{\text{ср}i} - M_{\text{с.ср}i}}. \quad (3.62)$$

Учитывая, что  $\Delta\omega_i = \text{const}$ , общее время пуска определяется по формуле:

$$t_{\Pi} = J \Delta \omega_i \sum_1^n \frac{1}{M_{\text{ср1}} - M_{\text{с.ср1}}}. \quad (3.63)$$

Построение зависимостей  $\omega(t)$  и  $M(t)$  производится аналогично методу площадей. Точность метода определяется количеством интервалов  $\Delta \omega_i$  разбиения. С увеличением количества интервалов  $\Delta \omega_i$  растет точность.

Аналогичным образом определяется время любого другого переходного процесса (наброс и сброс нагрузки, торможение и т.д.). При этом динамический момент в общем случае равный  $M_{\text{дин}} = \pm M \pm M_c$ , необходимо определять с учетом знаков составляющих моментов.

### Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение переходного процесса в электроприводе.
2. Назовите причины возникновения переходных процессов в электроприводе.
3. Назовите основные виды переходных процессов в электроприводе.
4. Запишите уравнение движения электропривода. Поясните возможные состояния электропривода на основании уравнения движения.
5. С какой целью осуществляется приведение моментов электропривода к валу электродвигателя?
6. С какой целью и как осуществляется приведение моментов инерции электропривода к валу электродвигателя?
7. Исходя из каких законов осуществляется приведение моментов сопротивления рабочей машины к валу электродвигателя?
8. Исходя из каких законов осуществляется приведение моментов инерции к валу двигателя?
9. Что такое динамический момент электропривода и когда он проявляется?
10. Определите приведенные к валу момент нагрузки и момент инерции на примере подъемного механизма.
11. Определите время переходного процесса при пуске электропривода при  $M = \text{const}$  и активной нагрузке  $M_c = \text{const}$ .
12. Дайте определение электромеханической постоянной времени.
13. Что такое электромагнитная постоянная времени электропривода?
14. Какое влияние на вид переходного процесса оказывает электромагнитная постоянная времени?
15. Как влияет на вид переходного процесса соотношение между электромеханической и электромагнитной постоянными времени?
16. В чем заключается методика определения продолжительности переходного процесса при произвольной зависимости динамического момента от скорости.

## Глава 4

# НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ

### 4.1. Потери энергии в установившихся и переходных режимах работы электропривода

При преобразовании электрической энергии в механическую часть мощности теряется в механическом передаточном устройстве  $\Delta P_{\text{мех}}$ , а часть – в самом двигателе  $\Delta P_{\text{дв}}$ :

$$\Delta P = \Delta P_{\text{дв}} + \Delta P_{\text{мех}}. \quad (4.1)$$

Потери мощности в механическом передаточном устройстве определяются главным образом трением и оцениваются с помощью КПД, значения которого для разных устройств при разных нагрузках приводятся в справочной литературе.

Потери мощности в двигателе превращаются в тепло, что приводит к нагреву двигателя и наложению ограничений на режимы работы электропривода.

Анализ потерь мощности в электродвигателе в различных режимах работы электропривода важен как с точки зрения анализа экономичности, так и для оценки правильности выбора или проверки двигателя по условиям нагрева. Рост температуры двигателя выше допустимых значений приводит к снижению электрической прочности электроизоляционных материалов из-за изменения их физико-химических свойств и как следствие к пробое изоляции обмоток и выходу двигателя из строя.

Потери мощности в двигателе удобно представлять в виде суммы потерь  $\Delta P_{\text{с}}$ , не зависящих от нагрузки, и потерь  $\Delta P_{\text{в}}$ , которые пропорциональны нагрузке двигателя:

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{в}}. \quad (4.2)$$

К постоянным потерям относят потери в стали  $\Delta P_{\text{ст}}$ , механические потери  $\Delta P_{\text{м}}$  (от трения в подшипниках и вентиляционные потери), потери в обмотке возбуждения  $\Delta P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}$  (для ДПТ независимого возбуждения). Однако «постоянные» потери остаются неизменными только при работе двигателя на естественной механической характеристике, когда скорость изменяется незначительно. В этом случае их принимают равными своему номинальному значению  $\Delta P_{\text{сн}}$ .

Переменные потери  $\Delta P_{\text{в}}$  определяются потерями в меди.

Для двигателей постоянного тока:

$$\Delta P_{\text{в}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}\Sigma} = I_{\text{н}}^2 R_{\text{я}\Sigma} \left( \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{н}}} \right)^2 = \Delta P_{\text{вн}} \left( \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{н}}} \right)^2, \quad (4.3)$$

где  $\Delta P_{\text{вн}}$  – номинальные переменные потери мощности.

Для асинхронных двигателей:

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2'. \quad (4.4)$$

Если учесть, что при малых скольжениях  $I_\mu \approx \text{const}$ ,  $\cos\varphi_2 \approx 1$ , можно записать, что  $I_1^2 \approx I_\mu^2 + I_2'^2$  и  $I_\mu^2 R_1 \approx \text{const}$ .

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= 3(I_2')^2 R_2' \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) = \\ &= 3(I_{2H}')^2 R_2' \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \left(\frac{I_2'}{I_{2H}'}\right)^2 = \Delta P_{vH} \left(\frac{I_2'}{I_{2H}'}\right)^2. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Таким образом, переменные потери для различных двигателей будут определяться одним выражением:

$$\Delta P_v = \Delta P_{vH} x^2, \quad (4.5a)$$

где  $x = \frac{I}{I_H}$  – кратность тока нагрузки двигателей.

При этом мощность потерь в двигателе:

$$\Delta P_{дв} = \Delta P_{сн} + \Delta P_{vH} x^2 = \Delta P_{vH} (\alpha + x^2), \quad (4.6)$$

где  $\alpha = \frac{\Delta P_{сн}}{\Delta P_{vH}}$  – коэффициент потерь, зависящий от номинальной мощности, скорости и исполнения двигателя,  $\alpha = 0,5 \dots 2$ , для АД –  $\alpha = 0,5 \dots 0,7$ .

Определив номинальные потери мощности в двигателе:

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \quad (4.7)$$

из системы уравнений:

$$\begin{cases} \Delta P_H = \Delta P_{сн} + \Delta P_{vH}; \\ \alpha = \frac{\Delta P_{сн}}{\Delta P_{vH}}, \end{cases} \quad (4.8)$$

вычисляют номинальные постоянные  $\Delta P_{сн}$  и переменные  $\Delta P_{vH}$  потери мощности, а по выражению (4.6) – общие потери в двигателе при нагрузке, отличной от номинальной.

Особое значение правильная оценка потерь энергии имеет для регулируемых электроприводов, потому что выбор способа регулирования скорости двигателя определяется в конечном итоге его экономичностью.

При анализе потерь энергии в регулируемых приводах следует учитывать, что постоянная составляющая  $\Delta P_c$  потерь (4.2) изменяется при регулировании скорости.



Для двигателей постоянного тока приближенно можно считать:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{дв}} &= \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{v}} = \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{v}} = \\ &= \Delta P_{\text{вн}} \left( \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega} \right)^m + (\Delta P_{\text{мн}} + \Delta P_{\text{ст.н}}) \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2 + M(\omega_0 - \omega), \end{aligned} \quad (4.9)$$

где  $\omega_0$  – скорость идеального холостого хода на регулировочной характеристике, «н» – означает соответствующие номинальные потери и скорость,  $m = 1 \dots 2$  – показатель степени, используемый при аппроксимации кривой намагничивания в пределах изменения тока возбуждения от нуля до номинального.

Данное выражение справедливо для всех способов регулирования скорости ДПТ с учетом изменения составляющих потерь в зависимости от способа регулирования.

Для асинхронного регулируемого электропривода потери приближенно можно принять:

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{v}} = \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{ст.с}} + \Delta P_{\text{ст.р}} + \Delta P_{\mu} + \Delta P_{\text{v}}, \quad (4.10)$$

где  $\Delta P_{\text{ст.с}}$ ,  $\Delta P_{\text{ст.р}}$  – потери в стали статора и ротора соответственно,  $\Delta P_{\mu} = 3I_{\mu}^2 R_1$  – потери в меди статора от намагничивающего потока  $I_{\mu}$ .

Механические потери можно принять:

$$\Delta P_{\text{м}} \approx \Delta P_{\text{мн}} \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2. \quad (4.11)$$

Суммарные потери в стали статора и ротора (от вихревых токов и наличия явления гистерезиса) можно определить по выражению:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст.с}} + \Delta P_{\text{ст.р}} = \Delta P_{\text{ст.с.н}} \left( \frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^2 \left( \frac{f}{f_{\text{н}}} \right)^{1,3} (1 + S^{1,3}), \quad (4.12)$$

где  $\Delta P_{\text{ст.с.н}}$  – номинальные потери в стали статора при  $U_{\text{н}}$  и  $f_{\text{н}}$ .

Переменные потери в АД определяются по выражению:

$$\Delta P_{\text{v}} = M \omega_0 S \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2x}} \right). \quad (4.13)$$

Составляющие потерь (4.10) изменяются в зависимости от конкретного способа регулирования скорости АД.

Не менее важной задачей, чем для установившихся режимов работы, является определение потерь энергии за время переходного процесса. Особенно большое значение этот вопрос имеет для электроприводов, у которых динамический режим является основным, например, подъемные краны, мобильные кормораздатчики при индивидуальном дозировании, молочные сепараторы и др.

В общем случае потери энергии в переходном процессе определяются выражением:

$$\Delta A_{\Pi} = \int_0^{t_{\Pi}} \Delta P(t) dt = \int_0^{t_{\Pi}} [\Delta P_c(t) + \Delta P_v(t)] dt = \Delta A_c + \Delta A_v, \quad (4.14)$$

где  $\Delta A_c$  и  $\Delta A_v$  – потери энергии, обусловленные соответственно постоянными и переменными потерями мощности.

Так как в переходных процессах токи двигателей в большинстве случаев значительно превышают номинальные, то доля потерь энергии, обусловленная постоянными потерями мощности, мала и ими можно пренебречь.

Тогда

$$\Delta A_{\Pi} \approx \int_0^{t_{\Pi}} \Delta P_v(t) dt. \quad (4.15)$$

Общее выражение для потерь энергии можно получить на основании того, что переменные потери мощности в якорной цепи ДПТ независимого возбуждения и в роторе АД определяются выражением:

$$\Delta P_v = M \omega_0 S = M (\omega_0 - \omega), \quad (4.16)$$

где  $S = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}$  – относительный перепад скорости ДПТ независимого

возбуждения;  $S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  – скольжение для АД.

Тогда при  $M_c = 0$  в соответствии с уравнением движения (3.22) момент двигателя:

$$M = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Отсюда

$$dt = \frac{J d\omega}{M} = -\frac{J \omega_0 dS}{M}. \quad (4.17)$$

Подставив в (4.15) выражения для  $\Delta P_v$  (4.16) и  $dt$  (4.17), изменив одновременно пределы интегрирования (при  $t = 0$   $S = S_{\text{нач}}$ , при  $t = t_{\Pi}$   $S = S_{\text{кон}}$ ), получим:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\Pi} &= \int_0^{t_{\Pi}} \Delta P_v dt = \int_0^{t_{\Pi}} M \omega_0 S dt = \int_{S_{\text{нач}}}^{S_{\text{кон}}} -J \omega_0^2 S dS = \\ &= \int_{S_{\text{кон}}}^{S_{\text{нач}}} J \omega_0^2 S dS = \frac{J \omega_0^2}{2} (S_{\text{нач}}^2 - S_{\text{кон}}^2). \end{aligned} \quad (4.18)$$

Определим с помощью (4.18) потери энергии при некоторых типичных переходных процессах (пуск, торможение, реверс) для ДПТ и асинхронных двигателей, подставив соответствующие значения  $S_{\text{нач}}$  и  $S_{\text{кон}}$ .

Для пуска вхолостую ( $M_c = 0$ )  $\omega_{\text{нач}} = 0$ ,  $\omega_{\text{кон}} = \omega_0$ ;  $S_{\text{нач}} = 1$ ,  $S_{\text{кон}} = 0$ , поэтому

- для двигателей постоянного тока:

$$\Delta A_{\text{п}} = \frac{J\omega_0^2}{2}; \quad (4.19)$$

- для асинхронных двигателей (с учетом потерь в статорной цепи и дополнительном сопротивлении роторной цепи):

$$\Delta A_{\text{п}} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2x}} \right). \quad (4.20)$$

При торможении противовключением  $\omega_{\text{нач}} = \omega_0$ ,  $\omega_{\text{кон}} = 0$ ;  $S_{\text{нач}} = 2$ ,  $S_{\text{кон}} = 1$  соответственно

- для двигателей постоянного тока:

$$\Delta A_{\text{п}} = \frac{3J\omega_0^2}{2}; \quad (4.21)$$

- для асинхронных двигателей:

$$\Delta A_{\text{п}} = \frac{3J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2x}} \right). \quad (4.22)$$

При динамическом торможении  $\omega_{\text{нач}} = \omega_0$ ,  $\omega_{\text{кон}} = 0$  и  $S_{\text{нач}} = 0$ ,  $S_{\text{кон}} = 1$ :

- для двигателей постоянного тока:

$$\Delta A_{\text{п}} = \frac{J\omega_0^2}{2}; \quad (4.23)$$

- для асинхронных двигателей:

$$\Delta A_{\text{п}} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2x}} \right). \quad (4.24)$$

При реверсе  $\omega_{\text{нач}} = \omega_0$ ,  $\omega_{\text{кон}} = -\omega_0$  и  $S_{\text{нач}} = 2$ ,  $S_{\text{кон}} = 0$ :

- для двигателей постоянного тока:

$$\Delta A_{\text{п}} = \frac{4J\omega_0^2}{2}; \quad (4.25)$$

- для асинхронных двигателей:

$$\Delta A_{\text{п}} = \frac{4J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2x}} \right). \quad (4.26)$$

Таким образом, потери энергии при торможении противовключением равны тройному запасу кинетической энергии электропривода и в три раза превышают потери при динамическом торможении, а потери при реверсе равны сумме потерь при торможении противовключением и пуске.

В переходных процессах со статической нагрузкой на валу момент двигателя определяется как динамической, так и статической состав-

ляющей. В этом случае потери мощности в якоре ДПТ или в роторе АД равны:

$$\begin{aligned}\Delta P_v &= M(\omega_0 - \omega) = \left( M_c + J \frac{d\omega}{dt} \right) (\omega_0 - \omega) = \\ &= \left[ J \omega_0 \frac{d\omega}{dt} - J \omega \frac{d\omega}{dt} \right] + M_c (\omega_0 - \omega).\end{aligned}\quad (4.27)$$

Потери энергии зависят от характера статического момента и формы механической характеристики и определяются:

$$\begin{aligned}\Delta A_{\Pi} &= \int_0^{t_{\Pi}} \Delta P_v(t) dt = \int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega_{\text{кон}}} J(\omega_0 - \omega) d\omega + \int_0^{t_{\Pi}} M_c (\omega_0 - \omega) dt = \\ &= \frac{J \omega_0^2}{2} (S_{\text{нач}}^2 - S_{\text{кон}}^2) + \int_0^{t_{\Pi}} M_c \omega_0 dt - \int_0^{t_{\Pi}} M_c \omega dt.\end{aligned}\quad (4.28)$$

В общем виде решение (4.28) может быть затруднено, так как момент сопротивления  $M_c$  и скорость  $\omega$  могут быть сложными функциями времени.

Поэтому рассмотрим достаточно простой случай: пуск электродвигателя при  $M_c = \text{const}$ .

В этом случае

$$\Delta A_{\Pi} = \frac{J \omega_0^2}{2} (S_{\text{нач}}^2 - S_{\text{кон}}^2) + M_c \left( \omega_0 t_{\Pi} - \int_0^{t_{\Pi}} \omega dt \right) = \Delta A_{\text{дин}} + \Delta A_c. \quad (4.29)$$

Первый член  $\Delta A_{\text{дин}}$  выражения (4.29) представляет собой потери энергии, обусловленные разгоном инерционных масс, а второй  $\Delta A_c$  – потери, вызванные наличием момента сопротивления  $M_c$ .

Для пусковых режимов величина  $\Delta A_c$  положительна. Для тормозных режимов  $\Delta A_c$  отрицательна.

Если аналитическое выражение  $\omega(t)$  очень сложное или оно вообще не существует, то определить интеграл можно воспользовавшись графиком (рис. 3.10). Очевидно, что интеграл  $\int_0^{t_{\Pi}} \omega dt$  представляет со-

бой площадь  $F_{\Pi}$ , т.е.

$$\int_0^{t_{\Pi}} \omega dt = F_{\Pi}, \quad (4.30)$$

тогда

$$\Delta A_{\Pi} = \frac{J \omega_0^2}{2} (S_{\text{нач}}^2 - S_{\text{кон}}^2) + M_c (\omega_0 t_{\Pi} - F_{\Pi}). \quad (4.31)$$

Для асинхронного электродвигателя (с учетом потерь цепи статора и дополнительном сопротивлении в цепи ротора):

$$\Delta A_{\Pi} = \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2x}} \right) \left[ \frac{J\omega_0^2}{2} (S_{\text{нач}}^2 - S_{\text{кон}}^2) + M_c (\omega_0 t_{\Pi} - F_{\Pi}) \right]. \quad (4.32)$$

Потери для ДПТ и АД в тормозных режимах и при реверсе определяются по выражениям (4.31) и (4.32) при подстановке соответствующих значений  $\omega_{\text{нач}}$ ,  $\omega_{\text{кон}}$  и  $S_{\text{нач}}$ ,  $S_{\text{кон}}$ .

Анализ полученных выражений (4.31) и (4.32) показывает, что основными способами снижения потерь энергии в переходных режимах являются:

- уменьшение момента инерции  $J$  электропривода;
- регулирование скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  двигателей в переходных режимах;
- применение АД с повышенным сопротивлением ротора  $R'_2$ .

Уменьшение момента инерции  $J$  электропривода возможно за счет снижения момента инерции применяемых электродвигателей, путем выбора оптимального передаточного числа механического передаточного устройства, а также путем замены, где это возможно по конструктивным соображениям, одного двигателя двумя, имеющими половинную номинальную мощность заменяемого двигателя.

Регулирование скорости идеального холостого хода можно обеспечить для ДПТ изменением напряжения на якоре, а для АД – изменением числа пар полюсов или изменением частоты питающего напряжения.

У двигателей с короткозамкнутым ротором уменьшение потерь в статоре достигается применением электродвигателей с повышенным сопротивлением ротора: электродвигателей с глубоким пазом, со сплошным стальным ротором.

## 4.2. Нагрев и охлаждение электродвигателей

Потери энергии в электродвигателе вызывают его нагрев. Вследствие неоднородности двигателя как физического тела точный учет тепловых процессов в нем оказывается весьма сложным. Конструкция электродвигателей содержит элементы, выполненные из материалов, имеющих различную теплопроводность и теплоемкость: медь обмоток, сталь, из которой выполнены магнитопроводы и станина, изоляционные материалы. Существенно на нагрев влияют способ охлаждения и положение отдельных частей двигателя относительно потока охлаждающего воздуха. В связи с этим лобовые и пазовые части обмотки находятся в различных условиях охлаждения.

В осевом направлении двигателя также имеется неравномерное распределение температуры. Основное количество теплоты выделяет-

ся в обмотках. Поэтому нагрев электродвигателя при работе определяется допустимой температурой, которая ограничивается нагревостойкостью изоляционных материалов, применяемых в двигателе. Превышение допустимой температуры ведет к преждевременному разрушению изоляции и выходу двигателя из строя или сокращению срока его службы. По нагревостойкости изоляционные материалы делятся на шесть классов: А, Е, В, F, Н и С с предельно допустимой температурой от 105 до 180 °С (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Класс изоляции	А	Е	В	F	Н	С
Предельно допустимая температура $\vartheta_{\text{доп}}$ , °С	105	120	130	155	180	>180
Допустимое превышение температуры $\tau_{\text{доп}}$ , °С	60	75	85	110	135	>135

Основными классами изоляции, применяемой в современных электродвигателях, являются F (155 °С) и Н (180 °С).

Расчетная практика и экспериментальные исследования показывают, что удовлетворительные тепловые модели электродвигателей для предварительного их выбора и проверки по нагреву можно получить, приняв следующие допущения, не искажающие в целом физическую картину процессов нагрева:

- двигатель принимают за сплошное однородное тело с бесконечно большой теплопроводностью, т.е. имеющее одинаковую температуру во всех точках;
- теплоотдача в окружающую среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и среды;
- окружающая среда обладает бесконечно большой теплоемкостью, т.е. в процессе нагрева двигателя ее температура не изменяется;
- потери мощности, теплоемкость двигателя, коэффициент теплоотдачи не зависят от температуры двигателя.

Для определения температуры двигателя и характера ее изменения составим тепловой баланс за элементарный промежуток времени  $dt$ .

Выделяемое в двигателе тепло  $dQ_1$  расходуется на увеличение его температуры  $dQ_2$ , а также отдается в окружающую среду  $dQ_3$ , т.е.

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3 \quad (4.33)$$

или

$$\Delta P dt = C d\tau + A \tau dt, \quad (4.34)$$

где  $\Delta P$  – потери в двигателе,  $C$  – теплоемкость двигателя,  $A$  – теплоотдача двигателя,  $\tau = \vartheta - \vartheta_{\text{о.с}}$  – превышение температуры двигателя  $\vartheta$  над температурой окружающей среды  $\vartheta_{\text{о.с}}$ .

При выполнении тепловых расчетов температура окружающей среды принимается равной 40 °С, которой соответствует номинальная мощность двигателя, указанная в паспорте.

Разделив обе части уравнения (4.34) на  $A dt$ , получим:

$$\frac{\Delta P}{A} = \frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt} + \tau \quad (4.35)$$

или

$$T_H \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{уст}, \quad (4.36)$$

где  $T_H = C/A$  – постоянная времени нагрева двигателя;  $\tau_{уст} = \Delta P/A$  – установившееся значение превышения температуры двигателя.

Решение уравнения (4.36) аналогично решению уравнения (3.32) и имеет вид:

$$\tau = \tau_{уст} + (\tau_{нач} - \tau_{уст}) e^{-t/T_H}, \quad (4.37)$$

где  $\tau_{нач}$  – начальное значение превышения температуры двигателя.

Выражение (4.37) может быть использовано для исследования изменения превышения температуры двигателя как при его нагреве, так и при охлаждении, например, при увеличении и уменьшении нагрузки, а также при отключении электродвигателя от сети. При этом в данное выражение необходимо подставить соответствующие значения  $\tau_{нач}$ ,  $\tau_{уст}$  и постоянной времени нагрева  $T_H$  или охлаждения  $T_0$ .

При увеличении нагрузки растут потери мощности  $\Delta P$ , а значит  $\tau_{уст}$  и  $\tau$ , при уменьшении нагрузки  $\tau_{уст}$  и  $\tau$  уменьшаются. При отключении электродвигателя от сети  $\Delta P$ , а следовательно, и  $\tau_{уст}$  равны 0. В этом случае уравнение (4.37) примет вид:

$$\tau = \tau_{нач} e^{-t/T_0}, \quad (4.38)$$

где  $T_0$  – постоянная времени охлаждения электродвигателя.

На рис. 4.1 в качестве примера представлены графики изменения превышения температуры двигателя  $\tau(t)$  при его включении (кривая 1), увеличении нагрузки (кривая 2), а на рис. 4.2 – при отключении от сети (кривая 1) и уменьшении нагрузки (кривая 2).

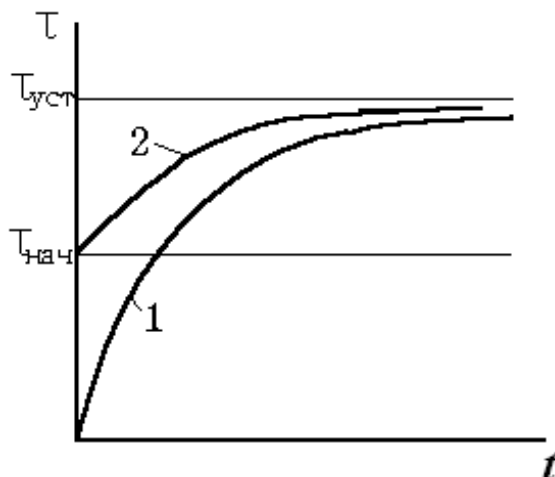


Рис. 4.1

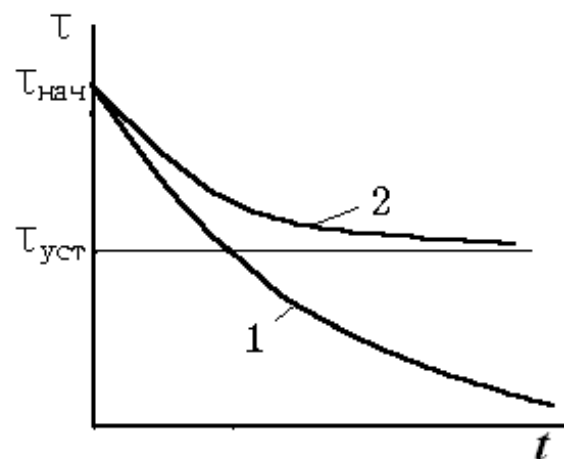


Рис. 4.2

Время изменения превышения температуры от начального до установившегося значения теоретически равно бесконечности, практически же можно считать равным:

$$t_{уст} \approx (3-4)T_H \text{ или } t_{уст} \approx (3-4)T_0. \quad (4.39)$$

При этом превышение температуры двигателя составляет  $(0,95 \dots 0,98)\tau_{уст}$ .

Таким образом, скорость изменения превышения температуры двигателя определяется постоянной времени нагрева или охлаждения.

Для лучшего понимания процессов нагрева и охлаждения остановимся более подробно на постоянных времени нагрева и охлаждения двигателя. Обычно в качестве постоянной времени нагрева двигателя принимается постоянная наиболее ответственной его части, отражающая общий тепловой режим работы. У двигателей постоянного тока обычно используют постоянную времени якоря, у асинхронного двигателя – постоянную времени статора.

Постоянные времени могут быть определены из уравнений нагрева (4.37) и охлаждения (4.38), если принять в каждом из них продолжительность процесса равной постоянной времени нагрева или охлаждения. В результате при нагреве превышение температуры двигателя при сообщении постоянного количества тепла ( $\Delta P = \text{const}$ ) достигнет  $0,632\tau_{уст}$ , а при остывании –  $0,368\tau_{нач}$ . Отсюда можно определить постоянные времени нагрева (рис. 4.3) и охлаждения (рис. 4.4).

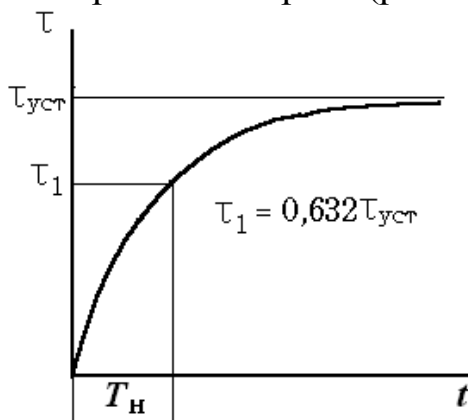


Рис. 4.3

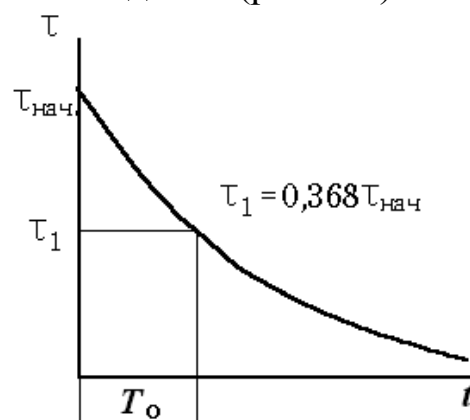


Рис. 4.4

Постоянную времени нагрева можно определить и как время нагрева двигателя до установившегося значения превышения температуры  $\tau_{уст}$  при отсутствии отдачи тепла в окружающую среду ( $A = 0$ ). Тогда уравнение (4.34) примет вид:

$$\Delta P dt = C d\tau. \quad (4.40)$$

Пусть в момент времени  $t = 0$   $\tau_{нач} = 0$ .

После интегрирования  $\int_0^{t_{уст}} \Delta P dt = \int_0^{\tau_{уст}} C d\tau$ , получим:  $\Delta P t_{уст} = C \tau_{уст}$ .



Учитывая, что  $\tau_{уст} = \Delta P / A$ , получим:

$$t_{уст} = \frac{C}{\Delta P} \tau_{уст} = \frac{C}{A} = T_H. \quad (4.41)$$

Следовательно, при отсутствии отдачи тепла в окружающую среду нагрев двигателя происходит по закону прямой, а время нагрева до установившегося значения превышения температуры равно постоянной времени нагрева  $T_H$ . Отсюда следует, что постоянные времени нагрева  $T_H$  и охлаждения  $T_O$  можно определить как отрезок, заключенный между перпендикуляром к оси абсцисс, проведенным через точку касания касательной к кривой  $\tau(t)$ , и точкой пересечения этой касательной с асимптотой  $\tau_{уст}$  (рис. 4.5 и 4.6).

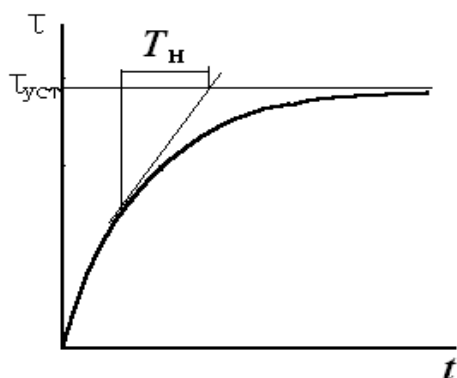


Рис. 4.5

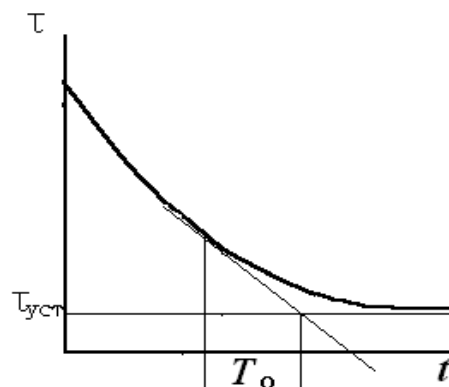


Рис. 4.6

Для определения постоянной времени нагрева можно применить метод трех точек, воспользовавшись уравнением нагрева (4.37). Для этого в координатных осях  $\tau$  и  $t$  строится экспериментально полученная кривая  $\tau(t)$  (рис. 4.7).

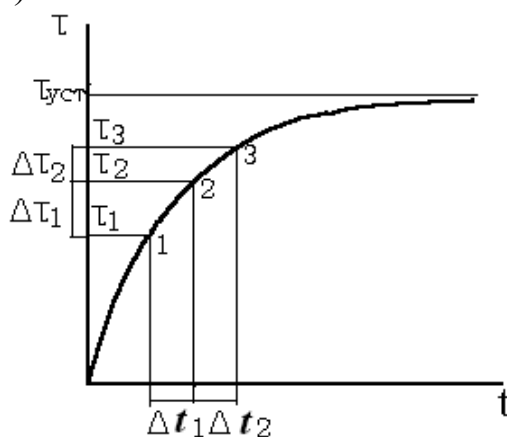


Рис. 4.7

На оси  $t$  откладывают равные отрезки  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$ , из концов отрезков восстанавливают перпендикуляры до пересечения с кривой нагрева  $\tau(t)$ . Через полученные точки 1, 2 и 3 проводят горизонтальные прямые и получают значения превышения температур  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$ . Далее уравнение нагрева (4.37), запишем для точки 2 и точки 3, имея в виду что,  $\tau_{нач1} = \tau_1$ ,  $\tau_{нач2} = \tau_2$ :

$$\tau_2 = \tau_{уст} + (\tau_1 - \tau_{уст}) e^{-\Delta t / T_H}; \quad (4.42)$$

$$\tau_3 = \tau_{уст} + (\tau_2 - \tau_{уст}) e^{-\Delta t / T_H}. \quad (4.43)$$

Вычитая (4.42) из (4.43), получим:

$$\tau_3 - \tau_2 = (\tau_2 - \tau_{уст}) e^{-\Delta t / T_H} - (\tau_1 - \tau_{уст}) e^{-\Delta t / T_H} = (\tau_2 - \tau_1) e^{-\Delta t / T_H},$$

и далее

$$\tau_3 - \tau_2 = (\tau_2 - \tau_1) e^{-\Delta t / T_H}. \quad (4.44)$$

Прологарифмировав выражение (4.44) и сделав несложные преобразования, получим:

$$T_H = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}}. \quad (4.45)$$

Следует отметить, что процессы нагрева и охлаждения двигателей могут характеризоваться различными значениями постоянной времени в зависимости от режима работы и типа электродвигателя. Связано это с тем, что постоянная времени зависит от теплоотдачи двигателя. Поэтому если при пуске, регулировании скорости двигателя или при охлаждении, вызванном его остановом, условия теплоотдачи изменяются, то изменяется постоянная времени.

При отключении двигателя от сети ухудшение теплоотдачи характеризуется коэффициентом ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе (якоре):

$$\beta_o = \frac{A_o}{A}, \quad (4.46)$$

где  $A_o$ ,  $A$  – теплоотдача соответственно при неподвижном двигателе и номинальной скорости.

Примерные значения коэффициента  $\beta_o$  для двигателей различного исполнения и систем охлаждения представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Исполнение двигателя и система охлаждения	$\beta_o$
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95...0,98
Закрытый самовентилируемый	0,45...0,55
Защищенный самовентилируемый	0,25...0,35

С учетом (4.46) постоянная времени охлаждения при неподвижном роторе (якоре) составляет:

$$T_o = \frac{T_H}{\beta_o}, \quad (4.47)$$

т.е.  $T_o \geq T_H$ .

Величину теплоотдачи в переходных режимах  $A_{пр}$  практически можно принимать равной среднему из ее значений при неподвижном состоянии и при номинальной скорости, т.е.:

$$A_{пр} = \frac{A + A_o}{2} = \frac{A(1 + \beta_o)}{2}. \quad (4.48)$$

Тогда для периодов пуска и торможения:

$$\beta = \frac{A_{пр}}{A} = \frac{1 + \beta_o}{2}. \quad (4.49)$$

Таким образом, при различных нагрузках и режимах работы процессу нагрева будут соответствовать различные кривые  $\tau(t)$  изменения превышения температуры двигателя. При этом необходимость определения температуры двигателя обусловлена тем, что при его выборе должно соблюдаться условие:

$$\tau_{max} \leq \tau_{доп}, \quad (4.50)$$

где  $\tau_{доп}$  – допустимое превышение температуры, определяемое классом изоляции;  $\tau_{max}$  – наибольшее значение превышения температуры двигателя в процессе работы.

Для определения  $\tau_{max}$  необходимо знать график изменения потерь мощности  $\Delta P$  во времени, которые определяются нагрузкой, и данные о характере движения электропривода, задаваемые обычно в виде зависимости  $\omega(t)$ .

В качестве примера рассмотрим процесс изменения превышения температуры двигателя, представленный на рис. 4.8.

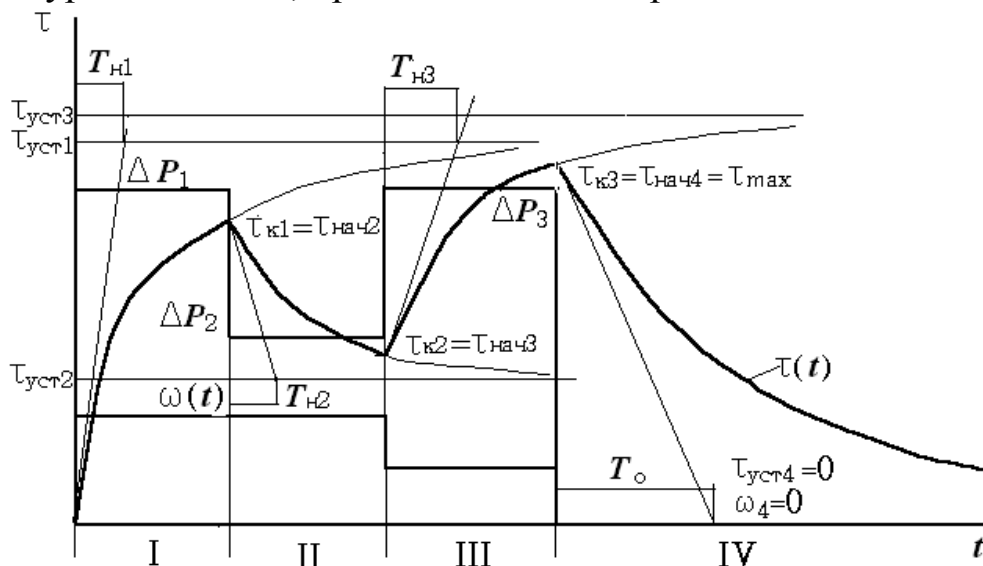


Рис. 4.8

Пусть в начале процесса нагрева (участок 1) потери мощности  $\Delta P_1$ ,  $\tau_{нач1} = 0$ . Тогда в соответствии с (4.37):

$$\tau_1(t) = \frac{\Delta P_1}{A} \left( 1 - e^{-t/T_{н1}} \right),$$

где  $T_{н1} = \frac{C}{A_1}$  и  $\tau_{уст1} = \frac{\Delta P_1}{A_1}$ .

На участке II потери мощности  $\Delta P_2$  меньше, чем на участке I, поэтому наблюдается процесс снижения  $\tau$ . Начальное значение  $\tau_{нач2}$  определяется конечным значением  $\tau_{к1}$ , а установившееся значение превышения температуры будет равно:  $\tau_{уст2} = \frac{\Delta P_2}{A_2}$ . Учитывая, что скорость двигателя на обоих участках одинакова, теплоотдача также не изменится, т.е.  $A_2 = A_1$ .

Экспонента  $\tau(t)$  на участке II имеет ту же постоянную времени, так как теплоемкость  $C$  и теплоотдача  $A_2$ , определяющие  $T_{н2}$ , не изменились. На участке III изменение  $\tau$  вызвано ростом потерь мощности  $\Delta P_3$  и снижением теплоотдачи  $A_3$ , так как произошло снижение скорости двигателя, имеющего самовентиляцию. Переходный процесс по-прежнему описывается уравнением нагрева (4.37). Начальное значение  $\tau_{нач3} = \tau_{к2}$ , установившееся значение  $\tau_{уст3} = \Delta P_3 / A_3 > \tau_{уст1}$ , а постоянная времени нагрева  $T_{н3} = C / A_3 > T_{н1}$ , ввиду того, что  $\Delta P_3 = \Delta P_1$ ,  $A_3 < A_1$ . Превышение температуры в конце участка III должно удовлетворять условию  $\tau_{к3} \leq \tau_{доп}$ .

При отключении двигателя от сети (участок IV), когда потери мощности  $\Delta P_4 = 0$  и  $\tau_{уст4} = 0$ , наблюдается процесс охлаждения, описываемый уравнением (4.38), с постоянной времени  $T_o = T_{н1} / \beta_o$  и  $\tau_{нач4} = \tau_{к3}$ .

### **4.3. Нагрузочные диаграммы электроприводов. Типовые режимы работы двигателей**

Выбор или проверка двигателя по условиям нагрева состоит в сопоставлении параметров режима работы, для которого двигатель проектировался (этот режим называется номинальным), с параметрами режима, в котором двигатель реально работает. Данные, содержащиеся в паспорте ЭД, относятся к определенному номинальному режиму и называются номинальными данными двигателя. При работе в номинальном режиме при номинальной нагрузке двигатель полностью используется в тепловом отношении.

Первичной информацией для расчета параметров реального режима, необходимых для выбора двигателей по мощности, являются зависимости статического момента сопротивления  $M_c(t)$  и скорости  $\omega(t)$  рабочей машины во времени. Зависимость  $M_c(t)$  называется нагрузочной диаграммой рабочей машины, которая может быть получена экспериментально либо расчетным путем на основании технологических данных. Под нагрузочной диаграммой двигателя понимается зависи-

мость момента двигателя от времени  $M(t)$ , которая определяется из уравнения движения (3.22):

$$M(t) = M_c(t) + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.51)$$

На рис. 4.9 представлены в качестве примера нагрузочные диаграммы рабочей машины  $M_c(t)$  и электродвигателя  $M(t)$  с линейной механической характеристикой при  $T_0 = 0$ .

Соотношение между электромеханической постоянной  $T_m$  и длительностью отдельных участков нагрузочной диаграммы рабочей машины  $t_1$  определяет степень приближения зависимости  $M(t)$  к зависимости  $M_c(t)$ . При  $t_1 \gg 3T_m$   $M_{\max} \approx M_{c,\max}$ , при  $t_1 < 3T_m$  момент двигателя всегда меньше  $M_c$ , в частности  $M_{\max} < M_{c,\max}$ .

Нагрузочная диаграмма может быть представлена и в виде зависимостей  $P(t)$  и  $I(t)$ .

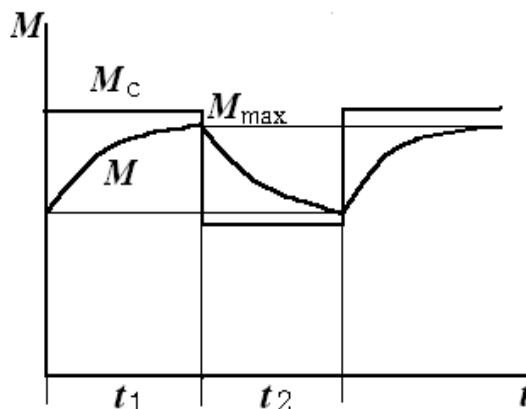


Рис. 4.9

Для выпускаемых в настоящее время электродвигателей предусматривается десять типовых режимов с условными обозначениями от S1 до S10 [ГОСТ Р 52776–2007 (МЭК 600-1–2004)].

1. Продолжительный (длительный) режим работы (S1) – это режим работы двигателя при постоянной нагрузке такой продолжительностью, что превышения температур всех его частей достигают установившихся значений  $\tau_{уст} = \Delta P / A$ , т.е.  $t_p > (3...4)T_n$  (рис. 4.10).

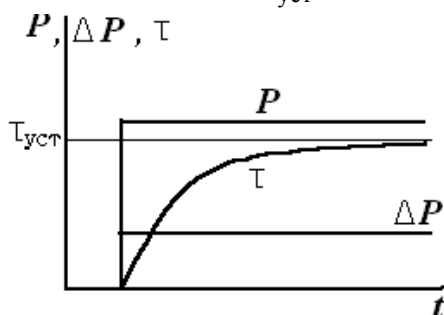


Рис. 4.10

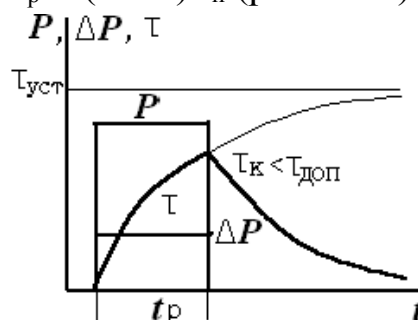


Рис. 4.11

Указанное значение  $\tau_{уст}$  является наибольшим для данного номинального режима.

В паспортных данных двигателей продолжительного режима работы указываются номинальные: мощность  $P_n$ , частота вращения  $n_n$ , напряжение  $U_n$ , ток  $I_n$ ,  $\cos\phi_n$ ,  $\eta_n$ , класс изоляции.

2. Кратковременный режим работы (S2) – это режим, при котором период постоянной нагрузки чередуется с периодом отключения дви-

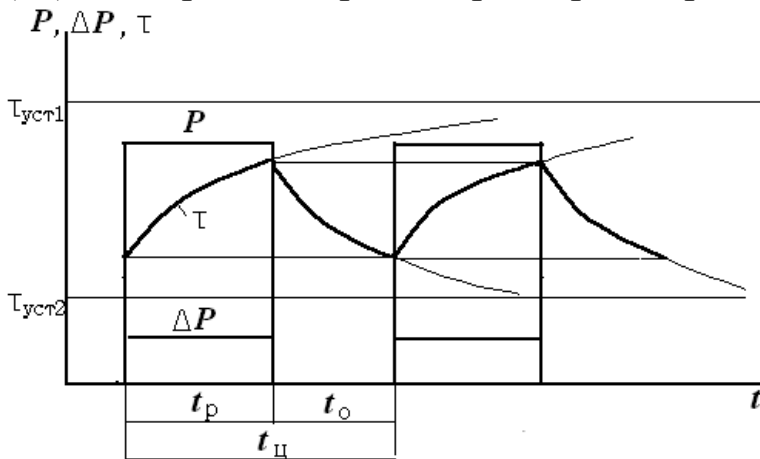
гателя. При этом за период нагрузки превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения  $\tau_{уст}$ , а за период отключения все его части охлаждаются до температуры окружающей среды, т.е.  $t_p < 3T_n$ , а  $t_o > 3T_o$  (рис. 4.11). Стандартные значения продолжительности рабочего периода  $t_p$  равны: 15, 30, 60 и 90 мин.

В паспортных данных двигателей кратковременного номинального режима указываются  $P_n$ ,  $n_n$ ,  $U_n$ ,  $\cos\phi_n$ ,  $\eta_n$ , при определенном стандартном значении  $t_p$ . Как видно из рис. 4.11, критерием здесь является значение максимальной температуры двигателя, в конце рабочего периода:

$$\vartheta_{max} = \vartheta_{o.c} + \tau_k \leq \vartheta_{доп},$$

где  $\vartheta_{o.c}$  – температура окружающей среды,  $\vartheta_{o.c} \leq 40$  °С;  $\tau_k$  – превышение температуры в конце рабочего периода;  $\vartheta_{доп}$  – допустимая температура двигателя для данного класса изоляции.

3. Повторно-кратковременный периодический режим работы (S3) – это режим, при котором кратковременные периоды постоянной



**Рис. 4.12**

нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами отключения двигателя (паузы), причем как за время рабочего периода, так и за время паузы превышения температуры двигателя не достигают установившихся значений  $\tau_{уст1}$  и  $\tau_{уст2}$ , т.е.  $t_p < 3T_n$  и  $t_o < 3T_o$  (рис. 4.12).

Повторно-кратковременный режим работы характеризуется продолжительностью включения:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_o} 100 \% = \frac{t_p}{t_ц} 100 \%. \quad (4.52)$$

В относительных единицах:

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_ц}, \quad (4.53)$$

где  $t_p$  – время рабочего периода;  $t_o$  – время паузы;  $t_ц$  – время цикла. Стандартные значения продолжительности включения 15; 25; 40 и 60 % или  $\varepsilon = 0,15; 0,25; 0,4; 0,6$ .

Максимальная допустимая продолжительность цикла для режима S3 равна 10 мин. Для режима S3 номинальные паспортные данные соответствуют только определенному значению ПВ и относятся к рабо-

чему периоду. Естественную механическую характеристику двигателя строят по номинальным данным, соответствующим ПВ = 40 %.

Рассмотренные режимы  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$  являются основными и наиболее характерными для двигателей.

Режимы  $S4$ ,  $S5$  являются разновидностью режима  $S3$ .

4. Повторно-кратковременный периодический режим работы с пусками ( $S4$ ) – это режим работы, при котором чередуется последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых содержит длинный пуск, время работы при постоянной нагрузке и время покоя. Для данного режима нормируются продолжительность включения, число пусков в час (30, 60, 120 и 240) и коэффициент инерции электропривода равный отношению суммарного приведенного момента инерции привода к моменту инерции ротора (якоря) двигателя (1,2; 1,6; 2; 2,5; 4).

5. Повторно-кратковременный периодический режим ( $S5$ ) с пусками и электрическими торможениями – это режим работы, при котором чередуется последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из времени пуска, времени работы при постоянной нагрузке, времени электрического торможения и времени покоя.

Это режим, при котором потери при пуске и электрическом торможении существенно влияют на рост превышения температуры двигателя. Нормируемые величины те же, что и для режима  $S4$ .

6. Непрерывный периодический режим с кратковременной нагрузкой (перемежающийся) ( $S6$ ) – это режим работы, при котором чередуется последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из времени работы при постоянной нагрузке и времени работы на холостом ходу. Время покоя отсутствует (рис. 4.13).

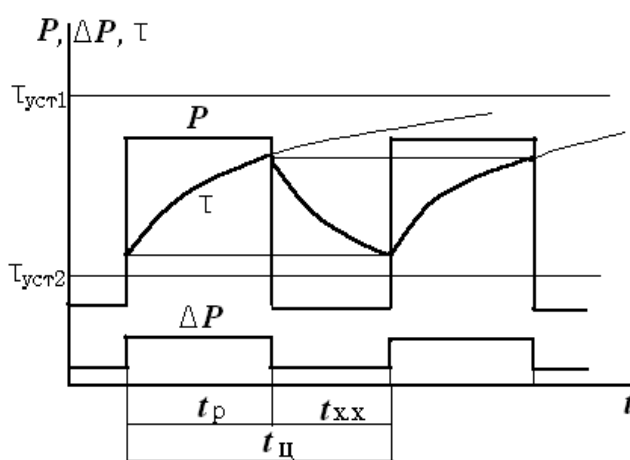


Рис. 4.13

Этот режим характеризуется продолжительностью нагрузки:

$$ПН = \frac{t_p}{t_p + t_{x.x}} 100 \%. \quad (4.54)$$

В относительных единицах:

$$\epsilon_{п} = \frac{t_p}{t_p + t_{x.x}}. \quad (4.55)$$

Стандартные значения ПН равны 15, 25, 40 и 60 %.

7. Непрерывный периодический режим с электрическим торможением ( $S7$ ) – это режим работы, при котором чередуется последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из времени пуска, времени работы при постоянной нагрузке и времени электрического торможения. Время покоя отсутствует. Потери мощности при торможении существенно влияют на рост превышения температуры двигателя. Для этого режима нормируется число пусков в час (30, 60, 120 и 240) и коэффициент инерции (1,2; 1,6; 2; 2,5; 4).

8. Непрерывный периодический режим с взаимозависимыми изменениями нагрузки и частоты вращения ( $S7$ ) – это режим работы, при котором чередуется последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из времени работы при постоянной нагрузке, соответствующей заданной частоте вращения, за которым следуют один или более периодов работы при других постоянных нагрузках, соответствующих различным частотам вращения, что достигается, например, путем изменения числа полюсов в асинхронных двигателях. Время покоя отсутствует. При этом ни на одной из скоростей превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения. Для данного режима нормируются продолжительность нагрузки, число циклов в час (30, 60, 120 и 240), коэффициент инерции (1,2; 1,6; 2; 2,5; 4).

9. Режим с непериодическими изменениями нагрузки и частоты вращения ( $S9$ ) – это режим работы, при котором обычно нагрузка и частота вращения изменяются непериодически в допустимом рабочем диапазоне. Этот режим часто включает в себя перегрузки, которые могут значительно превышать базовую нагрузку. Для этого типа режима постоянная нагрузка, выбранная соответствующим образом и основанная на типовом режиме  $S1$ , берется как базовая для определения перегрузки.

10. Режим с дискретными постоянными нагрузками и частотами вращения ( $S10$ ) – это режим работы, состоящий из ограниченного числа дискретных нагрузок (или эквивалентных нагрузок) и, если возможно, частот вращения, при этом каждая комбинация нагрузки/частоты вращения сохраняется достаточное время для того, чтобы машина достигла практически установившегося теплового состояния. Минимальная нагрузка в течение рабочего цикла может иметь и нулевое значение (холостой ход, покой или бестоковое состояние).

#### **4.4. Выбор электродвигателей по мощности**

Выбор электродвигателей по мощности состоит в том, чтобы обеспечить наибольшее соответствие его температурного режима номинальному, т.е. чтобы выполнялось условие (4.50):  $\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп}}$ . Поэтому мощность двигателя должна выбираться в строгом соответствии с режимом работы и ожидаемой нагрузкой.



В общем случае задача выбора двигателя по мощности решается в два этапа. Точная нагрузочная диаграмма двигателя может быть построена только при известных данных двигателя и уточненном характере движения электропривода. Поэтому на первом этапе двигатель предварительно выбирается по нагрузочной диаграмме рабочей машины  $M_c(t)$  или  $P_c(t)$ .

На втором этапе производится уточнение нагрузочной диаграммы двигателя  $I(t)$ ,  $M(t)$  или  $P(t)$  и характера движения  $\omega(t)$ . Затем производится построение графика потерь  $\Delta P(t)$  и далее проверка по уточненным данным предварительно выбранного двигателя. В случае переменной нагрузки двигатель необходимо проверить также по условиям пуска и перегрузочной способности.

#### 4.4.1. Выбор двигателей по мощности при продолжительном режиме работы

##### Постоянная нагрузка

При постоянной нагрузке (рис. 4.10) на валу двигателя его мощность выбирается по условию:

$$P_n \geq P_{\text{расч}}, \quad (4.56)$$

где  $P_n$ ,  $P_{\text{расч}}$  – соответственно номинальная мощность двигателя и расчетная мощность рабочей машины.

Расчетная мощность рабочей машины определяется по соответствующим технологическим зависимостям с учетом потерь в механическом передаточном устройстве.

При выполнении условия (4.56) обеспечиваются условия  $\Delta P \leq \Delta P_n$  и  $\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{уст}} \leq \tau_{\text{доп}}$ . Таким образом, при постоянной нагрузке не требуется дополнительных расчетов по определению нагрева двигателя. Нужно лишь проверить его по условию пуска:

$$M_n \geq M_{\text{тр}} + M_{\text{изб}}, \quad (4.57)$$

где  $M_n$  – пусковой момент двигателя с учетом возможного снижения напряжения;  $M_{\text{тр}}$  – момент трогания рабочей машины;  $M_{\text{изб}}$  – избыточный момент, необходимый для обеспечения разбега двигателя [ $M_{\text{изб}} = (0,2 \dots 0,3)M_{\text{сн}}$ ];  $M_{\text{сн}}$  – момент сопротивления рабочей машины при номинальной скорости.

Необходимо обратить внимание на то, что условие (4.56) справедливо в том случае, когда двигатель работает при температуре окружающей среды  $\vartheta_{\text{о.с}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , установленной стандартом.

При номинальной нагрузке и  $\vartheta_{\text{о.с}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  превышение температуры двигателя равно допустимому значению:

$$\vartheta_{\text{доп}} - 40 = \tau_{\text{доп}} = \frac{\Delta P}{A} = \frac{\Delta P_{\text{сн}} + \Delta P_{\text{вн}}}{A} = \frac{\Delta P_{\text{вн}}}{A}(\alpha + 1), \quad (4.58)$$

где  $\Delta P_{\text{сн}}$ ,  $\Delta P_{\text{вн}}$  – соответственно постоянные и переменные номинальные потери мощности;  $\alpha = \frac{\Delta P_{\text{сн}}}{\Delta P_{\text{вн}}}$  – коэффициент потерь (для общепромышленных серий ДПТ независимого возбуждения  $\alpha = 1 \dots 1,5$ , для АД с короткозамкнутым ротором  $\alpha = 0,5 \dots 0,7$ ).

Если двигатель работает при температуре окружающей среды  $\vartheta_{\text{о.с}}$ , отличной от стандартной ( $40^\circ\text{C}$ ), то для сохранения той же предельно допустимой температуры нагрева  $\vartheta_{\text{доп}}$  допустимое превышение температуры должно быть уменьшено или увеличено. Для этого необходимо обеспечить, чтобы значение тока двигателя было равно  $I = xI_{\text{н}}$ , соответственно переменные потери будут равны  $\Delta P_{\text{в}} = x^2 \Delta P_{\text{вн}}$ .

При этом установившееся превышение температуры будет равно:

$$\tau_{\text{уст}} = \vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_{\text{о.с}} = \frac{\Delta P_{\text{вн}}}{A} (\alpha + x^2). \quad (4.59)$$

Разделив (4.59) на (4.58), получим:

$$\frac{\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_{\text{о.с}}}{\vartheta_{\text{доп}} - 40} = \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}. \quad (4.60)$$

Отсюда допустимая степень загрузки двигателя при  $\vartheta_{\text{о.с}} \neq 40^\circ\text{C}$  будет равна:

$$x = \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_{\text{о.с}}}{\vartheta_{\text{доп}} - 40} (\alpha + 1) - \alpha}, \quad (4.61)$$

допустимая мощность:

$$P_{\text{доп}} = xP_{\text{н}}. \quad (4.62)$$

В этом случае при выборе двигателя по мощности должно выполняться условие:

$$P_{\text{доп}} \geq P_{\text{расч}}. \quad (4.63)$$

### Переменная циклическая нагрузка

На рис. 4.14 представлен характерный случай переменной циклической нагрузки  $P(t)$  и в общем виде соответствующий ему график мощности потерь  $\Delta P(t)$ .

В этом случае в соответствии с (4.37) изменяется температура двигателя. При достаточно большом числе циклов работы электропривода  $n$ , когда  $nt_{\text{ц}} > 4T_{\text{н}}$ , температура двигателя в начале и в конце цикла оказывается одинаковой, а  $\tau_{\text{ср}}$  не изменяется. Такой режим называют *квазиустановившимся*. Наибольшее значение превышения температуры двигателя  $\tau_{\text{max}}$  будет иметь при нагрузке  $P_4$ . При этом критерием правильного выбора двигателя является условие:

$$\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп}}. \quad (4.64)$$

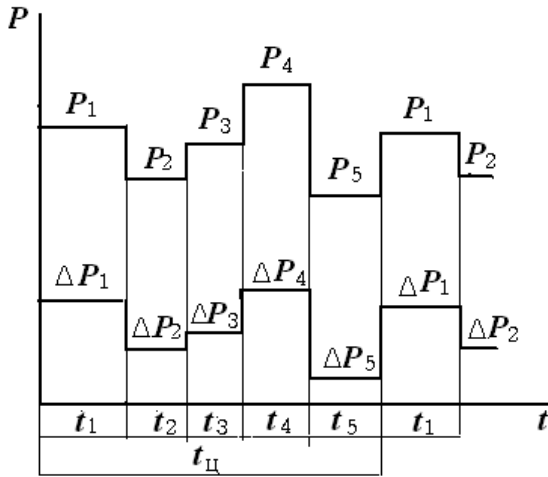


Рис. 4.14

Причем оценка нагрева двигателя может быть сделана прямым или косвенными методами.

Прямой метод связан с построением по (4.37) кривой нагрева  $\tau(t)$ , определением по ней  $\tau_{\max}$ , что требует больших затрат времени. Поэтому на практике чаще пользуются косвенными методами, к которым относятся: метод средних потерь и методы эквивалентных величин — тока, момента и мощности.

**Метод средних потерь** является наиболее точным и универсальным из косвенных методов и базируется на сопоставлении средних потерь мощности  $\Delta P_{\text{ср}}$  за цикл работы двигателя с номинальными потерями  $\Delta P_{\text{н}}$ .

Если учесть, что для квазиустановившегося режима работы количество выделившегося тепла в двигателе за цикл равняется отданному в окружающую среду, то уравнение теплового баланса можно записать:

$$\int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt = A \tau_{\text{ср}} t_{\text{ц}}, \quad (4.65)$$

из которого следует, что

$$\int_0^{t_{\text{ц}}} \frac{\Delta P dt}{A t_{\text{ц}}} = \tau_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_{\text{ср}}}{A}, \quad (4.66)$$

где  $\int_0^{t_{\text{ц}}} \frac{\Delta P}{t_{\text{ц}}} dt = \Delta P_{\text{ср}}$  — средние потери мощности за цикл работы.

Для того чтобы обеспечить выполнение условия  $\tau_{\text{ср}} \leq \tau_{\text{н}} = \tau_{\text{доп}}$ , необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}, \quad (4.67)$$

где  $P_{\text{н}}$ ,  $\eta_{\text{н}}$  — соответственно номинальная мощность и КПД двигателя.

В случае, когда на отдельных участках нагрузка постоянна (рис. 4.14), средние потери мощности определяются по формуле:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \sum_1^n \frac{\Delta P_i t_i}{t_{\text{ц}}}, \quad (4.68)$$

где  $\Delta P_i$  — потери мощности на  $i$ -м участке;  $t_i$  — продолжительность  $i$ -го участка;  $n$  — число участков в цикле.

Если в процессе работы теплоотдача на разных участках рабочего цикла изменяется (например, для двигателя с самовентиляцией), то средние потери мощности определяются:

$$\Delta P_{\text{cp}} = \sum_1^n \Delta P_i t_i / \sum_1^n \beta_i t_i, \quad (4.69)$$

где  $\beta_i$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на разных участках рабочего цикла.

Если в рабочем цикле присутствуют периоды пуска и торможения, то

$$\beta_i = \beta + (1 - \beta) \frac{\omega_i}{\omega}, \quad (4.70)$$

где  $\beta = \frac{1 + \beta_0}{2}$ ,  $\beta_0$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе.

### Порядок выбора электродвигателя по методу средних потерь

1. По нагрузочной диаграмме рабочей машины определяют среднюю мощность на валу электродвигателя:

$$P_{\text{cp}} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\eta_{\text{п}} t_{\text{ц}}} \quad (4.71)$$

или

$$P_{\text{cp}} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\eta_{\text{п}} \sum_1^n \beta_i t_i}. \quad (4.72)$$

2. Из каталога выбирают электродвигатель по условию:

$$P_{\text{н}} \geq k_3 P_{\text{cp}}, \quad (4.73)$$

где  $k_3 = 1,1 \dots 1,3$  – коэффициент запаса, который принимается тем больше, чем более резко переменный характер имеет нагрузочная диаграмма.

3. Определяют потери мощности для каждого участка:

$$\Delta P_i = \Delta P_{\text{сн}} + \Delta P_{\text{вн}} x_i^2, \quad (4.74)$$

где  $x_i = \frac{P_i}{P_{\text{н}}}$  – коэффициент загрузки на  $i$ -м участке.

В случае если известна зависимость КПД от нагрузки, потери мощности определяются по выражению:

$$\Delta P_i = P_i \frac{1 - \eta_i}{\eta_i}, \quad (4.75)$$

где  $\eta_i$  – КПД двигателя при нагрузке  $P_i$ .

4. По полученным данным строят график  $\Delta P(t)$  (рис. 4.14).

5. По (4.68) или (4.69) определяют средние потери мощности за цикл и сравнивают их с номинальными:  $\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{н}}$ .

6. Выбранный электродвигатель проверяют по условию надежного пуска (4.57):

$$M_{\text{п}} \geq M_{\text{тр}} + M_{\text{изб}}; \quad (4.76)$$

- для двигателей постоянного тока:

$$M_{\text{п}} = (2 \dots 2,5) M_{\text{н}};$$

• для асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором:

$$M_{\text{п}} = k_U^2 M_{\text{пн}},$$

где  $M_{\text{пн}} = \mu_{\text{п}} M_{\text{н}}$  – пусковой момент двигателя при номинальном напряжении;  $\mu_{\text{п}}$  – кратность пускового момента;  $k_U = U_{\text{дейст}} / U_{\text{н}}$  – коэффициент, учитывающий снижение напряжения при пуске;  $U_{\text{дейст}}$  – действительное напряжение на обмотке статора при пуске;  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение.

7. Выбранный электродвигатель проверяют по условию допустимой максимальной нагрузки:

$$M_{\text{мах.доп}} \geq M_{\text{мах.нагр}} + 0,25 M_{\text{н}}, \quad (4.77)$$

где  $M_{\text{мах.нагр}}$  – максимальный за рабочий цикл момент на валу двигателя (например, на рис. 4.14 максимальный момент имеет место при  $P_4$ );  $M_{\text{мах.доп}}$  – допустимый момент для данного типа двигателя:

- для асинхронного двигателя:

$$M_{\text{мах.доп}} = k_{U1}^2 M_{\text{к}},$$

где  $M_{\text{к}} = \mu_{\text{к}} M_{\text{н}}$  – критический момент двигателя;  $\mu_{\text{к}}$  – кратность критического момента;  $k_{U1} = 0,95$  – коэффициент, учитывающий отклонение напряжения на обмотке статора в период рабочего цикла;

- для двигателей постоянного тока:

$$M_{\text{мах.доп}} = (2 \dots 2,5) M_{\text{н}}.$$

С помощью метода средних потерь нагрев двигателя оценивается по среднему значению превышения температуры  $\tau_{\text{ср}}$ . В этом заключается определенная погрешность, так как максимальный перегрев  $\tau_{\text{мах}}$  двигателя на отдельных участках цикла может превышать  $\tau_{\text{ср}}$ . Поэтому погрешность будет тем меньше, чем больше постоянная времени нагрева двигателя  $T_{\text{н}}$  будет превышать значение  $t_{\text{мах}}$  наиболее продолжительного участка цикла, на котором мощность нагрузки превышает среднее значение  $P_{\text{ср}}$ . При этом  $\tau_{\text{ср}} \approx \tau_{\text{мах}}$ .

Основным недостатком метода средних потерь является то, что он не дает возможности выбрать двигатель по нагрузочной диаграмме рабочей машины, так как для определения потерь  $\Delta P_2$  необходимо знать параметры двигателя. Кроме того, определение потерь связано с трудностями расчета и большими затратами времени.

На базе этого метода можно обосновать более простые методы выбора электродвигателей по мощности. Идея этих методов состоит в замене соотношений для средних потерь соотношением других величин, которые пропорциональны средним потерям.

### Методы эквивалентных тока, момента и мощности

Общее выражение для потерь мощности в двигателях постоянного и переменного тока при произвольной форме графика нагрузки (рис. 4.15) запишем в виде:

$$\Delta P(t) = \Delta P_c + I^2(t)R, \quad (4.78)$$

где  $I = I_{\text{я}}$  – для двигателей постоянного тока,  $I = I_1$  – для асинхронного двигателя;  $R = R_{\text{я}}$  – для ДПТ независимого возбуждения;  $R = R_{\text{я}} + R_{\text{в}}$  – для ДПТ последовательного возбуждения;  $R = 3(1 + R_1 / R_2')$  – для асинхронного двигателя.

С учетом (4.78) условие (4.67) проверки двигателя по нагреву запишется:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P_c dt + \frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} I^2(t)R dt \leq \Delta P_{\text{сн}} + I_{\text{н}}^2 R, \quad (4.79)$$

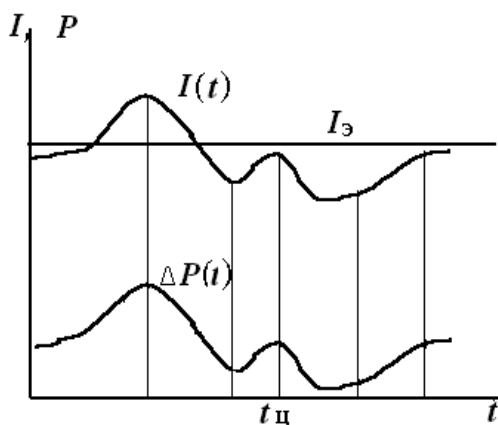


Рис. 4.15

где  $I_{\text{н}}$  – номинальный ток двигателя.

Если принять, что постоянные потери и сопротивление  $R$  обмоток двигателя неизменны, то можно записать:

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} I^2(t) dt} \leq I_{\text{н}}. \quad (4.80)$$

Левая часть данного выражения представляет собой эквивалентный (среднеквадратичный) ток двигателя:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} I^2(t) dt}. \quad (4.81)$$

Эквивалентный ток – это такой неизменный ток, при котором в двигателе выделится такое же количество теплоты при том же сопротивлении  $R$ , что и при реальном токе  $I(t)$  (рис. 4.15).

В этом случае условие проверки правильности выбора двигателя:

$$I_{\text{э}} \leq I_{\text{н}}. \quad (4.82)$$

Если известно, что в режиме, для которого выбирается двигатель, магнитный поток двигателя в течение цикла работы неизменный, т.е. соблюдается условие  $M = k\Phi I$ , то подстановка его в выражение (4.81) дает:

$$M_{\text{э}} = k\Phi I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} M^2(t) dt}. \quad (4.83)$$

При этом условием правильного выбора двигателя будет:

$$M_{\text{э}} \leq M_{\text{н}}. \quad (4.84)$$

Метод эквивалентного момента позволяет выбрать двигатель по мощности, если известны нагрузочная диаграмма  $M(t)$  и угловая скорость  $\omega$ . В этом случае расчетная мощность  $P_{\text{расч}} = M_{\text{э}}\omega$  и условие выбора двигателя:

$$P_{\text{расч}} \leq P_{\text{н}}.$$

В тех случаях, когда можно считать, что при изменении нагрузки на валу двигателя его скорость изменяется незначительно, т.е.  $\omega_1 \approx \omega_2 \approx \dots \approx \omega_n \approx \omega_{\text{н}}$ , эквивалентную мощность определяют аналогично (4.81), (4.83):

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} P^2(t) dt}. \quad (4.85)$$

Условие правильного выбора двигателя примет вид:

$$P_{\text{э}} \leq P_{\text{н}}. \quad (4.86)$$

При практических расчетах часто интегрирование (4.81), (4.83), (4.85) удобно заменить суммированием, разбив соответственно графики  $I(t)$ ,  $M(t)$  или  $P(t)$  на участки с постоянными значениями переменных. В этом случае формулы для эквивалентных величин примут вид:

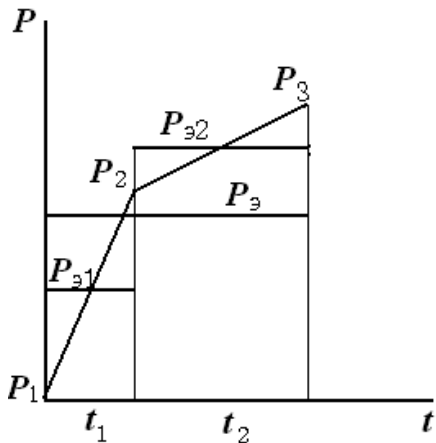
$$I_{\text{э}} = \sqrt{\left( \sum_1^n I_i^2 t_i \right) / \sum_1^n t_i}; \quad (4.87)$$

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\left( \sum_1^n M_i^2 t_i \right) / \sum_1^n t_i}; \quad (4.88)$$

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\left( \sum_1^n P_i^2 t_i \right) / \sum_1^n t_i}. \quad (4.89)$$

В тех случаях, когда нагрузочная диаграмма имеет треугольную или трапецеидальную форму (рис. 4.16), эквивалентное значение, например, мощности за цикл работы определяется по выражениям:

$$P_{э1} = \frac{P_2}{\sqrt{3}}; P_{э2} = \sqrt{\frac{P_2^2 + P_2 P_3 + P_3^2}{3}}; P_э = \sqrt{\frac{P_{э1}^2 t_1 + P_{э2}^2 t_2}{t_1 + t_2}}. \quad (4.89a)$$



**Рис. 4.16**

При использовании самовентилируемых двигателей (при изменяющейся теплоотдачи на участках) в выражения эквивалентных величин  $I_э$ ,  $M_э$ ,  $P_э$  вместо  $t_ц$  и  $\sum t_i$  необходимо подставить  $\sum \beta_i t_i$ .

Следует отметить, что методы средних потерь и эквивалентного тока применимы только для проверки по нагреву предварительно выбранного двигателя. Методы эквивалентного момента и мощности можно использовать для выбора двигателя по на-

грузочной диаграмме рабочей машины, считая, что момент (мощность) двигателя равен соответствующим статическим значениям момента (мощности) сопротивления рабочей машины.

#### **Порядок выбора электродвигателя по мощности методами эквивалентного момента и мощности**

1. По нагрузочной диаграмме рабочей машины определяют эквивалентный момент или мощность по выражениям (4.83), (4.85) или (4.88), (4.89).

2. На основании полученных эквивалентных значений момента или мощности по условиям (4.84), (4.86) выбирают по каталогу двигатель.

3. Выбранный электродвигатель проверяют по условию надежного пуска (4.57) и допустимой максимальной нагрузки (4.77).

Все рассмотренные методы проверки двигателя по нагреву при переменной нагрузке представляют собой методы эквивалентного приведения реальной нагрузочной диаграммы к стандартной диаграмме для режима S1 (рис. 4.10).

#### **4.4.2. Выбор двигателей по мощности при кратковременном режиме работы**

Для привода рабочих машин, работающих в кратковременном режиме S2, можно использовать электродвигатели как номинального продолжительного режима S1, так и номинального кратковременного режима S2 работы.

#### **Выбор двигателя номинального продолжительного режима работы S1 для работы в режиме S2**

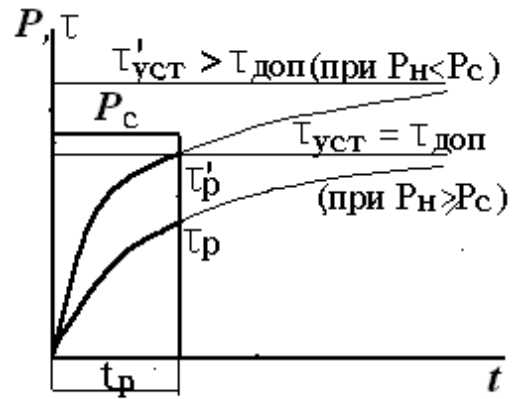
Простейший график работы двигателя приведен на рис. 4.17. Исходя из определения кратковременного режима работы, для установ-



ления превышения температуры достаточно ограничиться рассмотрением одного рабочего периода  $t_p$ . Поскольку за время работы нагрузка  $P_c$  двигателя постоянна, то уравнение нагрева будет иметь вид:

$$\tau = \tau_{уст} \left(1 - e^{-t_p/T_n}\right).$$

Если выбрать двигатель по условию  $P_n \geq P_c$ , то превышение температуры  $\tau_p = \tau_{уст} \left(1 - e^{-t_p/T_n}\right)$  к концу рабочего периода  $t_p$  не достигнет установившегося значения  $\tau_{уст}$  (рис. 4.17), т.е. двигатель будет недоиспользован по нагреву.



**Рис. 4.17**

Для полного использования в кратковременном режиме работы  $S2$  двигателя, предназначенного для продолжительного режима  $S1$ , его следует выбирать по условию  $P_n < P_c$ , т.е. перегружать. В этом случае к концу рабочего периода превышение температуры двигателя достигнет допустимого значения для данного класса изоляции (рис. 4.17):

$$\tau'_p = \tau_{уст} = \tau_{доп} = \tau'_{уст} \left(1 - e^{-t_p/T_n}\right), \quad (4.90)$$

где  $\tau'_{уст} = \Delta P_{кр} / A$  и  $\tau_{уст} = \Delta P_n / A$  — установившиеся значения превышения температуры;  $\Delta P_{кр}$  — потери мощности в двигателе в кратковременном режиме при нагрузке  $P_c$ ;  $\Delta P_n$  — потери мощности в двигателе при номинальной нагрузке в длительном режиме.

Количественно перегрузку двигателя можно оценить с помощью коэффициентов термической и механической перегрузок.

Коэффициент термической перегрузки — есть отношение потерь мощности при кратковременном режиме  $\Delta P_{кр}$  к номинальным потерям мощности  $\Delta P_n$  в длительном режиме:

$$p_T = \frac{\Delta P_{кр}}{\Delta P_n} = \frac{\tau'_{уст}}{\tau_{уст}}. \quad (4.91)$$

С учетом (4.90)

$$p_T = \frac{1}{1 - e^{-t_p/T_n}}. \quad (4.92)$$

По коэффициенту термической перегрузки можно определить коэффициент механической перегрузки, который равен отношению мощности нагрузки  $P_c$  двигателя в режиме  $S2$  к номинальной мощности  $P_n$  в режиме  $S1$ , т.е.  $p_M = P_c / P_n$ .

Действительно,

$$\begin{aligned}
 p_T &= \frac{\Delta P_{кр}}{\Delta P_H} = \frac{\Delta P_{сн} + \Delta P_{вн} \left( \frac{P_c}{P_H} \right)^2}{\Delta P_{сн} + \Delta P_{вн}} = \\
 &= \frac{\Delta P_{вн} \left[ \frac{\Delta P_{сн}}{\Delta P_{вн}} + \left( \frac{P_c}{P_H} \right)^2 \right]}{\Delta P_{вн} \left( \frac{\Delta P_{сн}}{\Delta P_{вн}} + 1 \right)} = \frac{\alpha + p_M^2}{\alpha + 1},
 \end{aligned} \tag{4.93}$$

откуда

$$p_M = \sqrt{p_T (\alpha + 1) - \alpha}, \tag{4.93a}$$

где  $\alpha = \frac{\Delta P_{сн}}{\Delta P_{вн}}$  – коэффициент потерь.

Если нагрузка в рабочий период переменная, то в расчетные формулы вводится вместо  $P_c$  эквивалентная мощность  $P$ , за время работы  $t_p$ .

Следует отметить, что полное использование двигателей режима S1 по нагреву при малых значениях отношения  $t_p / T_n$  ( $t_p / T_n \leq 0,4$ ) ограничивается перегрузочной способностью двигателей, так как допустимый по условиям нагрева коэффициент механической перегрузки  $p_M \approx 2,5$ , что соответствует перегрузочной способности двигателей постоянного тока и несколько больше перегрузочной способности асинхронных двигателей общепромышленного исполнения.

Таким образом, выбор мощности двигателей номинального режима S1 для работы в режиме S2 должен производиться из допустимых условий нагрева и перегрузочной способности:

$$P_H \geq \frac{P_c}{p_M} \text{ и } P_H \geq \frac{P_c}{\lambda}, \tag{4.94}$$

где  $\lambda$  – перегрузочная способность двигателя (для ДПТ –  $\lambda = 2 \dots 2,5$ , для АД  $\lambda$  определяется кратностью критического момента  $\mu_k$  двигателя).

Если нагрузочная диаграмма задана в виде  $I(t)$  или  $M(t)$ , то в расчетные формулы вместо мощности  $P_c$  вводится соответствующее значение тока или момента.

### **Порядок выбора двигателя номинального продолжительного режима S1 для работы в кратковременном режиме S2**

1. Известными являются время рабочего периода  $t_p$  и нагрузка  $P_c$  либо  $P_s$ . По каталогу предварительно выбирают двигатель по условию допустимой перегрузки:

$$P_H \geq \frac{P_c}{\lambda}.$$

2. Для выбранного двигателя с номинальной мощностью  $P_H$  определяют номинальные потери мощности  $\Delta P_H$ , их составляющие  $\Delta P_{сн}$  и  $\Delta P_{вн}$  и коэффициент потерь  $\alpha = \Delta P_{сн} / \Delta P_{вн}$  (4.7) и (4.8).

3. Для выбранного двигателя определяют постоянную времени нагрева  $T_H$ :

$$T_H = 6 \frac{m \tau_{доп} \eta_H}{P_H (1 - \eta_H)}, \quad (4.95)$$

где  $m$  – масса электродвигателя;  $\tau_{доп}$  – допустимое превышение температуры двигателя; (для класса изоляции  $B$  –  $\tau_{доп} = 80$  °С, для  $F$  –  $110$  °С, для  $H$  –  $135$  °С);  $P_H$ ,  $\eta_H$  – номинальная мощность и КПД двигателя соответственно.

4. По выражениям (4.92) и (4.93а) вычисляют значения коэффициентов термической  $p_T$  и механической  $p_M$  перегрузок.

5. По коэффициенту механической перегрузки определяют мощность, которую может развивать двигатель, не перегреваясь в течение времени  $t_p$  при кратковременном режиме работы:

$$P_{кр} = p_M P_H. \quad (4.96)$$

Если при этом выполняется условие

$$P_{кр} \geq P_c \text{ или } P_{кр} \geq P_э, \quad (4.97)$$

то максимальное превышение температуры двигателя не превзойдет допустимой величины. Если эти условия не выполняются, то следует выбрать двигатель большей мощности.

6. Выбранный двигатель проверяют по условию надежного пуска (4.57) и условию допустимой перегрузки (4.77).

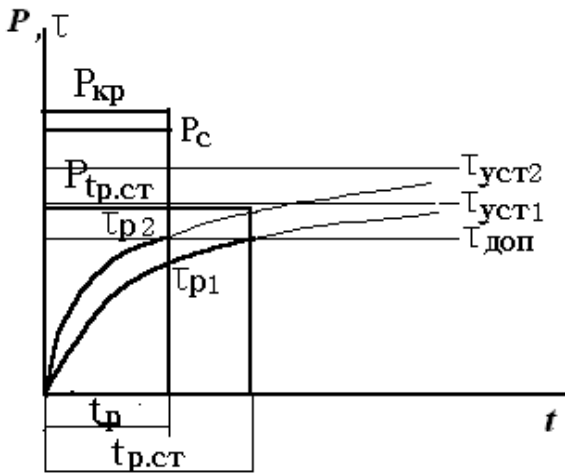
### **Выбор двигателя кратковременного номинального режима работы S2**

Для кратковременного режима работы выпускаются специальные электродвигатели, отличающиеся повышенной перегрузочной способностью и нормативным временем работы 10, 30, 60 и 90 мин. Это значит, что двигатель может быть загружен номинальной мощностью в течение указанного времени и будет полностью использован по нагреву.

В общем случае выбор таких двигателей по мощности может выполняться по двум вариантам.

Если время работы двигателя по нагрузочной диаграмме совпадает со стандартным  $t_p = t_{p.ст}$ , то условие выбора двигателя запишется в виде:

$$P_{t_{p.ст}} \geq P_c \text{ или } P_{t_{p.ст}} \geq P_э,$$



**Рис. 4.18**

где  $P_{тp,ст}$  – номинальная мощность двигателя при стандартном времени работы  $t_{п,ст}$ .

Если же время работы двигателя отличается от стандартного, то можно найти такую нагрузку  $P_{кр}$ , при которой двигатель будет полностью использован по нагреву, т.е. по истечении времени  $t_p$  превышение температуры будет равно допустимому значению ( $\tau_{p2} = \tau_{доп}$ , рис. 4.18), т.е. условие выбора электродвигателя:

$$P_{тp,ст} < P_c.$$

Двигатель при номинальной нагрузке  $P_{тp,ст}$  за стандартное время работы  $t_{п,ст}$  нагреется до допустимого превышения температуры:

$$\tau_{p1} = \tau_{доп} = \tau_{уст1} \left( 1 - e^{-t_{п,ст}/T_n} \right). \quad (4.98)$$

При работе с нагрузкой  $P_c$ , отличной от номинальной, в течение фактического времени работы  $t_p$  превышение температуры также не должно превышать того же допустимого значения:

$$\tau_{p2} = \tau_{доп} = \tau_{уст2} \left( 1 - e^{-t_p/T_n} \right). \quad (4.99)$$

Коэффициент термической перегрузки с учетом (4.98), (4.99):

$$p_T = \frac{\tau_{уст2}}{\tau_{уст1}} = \frac{1 - e^{-t_{п,ст}/T_n}}{1 - e^{-t_p/T_n}}. \quad (4.100)$$

Коэффициент механической перегрузки:

$$p_M = \sqrt{p_T (\alpha + 1)} - \alpha,$$

тогда допустимая мощность:

$$P_{кр} = p_M P_{тp,ст}. \quad (4.101)$$

Тогда условие правильности выбора двигателя будет иметь вид:

$$P_{кр} \geq P_c \text{ или } P_{кр} \geq P_э.$$

### Порядок выбора двигателя номинального кратковременного режима S2 для работы в режиме S2

1. Известными являются время рабочего периода  $t_p$  и нагрузка  $P_c$  или  $P_э$ . По каталогу предварительно выбирают двигатель по условию:

$$P_{тp,ст} \geq \frac{P_{с.макс}}{\lambda} \text{ при } t_{п,ст} > t_p,$$

где  $P_{с.макс}$  – максимальная мощность сопротивления рабочей машины по нагрузочной диаграмме.

2. Для выбранного двигателя по (4.7), (4.8) определяют потери мощности и коэффициент потерь  $\alpha$ , а также постоянную времени нагрева  $T_n$  по (4.95).

3. По выражению (4.101) определяют мощность  $P_{кр}$ , которую может развивать двигатель, не перегреваясь в течение рабочего времени  $t_p$ . Затем проверяют выбранный двигатель по условию:

$$P_{кр} \geq P_c \text{ или } P_{кр} \geq P_{\text{э}}.$$

4. Выбранный двигатель проверяют по условию надежного пуска (4.57) и условию допустимой перегрузки (4.77).

### 4.4.3. Выбор двигателей по мощности при повторно-кратковременном режиме работы

Для работы в повторно-кратковременном режиме  $S3$  используют двигатели номинального продолжительного режима  $S1$  и двигатели номинального повторно-кратковременного режима  $S3$ , методика выбора которых существенно различается.

#### Выбор двигателя номинального продолжительного режима работы $S1$ для работы в повторно-кратковременном режиме $S2$

График нагрузки по-вторно-кратковременного режима представлен на рис. 4.19, для которого характерно чередование рабочих периодов  $t_p$  и пауз  $t_o$ , причем превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения ни в один из периодов. К показанному на рис. 4.19 графику нагрузки могут быть сведены более

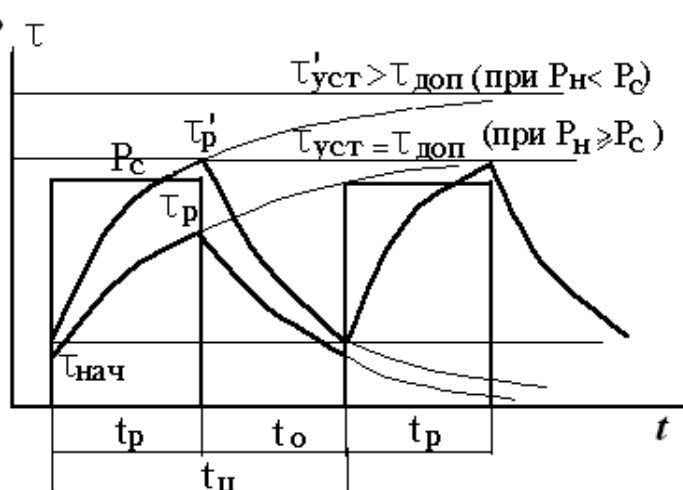


Рис. 4.19

сложные графики путем расчета эквивалентных значений мощности  $P_{\text{э}}$ ,

рабочего периода  $t_{p\text{э}} = \sum_1^m t_{p1}$  и паузы  $t_{o\text{э}} = \sum_1^n t_{o1}$ , где  $m$  — число рабочих периодов в цикле;  $n$  — число пауз в цикле. Для достаточно удаленного от начала работы цикла колебания превышения температуры устанавливаются в определенных пределах, зависящих от нагрузки.

Если выбрать двигатель по условию  $P_n \geq P_c$ , то превышение температуры  $\tau_p$  в конце рабочего периода  $t_p$  из-за наличия пауз не достигнет установившегося значения:

$$\tau_p < \tau_{уст} = \tau_{доп}.$$

Поэтому с целью полного использования двигателя по нагреву его нагрузка может быть увеличена по отношению к номинальной в продолжительном режиме, т.е. двигатель следует выбирать по условию  $P_H < P_C$ . В этом случае к концу рабочего периода превышение температуры двигателя достигнет допустимого значения  $\tau_{\text{доп}}$ :

$$\tau'_p = \tau_{\text{уст}} = \tau_{\text{доп}} = \tau'_{\text{уст}} + (\tau_{\text{нач}} - \tau'_{\text{уст}}) e^{-t_p/T_H}, \quad (4.102)$$

где  $T_0 = T_H / \beta_0$  – постоянная времени охлаждения;

$$\tau_{\text{нач}} = \tau_{\text{уст}} e^{-t_0/T_0}. \quad (4.103)$$

Подставляя (4.103) в (4.102), получим:

$$\tau_{\text{уст}} = \tau'_{\text{уст}} + (\tau_{\text{уст}} e^{-t_0/T_0} - \tau'_{\text{уст}}) e^{-t_p/T_H}.$$

Отсюда после несложных преобразований коэффициент тепловой перегрузки:

$$p_T = \frac{\tau'_{\text{уст}}}{\tau_{\text{уст}}} = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_0}{T_0} - \frac{t_p}{T_H}\right)}}{1 - e^{-t_p/T_H}}. \quad (4.104)$$

Коэффициент механической перегрузки  $p_M$  и допустимую по условиям нагрева мощность, которую может развивать двигатель, не перегреваясь в течение времени  $t_p$  при повторно-кратковременном режиме работы, можно определить по выражениям (4.93а) и (4.96):

$$p_M = \sqrt{p_T (\alpha + 1)} - \alpha;$$

$$P_{\text{пкр}} = p_M P_H.$$

При этом должно выполняться условие:

$$P_{\text{пкр}} \geq P_C \text{ или } P_{\text{пкр}} \geq P_{\text{э}}.$$

Порядок выбора электродвигателя номинального продолжительного режима  $S1$  для работы в повторно-кратковременном режиме  $S3$  аналогичен выбору двигателя для кратковременного режима  $S2$  (см. п. 4.4.2). Отличие заключается только в определении коэффициента тепловой перегрузки (4.104).

**Рассмотрим более простой метод выбора двигателя режима работы  $S1$  для работы в режиме  $S3$ .**

В период паузы, когда двигатель отключен, потери в нем отсутствуют. Поэтому в период работы нагрузка  $P_{\text{пкр}}$  может быть увеличена по отношению к номинальной  $P_H$  в продолжительном режиме. В этом случае среднее количество теплоты, выделяющееся в двигателе, за цикл равно:

$$Q_B = \Delta P_{\text{ср}} t_p = \left[ \Delta P_{\text{сн}} + \Delta P_{\text{вн}} \left( \frac{P_{\text{пкр}}}{P_H} \right)^2 \right] t_p. \quad (4.105)$$

Полное количество теплоты, которое отдается в окружающую среду за цикл при номинальном (допустимом) превышении температуры:

$$Q_o = \Delta P_H t_p + \Delta P_H \beta_o t_o = (\Delta P_{CH} + \Delta P_{VH})(t_p + \beta_o t_o). \quad (4.106)$$

Для квазиустановившегося процесса в повторно-кратковременном режиме справедливо соотношение:  $Q_b = Q_o$  или

$$\left[ \Delta P_{CH} + \Delta P_{VH} \left( \frac{P_{пкр}}{P_H} \right)^2 \right] t_p = (\Delta P_{CH} + \Delta P_{VH})(t_p + \beta_o t_o). \quad (4.107)$$

Преобразуя (4.107), получим выражение для определения допустимой по условиям нагрева нагрузки двигателя продолжительного номинального режима при работе в повторно-кратковременном режиме с заданным значением продолжительности включения:

$$P_{пкр} = P_H \sqrt{\frac{\varepsilon + \beta_o (1 + \alpha)(1 - \varepsilon)}{\varepsilon}}, \quad (4.108)$$

где  $\alpha$  – коэффициент потерь;  $\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_o}$  – относительная продолжительность включения.

Полученное значение мощности при выборе двигателя сравнивается с мощностью нагрузки  $P_c$  или ее эквивалентным значением:

$$P_{пкр} \geq P_c \text{ или } P_{пкр} \geq P_{\varepsilon}. \quad (4.109)$$

Аналогичные формулы для выбора мощности двигателя получают в случае, если нагрузочные диаграммы заданы в виде  $I(t)$  или  $M(t)$ .

Выбранный двигатель проверяют по условию надежного пуска (4.57) и условию допустимой перегрузки (4.77).

**Рассмотрим упрощенный метод выбора двигателя режима работы S1 для работы в режиме S3.**

Выбор мощности электродвигателя производится по условию:

$$P_H \geq P_{\text{экр}}, \quad (4.110)$$

Эквивалентная мощность  $P_{\text{экр}}$  определяется по нагрузочной диаграмме (рис. 4.20) за цикл работы  $t_{\text{ц}}$  с учетом ухудшения условий охлаждения двигателя в период паузы  $t_o$  по выражению:

$$P_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{P_c^2 t_p}{t_p + \beta_o t_o}}, \quad (4.111)$$

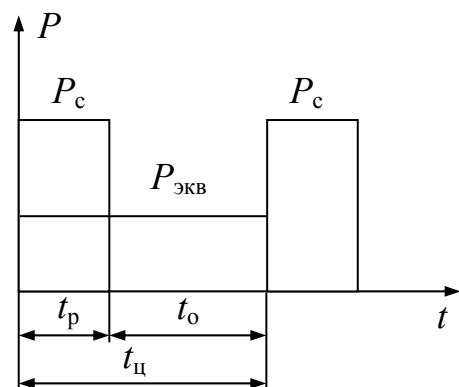


Рис. 4.20

где  $\beta_o$  – коэффициент ухудшения условий охлаждения двигателя в период паузы (табл. 4.2).

Выбранный двигатель проверяют по условию надежного пуска (4.57) и условию допустимой перегрузки (4.77) в случае переменной нагрузки.

### Выбор двигателя номинального повторно-кратковременного режима работы S3 для работы в режиме S3

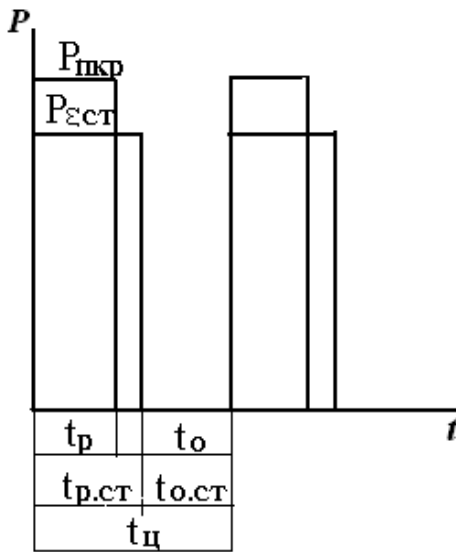


Рис. 4.21

Для повторно-кратковременного режима работы выпускается серия специальных двигателей, имеющих повышенные перегрузочную способность и пусковой момент. В каталогах указывается номинальная мощность  $P_{\epsilon ст}$  при нормированной (стандартной) продолжительности включения  $ПВ_{ст} = 15, 25, 40, 60 \%$  или в относительных единицах  $\epsilon_{ст} = 0,15; 0,25; 0,4; 0,6$ . Длительность рабочего цикла  $t_ц$  не должна превышать 10 мин. Основным значением  $\epsilon$ , при котором рассчитываются конструктивные параметры двигателя, является  $\epsilon_{ст} = 0,4$ .

Если реальная продолжительность включения совпадает с одной из стандартных ( $\epsilon = \epsilon_{ст}$ ), то выбор двигателя по мощности производится по условию (рис. 4.21):

$$P_{\epsilon ст} \geq P_c \text{ или } P_{\epsilon ст} \geq P_э. \quad (4.112)$$

Однако чаще  $\epsilon \neq \epsilon_{ст}$ . При этом необходимо определить допустимую из условий нагрева мощность  $P_{пкр}$  (рис. 4.21), на которую может быть нагружен двигатель при реальной продолжительности включения.

На основании метода средних потерь можно утверждать: превышение температуры двигателя при его работе с мощностью  $P_{пкр}$  при  $\epsilon$  не будет превышать допустимого значения, если средние потери мощности за цикл при  $P_{пкр}$  и  $\epsilon$  не будут превышать средние потери за тот же цикл при  $P_{\epsilon ст}$  и  $\epsilon_{ст}$ , т.е. если

$$\Delta P_{\epsilon} \frac{t_p}{t_p + t_o} = \Delta P_{\epsilon ст} \frac{t_{p.ст}}{t_{p.ст} + t_{o.ст}}; \quad (4.113)$$

$$\Delta P_{\epsilon} \epsilon = \Delta P_{\epsilon ст} \epsilon_{ст}. \quad (4.114)$$

Тогда

$$(\Delta P_{сн} + \Delta P_{вн}) \epsilon_{ст} = \left[ \Delta P_{сн} + \Delta P_{вн} \left( \frac{P_{пкр}}{P_{\epsilon ст}} \right)^2 \right] \epsilon. \quad (4.115)$$

Откуда

$$P_{пкр} = P_{\epsilon ст} \sqrt{(\alpha + 1) \frac{\epsilon_{ст}}{\epsilon} - \alpha}. \quad (4.116)$$



Полученное значение мощности при выборе двигателя сравнивается с мощностью нагрузки  $P_c$  или ее эквивалентным значением  $P_э$ :

$$P_{\text{пкр}} \geq P_c \text{ или } P_{\text{пкр}} \geq P_э. \quad (4.117)$$

В заключение рассмотрим порядок выбора двигателя номинального повторно-кратковременного режима  $S3$  для работы в режиме  $S3$ .

1. Известными являются продолжительность включения  $\varepsilon$  и нагрузка  $P_c$  либо  $P_э$ . По каталогу выбирают предварительно двигатель по условиям:

$$\varepsilon_{\text{ст}} > \varepsilon \text{ и } P_{\varepsilon_{\text{ст}}} \geq \frac{P_{c\text{max}}}{\lambda}, \quad (4.118)$$

где  $P_{c\text{max}}$  – максимальная мощность сопротивления рабочей машины по нагрузочной диаграмме;  $\lambda$  – перегрузочная способность двигателя.

2. Для выбранного двигателя определяют коэффициент потерь  $\alpha$ .

3. По выражению (4.116) мощность двигателя при стандартном значении продолжительности включения  $\varepsilon_{\text{ст}}$  пересчитывают на фактическое значение продолжительности включения и проверяют двигатель по условию  $P_{\text{пкр}} \geq P_c$  или  $P_{\text{пкр}} \geq P_э$ .

4. Выбранный двигатель проверяют по условию надежного пуска (4.57) и условию допустимой перегрузки (4.77) в случае переменной нагрузки.

#### 4.4.4. Определение допустимого числа включений

##### асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

При большой частоте включений в повторно-кратковременном режиме потери в переходных процессах вызывают повышенный нагрев, связанный с протеканием пускового тока и токов в тормозных режимах. Это ограничивает число включений, т.е. возникает задача определения максимально допустимого числа включений АД в единицу времени (например, в час), при котором среднее превышение температуры после большого количества рабочих циклов будет равно допустимому.

Пусть цикл работы состоит (рис. 4.22) из пуска в течение времени  $t_{\text{п}}$ , установившегося движения в течение времени  $t_{\text{уст}}$  со скоростью  $\omega_{\text{н}}$  при моменте сопротивления рабочей машины  $M_c = \text{const}$ , процесса торможения продолжительностью  $t_{\text{т}}$  и паузы длительностью  $t_0$ , т.е.

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{п}} + t_{\text{уст}} + t_{\text{т}} + t_0. \quad (4.119)$$

Длительность цикла при  $h$  включений в час равна:

$$t_{\text{ц}} = \frac{3600}{h} \quad (4.120)$$

Время установившегося движения при относительной продолжительности включения:

$$\varepsilon = \frac{t_{\Pi} + t_{\text{уст}} + t_{\text{T}}}{t_{\Pi} + t_{\text{уст}} + t_{\text{T}} + t_{\text{o}}} = \frac{t_{\text{p}}}{t_{\text{ц}}};$$

$$t_{\text{уст}} = t_{\text{ц}}\varepsilon - (t_{\Pi} + t_{\text{T}}) = \frac{3600}{h}\varepsilon - (t_{\Pi} + t_{\text{T}}). \quad (4.121)$$

Время паузы:

$$t_{\text{o}} = t_{\text{ц}}(1 - \varepsilon) = \frac{3600}{h}(1 - \varepsilon). \quad (4.122)$$

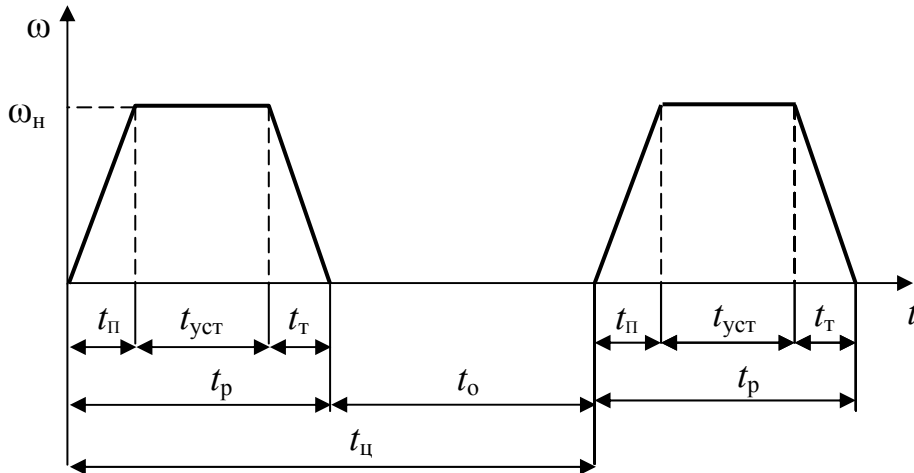


Рис. 4.22

При работе двигателя с номинальной постоянной нагрузкой потери энергии, выделяющиеся за цикл, состоят из потерь энергии при пуске  $\Delta A_{\Pi}$ , торможении  $\Delta A_{\text{T}}$  и работе  $\Delta A_{\text{уст.н}}$  с установившейся скоростью  $\omega_{\text{н}}$ . Однако потери в установившемся режиме  $\Delta A_{\text{уст.х}} = \Delta P_{\text{х}} t_{\text{уст}}$  могут отличаться от номинальных и зависят от загрузки двигателя.

При этом в окружающую среду отдается тепло (с учетом изменения условий теплоотдачи с помощью коэффициента ухудшения условий охлаждения  $\beta_{\text{o}}$  во время пуска, торможения и паузы (4.49):

- в период установившейся работы за время  $t_{\text{уст}}$   $\Delta W_{\text{уст.н}} = \Delta P_{\text{н}} t_{\text{уст}}$ ;
- за время паузы  $\Delta W_{\text{o}} = \beta_{\text{o}} \Delta P_{\text{н}} t_{\text{o}}$ ;
- за время пуска  $\Delta W_{\Pi} = \beta \Delta P_{\text{н}} t_{\Pi} = \frac{1 + \beta_{\text{o}}}{2} \Delta P_{\text{н}} t_{\Pi}$ ;
- за время торможения  $\Delta W_{\text{T}} = \beta \Delta P_{\text{н}} t_{\text{T}} = \frac{1 + \beta_{\text{o}}}{2} \Delta P_{\text{н}} t_{\text{T}}$ .

Уравнение теплового баланса в установившемся режиме работы двигателя с допустимым числом включений будет иметь вид:

$$\Delta A_{\Pi} + \Delta A_{\text{T}} + \Delta A_{\text{уст.х}} = \Delta W_{\Pi} + \Delta W_{\text{T}} + \Delta W_{\text{уст}} + \Delta W_{\text{o}}$$

и далее

$$\Delta A_{\Pi} + \Delta A_{\text{T}} + \Delta P_{\text{х}} t_{\text{уст}} = \frac{1 + \beta_{\text{o}}}{2} \Delta P_{\text{н}} t_{\Pi} + \frac{1 + \beta_{\text{o}}}{2} \Delta P_{\text{н}} t_{\text{T}} + \Delta P_{\text{н}} t_{\text{уст}} + \beta_{\text{o}} \Delta P_{\text{н}} t_{\text{o}}. \quad (4.123)$$

Подставляя значения  $t_{\text{уст}}$  и  $t_0$  в выражение (4.123), получим:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}} + \Delta P_x \frac{3600}{h} \varepsilon - (t_{\text{п}} + t_{\text{т}}) &= \frac{1 + \beta_0}{2} \Delta P_{\text{н}} (t_{\text{п}} + t_{\text{т}}) + \\ + \Delta P_{\text{н}} \varepsilon \frac{3600}{h} - \Delta P_{\text{н}} (t_{\text{п}} + t_{\text{т}}) + \Delta P_{\text{н}} \beta_0 (1 - \varepsilon) \frac{3600}{h}. \end{aligned} \quad (4.124)$$

В результате преобразований относительно  $h$ , получим:

$$h = 3600 \frac{(\Delta P_{\text{н}} - \Delta P_x) \varepsilon + \Delta P_{\text{н}} \beta_0 (1 - \varepsilon)}{\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}} - a}, \quad (4.125)$$

где  $a = (t_{\text{п}} + t_{\text{т}}) \left[ \Delta P_{\text{н}} \left( \frac{1 + \beta_0}{2} - 1 \right) + \Delta P_x \right]$ .

При работе АД с к.-з. ротором в повторно-кратковременном режиме в случае, когда продолжительность пуска и торможения невелика, значение  $a$  обычно составляет 2...4 % от суммы потерь при пуске и торможении  $(\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}})$  и её можно учесть как  $0,03(\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}})$  [1].

В этом случае

$$\begin{aligned} h &= 3600 \frac{(\Delta P_{\text{н}} - \Delta P_x) \varepsilon + \Delta P_{\text{н}} \beta_0 (1 - \varepsilon)}{0,97(\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}})} = \\ &= 3700 \frac{(\Delta P_{\text{н}} - \Delta P_x) \varepsilon + \Delta P_{\text{н}} \beta_0 (1 - \varepsilon)}{\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{т}}}. \end{aligned} \quad (4.126)$$

При этом  $\Delta P_{\text{н}}$  определяется по выражению (4.7),  $\Delta P_x$  – по выражению (4.6) с учетом выражения (4.8), потери энергии при пуске  $\Delta A_{\text{п}}$  и торможении  $\Delta A_{\text{т}}$  определяются по выражению (4.32) при  $R'_{2x} = 0$  с использованием рис. 3.10.

### Контрольные вопросы и задания

1. Чем обусловлены и от чего зависят потери мощности в электродвигателях?
2. За счет чего происходит нагрев двигателя? Перечислите и охарактеризуйте виды потерь в электродвигателе.
3. Потери мощности в установившихся режимах работы электропривода.
4. Особенности определения потерь мощности в регулируемых электроприводах?
5. Потери энергии в переходных режимах работы электропривода.
6. Как определяются потери энергии в переходных режимах (при пуске, торможении, реверсе)?
7. Как изменятся потери энергии в переходных процессах, если момент инерции электропривода уменьшился вдвое?

8. Как изменятся потери энергии в переходных процессах, если момент инерции электропривода увеличится вдвое?

9. Во сколько раз изменятся потери энергии при пуске, если вместо двигателя постоянного тока установлен асинхронный короткозамкнутый двигатель?

10. В системе электропривода вместо режима динамического торможения применили торможение противовключением. Как и во сколько раз изменятся потери энергии?

11. Дайте определение нагрузочной диаграммы рабочей машины и электродвигателя.

12. В чем заключается различие между нагрузочной диаграммой двигателя и механизма.

13. Приведите уравнение теплового баланса двигателя.

14. Запишите уравнение нагрева, охлаждения.

15. Постоянная времени нагрева, способы ее определения.

16. Постоянная времени охлаждения, способы ее определения.

17. В чем заключается физический смысл коэффициента ухудшения условий охлаждения?

18. Двигатель работает с принудительной вентиляцией, но вентилятор отключился. Как изменится нагрев двигателя, если  $\beta = 0,5$ .

19. Назовите основные типовые режимы работы электрических двигателей.

20. Перечислите и поясните косвенные методы проверки электродвигателей по нагреву.

21. Порядок выбора электродвигателя по мощности методом средних потерь.

22. В чем заключается суть методов эквивалентного тока, момента и мощности?

23. Особенности выбора по мощности электродвигателя режима  $S1$  для работы в режиме  $S2$ .

24. Особенности выбора по мощности электродвигателя режима  $S1$  для работы в режиме  $S3$ .

25. Выбор по мощности электродвигателя режима  $S3$  для работы в режиме  $S3$ .

## Раздел II

# КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ, КУРСОВАЯ РАБОТА

### Глава 5

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### 5.1. Режимы работы, электромеханические свойства электродвигателей постоянного тока (ДПТ)

**5.1.1.** В каких квадрантах плоскости  $\omega, M$  изображаются электромеханические и механические характеристики ДПТ независимого возбуждения в режиме динамического торможения (рис. 5.1)?

- 1) I–II;
- 2) II–IV;
- 3) I–III;
- 4) I– IV;
- 5) II–III.

**5.1.2.** В каких квадрантах плоскости  $\omega, M$  изображаются электромеханические и механические характеристики ДПТ независимого возбуждения в режиме торможения противовключением (рис. 5.1)?

- 1) I–II;
- 2) I–III;
- 3) II–IV;
- 4) II–IV;
- 5) I–IV.

**5.1.3.** Выражение  $M_{\text{вал}} = M_{\text{эм}} - M_{\text{пот}}$  справедливо для

- 1) двигательного режима;
- 2) режима динамического торможения;
- 3) режима торможения противовключением;
- 4) генераторного режима.

**5.1.4.** Для электродвигателя (ЭД), работающего в двигательном режиме, баланс мощностей выражается соотношением:

- 1)  $P_{\text{м}} = P_{\text{эл.м}} + \Delta P$ ;
- 2)  $P_{\text{м}} + P_{\text{эл.м}} = \Delta P$ ;
- 3)  $P_{\text{м}} = \Delta P$ ;
- 4)  $P_{\text{эл.м}} = P_{\text{м}} + \Delta P$ .

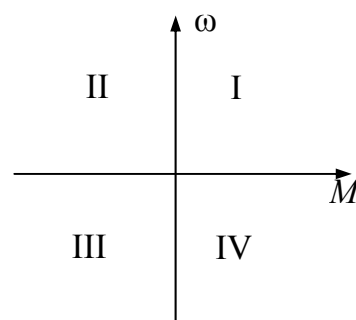


Рис. 5.1

**5.1.5.** Для ЭД, работающего в генераторном режиме, баланс мощностей выражается соотношением:

- 1)  $P_M = P_{эл.М} + \Delta P$ ;
- 2)  $P_{эл.М} = P_M + \Delta P$ ;
- 3)  $P_M = \Delta P$ ;
- 4)  $P_M + P_{эл.М} = \Delta P$ .

**5.1.6.** Для ЭД, работающего в режиме динамического торможения, баланс мощностей выражается соотношением:

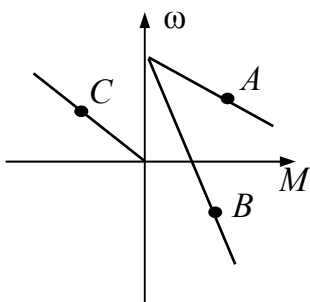
- 1)  $P_M = P_{эл.М} + \Delta P$ ;
- 2)  $P_M + P_{эл.М} = \Delta P$ ;
- 3)  $P_M = \Delta P$ ;
- 4)  $P_{эл.М} = P_M + \Delta P$ .

**5.1.7.** Для ЭД, работающего в режиме торможения противовключением, баланс мощностей выражается соотношением:

- 1)  $P_M = P_{эл.М} + \Delta P$ ;
- 2)  $P_M + P_{эл.М} = \Delta P$ ;
- 3)  $P_M = \Delta P$ ;
- 4)  $P_{эл.М} = P_M + \Delta P$ .

**5.1.8.** При работе ДПТ независимого возбуждения в точке *A* справедливо выражение (рис. 5.2):

- 1)  $U - E = I_{я} R_{я}$ ;
- 2)  $-U - E = I_{я} R_{я}$ ;
- 3)  $U = I_{я} R_{я}$ ;
- 4)  $E = I_{я} R_{я}$ .



**Рис. 5.2**

**5.1.9.** При работе ДПТ независимого возбуждения в точке *B* справедливо выражение (рис. 5.2):

- 1)  $U + E = I_{я} R_{я}$ ;
- 2)  $E = I_{я} R_{я}$ ;
- 3)  $U = I_{я} R_{я}$ ;
- 4)  $E = -I_{я} R_{я}$ .

**5.1.10.** При работе ДПТ независимого возбуждения в точке *C* справедливо выражение (рис. 5.2):

- 1)  $U - E = I_{я} R_{я}$ ;
- 2)  $U + E = I_{я} R_{я}$ ;
- 3)  $E = U + I_{я} R_{я}$ ;
- 4)  $E = I_{я} R_{я}$ .

**5.1.11.** В точке *A* ДПТ независимого возбуждения (рис. 5.3) работает в

- 1) режиме динамического торможения;
- 2) генераторном режиме;
- 3) двигательном режиме;
- 4) режиме торможения противовключением.

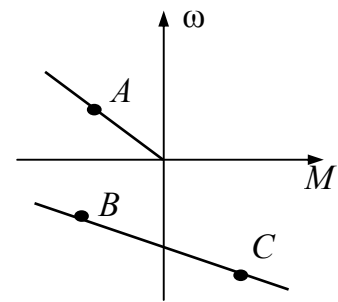


Рис. 5.3

**5.1.12.** В точке *B* ДПТ независимого возбуждения (рис. 5.3) работает в

- 1) режиме торможения противовключением;
- 2) режиме динамического торможения;
- 3) генераторном режиме;
- 4) двигательном режиме.

**5.1.13.** ДПТ независимого возбуждения, работающий в точке *C* (рис. 5.3):

- 1) потребляет электроэнергию и расходует её только на потери в якорной цепи;
- 2) отдает электроэнергию в сеть;
- 3) преобразует механическую энергию в электрическую, выделяющуюся в виде тепла в якорной цепи;
- 4) потребляет электроэнергию из сети и преобразует ее в механическую.

**5.1.14.** Для перехода ДПТ из точки *A* в точку *B* необходимо (рис. 5.4):

- 1) отключить обмотку якоря от сети и замкнуть её на дополнительное сопротивление, оставив обмотку возбуждения под напряжением;
- 2) вращать якорь с помощью стороннего двигателя с угловой скоростью  $\omega > \omega_0$ ;
- 3) включить дополнительное сопротивление в цепь якоря, не отключая его от сети;
- 4) отключить обмотку якоря от сети и замкнуть её на дополнительное сопротивление, подключив обмотку возбуждения к якорю.

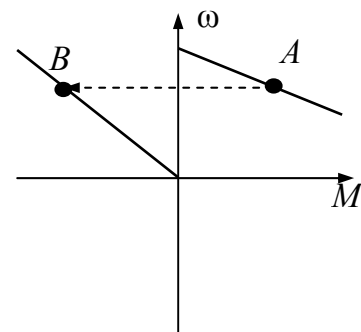


Рис. 5.4

**5.1.15.** Электродвижущая сила ДПТ независимого возбуждения определяется по выражению:

- 1).  $E = k\Phi I$ ;
- 2)  $E = k\Phi\omega$ ;
- 3)  $E = \frac{1}{k\Phi}$ ;
- 4)  $E = \frac{\omega}{k\Phi}$ .

**5.1.16.** Схема включения ДПТ независимого возбуждения (рис. 5.5) соответствует его работе в:

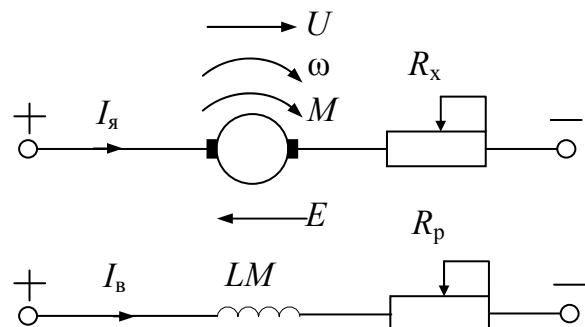
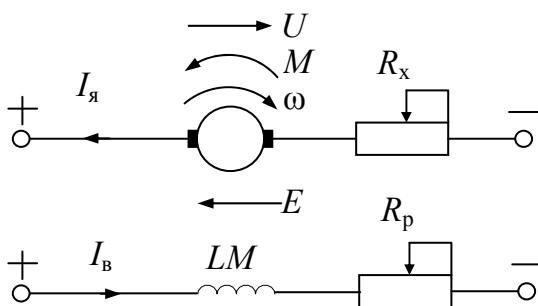


Рис. 5.5

- 1) режиме торможения с рекуперацией;
- 2) режиме динамического торможения;
- 3) двигательном режиме;
- 4) режиме торможения противовключением.

**5.1.17.** Для определения номинального электромагнитного момента ДПТ справедливо выражение:

- 1)  $M_H = \kappa\Phi\omega_H$ ;
- 2)  $M_H = P_H\omega_H$ ;
- 3)  $M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$ ;
- 4)  $M_H = \kappa\Phi I_H$ .



**Рис. 5.6**

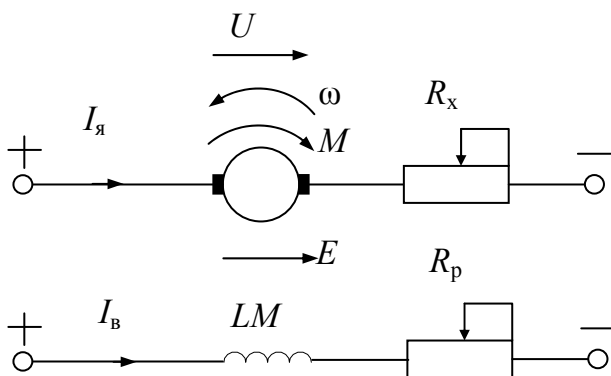
**5.1.18.** Схема включения ДПТ независимого возбуждения (рис. 5.6) соответствует его работе в

- 1) режиме торможения с рекуперацией;
- 2) режиме динамического торможения;
- 3) двигательном режиме;
- 4) режиме торможения противовключением.

**5.1.19.** Для определения номинального момента на валу ЭД справедливо выражение:

- 1)  $M_H = \kappa\Phi\omega_H$ ;
- 2)  $M_H = \kappa\Phi I_H$ ;
- 3)  $M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$ ;
- 4)  $M_H = P_H\omega_H$ .

**5.1.20.** Схема включения ДПТ независимого возбуждения (рис. 5.7)



**Рис. 5.7**

соответствует его работе в

- 1) режиме торможения с рекуперацией;
- 2) режиме динамического торможения;
- 3) режиме торможения противовключением (перемена полярности);
- 4) режиме торможения противовключением (тормозной спуск).



**5.1.21.** Для определения  $k\Phi$  (в системе СИ) по конструктивным параметрам справедливо выражение:

$$1) k\Phi = \frac{E_H}{\omega_0};$$

$$2) k\Phi = \frac{U_H}{\omega_H};$$

$$3) k\Phi = \frac{pN}{2\pi a} \Phi;$$

$$4) k\Phi = \frac{2\pi a}{pN} \Phi.$$

**5.1.22.** Для определения  $k\Phi$  (в системе СИ) по паспортным данным справедливо выражение:

$$1) k\Phi = \frac{E_H}{\omega_0};$$

$$2) k\Phi = \frac{U_H}{\omega_H};$$

$$3) k\Phi = \frac{E_H}{\omega_H};$$

$$4) k\Phi = \frac{2\pi a}{pN} \Phi.$$

**5.1.23.** Ориентировочно внутреннее сопротивление якоря ДПТ независимого возбуждения можно определить по выражению:

$$1) R_{я} = 0,5(1 - \eta_H) \frac{U_H}{I_H};$$

$$2) R_{я} = 2(1 - \eta_H) \frac{U_H}{I_H};$$

$$3) R_{я} = 0,5 \frac{U_H}{(1 - \eta_H) I_H};$$

$$4) R_{я} = 0,5(1 - \eta_H) \frac{I_H}{U_H}.$$

**5.1.24.** Уравнение механической характеристики ДПТ независимого возбуждения  $\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{я} + R_x}{(k\Phi)^2} M$  соответствует его работе в

- 1) двигательном режиме;
- 2) режиме динамического торможения;
- 3) генераторном режиме;
- 4) режиме торможения противовключением.

**5.1.25.** Уравнение механической характеристики ДПТ независимо-

го возбуждения  $\omega = -\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{(k\Phi)^2} M$  справедливо для

- 1) двигательного режима;
- 2) режима торможения противовключением;
- 3) генераторного режима;
- 4) режима динамического торможения.

**5.1.26.** Какими параметрами определяется модуль жесткости механической характеристики ДПТ независимого возбуждения?

- 1) Только величиной сопротивления цепи якоря.
- 2) Величиной потока возбуждения и напряжения, приложенного к якорю.
- 3) Величиной потока возбуждения и сопротивлением цепи якоря.
- 4) Величиной потока возбуждения, напряжения, приложенного к якорю и сопротивлением цепи якоря.

**5.1.27.** Для определения коэффициента жесткости механической характеристики двигателя справедливо выражение:

- 1)  $\beta = \frac{d\omega}{dM}$ ;
- 2)  $\beta = \frac{dM}{d\omega}$ ;
- 3)  $\beta = \frac{dM}{dt}$ ;
- 4)  $\beta = \frac{d\omega}{dt}$ ;
- 5)  $\beta = \frac{dI}{dt}$ .

**5.1.28.** При уменьшении напряжения, приложенного к якорю ДПТ независимого возбуждения, модуль жесткости механической характеристики:

- 1) увеличится;
- 2) останется неизменным;
- 3) уменьшится;
- 4) изменит свой знак на противоположный.

**5.1.29.** При уменьшении потока возбуждения ДПТ независимого возбуждения модуль жесткости механической характеристики:

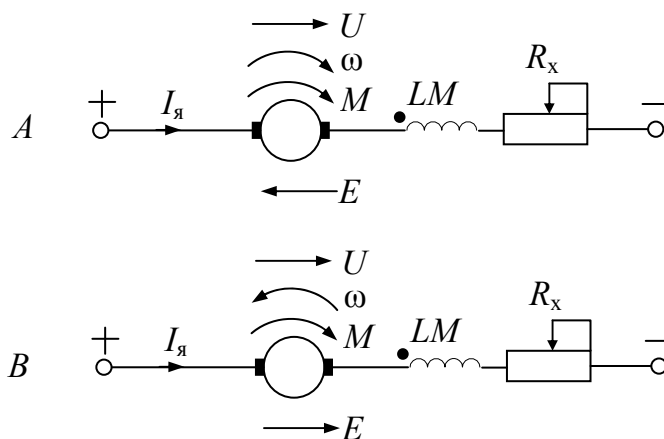
- 1) уменьшится;
- 2) останется неизменным;
- 3) увеличится;
- 4) изменит свой знак на противоположный.

**5.1.30.** При введении дополнительного сопротивления в цепь якоря ДПТ независимого возбуждения модуль жесткости механической характеристики:

- 1) уменьшится;
- 2) увеличится;
- 3) останется неизменным;
- 4) изменит свой знак на противоположный.

**5.1.31.** В результате перехода от схемы включения *A* к схеме *B* (рис. 5.8) ДПТ последовательного возбуждения будет работать в режиме:

- 1) динамического торможения с самовозбуждением;
- 2) генераторного торможения;
- 3) торможения противовключением (тормозной спуск);
- 4) торможение противовключением (перемена полярности).



**Рис. 5.8**

**5.1.32.** Для обеспечения одинаковой величины начального тормозного момента

при торможении противовключением (ПВ) и динамическом торможении (ДТ) ДПТ независимого возбуждения для дополнительных сопротивлений, включаемых в цепь якоря, справедливо соотношение:

- 1)  $R_{ПВ} > R_{ДТ}$ ;
- 2)  $R_{ПВ} = R_{ДТ}$ ;
- 3)  $R_{ПВ} < R_{ДТ}$ ;
- 4)  $R_{ПВ} = R_{ДТ} = 0$ .

**5.1.33.** При торможении противовключением ДПТ независимого возбуждения до скорости равной 0 тормозной момент (при одинаковом начальном) по сравнению с режимом динамического торможения будет:

- 1) меньше;
- 2) больше;
- 3) одинаковым.

**5.1.34.** В зоне малых нагрузок ( $I_{я*} < 0,3$ ) механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения:

- 1) представляет собой кривую гиперболического типа;
- 2) представляет собой кривую параболического типа;
- 3) близка к линейно-возрастающей;
- 4) близка к линейно-падающей.

**5.1.35.** В зоне больших нагрузок ( $I_{я*} > 1,3$ ) механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения:

- 1) представляет собой кривую гиперболического типа;
- 2) представляет собой кривую параболического типа;
- 3) близка к линейно-возрастающей;
- 4) близка к линейно-падающей.

**5.1.36.** Как при токах якоря  $I_{я*} > 1$  возрастает момент, развиваемый ДПТ последовательного возбуждения, по сравнению с током якоря?

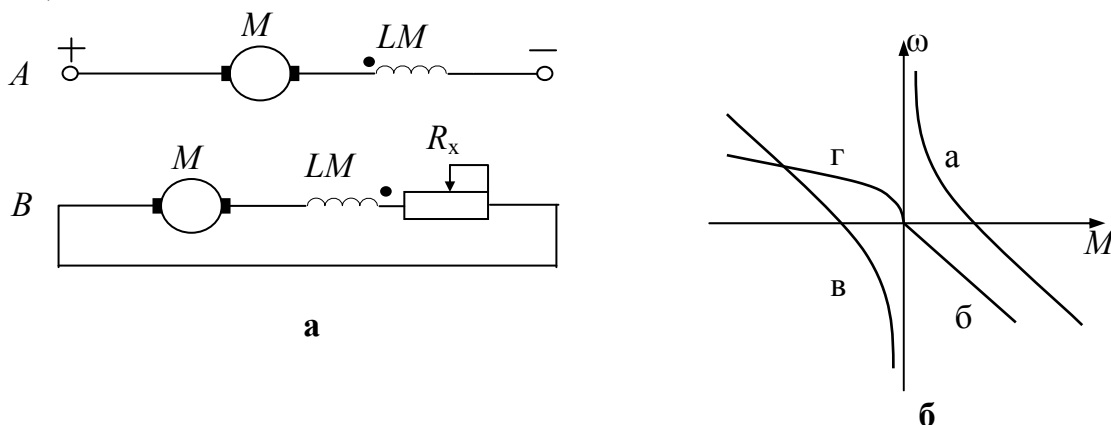
- 1) возрастает в большей степени ( $M* > I_{я*}$ );
- 2) возрастает в меньшей степени ( $M* < I_{я*}$ );
- 3) возрастает в равной степени ( $M* = I_{я*}$ );
- 4) не возрастает ( $M* = const$ ).

**5.1.37.** Какой момент при одной и той же перегрузке по току (при  $I_{я*} > 1$ ) развивает ДПТ последовательного возбуждения по сравнению с ДПТ независимого возбуждения?

- 1) больший;
- 2) меньший;
- 3) равный.

**5.1.38.** В результате перехода от схемы включения *A* (рис. 5.9а) к схеме включения *B* механическая характеристика будет иметь вид (рис. 5.9б):

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в;
- 4) г.



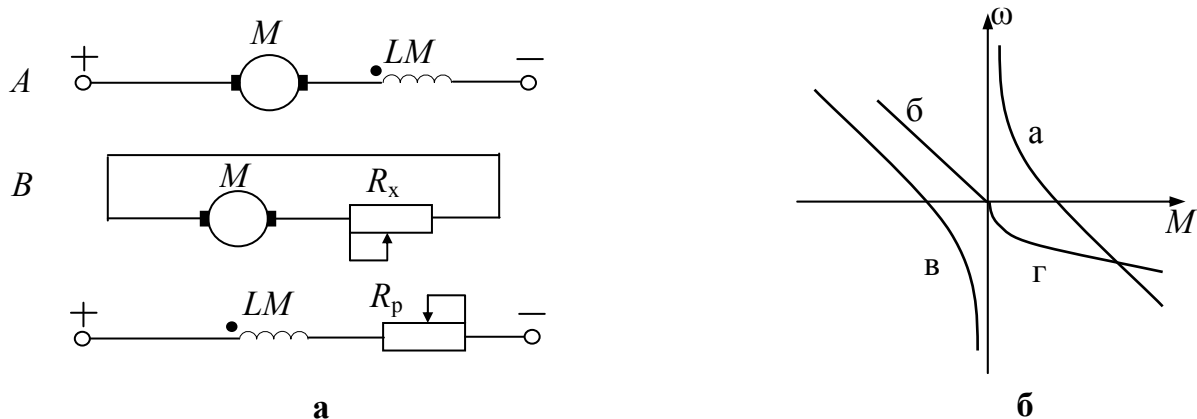
**Рис. 5.9**

**5.1.39.** Для ДПТ последовательного возбуждения неосуществим режим:

- 1) динамического торможения;
- 2) генераторного торможения;
- 3) торможения противовключением (тормозной спуск);
- 4) режим торможения противовключением (перемена полярности).

**5.1.40.** В результате перехода от схемы включения *A* (рис. 5.10а) к схеме включения *B* механическая характеристика будет иметь вид (рис. 5.10б):

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в;
- 4) г.



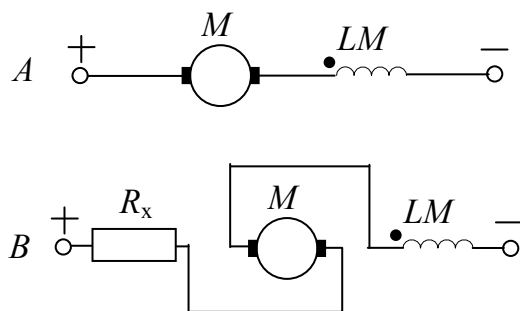
**Рис. 5.10**

**5.1.41.** Для осуществления реверса ДПТ последовательного возбуждения необходимо:

- 1) изменить полярность на зажимах двигателя;
- 2) изменить полярность только на якоре двигателя;
- 3) не изменяя полярности на якоре, включить в цепь якоря дополнительное сопротивление;
- 4) включить дополнительное сопротивление в цепь якоря и изменить полярность на якоре двигателя.

**5.1.42.** В результате перехода от схемы включения *A* (рис. 5.11) к схеме включения *B* механическая характеристика будет иметь вид (см. рис. 5.10б):

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в;
- 4) г.



**Рис. 5.11**

**5.1.43.** Модуль жесткости механической характеристики ДПТ последовательного возбуждения при уменьшении напряжения, приложенного к двигателю:

- 1) практически останется неизменной;
- 2) уменьшится;
- 3) увеличится;
- 4) изменит знак на противоположный.

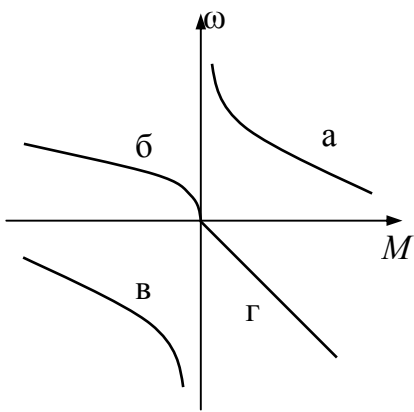


Рис. 5.12

**5.1.44.** Динамическому торможению (с самовозбуждением) ДПТ последовательного возбуждения соответствует механическая характеристика (рис. 5.12):

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в;
- 4) г.

**5.1.45.** Модуль жесткости механической характеристики ДПТ последовательного возбуждения при включении дополнительного сопротивления в цепь якоря:

1) уменьшится;

2) увеличится;

3) останется неизменным;

4) изменит знак на противоположный.

**5.1.46.** Схеме включения ДПТ последовательного возбуждения (рис. 5.13) (при замыкании контактов  $K1$  и размыкании контактов  $K2$ ) соответствует механическая характеристика (рис. 5.14):

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в;
- 4) г.

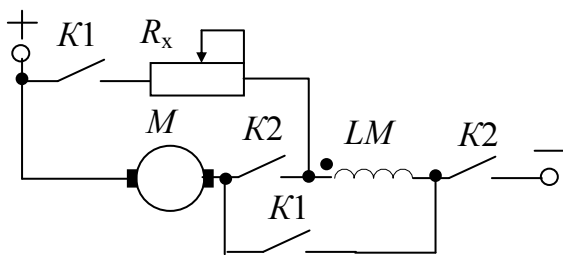


Рис. 5.13

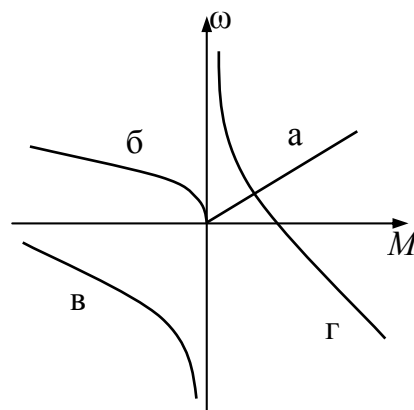


Рис. 5.14

**5.1.47.** Как изменится частота вращения ДПТ последовательного возбуждения с шунтирующим цепь якоря сопротивлением, если уменьшить его величину?

1) уменьшится;

2) увеличится;

3) останется неизменным.

**5.1.48.** Схеме включения ДПТ последовательного возбуждения (рис. 5.15) (при замыкании контактов  $K1$  и размыкании контакта  $K2$ ) соответствует механическая характеристика (рис. 5.16):

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в;
- 4) г.

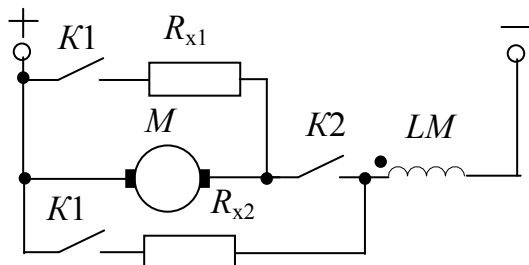


Рис. 5.15

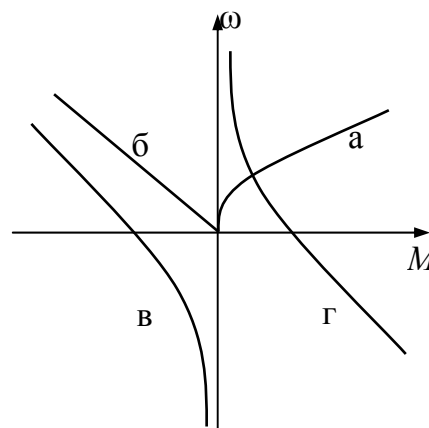


Рис. 5.16

**5.1.49.** Двигатель постоянного тока не может создать вращающий момент при отсутствии:

- 1) момента инерции;
- 2) тока якоря;
- 3) магнитного потока и тока якоря;
- 4) угловой скорости якоря;
- 5) дополнительного сопротивления в цепи якоря.

**5.1.50.** ЭДС двигателя, индуцируемая в якоре двигателя постоянного тока, не может возникнуть при отсутствии:

- 1) тока якоря;
- 2) момента сопротивления;
- 3) момента двигателя;
- 4) угловой скорости якоря;
- 5) угловой скорости якоря и магнитного потока.

**5.1.51.** Величина магнитного поля двигателя постоянного тока зависит от

- 1) тока якоря;
- 2) ЭДС двигателя;
- 3) тока возбуждения;
- 4) момента сопротивления;
- 5) угловой скорости якоря.

**5.1.52.** При увеличении нагрузки на валу двигателя постоянного тока ток якоря:

- 1) увеличивается;
- 2) остается неизменным;
- 3) уменьшается;
- 4) сначала увеличивается, а затем уменьшается до номинального значения.

**5.1.53.** Как изменится угловая скорость двигателя постоянного тока независимого возбуждения на холостом ходу, если в процессе его работы произошел обрыв цепи возбуждения машины?

- 1) не изменится;
- 2) возрастет;
- 3) уменьшится;
- 4) двигатель остановится.

С целью более полного усвоения материала рассмотрим примеры решения некоторых типов задач, а также предлагаем несколько задач для самостоятельного решения.

### Пример 1

Дан электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения П62 ( $P_n = 14$  кВт,  $U_n = 220$  В,  $I_n = 73,5$  А,  $n_n = 1500$  об/мин,  $\eta_n = 0,865$ ,  $J_d = 0,65$  кг·м<sup>2</sup>). Требуется:

1. Построить естественную механическую характеристику. Определить момент потерь холостого хода.

2. Построить пусковую диаграмму и рассчитать ступени пускового реостата. Момент статического сопротивления рабочей машины принять постоянным и равным номинальному ( $M_c = M_n = \text{const}$ ).

3. Построить механическую характеристику двигателя в режиме динамического торможения при включении в цепь якоря дополнительного сопротивления  $R_x = 1,2$  Ом.

4. Определить дополнительное  $R_x$ , которое необходимо включить в цепь якоря, чтобы в режиме торможения противовключением при номинальной скорости начальный тормозной момент был равен  $2M_n$ . Определить момент двигателя на валу.

### Решение

1. Естественная механическая характеристика двигателя представляет собой прямую линию, проходящую через точки:

$$\text{т. 1} - \omega = \omega_0 \text{ при } M = 0 \text{ и т. 2} - \omega = \omega_n \text{ при } M = M_{н\text{э}}.$$

Сопротивление якоря двигателя:

$$R_{\text{я}} = 0,5(1 - \eta_n) \frac{U_n}{I_n} = 0,5(1 - 0,865) \frac{220}{73,5} = 0,202 \text{ Ом.}$$

Коэффициент  $k\Phi_n$  при  $\Phi_n = \text{const}$ :

$$k\Phi_n = \frac{E_n}{\omega_n} = \frac{U_n - I_n R_{\text{я}}}{\omega_n} = \frac{220 - 73,5 \cdot 0,202}{157} = 1,31,$$

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}.$$

Скорость идеального холостого хода:



$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{\kappa\Phi_{\text{н}}} = \frac{220}{1,31} = 168 \text{ с}^{-1}.$$

Номинальный электромагнитный момент двигателя:

$$M_{\text{нэ}} = \kappa\Phi_{\text{н}} I_{\text{н}} = 1,31 \cdot 73,5 = 96,3 \text{ Нм}.$$

Номинальный момент двигателя на валу:

$$M_{\text{нв}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{14000}{157} = 89,3 \text{ Нм}.$$

Момент потерь холостого хода:

$$M_0 = M_{\text{нэ}} - M_{\text{нв}} = 96,3 - 89,3 = 7 \text{ Нм}.$$

На рис. 5.17 представлена естественная механическая характеристика двигателя, построенная по двум точкам:

$$\omega_0 = 168 \text{ с}^{-1} \text{ и } M = 0; \omega_{\text{н}} = 157 \text{ с}^{-1} \text{ и } M_{\text{нэ}} = 96,3 \text{ Нм}.$$

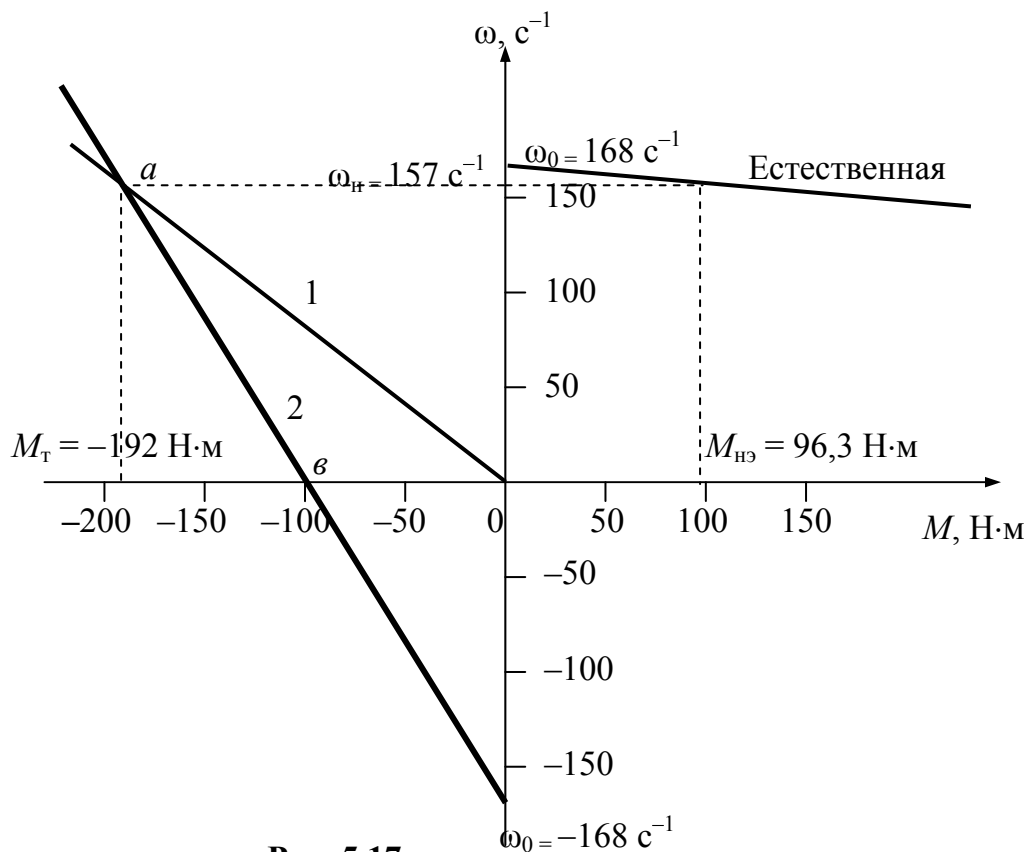


Рис. 5.17

Модуль коэффициента жесткости естественной механической ха-

рактеристики:  $\beta_e = (\kappa\Phi)^2 / R_{\text{я}} = \frac{1,31^2}{0,202} = 8,5.$

2. Используем графический метод расчета пускового реостата.

Для построения реостатных характеристик принимаем, что момент двигателя при пуске изменяется в пределах от  $M_{\text{мах}}$  до  $M_{\text{мин}}$  (рис. 5.18), которые соответственно определяются как

$$M_{\text{мах}} = (2 \dots 2,5) M_{\text{нэ}} = (2 \dots 2,5) 96,3 = (192,6 \dots 240,8) \text{ Нм};$$

$$M_{\min} = (1,1 \dots 1,3)M_c = (1,1 \dots 1,3)96,3 = (106 \dots 125) \text{ Нм.}$$

Принимаем  $M_{\max} = 220 \text{ Нм}$ ;  $M_{\min} = 120 \text{ Нм}$ .

Построение пусковой диаграммы показано на рис. 5.18.

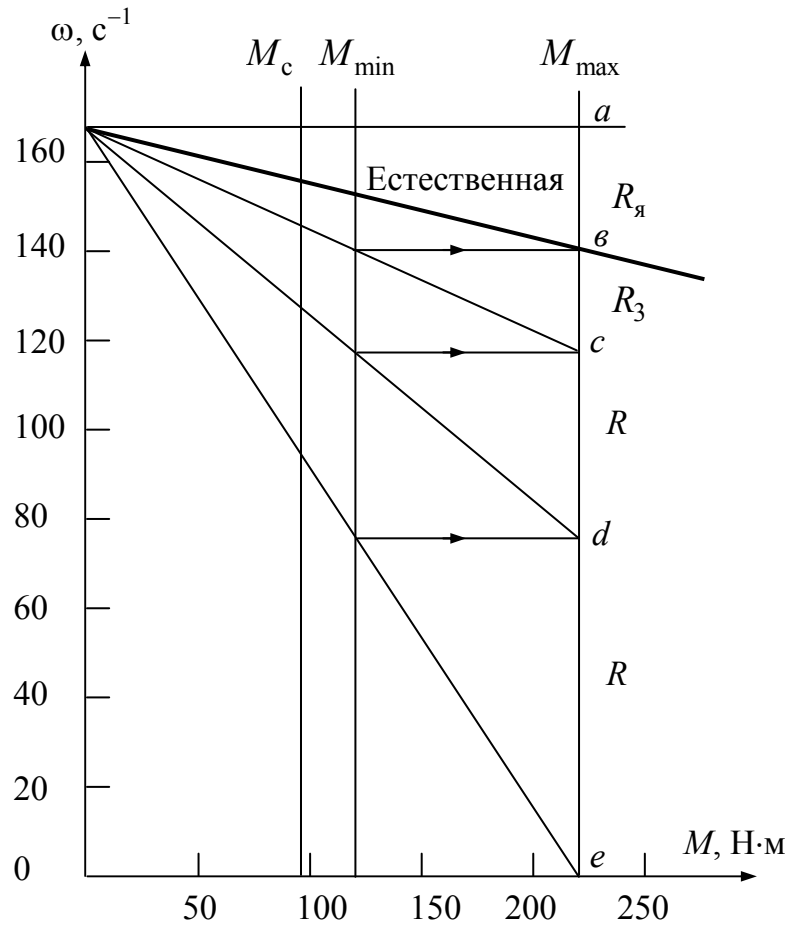


Рис. 5.18

Отрезок  $\overline{ab}$  соответствует сопротивлению якоря двигателя. Тогда масштаб сопротивления равен:

$$m_R = \frac{R_{\text{я}}}{ab} = \frac{0,202}{20} = 0,0101 \text{ Ом/мм.}$$

Сопротивление ступеней пускового реостата:

$$R_1 = \overline{ed}m_R = 58 \cdot 0,0101 = 0,586 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \overline{dc}m_R = 31 \cdot 0,0101 = 0,313 \text{ Ом};$$

$$R_3 = \overline{cb}m_R = 17 \cdot 0,0101 = 0,172 \text{ Ом.}$$

Общее сопротивление пускового реостата:

$$R_{\text{пр}} = \overline{vet}m_R = 106 \cdot 0,0101 = 1,07 \text{ Ом.}$$

3. Механическая характеристика двигателя при динамическом торможении, как известно, проходит через начало координат и описывается уравнением:

$$\omega = -\frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{(k\Phi)^2} = M_{\text{T}}.$$

Поэтому для ее построения при  $R_{\text{х}} = 1,2$  Ом достаточно определить, например, тормозной момент при скорости равной номинальной:

$$M_{\text{T}} = -\frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}} = -\frac{1,31^2}{0,202 + 1,2} \cdot 157 = -192 \text{ Нм}.$$

На рис. 5.17 механическая характеристика 1 соответствует режиму динамического торможения двигателя.

4. В режиме торможения противовключением ток якоря определяется уравнением:

$$I_{\text{я}} = \frac{U + E}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}},$$

так как эдс двигателя направлена последовательно – согласно с направлением сети.

Тогда величина дополнительного сопротивления в цепи якоря:

$$R_{\text{х}} = \frac{U + E}{I_{\text{я}}} - R_{\text{я}} = \frac{U_{\text{н}} + k\Phi_{\text{н}}\omega_{\text{н}}}{2I_{\text{н}}} - R_{\text{я}} = \frac{220 + 1,31 \cdot 157}{2 \cdot 73,5} - 0,202 = 2,7 \text{ Ом},$$

где  $I_{\text{я}} = 2I_{\text{н}}$  – по условию, так как  $\Phi = \text{const}$ ;  $E = E_{\text{н}} = k\Phi_{\text{н}}\omega_{\text{н}}$  при  $\omega = \omega_{\text{н}}$  по условию.

На рис. 5.17 механическая характеристика 2 построена по двум точкам ( $\omega = -\omega_0 = -168 \text{ с}^{-1}$ ;  $M = 0$ ;  $\omega = \omega_{\text{н}} = 157 \text{ с}^{-1}$ ;  $M_{\text{TЭ}} = -2M_{\text{нЭ}} = -192 \text{ Нм}$ ). Режиму торможения противовключением соответствует часть *ав* характеристики 2.

Тормозной момент двигателя на валу:

$$M_{\text{ТВ}} = M_{\text{TЭ}} + M_{\text{О}} = 192 + 7 = 199 \text{ Нм}.$$

## Пример 2

Дан электродвигатель постоянного тока последовательного возбуждения ДП–11 ( $P_{\text{н}} = 6 \text{ кВт}$ ,  $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$ ,  $I_{\text{н}} = 36 \text{ А}$ ,  $n_{\text{н}} = 850 \text{ об/мин}$ ,  $R_{\text{я}} = 0,556 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{ов}} = 0,3 \text{ Ом}$ ). Данные универсальных характеристик приведены в табл. 5.1. Требуется:

1. Определить сопротивление  $R_{\text{х}}$ , которое необходимо включить в цепь якоря, чтобы при моменте  $M = 0,7M_{\text{н}}$  скорость составила  $0,8\omega_{\text{н}}$ .

2. Построить естественную и реостатную механические характеристики двигателя.

Таблица 5.1

Данные универсальных характеристик

$I^*$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$M^*$	0,1	0,3	0,5	0,74	1,0	1,3	1,55	1,85	2,1
$\omega^*$	2,2	1,5	1,2	1,08	1,0	0,92	0,88	0,85	0,82

## Решение

1. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения рассчитывают и строят на основе каталожных данных и универсальных характеристик (рис. 5.19), построенных по данным табл. 5.1, задаваясь значением тока и определяя момент  $M$  и скорость  $\omega$  двигателя.

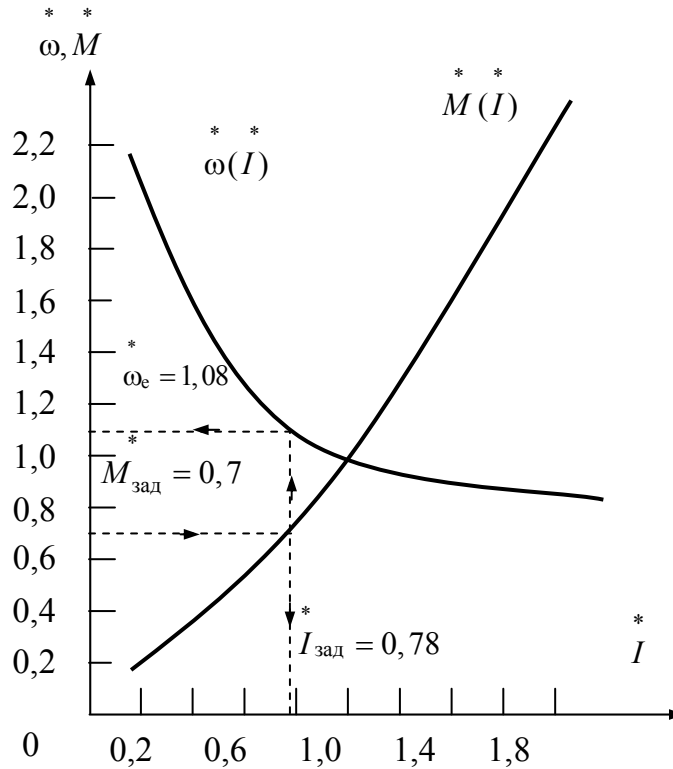


Рис. 5.19

Дополнительное сопротивление  $R_x$ , включенное в цепь якоря, для характеристики, проходящей через заданную точку ( $M = 0,7M_n$ ,  $\omega = 0,8\omega_n$ ) определим из соотношения:

$$\frac{\omega_e}{\omega_p} = \frac{E_e}{E_p} = \frac{U_n - I_e(R_{\text{я}} + R_{\text{ов}})}{U_n - I_p(R_{\text{я}} + R_{\text{ов}} + R_x)}$$

где  $I_e = I_p = I_{\text{зад}}$ , чтобы поток  $\Phi = \text{const}$ .

При этом в уравнение подставляем:  $\omega_p = 0,8\omega_n$  – по условию задачи;  $I_{\text{зад}} = 0,78I_n$  – из рис. 5.19 по кривой  $M(I)$ , при  $M_{\text{зад}} = 0,7$  (по условию задачи);  $\omega_e = 1,08\omega_n$  – из рис. 5.19 по кривой  $\omega(I)$ , при  $I_{\text{зад}} = 0,78$ .

После преобразований:

$$R_x = \left(1 - \frac{\omega_p}{\omega_e}\right) \left(\frac{U_n}{I_{\text{зад}}} - R_{\text{я}} - R_{\text{ов}}\right) = \left(1 - \frac{0,8\omega_n}{1,08\omega_n}\right) \left(\frac{U_n}{0,78I_n} - R_{\text{я}} - R_{\text{ов}}\right) =$$

$$= (1 - \frac{0,8 \cdot 89}{1,08 \cdot 89}) (\frac{220}{0,78 \cdot 36} - 0,566 - 0,3) = 1,8 \text{ Ом.}$$

2. Построим естественную и реостатную механические характеристики двигателя, воспользовавшись универсальными характеристиками (т. 1) и приведенным выше соотношением.

Данные для их построения сведены в табл. 5.2. Характеристики представлены на рис. 5.20.

Таблица 5.2

$I^*$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$M^*$	0,1	0,3	0,5	0,74	1,0	1,3	1,55	1,85	2,1
$\omega_e^*$	2,2	1,5	1,2	1,07	1,0	0,92	0,88	0,85	0,82
$I, \text{ А}$	7,2	14,4	21,6	28,8	36,0	43,2	50,4	57,6	64,8
$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$	6,74	20,2	33,7	53,9	67,4	80,9	94,4	107,8	121,3
$\omega_e, \text{ с}^{-1}$	195,8	133,5	106,8	95,2	89,0	81,9	78,3	75,7	73,0
$E_e, \text{ В}$	213,8	207,5	201,3	195,1	188,8	182,6	176,4	170,0	163,9
$E_p, \text{ В}$	200,8	181,6	162,4	143,2	124,0	104,8	85,6	66,4	47,2
$\omega_p = \frac{E_p}{E_e} \omega_e, \text{ с}^{-1}$	183,9	116,8	86,2	69,9	58,5	47,0	38,0	29,6	20,9

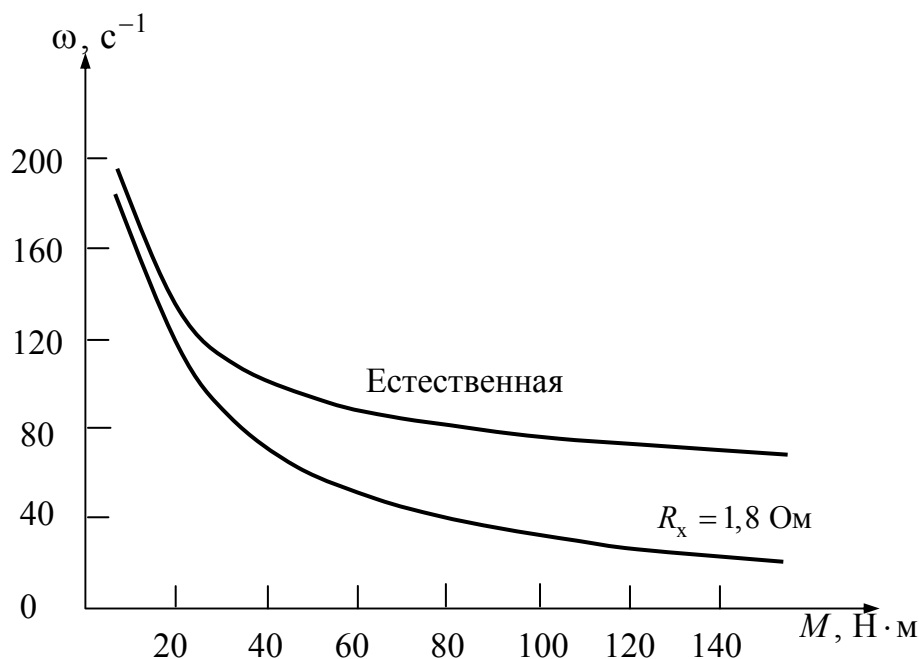


Рис. 5.20

Номинальный момент электродвигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{6000}{89} = 67,4 \text{ Нм.}$$

## Задачи для самостоятельного решения

**5.1.** Чему равно номинальное сопротивление ДПТ независимого возбуждения и сопротивление якоря (ПЗ2  $P_n = 4,5$  кВт,  $I_n = 24,3$  А,  $U_n = 220$  В)?

Ответ: 9 Ом; 0,72 Ом.

**5.2.** Чему равен номинальный момент на валу и электромагнитный момент ДПТ независимого возбуждения ( $P_n = 6$  кВт,  $I_n = 33$  А,  $U_n = 220$  В,  $n_n = 1500$  об/мин)?

Ответ: 38,2 Н·м; 42,2 Н·м.

**5.3.** Для ДПТ независимого возбуждения (П52  $P_n = 14$  кВт,  $I_n = 74$  А,  $U_n = 220$  В,  $n_n = 3000$  об/мин) определить скорость идеального холостого хода и номинальный электромагнитный момент. Построить естественную механическую характеристику.

Ответ:  $337$  с<sup>-1</sup>; 48 Н·м.

**5.4.** Для ДПТ независимого возбуждения (П21  $P_n = 1,5$  кВт,  $I_n = 9$  А,  $U_n = 220$  В,  $n_n = 3000$  об/мин) определить ток и момент короткого замыкания при  $R_x = 3$  Ом. Построить естественную и реостатную механические характеристики.

Ответ: 36,9 А; 22,7 Н·м.

**5.5.** Для ДПТ независимого возбуждения (П71  $P_n = 11$  кВт,  $I_n = 62$  А,  $U_n = 220$  В,  $n_n = 1000$  об/мин,  $\eta_n = 0,805$ ) определить скорость идеального холостого хода при  $U = 0,75U_n$ . Построить естественную и искусственную механические характеристики.

Ответ:  $86,4$  с<sup>-1</sup>.

**5.6.** Для ДПТ независимого возбуждения (П42  $P_n = 8$  кВт,  $I_n = 43,5$  А,  $U_n = 220$  В,  $n_n = 3000$  об/мин,  $\eta_n = 0,835$ ) определить скорость идеального холостого хода при  $\Phi = 0,5\Phi_n$ . Построить естественную и искусственную механические характеристики.

Ответ:  $685$  с<sup>-1</sup>.

**5.7.** Для характеристики  $A$  дополнительное сопротивление, включенное в цепь якоря ДПТ независимого возбуждения ( $U_n = 110$  В), составляет (рис. 5.21).

Ответ: 5,5 Ом.

**5.8.** Чему равно сопротивление, введенное в цепь якоря ДПТ независимого возбуждения, если двигатель имеет характеристику  $A$  (рис. 5.22) ( $U_n = 110$  В)?

Ответ: 9,9 Ом.

**5.9.** Определить дополнительное сопротивление, которое необходимо включить в цепь якоря ДПТ независимого возбуждения ( $P_n = 4,5$  кВт,  $I_n = 25,4$  А,  $U_n = 220$  В,  $n_n = 1500$  об/мин,  $\eta_n = 0,805$ ), чтобы в режиме тормозного спуска при  $I = I_n$  скорость составила  $0,25\omega_n$ .

Ответ: 9,77 Ом.

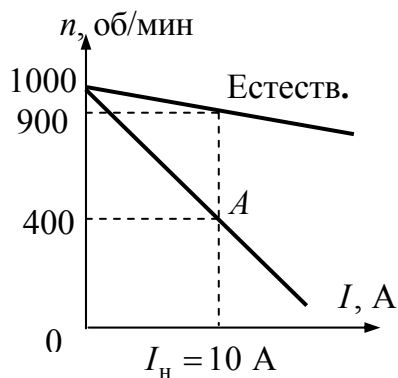


Рис. 5.21

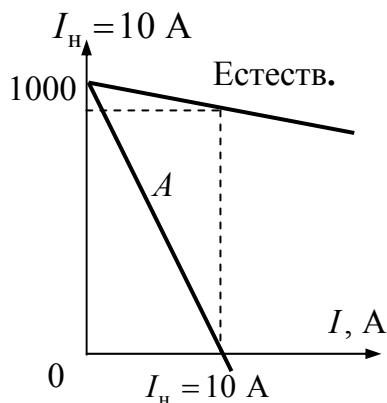


Рис. 5.22

**5.10.** Для характеристики *A* дополнительное сопротивление, включенное в цепь якоря ДПТ независимого возбуждения ( $U_H = 220$  В), составляет (рис. 5.23).

Ответ: 6,6 Ом.

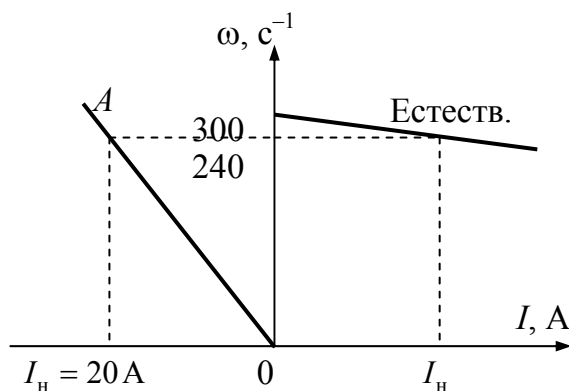


Рис. 5.23

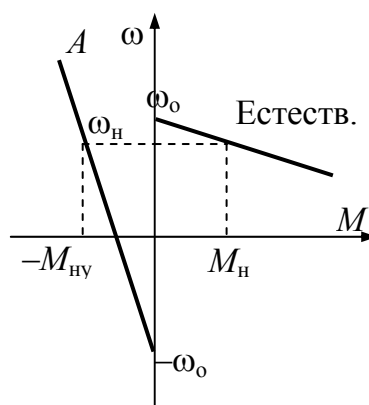


Рис. 5.24

**5.11.** Построить естественную механическую характеристику ДПТ независимого возбуждения ПЗ2 ( $P_H = 2,2$  кВт,  $U_H = 220$  В,  $I_H = 12$  А,  $n_H = 1500$  об/мин,  $R_{я\Sigma} = R_{я} + R_{\partial n} = 1,205$  Ом). Определить ток  $I$  и скорость  $\omega$  при работе двигателя в генераторном режиме при моменте на валу  $M_B = 10$  Н·м.

Ответ: 6,3 А;  $174$  с<sup>-1</sup>.

**5.12.** Для характеристики *A* дополнительное сопротивление, включенное в цепь ДПТ независимого возбуждения ( $P_H = 2,2$  кВт,  $U_H = 220$  В,  $I_H = 12,5$  А,  $\omega_H = 300$  с<sup>-1</sup>), составляет (рис. 5.24).

Ответ: 31,7 Ом.

## 5.2. Режимы работы, электромеханические и механические характеристики асинхронного электродвигателя

5.2.1. Как изменится критический момент асинхронного электродвигателя (АД) при увеличении  $R_1$ ?

- 1) уменьшится;
- 2) увеличится;
- 3) останется неизменным.

5.2.2. Как изменится критический момент асинхронного электродвигателя (АД) при увеличении  $(X_1 + X_2')$ ?

- 1) уменьшится;
- 2) увеличится;
- 3) останется неизменным.

5.2.3. Как изменится критический момент асинхронного электродвигателя при увеличении  $R_2'$ ?

- 1) уменьшится;
- 2) увеличится;
- 3) останется неизменным.

5.2.4. Как изменится критическое скольжение асинхронного электродвигателя при увеличении  $R_2'$ ?

- 1) уменьшится;
- 2) увеличится;
- 3) останется неизменным.

5.2.5. Как изменится критическое скольжение асинхронного электродвигателя (АД) при увеличении  $X_2'$ ?

- 1) уменьшится;
- 2) увеличится;
- 3) останется неизменным.

5.2.6. Как изменится критический момент АД при изменении напряжения питания?

- 1) не зависит от  $U$ ;
- 2) пропорционально  $U^2$ ;
- 3) пропорционально  $U$ ;
- 4) пропорционально  $\frac{1}{U}$ .

5.2.7. Для механических характеристик АД в генераторном и двигательном режимах для критических скольжений справедливо соотношение:

- 1)  $|S_{кГ}| = |S_{кД}|$ ;
- 2)  $|S_{кГ}| > |S_{кД}|$ ;
- 3)  $|S_{кГ}| < |S_{кД}|$ .



**5.2.8.** При работе АД в режиме рекуперативного торможения для скольжения справедливо соотношение:

- 1)  $S > 1$ ;
- 2)  $S < 0$ ;
- 3)  $0 > S > -1$ ;
- 4)  $S = 0$ .

**5.2.9.** Может ли критическое скольжение АД иметь значение, превышающее единицу?

- 1) да, при снижении  $U$ ;
- 2) не может;
- 3) да, при включении дополнительного сопротивления в цепь ротора;
- 4) да, при включении дополнительного сопротивления в цепь статора.

**5.2.10.** Для АД, работающего в двигательном и генераторном режимах, при одинаковых значениях скольжения для тока ротора справедливо соотношение:

- 1)  $|I'_{2ДВ}| > |I'_{2Г}|$ ;
- 2)  $|I'_{2ДВ}| = |I'_{2Г}|$ ;
- 3)  $|I'_{2ДВ}| < |I'_{2Г}|$ .

**5.2.11.** Для механических характеристик АД в генераторном и двигательном режимах для критических моментов справедливо соотношение:

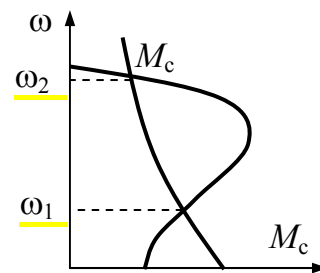
- 1)  $|M_{кДВ}| > |M_{кГ}|$ ;
- 2)  $|M_{кДВ}| = |M_{кГ}|$ ;
- 3)  $|M_{кДВ}| < |M_{кГ}|$ .

**5.2.12.** При изменении скольжения АД эдс ротора будет определяться по выражению:

- 1)  $E_{2S} = E_{2К}S$ ;
- 2)  $E_{2S} = \frac{E_{2К}}{S}$ ;
- 3)  $E_{2S} = E_{2К}S^2$ ;
- 4)  $E_{2S} = \frac{E_{2К}}{\sqrt{S}}$ .

**5.2.13.** При пуске АД с моментом сопротивления на валу  $M_c$  происходит его разбег до скорости (рис. 5.25):

- 1)  $\omega = \omega_1$ ;
- 2)  $\omega = \omega_0$ ;



**Рис. 5.25**

- 3)  $\omega = 0$ ;
- 4)  $\omega = \omega_2$ .

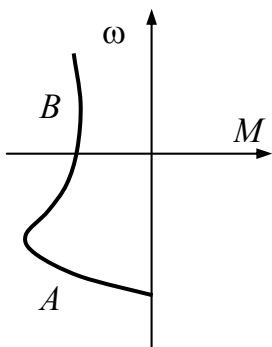


Рис. 5.26

**5.2.14.** В точке *A* АД работает в (рис. 5.26):

- 1) режиме динамического торможения;
- 2) режиме торможения противовключением;
- 3) режиме генераторного торможения;
- 4) двигательном режиме.

**5.2.15.** В точке *B* АД работает в (рис. 5.26):

- 1) режиме динамического торможения;
- 2) режиме генераторного торможения;
- 3) двигательном режиме;
- 4) режиме торможения противовключением.

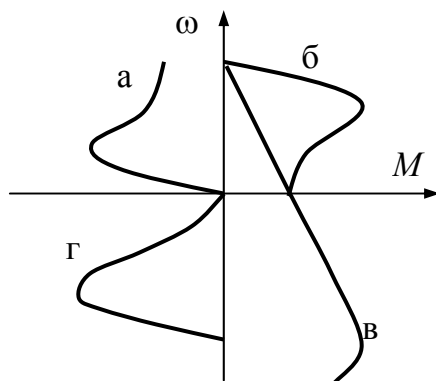


Рис. 5.27

**5.2.16.** Работе трехфазного АД в однофазном режиме соответствует механическая характеристика (рис. 5.27):

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в;
- 4) г.

**5.2.17.** Механическая характеристика *a* АД соответствует его работе в (рис. 5.27):

- 1) режиме торможения противовключением;
- 2) режиме динамического торможения;
- 3) режиме торможения с рекуперацией;
- 4) двигательном режиме.

**5.2.18.** Для увеличения максимального (критического) момента АД в режиме динамического торможения необходимо:

- 1) уменьшить сопротивление роторной цепи;
- 2) увеличить сопротивление роторной цепи;
- 3) уменьшить постоянный ток в цепи статора;
- 4) увеличить постоянный ток в цепи статора.

**5.2.19.** Механическая характеристика 2 АД может быть получена при изменении (рис. 5.28):

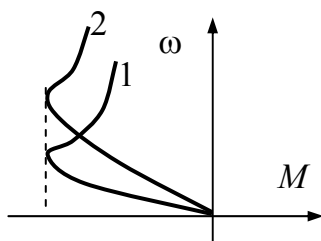


Рис. 5.28

- 1) величины сопротивления роторной цепи;
- 2) величины постоянного тока статора;
- 3) числа пар полюсов;
- 4) емкости конденсаторов в цепи статора.

**5.2.20.** При подаче на статор заторможенного АД напряжения частотой  $f_1$  частота  $f_2$  тока ротора будет:

1.  $f_2 < f_1$ ;
2.  $f_2 = f_1$ ;
3.  $f_2 = 0$ ;
4.  $f_2 > f_1$ .

**5.2.21.** Для определения величины номинального сопротивления фазы ротора АД справедливо выражение:

- 1)  $R_{2H} = \frac{E_{2K}}{\sqrt{3}I_{2H}}$ ;
- 2)  $R_{2H} = \frac{E_{2K}S_H}{\sqrt{3}I_{2H}}$ ;
- 3)  $R_{2H} = \frac{E_{2K}S_K}{\sqrt{3}I_{2H}}$ ;
- 4)  $R_{2H} = \frac{E_{2K}}{\sqrt{3}I_{2H}S_H}$ .

**5.2.22.** С уменьшением напряжения сети перегрузочная способность асинхронного электродвигателя:

- 1) уменьшится;
- 2) останется неизменной;
- 3) увеличится.

**5.2.23.** Каким способом следует включить трехфазный асинхронный двигатель с паспортными данными  $U_H = 380/220$  В в сеть с линейным напряжением 220 В, чтобы он работал на естественной характеристике?

- 1) любым способом;
- 2) звездой;
- 3) треугольником;
- 4) естественную характеристику получить нельзя.

**5.2.24.** Критический момент, развиваемый асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, с увеличением частоты питающей сети в два раза при неизменном напряжении сети  $U_c = U_H = \text{const}$ :

- 1) не изменяется;
- 2) уменьшается в 2 раза;
- 3) увеличивается в 2 раза;
- 4) уменьшается в 4 раза.

Рассмотрим пример решения задачи на построение механических характеристик АД в различных режимах работы.

### Пример 3

Дан асинхронный электродвигатель с фазным ротором 4АК160S4 ( $P_H = 11$  кВт;  $n_H = 1435$  об/мин;  $U_H = 380/220$  В;  $I_{1H} = 22,4$  А;  $E_{2K} = 305$  В;  $I_{2H} = 22$  А;  $\eta_H = 0,865$ ;  $\cos\varphi_H = 0,86$ ;  $\mu_K = 3$ ).

Требуется:

1. Рассчитать и построить естественную механическую характеристику двигателя в пределах скольжения от  $S=0$  до  $S=2$  по полной формуле Клосса.

2. Определить номинальное сопротивление обмотки ротора.

3. Построить реостатную механическую характеристику в том же диапазоне изменения скольжения при включении дополнительного сопротивления в цепь ротора  $R_{2x} = 0,6$  Ом.

4. Определить сопротивление  $R_{2x}$ , которое необходимо включить в цепь ротора, чтобы в режиме тормозного спуска при моменте  $M_{зад} = M_H$  скорость составила  $\omega_{зад} = 0,25\omega_H$ .

**Решение**

1. Полная формула Клосса имеет вид:

$$M = \frac{2M_K(1 + \alpha S_K)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2\alpha S_K},$$

где  $\alpha = \frac{R_1}{R'_2} = 1$ .

Номинальный момент:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{11000}{150} = 73,2 \text{ Нм.}$$

Критический момент:

$$M_K = \mu_K M_H = 3 \cdot 73,2 = 219,6 \text{ Нм.}$$

Номинальное скольжение:

$$S_H = \frac{n_o - n_H}{n_o} = \frac{1500 - 1435}{1500} = 0,043.$$

Критическое скольжение:

$$\begin{aligned} S_K &= \frac{S_H[\mu_K + \sqrt{\mu_K^2 + 2S_H(\mu_K - 1) - 1}]}{1 - 2S_H(\mu_K - 1)} = \\ &= \frac{0,043[3 + \sqrt{3^2 + 2 \cdot 0,043(3 - 1) - 1}]}{1 - 2 \cdot 0,043(3 - 1)} = 0,3. \end{aligned}$$

Формула для расчета характеристики получает вид:

$$M = \frac{571}{\frac{S}{0,3} + \frac{0,3}{S} + 0,6}.$$

Результаты расчета представлены в табл. 5.3. Естественная механическая характеристика АД показана на рис. 5.29.

Таблица 5.3

$S_e$	0	0,043	0,15	0,3	0,5	0,7	1
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	0	73,2	184	219,6	199	170	135
$\omega_e = \omega_0(1 - S_e), \text{с}^{-1}$	157	150	133,5	110	78,5	47,1	0
$S_p$	0	0,12	0,42	0,83	1,38	1,93	2,76
$\omega_p = \omega_0(1 - S_p), \text{с}^{-1}$	157	138,2	92	26,7	-59,7	-146	-276,3

$S_e$	1,2	1,4	1,6	1,8
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	117,7	104,2	93,3	84,3
$\omega_e = \omega_0(1 - S_e), \text{с}^{-1}$	-31,4	-62,8	-94,2	-125,6

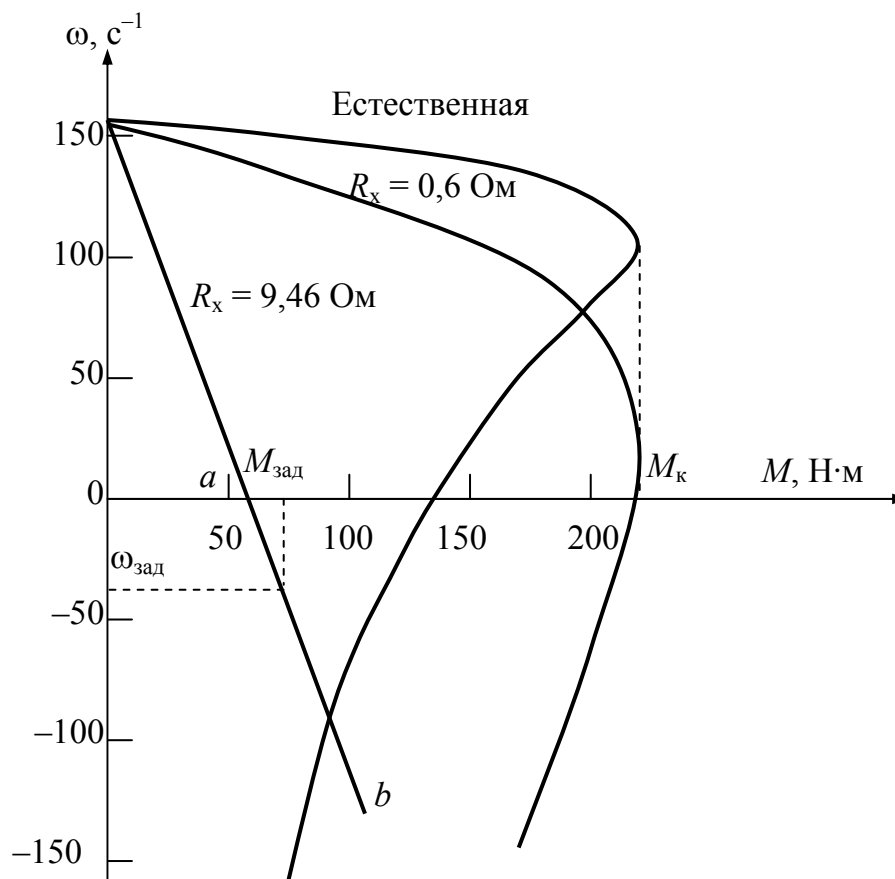


Рис. 5.29

## 2. Номинальное сопротивление обмотки ротора

$$R_{2н} = \frac{E_{2к} S_H}{\sqrt{3} I_{2н}} = \frac{305 \cdot 0,043}{\sqrt{3} \cdot 22} = 0,34 \text{ Ом}$$

или

$$R_{2н} = \frac{M_H S_H \omega_0}{3 I_{2н}^2} = \frac{73,2 \cdot 157 \cdot 0,043}{3 \cdot 22^2} = 0,34 \text{ Ом.}$$

Так как при одном и том же моменте значения скольжений относятся как сопротивления роторной цепи, то построение реостатной характеристики удобно провести, пользуясь выражением:

$$S_p = S_e \frac{R_{2H} + R_{2X}}{R_{2H}} = S_e \frac{0,34 + 0,6}{0,34} = 2,76S_e,$$

где  $S_e$  – скольжение, соответствующее моменту  $M$  на естественной характеристике;  $S_p$  – скольжение, соответствующее тому же значению момента  $M$  на реостатной характеристике.

Результаты расчета сведены в табл. 5.3, по данным которой построена реостатная характеристика (рис. 5.29).

3. Величину необходимого дополнительного сопротивления  $R_{2X}$ , включаемого в цепь ротора, при заданных значениях момента  $M_{зад}$  и скорости  $\omega_{зад}$ , можно определить по формуле:

$$R_{2X} = R_{2H} \left( \frac{S_p}{S_e} - 1 \right) = 0,34 \left( \frac{1,24}{0,043} - 1 \right) = 9,46 \text{ Ом.}$$

Для режима тормозного спуска:

$$S_p = \frac{n_o - (-n_{зад})}{n_o} = \frac{150 + 0,25 \cdot 1435}{1500} = 1,24.$$

Поскольку  $M_{зад} = M_H$ , то  $S_e = S_H = 0,043$ .

Механическая характеристика в режиме тормозного спуска (участок  $ab$  при  $R_{2X} = 9,46$  Ом) представлена на рис. 5.29.

### Задачи для самостоятельного решения

**5.13.** Определить пусковой момент АД с контактными кольцами (4АК200L4  $P_H = 30$  кВт;  $I_H = 58$  А;  $n_H = 1460$  об/мин;  $\mu_k = 4$ ) для естественной механической характеристики.

Ответ: 235 Н·м.

**5.14.** Определить эдс ротора АД с контактными кольцами (4АК200L6  $P_H = 20$  кВт;  $n_H = 965$  об/мин;  $I_{1H} = 43,2$  А;  $I_{2H} = 45$  А;  $E_{2к} = 330$  В), если его скорость равна  $0,25\omega_H$ .

Ответ: 251 В.

**5.15.** Для АД с контактными кольцами определить пусковой ток ротора при  $R_{2X} = 1$  Ом (4АК180M4  $P_H = 18,5$  кВт;  $n_H = 1460$  об/мин;  $I_{1H} = 36$  А;  $I_{2H} = 38$  А;  $E_{2к} = 295$  В).

Ответ: 152 А.

**5.16.** Определить потери мощности в роторе АД с контактными кольцами при номинальном режиме работы (4АК100S4  $P_H = 4$  кВт;  $I_H = 8,6$  А;  $n_H = 1430$  об/мин).

Ответ: 187 Вт.

**5.17.** Определить скорость АД с фазным ротором при работе на реостатной характеристике, если  $R_{2X} = 0,5$  Ом и  $M = M_H$  (4АК200M4  $P_H = 22$  кВт;  $I_{1H} = 42,7$  А;  $n_H = 1460$  об/мин;  $I_{2H} = 45$  А;  $E_{2к} = 340$  В).

Ответ:  $135 \text{ с}^{-1}$ .

**5.18.** Какое сопротивление  $R_{2x}$  требуется включить в цепь ротора АД с контактными кольцами, чтобы при  $M = M_H \omega = 0,25\omega_H$  (4АК160М4  $P_H = 14$  кВт;  $n_H = 1450$  об/мин;  $I_{2H} = 29$  А;  $E_{2к} = 300$  В)?

Ответ: 2,86 Ом.

**5.19.** Какое требуется включить в цепь ротора АД с контактными кольцами сопротивление  $R_{2x}$ , чтобы в режиме торможения противовключением при  $M = M_H \omega = 0,25\omega_H$  (4АК160S4  $P_H = 11$  кВт;  $n_H = 1435$  об/мин;  $I_{2H} = 22$  А;  $E_{2к} = 305$  В)?

Ответ: 9,6 Ом.

**5.20.** Для асинхронного электродвигателя RA112M4 с к.-з. ротором (табл. 5.4) построить естественную электромеханическую характеристику.

Таблица 5.4

Тип	$P_H$ , кВт	$I_H$ , А	$n_H$ , об/мин	$\cos\varphi_H$	$\eta_H$	$\kappa_i$	$\mu_{п}$	$\mu_{min}$	$\mu_{к}$
RA112M4	4,0	9,0	1430	0,84	0,855	6,5	2,2	1,9	2,9

**5.21.** Определить модуль коэффициента жесткости рабочей части естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя с к.-з. ротором с паспортными данными (табл. 5.4).

**5.22.** Построить искусственную механическую характеристику асинхронного электродвигателя с к.-з. ротором с паспортными данными (табл. 5.4) при снижении напряжения на статоре на 20 %.

**5.23.** Определить скорость асинхронного электродвигателя с паспортными данными:  $P_H = 22$  кВт,  $n_H = 935$  об/мин, номинальная частота  $f_H = 50$  Гц, номинальное фазное напряжение  $U_H = 220$  В при номинальном моменте, если частота источника питания  $f = 0,5f_H$  и напряжение  $U = 0,5U_H$ .

*Примечание.* При расчете пренебречь падением напряжения на активном сопротивлении обмотки статора, т.е. принимаем, что коэффициенты жесткости рабочего участка характеристик равны.

Ответ: 435 об/мин.

**5.24.** Определить номинальное, критическое скольжение, критический и пусковой моменты асинхронного электродвигателя RA132SB2 с к.-з. ротором с паспортными данными из табл. 5.5.

Таблица 5.5

Тип	$P_H$ , кВт	$I_H$ , А	$n_H$ , об/мин	$\cos\varphi_H$	$\eta_H$	$\kappa_i$	$\mu_{п}$	$\mu_{min}$	$\mu_{к}$
RA132SB2	7,5	15,0	2890	0,89	0,89	7,0	2,5	2,1	3,2

**5.25.** Асинхронный электродвигатель с паспортными данными:  $P_H = 7,5$  кВт,  $U_H = 220$  В, номинальное скольжение  $S_H = 5,1$  %, число пар полюсов  $p = 3$ , работает в двигательном режиме с номинальной

скоростью, а затем переводится в режим торможения противовключением (переменной чередования фаз). Определить скольжение АД в момент перехода в режим торможения.

Ответ: 1,949.

**5.26.** Асинхронный электродвигатель с паспортными данными:  $P_n = 7,5$  кВт,  $U_n = 220$  В, номинальное скольжение  $S_n = 5,1$  %, число пар полюсов  $p = 3$ , работает в двигательном режиме с номинальной скоростью при наличии на валу активного номинального момента, а затем переводится в режим торможения противовключением (переменной чередования фаз). Определите режим работы и скорость в установившемся режиме.

Ответ: режим работы – генераторное торможение, скорость  $\omega = -110$  с<sup>-1</sup>.



## Глава 6 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

### 6.1. Регулирование скорости электропривода постоянного тока

**6.1.1.** Угловая скорость идеального холостого хода ДПТ независимого возбуждения при уменьшении напряжения на якоре в 2 раза:

- 1) увеличится в 2 раза;
- 2) уменьшится в 2 раза;
- 3) останется неизменной;
- 4) уменьшится в 4 раза.

**6.1.2.** Угловая скорость идеального холостого хода ДПТ независимого возбуждения при уменьшении потока возбуждения в 2 раза:

- 1) уменьшится в 2 раза;
- 2) увеличится в 4 раза;
- 3) увеличится в 2 раза;
- 4) останется неизменной.

**6.1.3.** При работе на характеристике А (рис. 6.1):

- 1)  $R_x > 0$ ;
- 2)  $U < U_n$ ;
- 3)  $\Phi < \Phi_n$ ;
- 4)  $\Phi > \Phi_n$ .

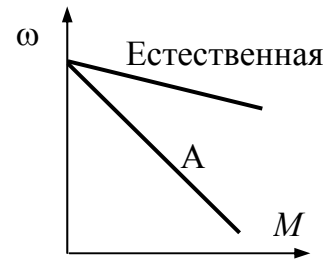


Рис. 6.1

**6.1.4.** При изменении магнитного потока все механические характеристики ДПТ независимого возбуждения будут:

- 1) пересекаться в различных точках;
- 2) пересекаться в одной точке;
- 3) параллельны.

**6.1.5.** При работе на характеристике А (рис. 6.2):

- 1)  $\Phi = \frac{\Phi_n}{2}$ ;
- 2)  $R_x = 2 R_{я}$ ;
- 3)  $U = \frac{U_n}{2}$ ;
- 4)  $U = \frac{U_n}{4}$ .

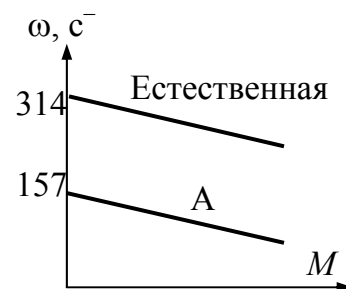


Рис. 6.2

**6.1.6.** При изменении магнитного потока все электромеханические характеристики ДПТ независимого возбуждения будут:

- 1) параллельны;
- 2) пересекаться в одной точке;
- 3) пересекаться в различных точках.

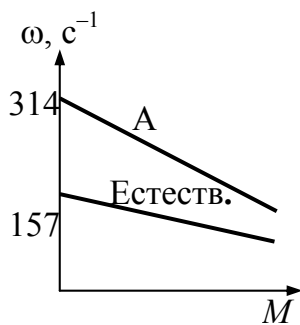


Рис. 6.3

6.1.7. При работе на характеристике А (рис. 6.3):

- 1)  $U = \frac{U_H}{2}$ ;
- 2)  $\Phi = \frac{\Phi_H}{2}$ ;
- 3)  $\Phi = 2\Phi_H$ ;
- 4)  $R_x = 2R_{я}$ .

6.1.8. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения осуществляется (рис. 6.4):

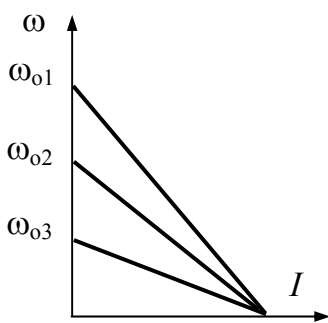


Рис. 6.4

- 1) изменением величины дополнительного сопротивления в цепи якоря;
- 2) изменением потока возбуждения;
- 3) изменением подведенного к якорю напряжения;
- 4) шунтированием якоря.

6.1.9. Каким образом можно перевести ДПТ независимого возбуждения из точки А в точку Б (рис. 6.5)?

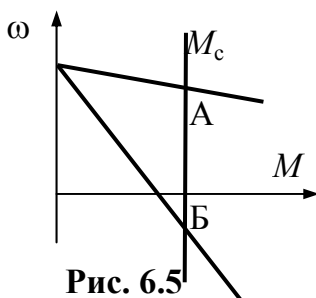


Рис. 6.5

- 1) переменной полярности на якоря;
- 2) переводом ДПТ в режим динамического торможения;
- 3) введением сопротивления  $R_x$  в цепь якоря;
- 4) изменением потока возбуждения двигателя.

6.1.10. Каким образом можно перевести ДПТ независимого возбуждения из точки А в точку Б (рис. 6.6)?

- 1) увеличением сопротивления в цепи якоря.
- 2) увеличением потока возбуждения.
- 3) уменьшением напряжения, приложенного к якорю.
- 4) уменьшением потока возбуждения.

6.2.11. Механическую характеристику А ДПТ последовательного возбуждения можно получить (рис. 6.7):

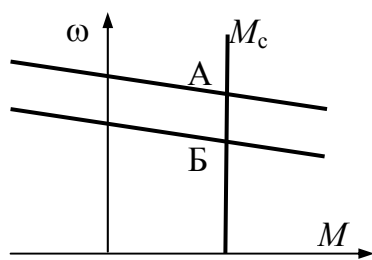


Рис. 6.6

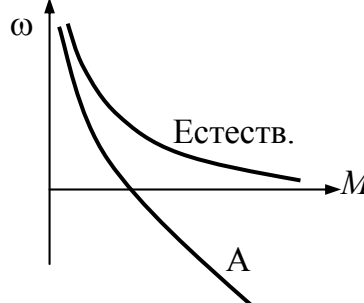


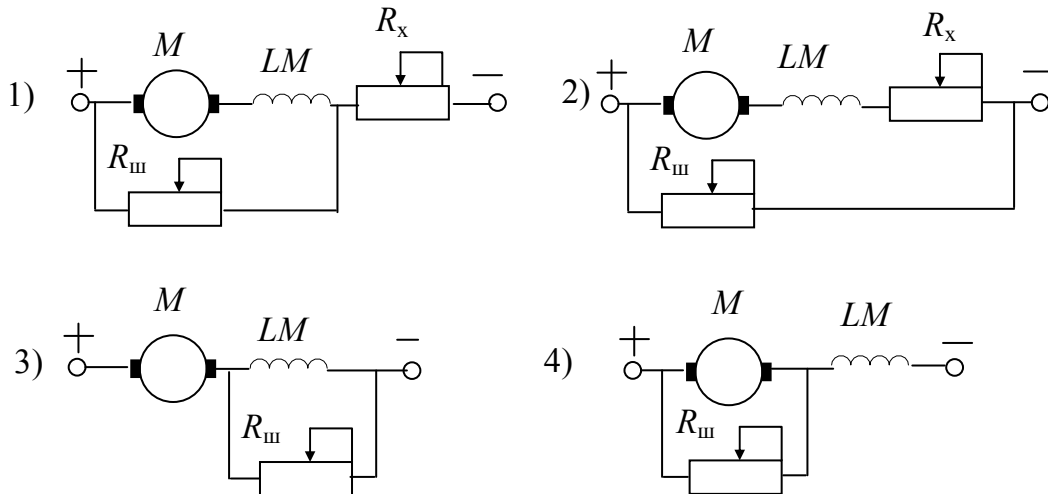
Рис. 6.7

- 1) изменением дополнительного сопротивления в цепи якоря;

- 2) шунтированием обмотки возбуждения;
- 3) изменением напряжения, приложенного к якорю;
- 4) шунтированием якоря.

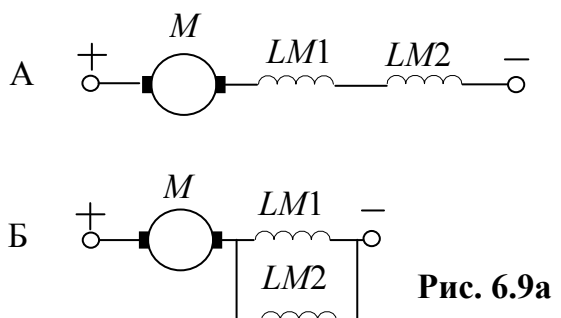
**6.1.12.** Какая из приведенных схем применяется для регулирования скорости вверх от основной (рис. 6.8)?

- 1) 2;
- 2) 3;
- 3) 1;
- 4) 4.

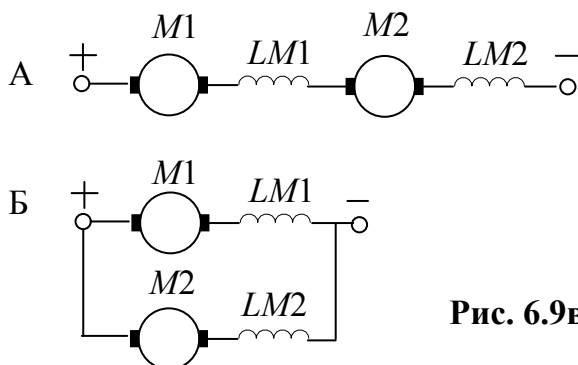


**Рис. 6.8**

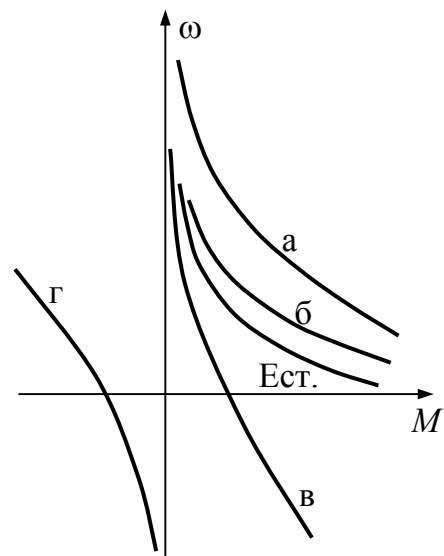
**6.1.13.** В результате перехода от схемы включения А к схеме Б (рис. 6.9а) механическая характеристика будет иметь вид (рис. 6.9б):



**Рис. 6.9а**



**Рис. 6.9в**



**Рис. 6.9б**

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в;
- 4) г.

**6.1.14.** В результате перехода от схемы включения А к схеме Б (рис. 6.9в) механическая характеристика будет иметь вид (рис. 6.9б):

- 1) а;
- 2) б;
- 3) в;
- 4) г.

Рассмотрим пример решения задач на построение механических характеристик ДПТ при регулировании скорости изменением различных параметров: потока возбуждения  $\Phi$ , напряжения приложенного к якору двигателя  $U$ , сопротивления в цепи якоря  $R_x$ .

### Пример 1

Дан электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения ПЗ1 ( $P_H = 1,5$  кВт;  $U_H = 220$  В;  $I_H = 8,7$  А;  $n_H = 1500$  об/мин;  $R_{я} = 2,455$  Ом). Требуется:

1. Построить естественную механическую характеристику двигателя.
2. Построить механическую характеристику двигателя при потоке  $\Phi = 0,7\Phi_H$ . Определить допустимый момент нагрузки при данном потоке.
3. Построить механическую характеристику двигателя при напряжении  $U = 0,5U_H$ .
4. Построить механическую характеристику двигателя при дополнительном сопротивлении в цепи якоря  $R_x = 5$  Ом.

### Решение

1. Естественную механическую характеристику двигателя строим аналогично примеру 1.

Коэффициент  $\kappa\Phi_H$  при  $\Phi = \Phi_H$ :

$$\kappa\Phi_H = \frac{E_H}{\omega_H} = \frac{U_H - I_H R_{я}}{\omega_H} = \frac{220 - 8,7 \cdot 2,455}{157} = 1,27.$$

Скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{\kappa\Phi_H} = \frac{220}{1,27} = 174 \text{ с}^{-1}.$$

Номинальный электромагнитный момент:

$$M_{HЭ} = \kappa\Phi_H I_H = 1,27 \cdot 8,7 = 11 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Модуль коэффициента жесткости естественной механической характеристики:

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_{HЭ}}{\omega_0 - \omega_H} = \frac{11}{174 - 157} = \frac{11}{17} = 0,65.$$

2. Для построения механической характеристики при потоке  $\Phi' = 0,7\Phi_H$  определим:

а) скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0' = \frac{U_H}{\kappa\Phi'} = \frac{U_H}{0,7\kappa\Phi_H} = \frac{220}{0,7 \cdot 1,27} = 247,5 \text{ с}^{-1}.$$

б) скорость двигателя при номинальном моменте из уравнения механической характеристики:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{H}}' &= \frac{U_{\text{H}}}{\kappa\Phi'} - \frac{R_{\text{я}}}{(\kappa\Phi')^2} M_{\text{э}} = \frac{U_{\text{H}}}{0,7\kappa\Phi_{\text{H}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(0,7\kappa\Phi_{\text{H}})^2} M_{\text{HЭ}} = \\ &= \frac{220}{0,7 \cdot 1,27} - \frac{2,455}{(0,7 \cdot 1,27)^2} 11 = 213 \text{ с}^{-1}.\end{aligned}$$

Механическую характеристику при потоке  $\Phi' = 0,7\Phi_{\text{H}}$  строим по двум точкам:  $\omega'_0 = 247,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $M = 0$  и  $\omega'_{\text{H}} = 213 \text{ с}^{-1}$ ,  $M = M_{\text{HЭ}} = 11 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

При определении допустимого момента нагрузки двигателя следует исходить из того, что ток двигателя в любом режиме не должен быть больше его номинального значения, т.е.  $I_{\text{я}} \leq I_{\text{H}}$ .

Тогда, при  $\Phi' = 0,7\Phi_{\text{H}}$  допустимый момент нагрузки:

$$M_{\text{доп}} = \kappa\Phi' I_{\text{H}} = 0,7\kappa\Phi_{\text{H}} I_{\text{H}} = 0,7 \cdot 1,27 \cdot 8,7 = 7,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Модуль коэффициента жесткости:

$$\beta_{\Phi} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_{\text{HЭ}}}{\omega'_0 - \omega'_{\text{H}}} = \frac{11}{247,5 - 213} = \frac{11}{34,5} = 0,32.$$

3. Для построения механической характеристики при напряжении  $U = 0,5U_{\text{H}}$  определим:

• скорость идеального хода:

$$\omega_0'' = \frac{U}{\kappa\Phi_{\text{H}}} = \frac{0,5U_{\text{H}}}{\kappa\Phi_{\text{H}}} = \frac{0,5 \cdot 220}{1,27} = 87 \text{ с}^{-1};$$

• скорость двигателя при номинальном моменте:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{H}}'' &= \frac{U}{\kappa\Phi_{\text{H}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(\kappa\Phi_{\text{H}})^2} M_{\text{э}} = \frac{0,5U_{\text{H}}}{\kappa\Phi_{\text{H}}} - \frac{R_{\text{я}}}{(\kappa\Phi_{\text{H}})^2} M_{\text{HЭ}} = \\ &= \frac{0,5 \cdot 220}{1,27} - \frac{2,455}{1,27^2} 11 = 70 \text{ с}^{-1}.\end{aligned}$$

Механическую характеристику строим по точкам:

$$\omega = \omega''_0 = 87 \text{ с}^{-1}, M = 0;$$

$$\omega = \omega''_{\text{H}} = 70 \text{ с}^{-1}, M = M_{\text{HЭ}} = 11 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Модуль коэффициента жесткости:

$$\beta_U = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_{\text{HЭ}}}{\omega''_0 - \omega''_{\text{H}}} = \frac{11}{87 - 70} = \frac{11}{17} = 0,65.$$

4. Так как при включении дополнительного сопротивления в цепь якоря скорость идеального холостого хода не изменяется, то для построения реостатной характеристики достаточно определить скорость двигателя при любом заданном моменте, например, при  $M = M_{\text{HЭ}}$ :

$$\omega_{\text{H}}''' = \frac{U_{\text{H}}}{\kappa\Phi_{\text{H}}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}}{(\kappa\Phi_{\text{H}})^2} M_{\text{HЭ}} = \frac{220}{1,27} - \frac{2,455 + 5}{1,27^2} \cdot 11 = 123 \text{ с}^{-1}.$$

Механическую характеристику строим по точкам:

$$\omega = \omega_0 = 174 \text{ с}^{-1}, M = 0;$$

$$\omega = \omega_H''' = 123 \text{ с}^{-1}, M = M_{HЭ} = 11 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Модуль коэффициента жесткости:

$$\beta_R = \frac{M_{HЭ}}{\omega_0 - \omega_H'''} = \frac{11}{174 - 123} = \frac{11}{51} = 0,22.$$

На рис. 6.10 представлены механические характеристики, рассчитанные в данном примере.

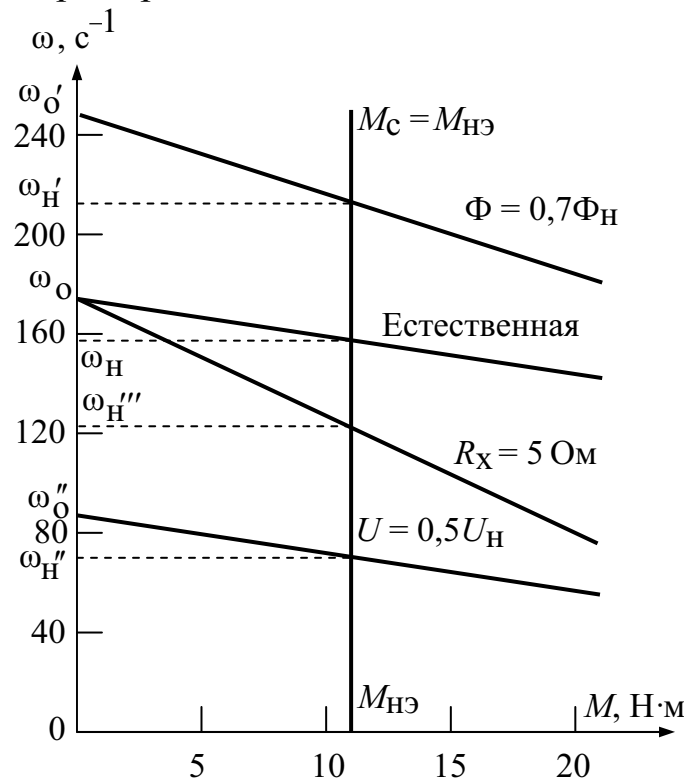


Рис. 6.10

### Задачи для самостоятельного решения

**6.1.** Построить естественную механическую характеристику ДПТ независимого возбуждения П22 ( $P_H = 2,2 \text{ кВт}$ ;  $U_H = 220 \text{ В}$ ;  $I_H = 12,5 \text{ А}$ ;  $n_H = 3000 \text{ об/мин}$ ;  $R_{я\Sigma} = R_{я} + R_{дп} = 1,03 \text{ Ом}$ ) и механическую характеристику при  $\Phi = 0,5\Phi_H$  и  $R_x = 2 \text{ Ом}$ .

**6.2.** Построить естественную механическую характеристику ДПТ независимого возбуждения П12 ( $P_H = 4,5 \text{ кВт}$ ;  $U_H = 220 \text{ В}$ ;  $I_H = 25,4 \text{ А}$ ;  $n_H = 1500 \text{ об/мин}$ ;  $R_{я} = 0,78 \text{ Ом}$ ) и механическую характеристику при  $U = 150 \text{ В}$  и  $R_x = 1,5 \text{ Ом}$ .

**6.3.** Построить естественную механическую характеристику ДПТ независимого возбуждения П51 ( $P_H = 6,0 \text{ кВт}$ ;  $U_H = 220 \text{ В}$ ;  $I_H = 33,2 \text{ А}$ ;  $n_H = 1500 \text{ об/мин}$ ;  $R_{я} = 0,472 \text{ Ом}$ ) и механическую характеристику при  $U = 110 \text{ В}$  и  $\Phi = 0,7\Phi_H$ .

## 6.2. Регулирование скорости асинхронного электропривода

6.2.1. Механическая характеристика АД 1 может быть получена при изменении (рис. 6.11):

- 1)  $U$ ;
- 2)  $R_1$ ;
- 3)  $R'_2$ ;
- 4)  $x_1 + x'_2$ .

6.2.2. Механическая характеристика АД 1 может быть получена при изменении (рис. 6.12):

- 1)  $U$ ;
- 2)  $R_1$ ;
- 3)  $R'_2$ ;
- 4)  $f$  и  $U$ .

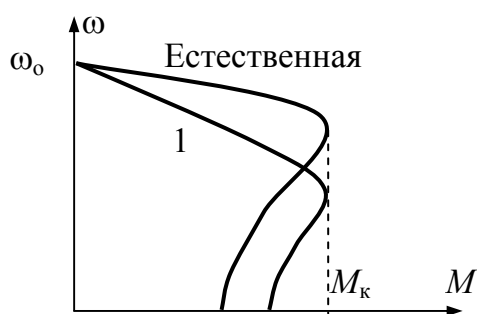


Рис. 6.11

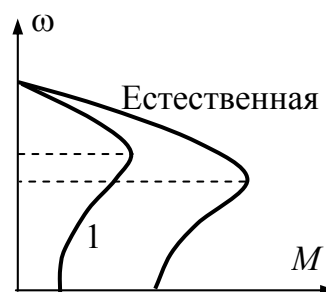


Рис. 6.12

6.2.3. Механическая характеристика АД 1 может быть получена при изменении (рис. 6.13):

- 1)  $U$ ;
- 2)  $R_1$ ;
- 3)  $R'_2$ ;
- 4)  $f$  и  $U$ .

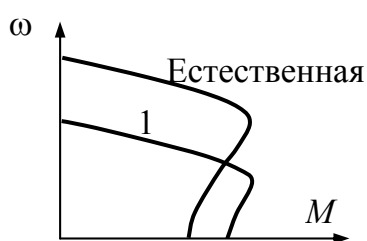


Рис. 6.13

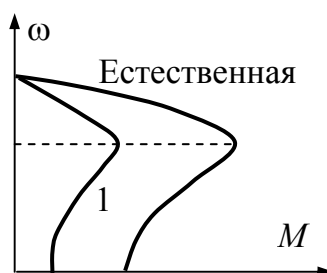


Рис. 6.14

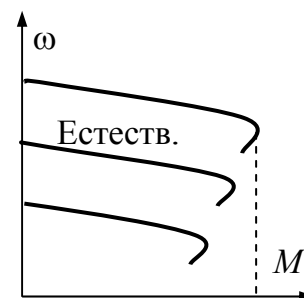


Рис. 6.15

6.2.4. Механическая характеристика АД 1 может быть получена при изменении (рис. 6.14):

- 1)  $U$ ;
- 2)  $R_1$ ;
- 3)  $R'_2$ ;
- 4)  $x_1 + x'_2$ .

**6.2.5.** Механические характеристики АД при частотном регулировании скорости соответствуют закону изменения напряжения (рис. 6.15):

1)  $\frac{U}{f} = \text{const};$

2)  $\frac{U}{f^2} = \text{const};$

3)  $\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const};$

4)  $f = \text{varia}, U = \text{const}.$

**6.2.6.** При постоянной мощности сопротивления на валу АД основной закон при частотном регулировании скорости имеет вид:

1)  $\frac{U}{f} = \text{const};$

2)  $\frac{U}{f^2} = \text{const};$

3)  $\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const};$

4)  $f = \text{varia}, U = \text{const}.$

**6.2.7.** Механические характеристики АД при частотном регулировании скорости соответствуют закону изменения напряжения (рис. 6.16):

1)  $\frac{U}{f} = \text{const};$

2)  $\frac{U}{f^2} = \text{const};$

3)  $\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const};$

4)  $f = \text{varia}, U = \text{const}.$

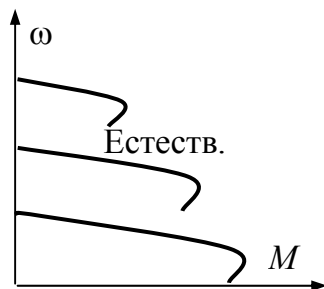


Рис. 6.16

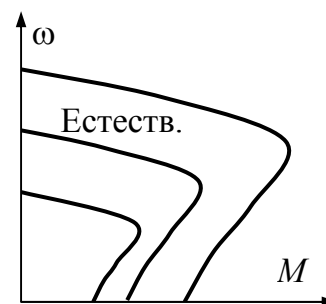


Рис. 6.17

**6.2.8.** При постоянном моменте сопротивления на валу АД основной закон при частотном регулировании скорости имеет вид:



1)  $\frac{U}{f} = \text{const}$  ;

2)  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$  ;

3)  $\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}$  ;

4)  $f = \text{varia}, U = \text{const}$  .

**6.2.9.** Механические характеристики АД при частотном регулировании скорости соответствуют закону изменения напряжения (рис. 6.17):

1)  $\frac{U}{f} = \text{const}$ ;

2)  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ ;

3)  $\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}$ ;

4)  $f = \text{varia}, U = \text{const}$ .

**6.2.10.** При вентиляторном моменте сопротивления на валу АД основной закон при частотном регулировании скорости имеет вид:

1)  $\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}$ ;

2)  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ ;

3)  $\frac{U}{f} = \text{const}$ ;

4)  $f = \text{varia}, U = \text{const}$ .

**6.2.11.** При переключении АД с  $\Delta$  на  $Y$  синхронная скорость:

1) увеличится в 2 раза;

2) уменьшится в 1,5 раза;

3) останется неизменной;

4) уменьшится в 2 раза.

**6.2.12.** При переключении АД с  $Y$  на  $YY$  критический момент:

1) увеличится в 2 раза;

2) уменьшится в 2 раза;

3) останется неизменным;

4) увеличиться в 1,5 раза.

**6.2.13.** При переключении АД с  $\Delta$  на  $YY$  критическое скольжение:

1) уменьшится в 2 раза;

2) увеличится в 2 раза;

3) останется неизменным;

4) уменьшится в 1,5 раза.

**6.2.14.** При переключении АД с Y на YY регулирование скорости производится при

1) постоянном допустимом моменте ( $M_{\text{доп}} = \text{const}$ );

2) постоянной допустимой мощности ( $P_{\text{доп}} = \text{const}$ );

3) допустимом моменте, прямо пропорциональном скорости ( $M_{\text{доп}} = \omega$ );

4) допустимой мощности, обратно пропорциональной скорости ( $P_{\text{доп}} \equiv \frac{1}{\omega}$ ).

**6.2.15.** При переключении АД с  $\Delta$  на YY регулирование скорости производится при

1) постоянном допустимом моменте ( $M_{\text{доп}} = \text{const}$ );

2) постоянной допустимой мощности ( $P_{\text{доп}} = \text{const}$ );

3) допустимом моменте, прямо пропорциональном скорости ( $M_{\text{доп}} = \omega$ );

4) допустимой мощности, обратно пропорциональной скорости ( $P_{\text{доп}} \equiv \frac{1}{\omega}$ ).

### Пример 5

Дан асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором 4АА71В6 ( $P_{\text{н}} = 0,56$  кВт;  $n_{\text{н}} = 920$  об/мин;  $U_{\text{н}} = 380/220$  В;  $I_{\text{н}} = 1,75$  А;  $\eta_{\text{н}} = 0,675$ ;  $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,71$ ;  $R_1 = 18,8$  Ом;  $R'_2 = 19$  Ом;  $x_1 = 13$  Ом;  $x_2 = 21$  Ом;  $\mu_{\text{min}} = 1,8$ ;  $\mu_{\text{н}} = 2$ ;  $\mu_{\text{к}} = 2,2$ ;  $k_i = 4,5$ ).

Требуется:

1. Построить естественную механическую характеристику двигателя по характерным точкам;

2. Построить механическую характеристику при напряжении питающей сети  $U = 0,7U_{\text{н}}$ .

3. Построить механическую характеристику при частоте питающей сети  $f = 25$  Гц и, если закон регулирования  $\frac{U}{f} = \text{const}$ .

### Решение

1. Характерные точки механической характеристики асинхронного электродвигателя:

1)  $\omega = \omega_0$ ;  $M = 0$ ;

2)  $\omega = \omega_{\text{н}}$ ;  $M = M_{\text{н}}$ ;

3)  $\omega = \omega_{\text{к}}$ ;  $M = M_{\text{к}}$ ;

4)  $\omega = \omega_{\text{min}}$ ;  $M = M_{\text{min}}$ ;

5)  $\omega = 0$ ;  $M = M_{\text{п}}$ .

Скорость идеального холостого хода (синхронная):

$$\omega_o = \frac{2\pi f}{P} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ с}^{-1}.$$

Номинальная скорость двигателя:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 920}{3} = 96,3 \text{ с}^{-1}.$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{550}{96,3} = 5,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критический момент двигателя:

$$M_K = \mu_K M_H = 2,2 \cdot 5,7 = 12,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Скорость двигателя при критическом моменте:

$$\omega_K = \omega_o (1 - S_K) = 104,7 (1 - 0,49) = 53,4 \text{ с}^{-1}.$$

$$S_K = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{19}{\sqrt{18,8^2 + (13 + 21)^2}} = 0,49.$$

Минимальный момент двигателя:

$$M_{\min} = \mu_{\min} M_H = 1,8 \cdot 5,7 = 10,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Скорость двигателя при минимальном моменте:

$$\omega_{\min} \approx \frac{\omega_o}{7} = \frac{104,7}{7} = 15 \text{ с}^{-1}.$$

Пусковой момент двигателя:

$$M_{\Pi} = \mu_{\Pi} M_H = 2,0 \cdot 5,7 = 11,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Естественная механическая характеристика показана на рис. 6.18.

2. Для построения механической характеристики при  $U = 0,7U_H$  воспользуемся соотношением:

$$M_U = M_e \left( \frac{U}{U_H} \right)^2 = M_e \left( \frac{0,7U_H}{U_H} \right)^2 = 0,49 M_e,$$

так как, момент, развиваемый асинхронным двигателем, пропорционален квадрату приложенного напряжения. Следует учесть, что данное соотношение справедливо при одинаковой скорости при работе на естественной и искусственной характеристиках. Искусственная механическая характеристика при  $U = 0,7U_H$  показана на рис. 6.18.

3. Скорость идеального холостого хода двигателя при частоте  $f = 25$  Гц:

$$\omega_{of} = \omega_o \frac{f}{f_H} = \omega_o \frac{25}{50} = 104,7 \frac{25}{50} = 52,4 \text{ с}^{-1}.$$

Критический момент двигателя:

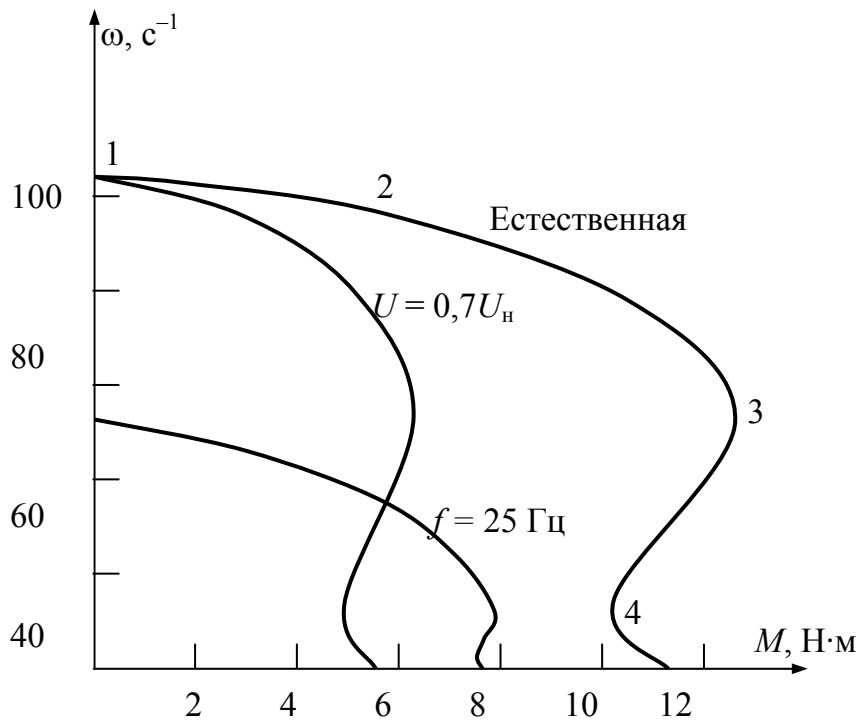


Рис. 6.18

$$M_{kf} = \frac{3(U_{\phi} \frac{f}{50})^2}{2\omega_{of} \left\{ R_1 + \sqrt{R_1^2 + [(x_1 + x_2) \frac{f}{50}]^2} \right\}} =$$

$$= \frac{3(220 \frac{25}{50})^2}{2 \cdot 52,4 \left\{ 18,8 + \sqrt{18,8^2 + [(13 + 21) \frac{25}{50}]^2} \right\}} = 7,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Скорость двигателя при критическом моменте:

$$\omega_{kf} = \omega_{of} (1 - S_{kf}) = 52,4(1 - 0,75) = 13 \text{ с}^{-1}.$$

$$S_{kf} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + [(x_1 + x_2) \frac{f}{50}]^2}} = \frac{19}{\sqrt{18,8^2 + [(13 + 21) \frac{25}{50}]^2}} = 0,75.$$

Пусковой момент двигателя:

$$M_{nf} = \frac{3(U_{\phi} \frac{f}{50})^2 R_2'}{\omega_{of} \left\{ (R_1 + R_2')^2 + [(x_1 + x_2) \frac{f}{50}]^2 \right\}} =$$

$$= \frac{3(220 \cdot \frac{25}{50})^2 \cdot 19}{52,4 \left\{ (18,8 + 19)^2 + [(13 + 21) \frac{25}{50}]^2 \right\}} = 7,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Механическая характеристика при  $f = 25$  Гц показана на рис. 6.18.

### Задачи для самостоятельного решения

**6.4.** Дан асинхронный электродвигатель 4А100L4 ( $P_n = 4$  кВт;  $U_n = 380/220$  В;  $I_n = 8,6$  А;  $n_n = 1430$  об/мин;  $\eta_n = 0,84$ ;  $\cos \varphi_n = 0,84$ ;  $k_i = 6$ ;  $\mu_n = 2$ ;  $\mu_{\min} = 1,6$ ;  $\mu_k = 2,4$ ).

Требуется:

1. Рассчитать параметры схемы замещения по каталожным данным.
2. Построить естественную механическую характеристику.
3. Построить механические характеристики при частотах питающей сети  $f = 100$  Гц и  $f = 25$  Гц при законах регулирования  $\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}$

и  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ .

4. Построить электромеханическую характеристику  $I_2 = f(S)$ .
5. Построить механическую характеристику при напряжении питающей сети  $U = 0,8U_n$ .

**6.5.** При работе АД с  $M_c = 1$  на естественной характеристике ( $\mu_k = M_k / M_n = 3$ ) напряжение на статоре снизилось вдвое. Определить скорость двигателя.

Ответ: 0

**6.6.** Дан двухскоростной асинхронный электродвигатель с паспортными данными:

Типоразмер двигателя	$P_n$ , кВт	$S_n$ , %	$\eta_n$ , %	$\cos \varphi_y$	$\mu_k$	$\mu_n$	$\mu_{\min}$	$k_i$
АИР200М4/2	27,5	2,0	92,0	0,83	2,5	2,2	2,1	7,0
	34,0	2,0	90,0	0,90	2,5	1,6	1,4	7,3

Требуется:

1. Построить естественные механические характеристики для двух скоростей.
2. По характеристикам определить схему соединения обмоток.
3. Определить допустимую мощность и допустимый момент для каждой схемы.

## Глава 7

# МЕХАНИКА И ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

**7.1.** При уменьшении передаточного числа редуктора приведенный к валу одного и того же двигателя момент сопротивления рабочей машины:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) останется неизменным.

**7.2.** При увеличении передаточного числа редуктора приведенный к валу одного и того же двигателя момент инерции:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) останется неизменным.

**7.3.** При увеличении момента сопротивления рабочей машины время пуска для одного и того же двигателя:

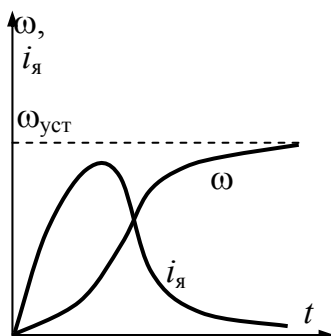
- 1) останется неизменным;
- 2) увеличится;
- 3) уменьшится.

**7.4.** С увеличением жесткости механических характеристик АД электромеханическая постоянная времени:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) останется неизменной.

**7.5.** За время равное электромеханической постоянной при динамическом моменте, линейно зависящем от скорости, электродвигатель разгонится до скорости, равной:

- 1)  $\omega = 0,5\omega_{уст}$ ;
- 2)  $\omega = 0,96\omega_{уст}$ ;
- 3)  $\omega = 0,63\omega_{уст}$ ;



**Рис. 7.1**

4)  $\omega = 0,72\omega_{уст}$ .

**7.6.** Кривые переходного процесса пуска (рис. 7.1) ДПТ независимого возбуждения при постоянном напряжении источника получены в предположении, что:

- 1)  $T_m \neq 0, T_\alpha = 0$ ;
- 2)  $T_m = 0, T_\alpha \neq 0$ ;
- 3)  $T_m \neq 0, T_\alpha \neq 0$ ;
- 4)  $T_m = 0, T_\alpha = 0$ .

7.7. Кривые переходного процесса пуска (рис. 7.2) ДПТ независимого возбуждения получены в предположении, что:

- 1)  $T_M \approx T_3$ ;
- 2)  $T_M > T_3$ ;
- 3)  $T_M < T_3$ ;
- 4)  $T_M \neq 0, T_3 = 0$ .

7.8. Время запаздывания  $t_3$  при пуске ДПТ независимого возбуждения (рис. 7.3) при  $M_c = \text{const}$ :

- 1)  $t_3 \equiv T_3$ ;
- 2)  $t_3 \equiv \frac{1}{T_3}$ ;
- 3)  $t_3$  не зависит от  $T_3$ ;
- 4)  $t_3 \equiv T_M$ ; 5.  $t_3 \equiv \frac{1}{T_M}$ .

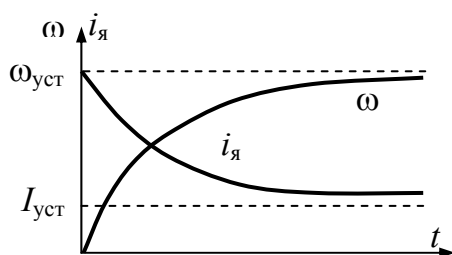


Рис. 7.2

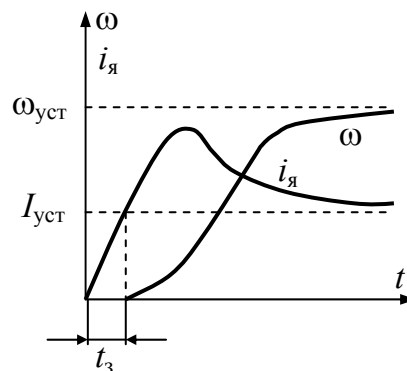


Рис. 7.3

7.9. При включении дополнительного сопротивления в цепь якоря ДПТ независимого возбуждения электромеханическая постоянная времени:

- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) останется неизменной.

7.10. Как повлияет на потери энергии при пуске асинхронного электродвигателя вхолостую снижение питающего напряжения?

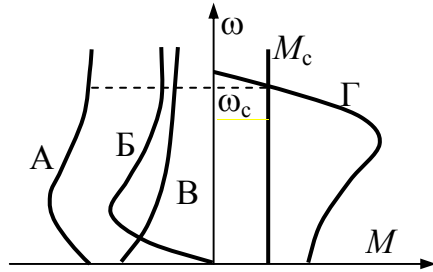
- 1) потери увеличатся;
- 2) потери уменьшатся;
- 3) потери останутся неизменными.

7.11. Как повлияет на время пуска вхолостую асинхронного электродвигателя снижение питающего напряжения?

- 1) время пуска увеличится;
- 2) время пуска уменьшится;
- 3) время пуска останется неизменным.

**7.12.** Потери энергии в роторной цепи АД в переходных процессах вхолостую с увеличением момента инерции:

- 1) уменьшаются;
- 2) увеличиваются;
- 3) остаются неизменными.



**Рис. 7.4**

**7.13.** Меньшее время торможения асинхронного электродвигателя от  $\omega = \omega_c$  до  $\omega = 0$  соответствует характеристике (рис. 7.4):

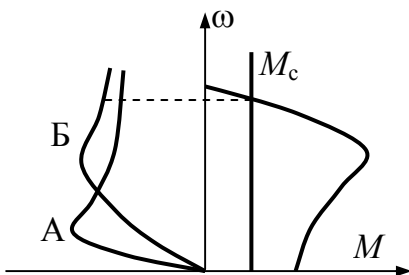
- 1) А;
- 2) Б;
- 3) В;
- 4) Г.

**7.14.** В каком соотношении будут находиться потери энергии при пуске двухскоростного асинхронного электродвигателя до максимальной скорости в одну ступень ( $\Delta A_1$ ) и потери при пуске в две ступени ( $\Delta A_2$ ):

- 1)  $\Delta A_1 = \Delta A_2$ ;
- 2)  $\Delta A_1 > \Delta A_2$ ;
- 3)  $\Delta A_1 < \Delta A_2$ ;
- 4)  $\Delta A_1 = 0, \Delta A_2 > 0$ .

**7.15.** Потери энергии при динамическом торможении АД вхолостую ( $\Delta A_{т.д}$ ) и при торможении противовключением вхолостую ( $\Delta A_{т.п}$ ) от  $\omega = \omega_0$  до  $\omega = 0$  находятся в соотношении:

- 1)  $\Delta A_{т.д} = \Delta A_{т.п}$ ;
- 2)  $\Delta A_{т.д} = \frac{\Delta A_{т.п}}{2}$ ;
- 3)  $\Delta A_{т.д} = \frac{\Delta A_{т.п}}{3}$ ;
- 4)  $\Delta A_{т.д} = \frac{\Delta A_{т.п}}{4}$ .



**Рис. 7.5**

**7.16.** При динамическом торможении вхолостую АД по характеристикам А и Б потери энергии находятся в соотношении (рис. 7.5):

- 1)  $\Delta A_{т.а} \cong \Delta A_{т.б}$ ;
- 2)  $\Delta A_{т.а} = \Delta A_{т.б}$ ;
- 3)  $\Delta A_{т.а} < \Delta A_{т.б}$ .

**7.17.** Как изменяются потери мощности в роторной цепи АД с увеличением скольжения?

- 1) уменьшаются;
- 2) увеличиваются;
- 3) остаются неизменными.



**7.18.** Как изменяются потери энергии при работе АД в двигательном режиме с увеличением момента сопротивления на валу?

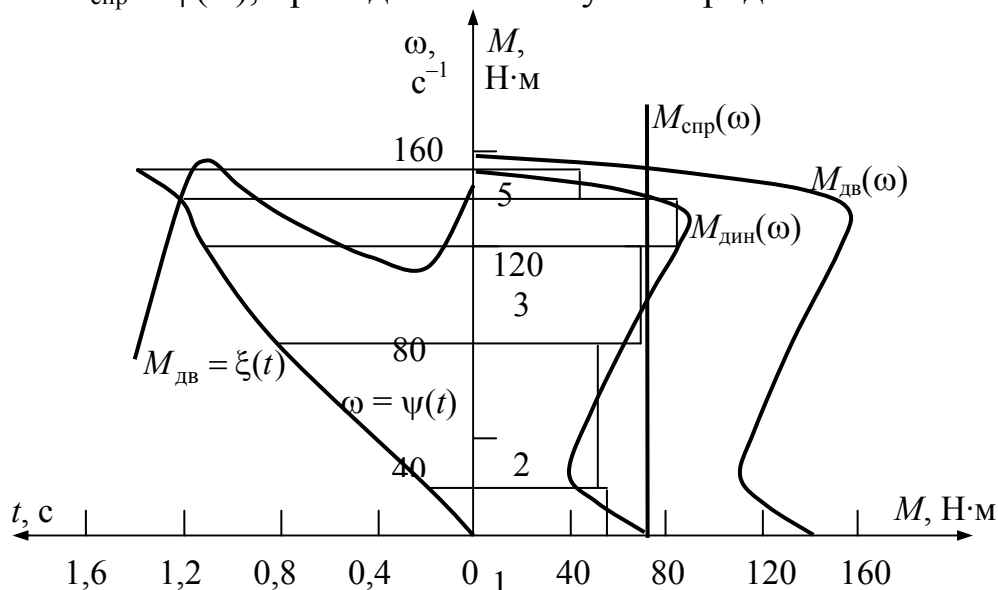
- 1) уменьшаются;
- 2) остаются неизменными;
- 3) увеличиваются.

### Пример 1

Определить время пуска привода рабочей машины с моментом сопротивления  $M = \text{const} = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Момент инерции рабочей машины равен  $4,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , передаточное число редуктора равно 3, КПД передачи – 0,93. Привод осуществляется от асинхронного электродвигателя 4А132М4 ( $P_n = 11 \text{ кВт}$ ;  $U_n = 380/220 \text{ В}$ ;  $I_n = 22 \text{ А}$ ;  $n_n = 1450 \text{ об/мин}$ ;  $\cos \varphi_n = 0,87$ ;  $\eta_n = 0,875$ ;  $k_i = 7,5$ ;  $\mu_n = 2$ ;  $\mu_{\min} = 1,6$ ;  $\mu_k = 2,2$ ;  $GД_d^2 = 0,16 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ).

### Решение

На рис. 7.6 представлены механическая характеристика электродвигателя  $M_{\text{дв}} = f(\omega)$ , построенная по характерным точкам, и рабочей машины  $M_{\text{спр}} = \varphi(\omega)$ , приведенная к валу электродвигателя.



**Рис. 7.6**

Приведенный момент сопротивления рабочей машины

$$M_{\text{с пр}} = \frac{M_{\text{с}}}{i \eta_{\text{пер}}} = \frac{200}{3 \cdot 0,93} = 72 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Приведенный момент инерции системы электродвигатель – рабочая машина:

$$J_{\text{пр}} = \frac{GД_d^2}{4} + \frac{J_{\text{рм}}}{i^2} = \frac{0,16}{4} + \frac{4,5}{9} = 0,54 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Для определения времени пуска привода применим метод площадей. Для этого построим кривую динамического момента  $M_{\text{дин}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{спр}}$ .

Заменим данную кривую ступенчатым графиком, таким образом, чтобы площади, ограниченные кривой динамического момента и ступенчатым графиком, были равны на каждом  $i$ -м участке. Тогда время пуска для  $i$ -го участка равно:

$$\Delta t_i = J_{\text{пр}} \frac{\Delta \omega_i}{M_{\text{дин}i}}, \text{ с } (i = 1, 2, 3, 4, 5).$$

Полное время пуска привода определим как

$$t_{\text{п}} = \sum_{i=1}^5 \Delta t_i, \text{ с.}$$

Результаты вычислений представлены в табл. 7.1, по которым построены кривые переходного процесса  $\omega = \psi(t)$  и  $M_{\text{дв}} = \zeta(t)$  (рис. 7.5) при пуске. Время пуска привода  $t_{\text{п}} = 1,4$  с.

Таблица 7.1

№ интервала	1	2	3	4	5
$\Delta \omega_i, \text{ с}^{-1}$	20	60	40	20	12
$\omega_{\text{кон}}, \text{ с}^{-1}$	20	80	120	140	152
$M_{\text{дин}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	56	52	70	84	44
$\Delta t_i, \text{ с}$	0,19	0,62	0,31	0,13	0,15
$t_i, \text{ с}$	0,19	0,81	1,12	1,25	1,4

## Пример 2

Рассчитать и построить кривые  $\omega = f(t)$  и  $i = \varphi(t)$  при пуске двигателя П62 (см. пример 1) при помощи трехступенчатого пускового реостата (рис. 5.18), если момент сопротивления рабочей машины  $M_{\text{с}} = M_{\text{н}}$  и соответственно ток  $I_{\text{с}} = I_{\text{н}}$ .

### Решение

Из примера 1 имеем значения сопротивлений ступеней  $r_1 = 0,586$  Ом,  $r_2 = 0,313$  Ом,  $r_3 = 0,172$  Ом и суммарное сопротивление пускового реостата  $r_{\text{р}} = 1,07$  Ом.

Для расчета кривых переходного процесса, учитывая линейную зависимость динамического момента от скорости, используем следующие уравнения:

$$\omega = \omega_{\text{уст}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}};$$

$$i = I_{\text{уст}} + (I_{\text{нач}} - I_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}}.$$

### Первая ступень пуска

Сопротивление цепи якоря:

$$R_1 = R_{\text{я}} + r_{\text{р}} = 0,202 + 1,07 = 1,272 \text{ Ом.}$$

Приведенный момент инерции системы (при моменте инерции ротора машины  $J_M = 1,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , передаточном числе  $u = 1$ ) равен:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{дв}} + J_M = 0,65 + 1,5 = 2,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{M1} = J_{\text{пр}} \frac{R_1}{(k\Phi_H)^2} = 2,15 \frac{1,272}{1,31^2} = 1,59 \text{ с.}$$

Установившиеся значения:

- тока  $I_{\text{уст}} = I_c = I_H = 73,5 \text{ А}$ ;
- скорости  $\omega_{\text{уст}} = \omega_{c1} = 93,3 \text{ с}^{-1}$  (рис. 5.18).

Начальные значения:

- тока  $I_{\text{нач}} = I_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{k\Phi_H} = \frac{220}{1,31} = 168 \text{ А}$  (рис. 5.18, 7.7);
- скорости  $\omega_{\text{нач}} = 0$ .

Расчетные формулы примут вид:

$$\omega = \omega_{\text{уст}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} = 93,3 + (0 - 93,3) e^{-\frac{t}{1,59}} = 93,3 \left( 1 - e^{-\frac{t}{1,59}} \right);$$

$$i = I_{\text{уст}} + (I_{\text{нач}} - I_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} = 73,5 + (168 - 73,5) e^{-\frac{t}{1,59}} = 73,5 + 94,5 e^{-\frac{t}{1,59}}.$$

Продолжительность пуска на первой ступени:

$$t_1 = T_{M1} \ln \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{уст}}}{I_{\text{min}} - I_{\text{уст}}} = 1,59 \frac{168 - 73,5}{91,6 - 73,5} = 2,63 \text{ с};$$

$$I_{\text{min}} = \frac{M_{\text{min}}}{k\Phi_H} = \frac{120}{1,31} = 91,6 \text{ А (рис. 5.18, 7.7).}$$

### Вторая ступень пуска

Сопротивление цепи якоря:

$$R_2 = R_{\text{я}} + r_2 + r_3 = 0,202 + 0,313 + 0,172 = 0,687 \text{ Ом.}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{M2} = J_{\text{пр}} \frac{R_2}{(k\Phi_H)^2} = 2,15 \frac{0,687}{1,31^2} = 0,86 \text{ с.}$$

Установившиеся значения:

- тока  $I_{\text{уст}} = I_c = I_H = 73,5 \text{ А}$ ;
- скорости  $\omega_{\text{уст}} = \omega_{c2} = 128 \text{ с}^{-1}$  (рис. 5.18).

Начальные значения:

- тока  $I_{\text{нач}} = I_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{k\Phi_H} = \frac{220}{1,31} = 168 \text{ А}$  (рис. 5.18, 7.7);

- скорости  $\omega_{\text{нач}} = \omega_2 = 77 \text{ с}^{-1}$  (рис. 5.18).

Расчетные формулы примут вид:

$$\omega = \omega_{\text{уст}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} = 128 + (77 - 128) e^{-\frac{t}{0,86}} = 128 - 51 e^{-\frac{t}{0,86}};$$

$$i = I_{\text{уст}} + (I_{\text{нач}} - I_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} = 73,5 + (168 - 73,5) e^{-\frac{t}{0,86}} = 73,5 + 94,5 e^{-\frac{t}{0,86}}.$$

Продолжительность пуска на второй ступени:

$$t_2 = T_{M2} \ln \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{уст}}}{I_{\text{min}} - I_{\text{уст}}} = 0,86 \frac{168 - 73,5}{91,6 - 73,5} = 1,42 \text{ с.}$$

### Третья ступень пуска

Сопротивление цепи якоря:

$$R_3 = R_{\text{я}} + r_3 = 0,202 + 0,172 = 0,374 \text{ Ом.}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{M3} = J_{\text{пр}} \frac{R_3}{(k\Phi_{\text{H}})^2} = 2,15 \frac{0,374}{1,31^2} = 0,47 \text{ с.}$$

Установившиеся значения:

- тока  $I_{\text{уст}} = I_{\text{с}} = I_{\text{H}} = 73,5 \text{ А}$ ;
- скорости  $\omega_{\text{уст}} = \omega_{\text{с3}} = 147 \text{ с}^{-1}$  (рис. 5.18).

Начальные значения:

- тока  $I_{\text{нач}} = I_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{k\Phi_{\text{H}}} = \frac{220}{1,31} = 168 \text{ А}$  (рис. 5.18, 7.7);
- скорости  $\omega_{\text{нач}} = \omega_3 = 118 \text{ с}^{-1}$  (рис. 5.18, 7.7).

Расчетные формулы примут вид:

$$\omega = \omega_{\text{уст}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} = 147 + (118 - 147) e^{-\frac{t}{0,47}} = 147 - 29 e^{-\frac{t}{0,47}};$$

$$i = I_{\text{уст}} + (I_{\text{нач}} - I_{\text{уст}}) e^{-\frac{t}{T_M}} = 73,5 + (168 - 73,5) e^{-\frac{t}{0,47}} = 73,5 + 94,5 e^{-\frac{t}{0,47}}.$$

Продолжительность пуска на третьей ступени:

$$t_3 = T_{M3} \ln \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{уст}}}{I_{\text{min}} - I_{\text{уст}}} = 0,47 \frac{168 - 73,5}{91,6 - 73,5} = 0,78 \text{ с.}$$

### Четвертая ступень пуска

Сопротивление цепи якоря:

$$R_4 = R_{\text{я}} = 0,202 \text{ Ом.}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{M4} = J_{\text{пр}} \frac{R_4}{(k\Phi_{\text{H}})^2} = 2,15 \frac{0,202}{1,31^2} = 0,25 \text{ с.}$$

Установившиеся значения:

- тока  $I_{уст} = I_c = I_H = 73,5 \text{ A}$ ;
- скорости  $\omega_{уст} = \omega_{c4} = 157 \text{ c}^{-1}$  (рис. 7.7).

Начальные значения:

- тока  $I_{нач} = I_{max} = \frac{M_{max}}{k\Phi_H} = \frac{220}{1,31} = 168 \text{ A}$  (рис. 5.18, 7.7);
- скорости  $\omega_{нач} = \omega_4 = 141 \text{ c}^{-1}$  (рис. 7.7).

Расчетные формулы примут вид:

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) e^{-\frac{t}{T_M}} = 157 + (141 - 157) e^{-\frac{t}{0,25}} = 147 - 16 e^{-\frac{t}{0,25}};$$

$$i = I_{уст} + (I_{нач} - I_{уст}) e^{-\frac{t}{T_M}} = 73,5 + (168 - 73,5) e^{-\frac{t}{0,25}} = 73,5 + 94,5 e^{-\frac{t}{0,25}}.$$

Продолжительность пуска на четвертой ступени:

$$t_4 \approx 5T_{M4} = 5 \cdot 0,25 = 1,25 \text{ c}.$$

Полная продолжительность пуска:

$$t_{п} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 2,63 + 1,42 + 0,78 + 1,25 \cdot 0,25 = 6,08 \text{ c}.$$

Данные расчета кривых  $i = f(t)$  и  $\omega = f_1(t)$  переходного процесса при пуске представлены на рис. 7.7 и в табл. 7.2.

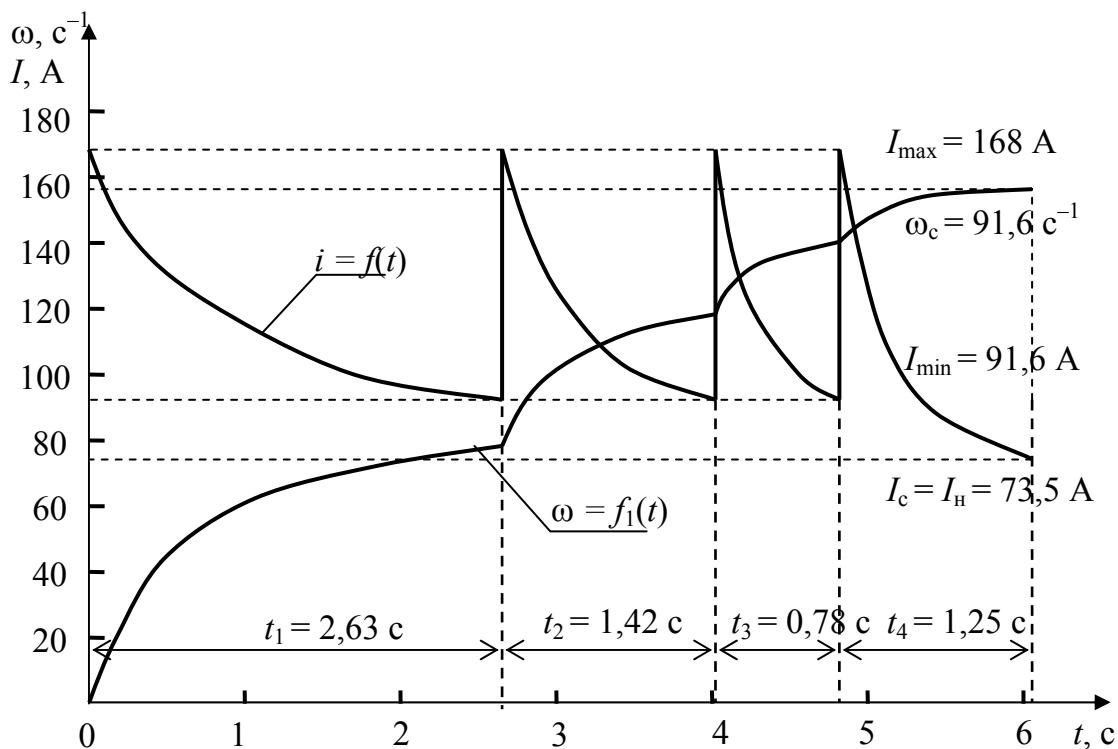


Рис. 7.7

Первая ступень			Вторая ступень			Третья ступень			Четвертая ступень		
$t, c$	$\omega, c^{-1}$	$i, A$	$t, c$	$\omega, c^{-1}$	$i, A$	$t, c$	$\omega, c^{-1}$	$i, A$	$t, c$	$\omega, c^{-1}$	$i, A$
0	0	168	0	77	168	0	118	168	0	141	168
0,5	25,2	142,5	0,5	99,5	126,3	0,2	128	135,2	0,25	151	108,3
1,0	43,6	123,9	1,0	112	103	0,4	134,6	113,8	0,5	154,8	86,3
1,5	57	110,3	1,42	118	91,6	0,6	139	110	0,75	156,2	78,2
2,0	66,8	100,4				0,78	141	91,6	1,0	156,7	75,2
2,63	77	91,6							1,25	156,8	74,1

### Задачи для самостоятельного решения

**7.1.** Определить время пуска привода центробежного вентилятора, осуществляемого от асинхронного электродвигателя 4А160М4 ( $P_H = 18,5$  кВт;  $U_H = 380/220$  В;  $n_H = 1465$  об/мин;  $I_H = 35,7$  А;  $\eta_H = 0,895$ ;  $\cos\varphi_H = 0,88$ ;  $\mu_n = 1,4$ ;  $\mu_k = 2,3$ ;  $k_i = 7$ ;  $\mu_{\min} = 1$ ;  $GД_{д}^2 = 0,51$  кг·м<sup>2</sup>). Номинальная мощность двигателя и вентилятора равны. Момент трогания вентилятора  $M_0 = 0,2M_H$ , момент инерции  $J_B = 8$  кг·м<sup>2</sup>. Построить кривые переходного процесса  $\omega = \varphi(t)$ ,  $M_{дв} = f(t)$  в процессе пуска.

**7.2.** Рассчитать электромеханическую постоянную времени  $T_M$  электропривода постоянного тока с двигателем независимого возбуждения. Данные двигателя: номинальная мощность  $P_H = 8$  кВт; номинальная частота вращения  $n_H = 1000$  об/мин; номинальное напряжение  $U_H = 220$  В; номинальный ток якоря  $I_H = 43$  А; сопротивление якорной цепи  $R_{я} = 0,33$  Ом. Приведенный момент инерции  $J = 2,2$  кгм<sup>2</sup>.

Ответ: 0,21 с.

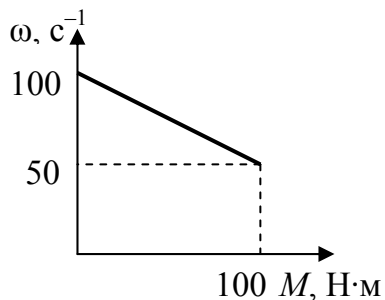


Рис. 7.8

**7.3.** Рассчитать электромеханическую постоянную времени  $T_M$  асинхронного электропривода. Данные двигателя: номинальная мощность  $P_H = 26$  кВт; номинальная частота вращения  $n_H = 710$  об/мин. Приведенный момент инерции  $J = 8$  кгм<sup>2</sup>.

Ответ: 0,09 с.

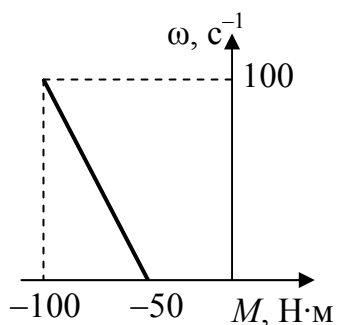


Рис. 7.9

**7.4.** Чему равна электромеханическая постоянная времени  $T_M$  (рис. 7.8), если приведенный момент инерции  $J = 0,5$  кгм<sup>2</sup>.

Ответ: 0,25 с.

**7.5.** Чему равна электромеханическая постоянная времени  $T_M$  (рис. 7.9), если приведенный момент инерции  $J = 0,25$  кгм<sup>2</sup>.

Ответ: 0,25 с.

**7.6.** Определить характер переходного процесса в обмотке якоря при пуске вхолостую ДПТНВ с паспортными данными: номинальная мощность  $P_n = 5,6$  кВт; номинальная частота вращения  $n_n = 1000$  об/мин; номинальное напряжение  $U_n = 220$  В; номинальный ток якоря  $I_n = 29,2$  А; сопротивление якорной цепи  $R_{я} = 0,443$  Ом, индуктивность якорной цепи  $10,2$  мГн. Момент инерции якоря  $J_{я} = 0,229$  кгм<sup>2</sup>, приведенный момент инерции рабочей машины  $J_M = 0,471$  кгм<sup>2</sup>.

Ответ: соотношение электромеханической и электромагнитной постоянных времени  $t = 2,18$ , переходный процесс – затухающий колебательный.

**7.7.** Определить характер переходного процесса в обмотке якоря при пуске ДПТНВ с постоянным моментом нагрузки (паспортные данные: номинальная мощность  $P_n = 5,6$  кВт; номинальная частота вращения  $n_n = 1000$  об/мин; номинальное напряжение  $U_n = 220$  В; номинальный ток якоря  $I_n = 29,2$  А; сопротивление якорной цепи  $R_{я} = 0,443$  Ом, индуктивность якорной цепи  $10,2$  мГн. Момент инерции якоря  $J_{я} = 0,229$  кгм<sup>2</sup>, приведенный момент инерции рабочей машины  $J_M = 0,471$  кгм<sup>2</sup>).

Ответ: соотношение электромеханической и электромагнитной постоянных времени  $t = 6,65$ , переходный процесс – апериодический.

**7.8.** Как изменится электромеханическая постоянная времени  $T_M$  электропривода постоянного тока, если:

- включить в цепь якоря дополнительное сопротивление, в 2 раза превышающее сопротивление якоря:

Ответ: увеличится в 3 раза;

- уменьшить в 2 раза магнитный поток:

Ответ: увеличится в 4 раза;

- уменьшить в 2 раза напряжение на якоре:

Ответ: не изменится.

**7.9.** Как изменится электромеханическая постоянная времени  $T_M$  асинхронного электропривода, если:

- включить в цепь ротора симметричное дополнительное сопротивление, в 2 раза превышающее сопротивление обмотки ротора.

Ответ: увеличится в 3 раза;

- уменьшить в 2 раза напряжение на статоре:

Ответ: увеличится в 4 раза;

- увеличить в 2 раза суммарный момент инерции:

Ответ: увеличится в 2 раза.

## Глава 8

### НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ

**8.1.** Уравнение теплового баланса двигателя при неизменной нагрузке имеет вид:

1)  $Qdt = A\tau dt + Cd\tau$ ;

2)  $Qdt = Cdt + Ad\tau$ ;

3)  $A\tau dt = Qdt + Cd\tau$ ;

4)  $Qdt = C\tau dt + Ad\tau$ ;

5)  $Qdt = Cd\tau + Adt$ .

**8.2.** В каких единицах измеряется теплоотдача  $A$  двигателя?

1) Дж/с;

2) Дж/°С;

3) Дж/(с·°С);

4) с/Дж;

5) (с·°С)/Дж.

**8.3.** По какому выражению определяется постоянная времени нагрева электродвигателя?

1)  $T_H = \frac{A}{C}$ ;

2)  $T_H = \frac{\tau_{уст}}{A}$ ;

3)  $T_H = \frac{A}{t}$ ;

4)  $T_H = \frac{C}{\tau_{уст}}$ ;

5)  $T_H = \frac{C}{A}$ .

**8.4.** Каким уравнением описывается процесс нагрева электродвигателя?

1)  $\tau = \tau_{нач} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_H}\right) \right] + \tau_{уст} \exp\left(-\frac{t}{T_H}\right)$ ;

2)  $\tau = \tau_{уст} \exp\left(-\frac{t}{T_H}\right) + \tau_{нач} \exp\left(-\frac{t}{T_H}\right)$ ;

3)  $\tau = \tau_{уст} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_H}\right) \right] - \tau_{уст} \exp\left(-\frac{t}{T_H}\right)$ ;



$$4) \tau = \tau_{\text{уст}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{н}}}\right) \right] + \tau_{\text{нач}} \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{н}}}\right);$$

$$5) \tau = \tau_{\text{нач}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{н}}}\right) \right] - \tau_{\text{уст}} \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{н}}}\right).$$

**8.5.** В каких единицах измеряется теплоемкость  $C$  двигателя?

- 1) Дж/с;
- 2) Дж·с;
- 3) Дж/°С;
- 4) Дж·°С;
- 5) Дж/(с·°С).

**8.6.** Для определения установившегося значения превышения температуры двигателя справедливо выражение:

$$1) \tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{A};$$

$$2) \tau_{\text{уст}} = \frac{A}{\Delta P};$$

$$3) \tau_{\text{уст}} = \frac{C}{A};$$

$$4) \tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{C}.$$

**8.7.** Чему практически равно время нагрева двигателя от начального до установившегося значения превышения температуры?

- 1)  $t = T_{\text{н}}$ ;
- 2)  $t < T_{\text{н}}$ ;
- 3)  $t = (3 \dots 4)T_{\text{н}}$ ;
- 4)  $t = (9 \dots 10)T_{\text{н}}$ .

**8.8.** Чем объясняется, что у самовентилируемых двигателей постоянная времени нагрева  $T_{\text{н}}$  значительно меньше постоянной времени охлаждения  $T_{\text{охл}}$ ?

- 1) уменьшением теплоотдачи;
- 2) увеличением теплоемкости;
- 3) увеличением теплоотдачи;
- 4) уменьшением теплоемкости;
- 5) неизменным значением теплоемкости и теплоотдачи.

**8.9.** Как при изменении нагрузки на валу электродвигателя изменяется величина  $T_{\text{н}}$ ?

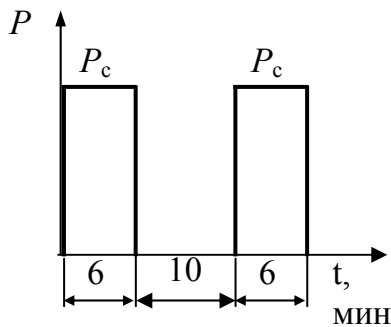
- 1) при увеличении нагрузки  $T_{\text{н}}$  увеличивается;
- 2) при увеличении нагрузки  $T_{\text{н}}$  уменьшается;
- 3) при уменьшении нагрузки  $T_{\text{н}}$  уменьшается;

- 4) при уменьшении нагрузки  $T_n$  увеличивается;
- 5) при изменении нагрузки  $T_n$  практически не изменяется.

**8.10.** В каком случае наблюдается равенство постоянных времени нагрева и охлаждения электродвигателя?

- 1) при работе защищенного электродвигателя с самовентиляцией;
- 2) при остановке защищенного электродвигателя с самовентиляцией;
- 3) при работе закрытого двигателя с самовентиляцией;
- 4) при работе закрытого двигателя с независимой вентиляцией.

**8.11.** По приведенному графику нагрузки (рис. 8.1) следует выбрать двигатель для



**Рис. 8.1**

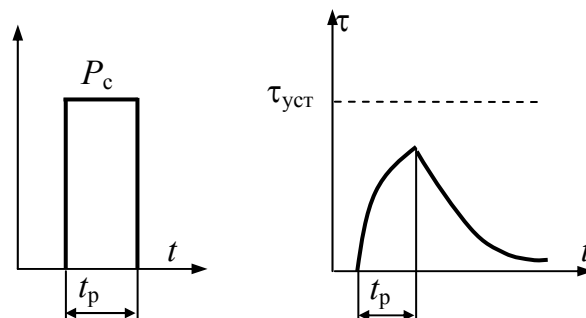
- 1) повторно-кратковременного режима;
- 2) кратковременного режима;
- 3) перемежающегося режима;
- 4) продолжительного режима.

**8.12.** С увеличением температуры окружающей среды допустимая нагрузка на электродвигатель:

- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) остается неизменной.

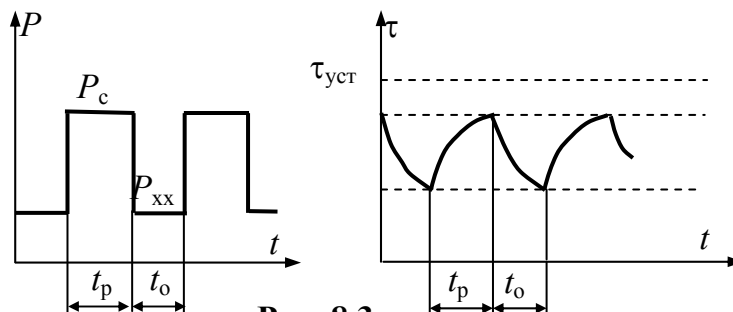
**8.13.** Какому режиму работы двигателя соответствует график нагрузки (рис. 8.2)?

- 1) продолжительному;
- 2) повторно-кратковременному;
- 3) перемежающемуся;
- 4) кратковременному;



**Рис. 8.2**

**8.14.** Какому режиму работы двигателя соответствует график нагрузки (рис. 8.3)?



**Рис. 8.3**

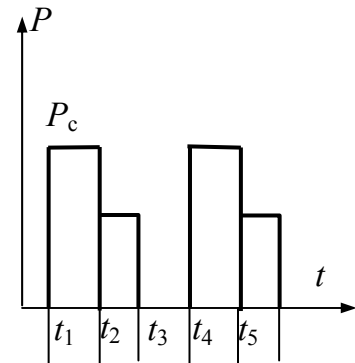
- 1) перемежающемуся;
- 2) повторно-кратковременному;
- 3) кратковременному;
- 4) продолжительному.

**8.15.** Какое условие соответствует правильному выбору электродвигателя по нагреву?

- 1)  $\tau_{\max} > \tau_{\text{доп}}$ ;
- 2)  $\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп}}$ ;
- 3)  $\tau_{\max} \approx (3 \dots 4)\tau_{\text{доп}}$ ;
- 4)  $\tau_{\max} = 1/2\tau_{\text{доп}}$ .

**8.16.** Чему равна относительная продолжительность включения для графика нагрузки (рис. 8.4)?

- 1)  $\varepsilon = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}$ ;
- 2)  $\varepsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$ ;
- 3)  $\varepsilon = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_3}$ ;
- 4)  $\varepsilon = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}$ .



**Рис. 8.4**

**8.17.** При увеличении продолжительности включения (ПВ%) двигателя выше расчетной допустимый по нагреву момент должен быть:

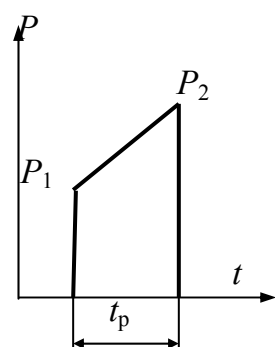
- 1) уменьшен;
- 2) увеличен;
- 3) остаться неизменным;
- 4) мало данных.

**8.18.** Определите зависимость между коэффициентами тепловой  $p_T$  и механической  $p_M$  перегрузки:

- 1)  $p_M = \sqrt{p_T \alpha}$ ;
- 2)  $p_M = \sqrt{p_T (\alpha + 1) - \alpha}$ ;
- 3)  $p_T = \sqrt{p_M}$ ;
- 4)  $p_T = \sqrt{p_M (\alpha - 1)}$ ;
- 5)  $p_M = \sqrt{p_T \alpha - 1}$ .

**8.19.** По какому выражению определяется эквивалентная мощность нагрузочной диаграммы вида (рис. 8.5)?

- 1)  $P_{\text{экв}} = \frac{P_1 + P_2}{2}$ ;
- 2)  $P_{\text{экв}} = \frac{P_1 + P_2}{t_p}$ ;



**Рис. 8.5**

$$3) P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_2^2}{3}} t_p;$$

$$4) P_{\text{ЭКВ}} = \frac{P_1^2 + P_2^2}{3};$$

$$5) P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2}{3}}.$$

**8.20.** Эквивалентная мощность для ступенчатого графика нагрузки определяется по выражению:

$$1) P_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{t_{\text{ц}}};$$

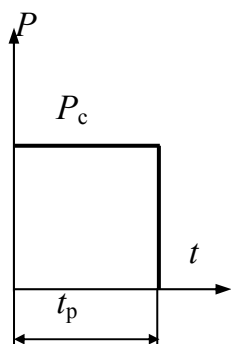
$$2) P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}};$$

$$3) P_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}};$$

$$4) P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{P_{\text{max}}^2 t_{\text{max}}}{t_{\text{ц}}}}.$$

**8.21.** Двигатель, выбранный по нагрузочной диаграмме (рис. 8.6)

необходимо и достаточно проверить:



**Рис. 8.6**

- 1) по условию надежного пуска;
- 2) по перегрузочной способности;
- 3) по условию надежного пуска и перегрузочной способности;
- 4) никаких проверок производить не следует.

**8.22.** Для проверки асинхронного двигателя по условию надежного пуска справедливо выражение:

- 1)  $M_{\text{пуск}} \geq M_{\text{тр}} + M_{\text{н}};$
- 2)  $M_{\text{пуск}} \geq 0,25M_{\text{тр}};$
- 3)  $k_u^2 M_{\text{пуск}} \geq M_{\text{тр}} + 0,25M_{\text{н}};$
- 4)  $k_u^2 M_{\text{кр}} \geq M_{\text{тр}} + 0,25M_{\text{н}}.$

**8.23.** При выборе мощности двигателя продолжительного режима (S1) для работы в кратковременном режиме (S2) справедливо выражение:

- 1)  $P_H \geq \frac{P_{\text{ЭКВ}}}{P_M}$ ;
- 2)  $P_H \leq P_{\text{ЭКВ}} P_M$ ;
- 3)  $P_H \leq \frac{P_{\text{ЭКВ}}}{P_M}$ .

**8.24.** Какое выражение следует использовать при проверке асинхронного двигателя по перегрузочной способности:

- 1)  $k_u^2 \geq M_{\text{max граф}}$ ;
- 2)  $k_u^2 \geq M_{\text{тр}}$ ;
- 3)  $k_u^2 \geq M_H + 0,25M_{\text{max граф}}$ ;
- 4)  $k_u^2 M_H \geq M_{\text{max граф}} + 0,25M_H$ .

**8.25.** Как изменится допустимое число включений двигателя при увеличении потерь энергии при пуске?

- 1) уменьшится;
- 2) увеличится;
- 3) останется неизменным.

**8.26.** При увеличении статической нагрузки на валу двигателя допустимое число включений двигателя:

- 1) увеличится;
- 2) останется неизменным;
- 3) уменьшится.

### Пример 1

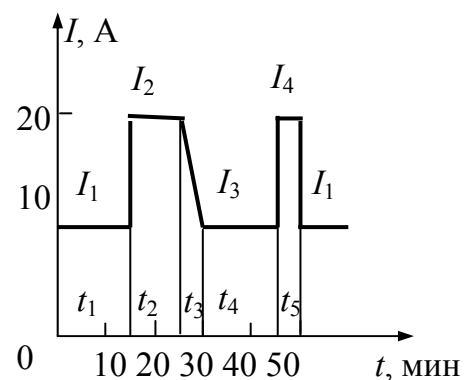
Проверить правильность выбора электродвигателя 4А132М4 ( $P_H = 7,5$  кВт;  $n_H = 1455$  об/мин;  $I_H = 15,1$  А;  $\eta_H = 0,875$ ;  $\cos\phi_H = 0,86$ ) для привода механизма, работающего в продолжительном режиме с графиком нагрузки, представленным на рис. 8.7 ( $t_1 = t_4 = 15$  мин;  $t_2 = 10$  мин;  $t_3 = t_5 = 5$  мин;  $I_1 = I_3 = 10$  А;  $I_2 = I_4 = 20$  А).

### Решение

Условие проверки правильности выбора электродвигателя:  $I_H \geq I_3$ .

Определяем эквивалентный ток на участке 3:

$$I_{33} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_2 I_3 + I_3^2}{3}} =$$



**Рис. 8.7**

$$= \sqrt{\frac{20^2 + 20 \cdot 10 + 10^2}{3}} = 15,3 \text{ А.}$$

Эквивалентный ток за время работы  $t_1-t_4$ :

$$I_э = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + I_4^2 t_4 + I_5^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}} =$$

$$= \sqrt{\frac{10^2 \cdot 15 + 20^2 \cdot 10 + 15,3^2 \cdot 5 + 10^2 \cdot 15 + 20^2 \cdot 5}{15 + 10 + 5 + 15 + 5}} = 14,3 \text{ А.}$$

Номинальный ток:

$$I_n = 15,1 \text{ А} > I_э = 14,3 \text{ А,}$$

следовательно, электродвигатель по тепловому режиму выбран правильно.

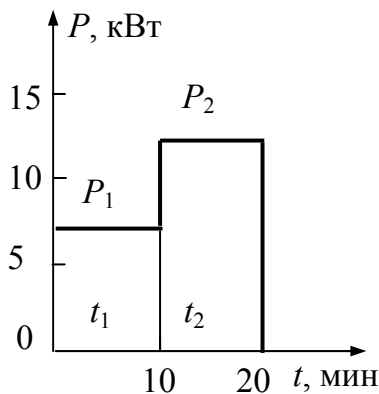


Рис. 8.8

### Пример 2

Выбрать асинхронный электродвигатель с к.-з. ротором серии 4А для привода механизма, работающего в режиме в соответствии с графиком нагрузки, представленном на рис. 8.8.

### Решение

Определяем эквивалентную мощность за цикл работы:

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2}{t_1 + t_2}} = \sqrt{\frac{7^2 \cdot 10 + 13^2 \cdot 10}{10 + 10}} = 10,4 \text{ кВт.}$$

Для полного использования по нагреву выбираем электродвигатель по условию  $P_n < P_э$ . Выбираем по каталогу двигатель 4А132S4 ( $P_n = 7,5 \text{ кВт}$ ;  $n_n = 1455 \text{ об/мин}$ ;  $I_n = 15,1 \text{ А}$ ;  $\eta_n = 0,875$ ;  $\cos\varphi_n = 0,86$ ;  $k_i = 7,5$ ;  $\mu_n = 2,2$ ;  $\mu_{\min} = 1,7$ ;  $\mu_k = 3,0$ ;  $m = 77 \text{ кг}$ ).

При этом температура электродвигателя в конце цикла работы не должна превышать допустимую для данного двигателя  $\tau_{\text{доп}} = 85 \text{ }^\circ\text{С}$ , что можно оценить с помощью коэффициентов тепловой и механической перегрузки.

Коэффициент тепловой перегрузки

$$p_T = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T_n}\right)} = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{20}{24}\right)} = 1,75.$$

Постоянная времени нагрева

$$T_n = \frac{C}{2A_n} = \frac{36344}{2 \cdot 12,6} = 1442 \text{ с} = 24 \text{ мин.}$$

Теплоемкость двигателя:

$$C = c_0 m = 472 \cdot 77 = 36344 \text{ Дж} / ^\circ\text{C},$$

где  $c_0$  – удельная теплоемкость стали, Дж/(кг·с);  $m$  – масса двигателя, кг.

Коэффициент теплоотдачи двигателя:

$$A_H = \frac{P_H}{\tau_{\text{доп}}} = \frac{1071}{85} = 12,6 \text{ Дж} / (^\circ\text{C} \cdot \text{с}).$$

Потери мощности при номинальной нагрузке:

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} = 7500 \frac{1 - 0,875}{0,875} = 1071 \text{ Вт}.$$

Коэффициент механической перегрузки:

$$p_M = \sqrt{p_T (\alpha + 1) - \alpha} = \sqrt{1,75(0,6 + 1) - 0,6} = 1,48,$$

где  $\alpha = 0,5 \dots 0,7$  – коэффициент потерь.

Мощность, которую может развить выбранный двигатель не перегреваясь, при кратковременном режиме работы  $P_K = p_M P_H = 1,48 \cdot 7,5 = 11,1$  кВт, что больше эквивалентной мощности  $P_э = 10,4$  кВт.

Следовательно, электродвигатель по тепловому режиму выбран правильно.

В подтверждении этого определим температуру двигателя в конце периода работы:

$$\tau_{\text{тр}} = \tau_{\text{уст.ф}} \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}\right) = 134,3 \left(1 - e^{-\frac{20}{24}}\right) = 76,6 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $\tau_{\text{уст.ф}}$  – фактическое значение установившейся температуры двигателя при нагрузке  $P_э$ :

$$\tau_{\text{уст.ф}} = \tau_{\text{доп}} p'_T = 85 \cdot 1,58 = 134,3 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $p'_T$  – фактическое значение коэффициента перегрузки:

$$p'_T = \frac{\alpha + (p'_M)^2}{\alpha + 1} = \frac{0,6 + 1,39^2}{0,6 + 1} = 1,58,$$

где  $p'_M$  – фактическое значение коэффициента механической перегрузки:

$$p'_M = \frac{P_э}{P_H} = \frac{10,4}{7,5} = 1,39.$$

Температура двигателя в конце цикла работы  $\tau_{\text{тр}} = 87,6$  °С меньше допустимой  $\tau_{\text{доп}} = 85$  °С, следовательно, двигатель выбран правильно.

Выбранный двигатель проверяем:

1. По условию пуска:

$$\left(\frac{U}{U_H}\right)^2 M_{\text{п}} \geq M_{\text{тр}} + 0,25M_H.$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{P_H \cdot 30}{\pi n_H} = \frac{7500 \cdot 30}{3,14 \cdot 1455} = 49,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент двигателя:

$$M_{\Pi} = \mu_{\Pi} M_H = 2,2 \cdot 49,2 = 108,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент трогания рабочей машины:

$$M_{\text{тр}} = \frac{P_1}{\omega_H} = \frac{7000}{152,4} = 45,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Действительное напряжение на зажимах двигателя при пуске  $U_H = 320 \text{ В}$ .

Тогда 
$$\left(\frac{U}{U_H}\right)^2 M_{\Pi} = \left(\frac{320}{380}\right)^2 108,3 = 76,8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{тр}} + 0,25M_H = 4,9 + 0,25 \cdot 49,2 = 58,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. По условию механической перегрузки:

$$M_K \geq M_{\text{max}} + 0,25M_H.$$

Критический момент двигателя

$$M_K = \mu_K M_H = 3 \cdot 49,2 = 147,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент сопротивления по графику нагрузки

$$M_{\text{max}} = \frac{P_2}{\omega_H} = \frac{13000}{152,4} = 85,3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{max}} + 0,25M_H = 85,3 + 0,25 \cdot 49,2 = 97,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таким образом,  $M_K = 147,6 \text{ Н} \cdot \text{м} > 97,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , т.е. выбранный двигатель подходит по условиям пуска и механической перегрузки.

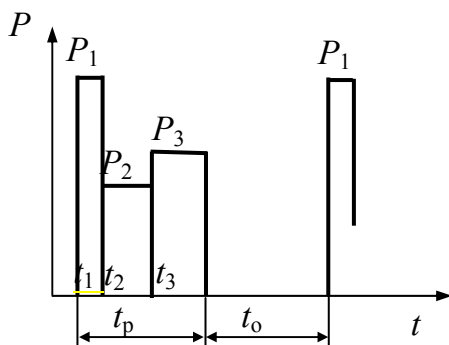


Рис. 8.9

### Пример 3

Выбрать асинхронный электродвигатель с к.-з. ротором серии 4АС для привода механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме в соответствии с графиком нагрузки (рис. 8.9) ( $P_1 = 12 \text{ кВт}$ ;  $P_2 = 6 \text{ кВт}$ ;  $P_3 = 8 \text{ кВт}$ ;  $t_1 = 1 \text{ мин}$ ;  $t_2 = t_3 = 2 \text{ мин}$ ;  $t_0 = 5 \text{ мин}$ ). Двигатель выбрать с синхронной частотой вращения 1500 об/мин.

### Решение

Эквивалентная мощность за время включения:

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} =$$



$$= \sqrt{\frac{12^2 \cdot 1 + 6^2 \cdot 2 + 8^2 \cdot 2}{1 + 2 + 2}} = 8,3 \text{ кВт.}$$

Фактическая относительная продолжительность включения:

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} = \frac{1 + 2 + 2}{1 + 2 + 2 + 5} = 0,5.$$

Так как фактическая продолжительность включения  $\varepsilon_{\phi} = 0,5$  не совпадает со стандартным значением  $\varepsilon_{\text{ст}}(0,15; 0,25; 0,4; 0,6)$ , необходимо найденное значение эквивалентной мощности  $P_{\phi}$  пересчитать на ближайшее стандартное значение продолжительности включения  $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,6$ , т.е.  $\varepsilon_{\text{ст}} > \varepsilon_{\phi}$ :

$$P'_{\phi} = P_{\phi} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\phi}}{\varepsilon_{\text{ст}}} + \alpha \left( \frac{\varepsilon_{\phi}}{\varepsilon_{\text{ст}}} - 1 \right)} = 8,3 \sqrt{\frac{0,5}{0,6} + 0,6 \left( \frac{0,5}{0,6} - 1 \right)} = 7,1 \text{ кВт,}$$

где  $\alpha$  – коэффициент потерь ( $\alpha = 0,6$ ).

По полученному значению  $P'_{\phi}$ , выбираем из каталога двигатель так, чтобы мощность двигателя при стандартной продолжительности включения  $P_{0,6} \geq P'_{\phi}$ .

Выбираем электродвигатель 4АС132S4 ( $P_{\text{н}(0,4)} = 8,5 \text{ кВт}$ ;  $P_{0,6} = 7,5 \text{ кВт}$ ;  $n_{\text{н}} = 1396 \text{ об/мин}$ ;  $I_{\text{н}} = 18,4 \text{ А}$ ;  $\eta_{\text{н}} = 0,83$ ;  $\cos\varphi_{\text{н}} = 0,85$ ;  $\mu_{\text{н}} = 2$ ;  $\mu_{\text{к}} = 2,2$ ).

Выбранный двигатель проверяем по условию пуска:

$$M_{\text{п}} \geq M_{\text{тр}} + 0,25M_{\text{н}}.$$

Пусковой момент:

$$M_{\text{п}} = \mu_{\text{п}} M_{\text{н}} = 2,0 \cdot 58,2 = 116,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номинальный момент:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{8500}{146} = 58,2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент трогания:

$$M_{\text{тр}} = \frac{P_1}{\omega_{\text{н}}} = \frac{12000}{146} = 82,2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Итак,  $116,4 > 82,2 + 0,25 \cdot 58,2$ ;  $116,4 > 96,8$ .

Следовательно, данный двигатель по пусковым условиям пригоден.

### Задачи для самостоятельного решения

**8.1.** Для графика нагрузки, приведенного на рис. 8.10, выбрать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А... основного исполнения. Постоянную времени нагрева принять

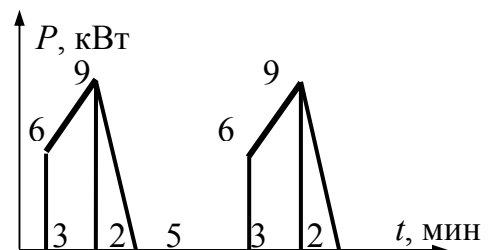


Рис. 8.10

равной  $T_n = 20$  мин, коэффициент ухудшения охлаждения –  $\beta_0 = 0,3$ . Двигатель выбрать с синхронной частотой вращения  $n_n = 1000$  об/мин.

**8.2.** Выбрать асинхронный электродвигатель с коротко замкнутым ротором серии РА... основного исполнения для работы в режиме кратковременной нагрузки  $P_k = 25$  кВт, действующей в течение  $t_p = 15$  мин. Постоянную времени нагрева принять  $T_n = 35$  мин.

**8.3.** Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором работает с циклической переменной нагрузкой.

1-й участок: длительность 4 мин, момент нагрузки  $0,8M_n$ ;

2-й участок: длительность 8 мин, момент нагрузки  $1,5M_n$ ;

3-й участок: длительность 5 мин, момент нагрузки  $0,6M_n$ .

Необходимо определить проходит ли двигатель по нагреву при таком графике нагрузки.

Ответ: асинхронный двигатель не проходит по нагреву.

**8.4.** Номинальная мощность двигателя в продолжительном режиме 140 кВт. При работе с ПВ = 25% и пренебрежении постоянными потерями номинальная мощность составит?

Ответ: 280 кВт.

**8.5.** При работе двигателя в повторно-кратковременном режиме с ПВ = 15 % его номинальная мощность равна 60 кВт. Номинальная мощность двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме с ПВ = 60 %, составит?

Ответ: 30 кВт.

**8.6.** На рис. 8.11 приведены расчетная и действительная кривые нагрева обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Определите, какая из них получена экспериментально, найдите постоянную времени нагрева двигателя.

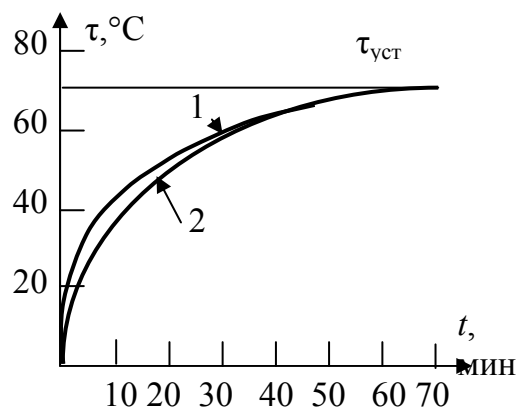


Рис. 8.11

## ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### Глава 5

#### Режимы работы, электромеханические и механические характеристики электроприводов

##### 5.1. Режимы работы, электромеханические и механические характеристики двигателей постоянного тока (ДПТ)

5.1.1 – 2; 5.1.2 – 3.

Отвечая на вопросы 5.1.1–5.1.2, следует учитывать, что при работе в тормозных режимах момент двигателя имеет знак, противоположный знаку скорости при выбранном направлении вращения.

**5.1.3 – 1; 5.1.4 – 4; 5.1.5 – 1; 5.1.6 – 3; 5.1.7 – 2.**

При ответе на вопросы 5.1.3–5.1.7 необходимо помнить, что электромеханическое преобразование энергии в электрической машине связано с потерями. При этом следует учитывать направление потока мощности.

**5.1.8 – 1; 5.1.9 – 1; 5.1.10 – 4; 5.1.11 – 1; 5.1.12 – 4; 5.1.13 – 2; 5.1.14 – 1; 5.1.15 – 2; 5.1.16 – 3; 5.1.17 – 4; 5.1.18 – 1; 5.1.19 – 3; 5.1.20 – 4.**

При ответе на вопросы 5.1.8–5.1.10 и 5.1.16, 5.1.18, 5.1.20 следует помнить, что для осуществления тормозного режима двигателя необходимо, чтобы направление эдс и тока якоря совпали. При этом момент двигателя и его скорость имеют противоположные направления. Для торможения противовключением характерным является совпадение направлений эдс и напряжения при одинаковом направлении потока возбуждения.

**5.1.21 – 3; 5.1.22 – 3; 5.1.23 – 1; 5.1.24 – 1; 5.1.25 – 4; 5.1.26 – 3; 5.1.27 – 2; 5.1.28 – 2; 5.1.29 – 1; 5.1.30 – 1.**

Отвечая на вопросы 5.1.26–5.1.30, нужно использовать для анализа выражение:

$$\beta = \left| \frac{k\Phi^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}} \right|;$$

**5.1.31 – 3** (см. пояснение к вопросам 5.1.16, 5.1.18, 5.1.20), **5.1.32 – 1.**

Для оценки величины дополнительных сопротивлений, включаемых в цепь якоря ДПТ в режиме торможения противовключением и динамического торможения, следует воспользоваться выражениями:

$$R_{\text{пв}} = \frac{U + E}{I_{\text{нач}}} - R_{\text{я}} \quad \text{и} \quad R_{\text{дт}} = \frac{E}{I_{\text{нач}}} - R_{\text{я}}.$$

Также см. пояснение к вопросам 5.1.26–5.1.30.

**5.1.33 – 2; 5.1.34 – 1; 5.1.35 – 4; 5.1.36 – 1; 5.1.37 – 1.**

При ответе на вопросы 5.1.36 и 5.1.37 необходимо помнить, что с ростом тока якоря ДПТ последовательного возбуждения растет поток возбуждения. Следовательно, момент двигателя, определяемый по выражению  $M = k\Phi I_{\text{я}}$ , растет в большей степени, чем ток якоря.

У ДПТ независимого возбуждения поток возбуждения практически не зависит от тока якоря.

**5.1.38 – 4; 5.1.39 – 2; 5.1.40 – 2; 5.1.41 – 4; 5.1.42 – 3; 5.1.43 – 2;**

**5.1.44 – 2; 5.1.45 – 1; 5.1.46 – 2; 5.1.47 – 1; 5.1.48 – 2.**

**5.1.49 – 3; 5.1.50 – 5; 5.1.51 – 3; 5.1.52 – 1; 5.1.53 – 2.**

## **5.2. Режимы работы, электромеханические и механические характеристики асинхронных электродвигателей**

**5.2.1 – 1; 5.2.2. – 1; 5.2.3 – 3.**

Для ответа на вопросы 5.2.1–5.2.3 необходимо проанализировать выражение:

$$M_{\text{к}} = \frac{3U_{\text{ф}}^2}{2\omega_0[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2)'^2}]}$$

5.2.4 – 2; 5.2.5 – 1; 5.2.6 – 2 (см. пояснение к вопросам 5.2.1–5.2.3);  
5.2.7 – 1

При ответе на вопросы 5.2.4; 5.2.5; 5.2.7 следует воспользоваться для анализа выражением:

$$S_{\text{к}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2)'^2}}$$

(знак «+» соответствует двигательному режиму, знак «-» – генераторному).

5.2.8 – 2; 5.2.9 – 3; 5.2.10 – 3; 5.2.11 – 3 (см. пояснение к вопросам 5.2.1–5.2.3. Необходимо учесть, что при работе АД в генераторном режиме перед  $\sqrt{\quad}$  будет знак «-». Кроме того, при одном и том же абсолютном значении скольжения ток  $I_2$  в генераторном режиме всегда больше, чем в двигательном).

5.2.12 – 1; 5.2.13 – 3; 5.2.14 – 4; 5.2.15 – 4; 5.2.16 – 4; 5.2.17 – 2;  
5.2.18 – 4; 5.2.19 – 1; 5.2.20 – 2; 5.2.21 – 2; 5.2.22 – 1; 5.2.23 – 3;  
5.2.24 – 4

При ответе на вопрос 5.2.22 нужно помнить, что перегрузочная способность двигателя – это отношение критического момента двигателя к номинальному  $\mu_{\text{к}} = \frac{M_{\text{к.д}}}{M_{\text{н}}}$ , а критический момент при снижении

напряжения уменьшается пропорционально  $U_{\text{ф}}^2$ .

## Глава 6

### Регулирование скорости электроприводов

#### 6.1. Регулирование скорости электропривода постоянного тока

6.1.1 – 2; 6.1.2 – 3; 6.1.3 – 1; 6.1.4 – 1; 6.1.5 – 3; 6.1.6 – 2; 6.1.7 – 2;  
6.1.8 – 2; 6.1.9 – 3; 6.1.9 – 3; 6.1.10 – 3; 6.1.11 – 1.

Отвечая на вопросы 6.1.1–6.1.11, следует иметь в виду, что скорость идеального холостого хода определяется по выражению:

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$$

При этом необходимо учитывать, как изменяется жесткость механических характеристик при изменении различных параметров:  $U$ ,  $\Phi$ ,  $R_x$ , анализируя выражение для определения коэффициента жесткости:

$$\beta = \left| \frac{(k\Phi)^2}{R_{\text{я}} + R_{\text{х}}} \right|.$$

**6.1.12 – 3; 6.1.13 – 1; 6.1.14 – 2.**

## **6.2. Регулирование скорости электропривода переменного тока**

**6.2.1 – 3; 6.2.2 – 2; 6.2.3 – 4; 6.2.4 – 1.**

Отвечая на вопросы 6.2.1–6.2.4, необходимо проанализировать выражение:

$$M_{\text{к}} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}$$

и учесть, что индуктивные сопротивления  $x_1$  и  $x_2' \equiv f$ .

**6.2.5 – 1; 6.2.6 – 3; 6.2.7 – 3; 6.2.8 – 1; 6.2.9 – 2; 6.2.10 – 2.**

При ответе на вопросы 6.2.5–6.2.10 нужно проанализировать основной закон изменения напряжения при частотном регулировании скорости асинхронного двигателя (формула Костенко):

$$\frac{U}{U_{\text{н}}} = \frac{f}{f_{\text{н}}} \sqrt{\frac{M_{\text{с}}(\omega)}{M_{\text{сн}}}},$$

имея в виду, что для многих механизмов уравнение механической характеристики:

$$M_{\text{с}} = M_{\text{с.нач}} + (M_{\text{сн}} - M_{\text{с.нач}}) \left( \frac{\omega_{\text{с}}}{\omega_{\text{сн}}} \right)^x,$$

где  $x = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Для облегчения анализа можно принять  $M_{\text{с.нач}} = 0$ .

**6.2.11 – 1; 6.2.12 – 1; 6.2.13 – 3;**

При ответе на вопросы 6.2.11–6.2.13 необходимо иметь в виду, что при переключении с «треугольника» и «звезды» на «двойную звезду» происходит переход от согласно-последовательного к встречно-параллельному соединению секций обмотки статора. При этом число пар полюсов уменьшается вдвое, а сопротивления обмоток статора и ротора уменьшаются в 4 раза. Кроме того, при переключении с «треугольника» на «двойную звезду» происходит снижение фазного напряжения в  $\sqrt{3}$  раз. Далее при анализе необходимо использовать следующие выражения:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}; \quad M_{\text{к}} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}; \quad S_{\text{к}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

**6.2.14 – 1; 6.2.15 – 2.**

Учитывая, что допустимый ток в секции обмотки статора не может превышать номинального значения и остается неизменным при переключении числа пар полюсов, а также, принимая КПД и  $\cos\varphi$  для всех схем одинаковыми, имеем:

- для схемы «двойная звезда»:

$$P_{Y\dot{Y}\text{доп}} = \sqrt{3}U2I_{\text{доп}} \cos\varphi_{Y\dot{Y}}\eta_{Y\dot{Y}}, \quad M_{Y\dot{Y}\text{доп}} = \frac{P_{Y\dot{Y}\text{доп}}}{\omega_{Y\dot{Y}}};$$

- для схемы «звезда»:

$$P_{Y\text{доп}} = \sqrt{3}UI_{\text{доп}} \cos\varphi_Y\eta_Y, \quad M_{Y\text{доп}} = \frac{P_{Y\text{доп}}}{\omega_Y};$$

- для схемы «треугольник»:

$$P_{\Delta\text{доп}} = UI_{\text{доп}} \cos\varphi_{\Delta}\eta_{\Delta}, \quad M_{\Delta\text{доп}} = \frac{P_{\Delta\text{доп}}}{\omega_{\Delta}}.$$

Учитывая, что  $\omega_{Y\dot{Y}} = 2\omega_Y$  и  $\omega_{Y\dot{Y}} = 2\omega_{\Delta}$ , можно показать, что при переключении со «звезды» на «двойную звезду» остается постоянным допустимый момент, а при переключении с «треугольника» на «двойную звезду» допустимая мощность.

## Глава 7

### Механика и переходные процессы в электроприводах

7.1 – 1; 7.2 – 2; 7.3 – 2; 7.4 – 2; 7.5 – 3; 7.6 – 3; 7.7 – 4; 7.8 – 1.

При ответе на вопросы 3.6 и 3.8 следует иметь в виду, что наличие индуктивности в якорной цепи делает невозможным скачкообразное изменение тока.

7.9 – 1; 7.10 – 3; 7.11 – 1; 7.12 – 2; 7.13 – 1.

Минимальное время торможения привода будет при наибольшем значении тормозного момента, которое можно оценить по площади, заключенной между характеристиками двигателя и рабочей машины.

7.14 – 2; 7.15 – 3; 7.16 – 1; 7.17 – 2; 7.18 – 3.

## Глава 8

### Нагрев и охлаждение электродвигателей.

#### Выбор электродвигателей по мощности

8.1 – 1; 8.2 – 3; 8.3 – 5; 8.4 – 4; 8.5 – 3; 8.6 – 1; 8.7 – 3; 8.8 – 1;  
8.9 – 5; 8.10 – 4; 8.11 – 4; 8.12 – 2; 8.13 – 4; 8.14 – 1; 8.15 – 2;  
8.16 – 3; 8.17 – 1; 8.18 – 2; 8.19 – 5; 8.20 – 2; 8.21 – 1;  
8.22 – 3; 8.23 – 3; 8.24 – 4; 8.25 – 1; 8.26 – 3.

## Глава 9

# ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

### Общие указания

Выполнение курсовой работы по дисциплине «Электропривод», для направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», направленности «Электрооборудование и электротехнологии»; «Автоматизация и роботизация технологических процессов» проводится с целью систематизации и закрепления полученных теоретических и практических знаний по электроприводу, являющегося одним из важнейших составляющих электрооборудования, используемого при решении профессиональных задач автоматизации и роботизации технологических процессов, применяемых на предприятиях АПК.

Курсовая работа позволяет решить следующие задачи:

- систематизировать и углубить теоретические знания по электроприводу;
- применять теоретические знания при решении поставленных профессиональных задач;
- сформировать навыки использования учебной, справочной и нормативной документации;

Для выполнения курсовой работы студенту следует изучить теоретический материал по литературе (учебникам и учебным пособиям) и конспектам лекций. Курсовую работу студенты выполняют во внеурочное время с использованием разнообразных информационных и программных материалов, оформляется работа в текстовом редакторе Microsoft Word и Microsoft Excel для составления таблиц, диаграмм, вычисления простых и сложных функций.

Тема курсовой работы «Выбор асинхронного электропривода для подъемного механизма».

### Требования к курсовой работе

#### Оформление текстового материала

1. Курсовая работа должна быть выполнена печатным способом с использованием компьютера и принтера на одной стороне белой бумаги формата А4 (210×297 мм).
2. Поля: с левой стороны – 25 мм; с правой – 10 мм; в верхней части – 20 мм; в нижней – 20 мм.
3. Тип шрифта: *Times New Roman Cyr*. Шрифт основного текста: обычный, размер 14 пт. Шрифт заголовков разделов (глав): полужирный, размер 16 пт. Шрифт заголовков подразделов: полужирный, размер 14 пт. Цвет шрифта должен быть черным. Межсимвольный интер-

вал – обычный. Межстрочный интервал – полуторный. Абзацный отступ – 1,25 см.

4. Страницы должны быть пронумерованы. Порядковый номер ставится в **середине верхнего поля**. Первой страницей считается титульный лист, но номер страницы на нем не проставляется.

5. Главы имеют **сквозную нумерацию** в пределах работы и обозначаются арабскими цифрами. **В конце заголовка точка не ставится**. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. **Переносы слов в заголовках не допускаются**.

6. Номер подраздела (параграфа) включает номер раздела (главы) и порядковый номер подраздела (параграфа), разделенные точкой. Пример – 1.1, 1.2 и т.д.

7. На последней странице курсовой работы ставятся дата окончания работы и подпись автора.

### **Оформление ссылок**

При написании курсовой работы необходимо давать краткие внутритекстовые библиографические ссылки. Если делается ссылка на источник в целом, то необходимо указать в квадратных скобках номер этого источника в библиографическом списке [7].

### **Оформление иллюстраций**

На все рисунки в тексте должны быть даны ссылки. Рисунки должны располагаться непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице. Рисунки нумеруются арабскими цифрами, при этом нумерация сквозная, но допускается нумеровать и в пределах раздела (главы). В последнем случае, номер рисунка состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой (*например*: Рисунок 1.1).

Подпись к рисунку располагается под ним посередине строки. Слово «Рисунок» пишется полностью. В этом случае подпись должна выглядеть так: **Рисунок 2 – Механические характеристики электродвигателя**. Точка в конце названия не ставится.

### **Оформление формул**

Формулы должны быть оформлены в редакторе формул Equation Editor и вставлены в документ как объект.

Объяснение значений символов и числовых коэффициентов нужно подавать непосредственно под формулой в той последовательности, в которой они приведены в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента нужно подавать с новой строки. Первую строку объяснения начинают со слова «где» без двоеточия.



Порядковые номера помечают арабскими цифрами в круглых скобках около правого поля страницы без точек от формулы к ее номеру. Формулы должны нумероваться сквозной нумерацией арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы справа в круглых скобках. Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой (например, 4.2).

### **Оформление таблиц**

На все таблицы в тексте должны быть ссылки. Таблица должна располагаться непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице.

Все таблицы нумеруются (нумерация сквозная, либо в пределах раздела – в последнем случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера внутри раздела, разделенных точкой (*например*, Таблица 1.2). Таблицы каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением обозначения приложения (*например*, Приложение 2, табл. 2).

Название таблицы следует помещать над таблицей слева, без абзачного отступа в одну строку с ее номером через тире (*например*, Таблица 6 – Результаты измерений и заключение).

При переносе таблицы на следующую страницу название помещают только над первой частью. Над другими частями также слева пишут слово «Продолжение» или «Окончание» и указывают номер таблицы (*например*, Продолжение таблицы 6).

### **Оформление библиографического списка (ГОСТ 7.1)**

#### **Книги**

##### ***С 1 автором***

1. Кабдин, Н.Е. Электрический привод [Текст]: учебник / Н.Е. Кабдин. – М.: ФГБОУ ВПО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, 2014. – 224 с.

##### ***С 2–3 авторами***

1. Епифанов, А.П. Электропривод [Текст]: учебник / А.П. Епифанов, Л. М. Малайчук, А. Г. Гущинский. – СПб.: Лань, 2012. – 400 с.

##### ***С 4 и более авторами***

1. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин [Текст]: учебник для вузов / И.П. Копылов [и др.]. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 767 с. – (Бакалавр. Углубленный курс).

#### **Учебники и учебные пособия**

1. Герасенков, А.А. Автоматизированный электропривод. Основные понятия, терминология и условные обозначения [Текст]: уч. пособие для вузов / А.А. Герасенков, Н.Е. Кабдин. – М.: МГАУ, 2009. – 107 с.

2. Кабдин, Н.Е. Электрический привод [Текст]: учебник / Н.Е. Кабдин. – М.: ФГБОУ ВПО РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева, 2014. – 224 с.

### Задание для курсовой работы

#### Раздел 1. Выбор электродвигателя с фазным ротором для режима $S3$

1.1. Для главного привода подъемного механизма, выполненного по кинематической схеме, приведенной на рис. 9.1, в соответствии с индивидуальным заданием выбрать асинхронный электродвигатель (АД) с фазным ротором, тип и марку редуктора. Режим работы электропривода – повторно-кратковременный ( $S3$ ).

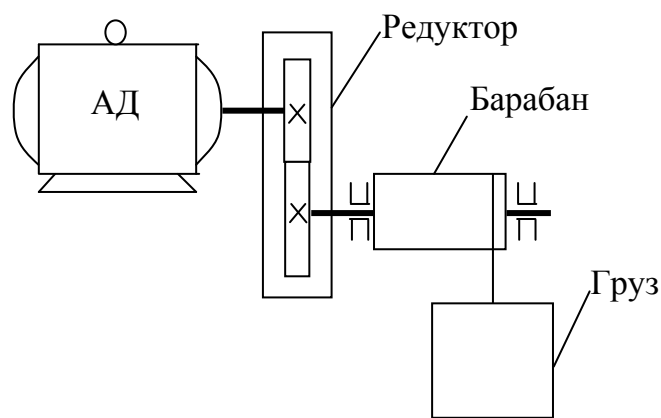


Рис. 9.1

1.2. Рассчитать сопротивления ступеней пускового реостата и определить пусковой ток в роторе электродвигателя и в сети.

1.3. Для главного привода подъемного механизма определить сопротивления, которые требуется ввести в цепь ротора, чтобы груз двигался на подъем и на спуск со скоростью, равной 0,5 заданного значения. Построить искусственные механические характеристики и определить токи в роторе и в сети в указанных режимах работы.

#### Раздел 2. Выбор электродвигателя с к.-з. ротором с повышенным скольжением для режима $S3$

2.1. Для привода подъемного механизма выбрать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором с повышенным скольжением. Режим работы электропривода –  $S3$ .

2.2. Построить естественную механическую характеристику и характеристики при напряжениях 0,5; 0,7 и 0,9 номинального значения.

### Раздел 3. Выбор электродвигателя с к.-з. ротором основного исполнения для режима S3

3.1. Для привода подъемного механизма выбрать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором основного исполнения. Режим работы электропривода – S3.

3.2. Определить время пуска электродвигателя и построить зависимости  $\omega = \varphi(t)$  и  $M_{дв} = \psi(t)$ .

3.3. Определить допустимое число включений двигателя в час.

3.4. Рассчитать параметры схемы замещения электродвигателя.

3.5. Построить механические характеристики при частотном регулировании по закону  $\frac{U}{f} = \text{const}$  для частот 10, 25, 100 Гц.

### Раздел 4. Выбор электродвигателя с к.-з. ротором с повышенным пусковым моментом для режима S2

4.1. Для привода подъемного механизма выбрать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором с повышенным пусковым моментом, считая, что режим работы электропривода – кратковременный (S2) и время работы составляет  $t_p = 15$  мин при номинальной мощности двигателя  $P_n \leq 11$  кВт,  $t_p = 30$  мин при номинальной мощности двигателя  $P_n > 11$  кВт.

4.2. Определить превышение температуры двигателя в конце указанного времени работы.

При выполнении курсовой работы необходимо иметь в виду следующее:

1. Весом троса можно пренебречь.

2. Электродвигатели основного исполнения для привода подъемного механизма выбирать в соответствии с вариантом по таблице из приложения 1.

3. Отношение  $\alpha = \frac{R_1}{R'_2}$  принять равным единице.

4. Время цикла в повторно-кратковременном режиме принять равным согласно ГОСТ 183–74 стандартному – 10 мин.

5. Момент сопротивления при спуске и подъеме считать неизменным.

6. Снижение напряжения при пуске принять равным 7,5%.

7. Постоянную времени нагрева  $T_n$  принять равной  $C/2A$ .

Вариант курсовой работы выдает преподаватель. Исходные данные для варианта, которыми являются: скорость груза  $V$ , масса груза  $m$ , диаметр барабана  $d$ , момент инерции барабана  $J_б$ , КПД передачи  $n_{п}$ , продолжительность включения ПВ, приведены в приложении 1.

## Методические указания

### Раздел 1. Выбор электродвигателя с фазным ротором для режима S3

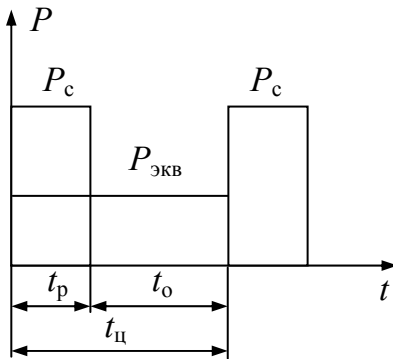


Рис. 9.2

1.1. Для правильного выбора мощности электродвигателя подъемного механизма следует построить нагрузочную диаграмму (рис. 9.2), для чего необходимо определить мощность сопротивления  $P_c$ , время работы  $t_p$  и паузы  $t_o$  по выражениям:

$$P_c = \frac{mgv}{\eta_{\text{п}}}, \quad (9.1)$$

где  $m$  – масса груза, кг;  $v$  – скорость груза, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\eta_{\text{п}}$  – КПД передачи.

$$t_p = t_{\text{ц}} \frac{ПВ}{100}, \quad (9.2)$$

где  $t_{\text{ц}}$  – время цикла работы ( $t_{\text{ц}} = 10$  мин);  $ПВ$  – продолжительность включения, %;

$$t_o = t_{\text{ц}} - t_p. \quad (9.3)$$

Выбор мощности электродвигателя производится по условию:

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{ЭКВ}}, \quad (9.4)$$

где  $P_{\text{н}}$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  $P_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентная мощность по нагрузочной диаграмме, определяемая по выражению:

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{P_c^2 t_p}{t_p + \beta_0 t_o}}, \quad (9.5)$$

где  $\beta_0$  – коэффициент ухудшения условий охлаждения двигателя в период паузы ( $\beta_0 = 0,45 \dots 0,55$ ).

Для обеспечения надежного пуска двигателя следует сделать проверку по условию:

$$k_u^2 M_{\text{п}} \geq M_{\text{тр}} + 0,25 M_{\text{н}}, \quad (9.6)$$

где  $k_u = \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{н}}}$  – действительное напряжение при пуске, о.е.;  $U_{\text{п}}$  – действительное напряжение при пуске, В;  $U_{\text{н}}$  – номинальное напряжение сети, В;  $M_{\text{п}}$  – пусковой момент электродвигателя (Н·м), который принимается равным  $0,8 \dots 0,9$  момента критического;  $M_{\text{тр}}$  – момент трогания рабочего органа подъемного механизма (Н·м), который приближенно можно определить по выражению:

$$M_{\text{тр}} = \frac{P_c}{\omega_n}, \quad (9.7)$$

где  $\omega_n$  – номинальная угловая скорость электродвигателя,  $\text{с}^{-1}$ .

1.2. При расчете сопротивлений ступеней пускового реостата следует использовать графический способ, для чего необходимо построить естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя по полной формуле Клосса (1.43), предварительно определив критическое скольжение по выражению (1.43а).

Переход от скольжения  $S$  к угловой скорости  $\omega$  производят, используя формулу:

$$\omega = \omega_0(1 - S), \quad (9.8)$$

где  $\omega_0$  – синхронная угловая скорость электродвигателя,  $\text{с}^{-1}$ .

Результаты расчета механической характеристики необходимо представить в виде таблицы.

Построение пусковой диаграммы (рис. 9.3) следует начинать с определения максимального и переключающего (минимального) моментов по выражениям:

$$M_{\text{max}} = (0,8 \dots 0,9) M_K; \quad M_{\text{min}} = (1,1 \dots 1,3) M_c, \quad (9.9)$$

где  $M_c = \frac{P_c}{\omega_n}$  – момент сопротивления подъемного механизма,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ .

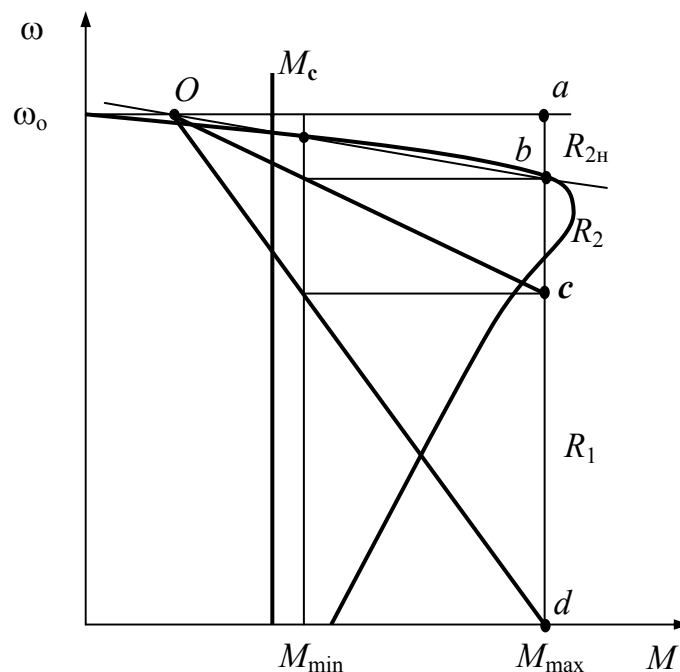


Рис. 9.3

После построения пусковой диаграммы необходимо определить масштаб сопротивления  $m_R$  ( $\text{Ом/мм}$ ):

$$m_R = \frac{R'_{2H}}{ab}, \quad (9.10)$$

где  $R'_{2H}$  – номинальное сопротивление ротора, определяемое по выражению (1.54);  $\overline{ab}$  – отрезок на пусковой диаграмме, соответствующий номинальному сопротивлению ротора, мм.

Тогда сопротивления ступеней пускового реостата равны:

$$R_1 = m_R \overline{cd}, \quad R_2 = m_R \overline{bc}, \quad (9.11)$$

всего реостата:

$$R_{\text{реост}} = m_R \overline{bd} = R_1 + R_2. \quad (9.12)$$

Пусковой ток ротора определяют по выражению:

$$I_{2\text{пуск}} = \frac{E_{2к}}{\sqrt{3}(R_{2H} + R_{\text{реост}})}. \quad (9.13)$$

Определение пускового тока в сети основывается на соотношении:

$$\frac{I_{1H}}{I_{2H}} = \frac{I_{1\text{пуск}}}{I_{2\text{пуск}}}, \quad (9.14)$$

то есть на том, что отношение токов статора и ротора в любом режиме работы электродвигателя остается постоянным.

1.3. Добавочное сопротивление, введенное в цепь ротора, определяют, используя выражение (1.53) при одинаковом моменте на естественной и искусственной механических характеристиках.

Скольжение электродвигателя при работе на подъем:

$$S_{\text{рпод}} = \frac{\omega_o - 0,5\omega_c}{\omega_o}; \quad (9.15)$$

на спуск груза:

$$S_{\text{рсп}} = \frac{\omega_o + 0,5\omega_c}{\omega_o}, \quad (9.16)$$

где  $\omega_c$  – угловая скорость электродвигателя при работе на естественной характеристике при  $M = M_c$ .

Для построения характеристики электродвигателя при подъеме груза необходимо определить критическое скольжение.

Токи в сети и роторе при работе на искусственных характеристиках определяют так же, как в п. 1.2, при соответствующих значениях скольжения  $S_{\text{рпод}}$ ,  $S_{\text{рсп}}$  и добавочного сопротивления  $R_{2\text{доб}}$ .

## Раздел 2. Выбор электродвигателя с к.-з. ротором с повышенным скольжением для режима S3

2.1. Для повторно-кратковременного режима работы (S3) выпускается серия специальных машин, рассчитанных на этот режим. Таковыми машинами являются электродвигатели с повышенным скольжением. Эти электродвигатели рассчитываются на работу при следующих стандартных продолжительностях включения (ПВ): 15, 25, 40, 60 и 100 %. В технической характеристике таких двигателей приводят величины мощности двигателя для всех значений ПВ. За номинальную мощность принимается мощность при ПВ = 40 %. Длительность рабочего цикла не должна превышать 10 мин (ГОСТ 183–74).

Для выбора двигателя из данной серии необходимо определить фактическую продолжительность включения ПВ (указывается в задании) и мощность сопротивления  $P_c$  по выражению (9.1).

Если продолжительность включения окажется нестандартной, то следует при выборе электродвигателя найденное значение мощности сопротивления пересчитать на ближайшее большее стандартное значение продолжительности включения по выражению:

$$P'_c = P_c \sqrt{\frac{\varepsilon_\phi}{\varepsilon_{ст}} + \alpha \left( \frac{\varepsilon_\phi}{\varepsilon_{ст}} - 1 \right)}, \quad (9.17)$$

где  $\varepsilon_{ст} = 0,15; 0,25; 0,4; 0,6$  – стандартное значение относительной продолжительности включения, о.е.;  $\varepsilon_\phi = \frac{t_p}{t_p + t_o}$  – фактическое значение

относительной продолжительности включения, о.е.;  $P_c$  – мощность сопротивления при значении  $\varepsilon_\phi$ , кВт;  $P'_c$  – мощность сопротивления, приведенная к ближайшему большему стандартному значению  $\varepsilon_{ст}$ , кВт;  $\alpha = 0,5 \dots 0,7$  – коэффициент потерь.

По полученному значению  $P'_c$  надо выбрать двигатель так, чтобы мощность двигателя при стандартной продолжительности включения удовлетворяла условию:

$$P_{\varepsilon_{ст}} \geq P'_c. \quad (9.18)$$

После чего двигатель необходимо проверить по условию надежного пуска (9.6).

Естественную механическую характеристику необходимо построить по характерным точкам по выражениям (1.48).

Построение искусственных механических характеристик при изменении напряжения сети основывается на квадратичной зависимости момента асинхронного электродвигателя от величины приложенного напряжения. Для построения данных характеристик необходимо про-

известны пересчет моментов для точек 2, 3, 4 и 5 (рис. 9.4) с номинального напряжения на напряжения, указанные в задании, по выражению:

$$M_u = M_e \left( \frac{U_{\text{ф.зад}}}{U_{\text{фн}}} \right)^2. \quad (9.19)$$

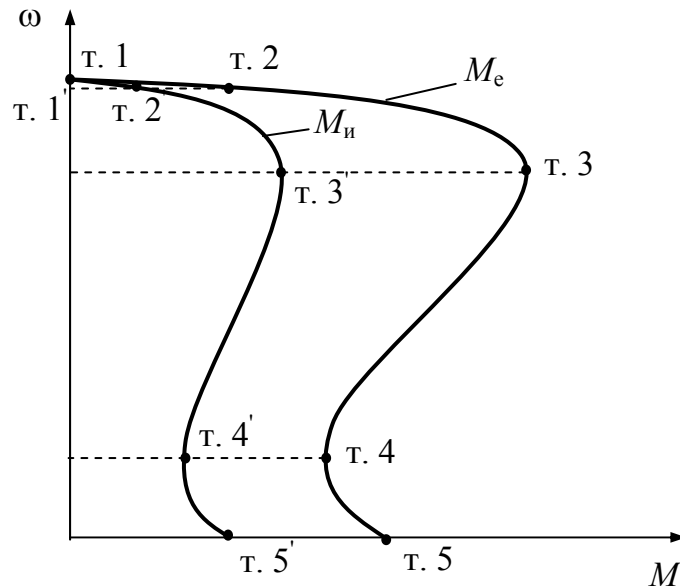


Рис. 9.4

### Раздел 3. Выбор электродвигателя с к.-з. ротором основного исполнения для режима S3

3.1. При повторно-кратковременном режиме работы (S3) могут быть использованы электродвигатели, предназначенные для продолжительного режима работы (S1). Поэтому выбор электродвигателя для привода подъемного механизма производится аналогично выбору двигателя с фазным ротором (п. 1.1).

Выбранные электродвигатели необходимо проверить по условию надежного пуска.

3.2. Время пуска  $t_{\text{пуск}}$  привода определяют на основе уравнения движения электропривода  $M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$ .

Механическую характеристику двигателя  $\omega = f_1(M_{\text{дв}})$  достаточно построить по характерным точкам (рис. 9.5), также как в п. 2.1.

Приведенный к валу электродвигателя момент сопротивления подъемного механизма определяют по выражению:

$$M_{\text{с.пр}} = \frac{P_c}{\omega_n}, \quad (9.20)$$

который будет постоянным.



Механическую характеристику подъемного механизма  $\omega = f_2(M_{с.пр})$  необходимо построить на том же графике, что и механическую характеристику электродвигателя  $\omega = f_1(M_{дв})$  (рис. 9.5).

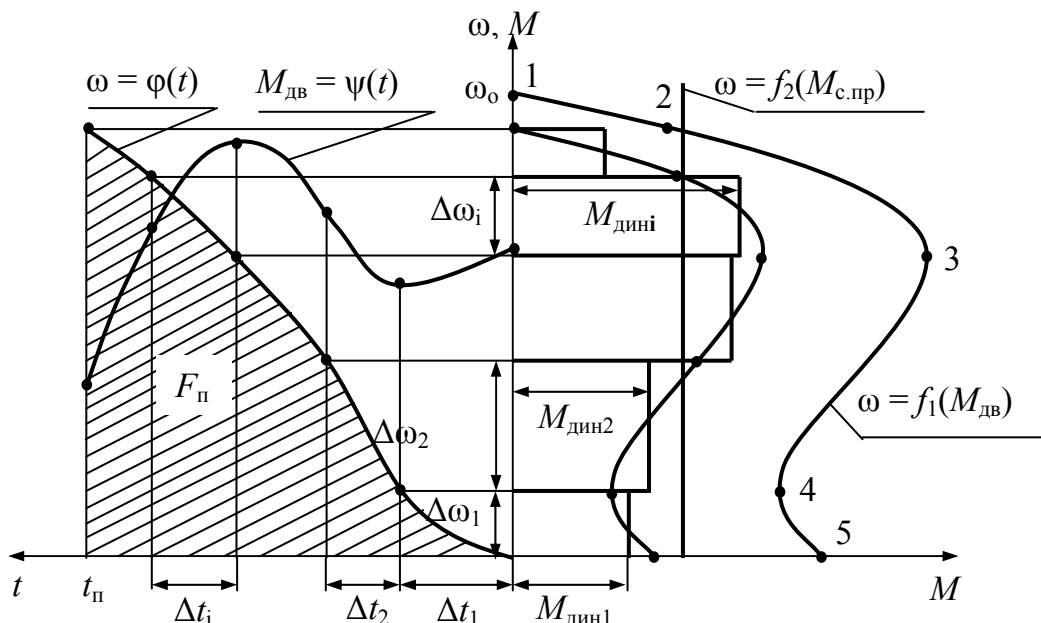


Рис. 9.5

Приведенный к валу электродвигателя момент инерции  $J_{пр}$  системы «двигатель – подъемный механизм» определяют по выражению:

$$J_{пр} = \kappa J_{дв} + \frac{J_6}{i^2} + \frac{mV^2}{\omega_{сн}^2}, \quad (9.21)$$

где  $\kappa = 1, 1 \dots 1, 3$  – коэффициент, учитывающий момент инерции механической передачи;  $J_6$  – момент инерции барабана подъемного механизма  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_{дв}$  – момент инерции ротора электродвигателя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $i = \frac{\omega_{н}}{\omega_{сн}}$  – передаточное отношение редуктора;  $\omega_{сн} = \frac{2V}{d}$  – номинальная скорость барабана подъемного механизма,  $\text{с}^{-1}$ ;  $V$  – скорость подъема груза,  $\text{м/с}$ ;  $d$  – диаметр барабана,  $\text{м}$ ;  $m$  – масса груза,  $\text{кг}$ .

Используя построенные механические характеристики электродвигателя  $\omega = f_1(M_{дв})$  и подъемного механизма  $\omega = f_2(M_{с.пр})$ , строят кривую динамического момента на основе соотношения  $M_{дв} - M_{с.пр} = M_{дин}$ . Затем кривую динамического момента заменяют ступенчатой линией с участками по скорости  $\Delta \omega_i$ , на которых динамический момент постоянен и равен его средней величине  $M_{дин_i}$  (рис. 9.5).

Тогда время пуска на каждом участке будет:

$$\Delta t_i = J_{пр} \frac{\Delta \omega_i}{M_{дин_i}}, \quad (9.22)$$

где  $\Delta \omega_i = \omega_{i+1} - \omega_i$  – интервал скорости на  $i$ -м участке,  $\text{с}^{-1}$ .

Полное время пуска:

$$t_{\Pi} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (9.23)$$

где  $n$  – количество участков.

Результаты расчета необходимо свести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Номер участка $i$	1	2	3	4	–	$n$
$M_{двi}$						
$M_{динi}$						
$\Delta\omega_i$						
$\Delta t_i$						
$t_{\Pi}$						

Зависимость  $M_{дв} = \psi(t)$  строится на основе графиков  $\omega = \varphi(t)$  и  $\omega = f_1(M_{дв})$ .

3.3. Допустимое число включений в час для электродвигателя подъемного механизма, выбранного в п. 2.2, рассчитывается по формуле:

$$h_{доп} = 3600 \frac{\Delta P_{\Pi} \beta_0 (1 - \varepsilon_{\phi}) + (\Delta P_{\Pi} - \Delta P_{\phi}) \varepsilon_{\phi}}{\Delta A_{\Pi}}, \quad (9.24)$$

где  $\Delta P_{\Pi}$  – номинальные потери мощности, Вт;  $\Delta P_{\phi}$  – фактические потери мощности (при нагрузке  $P_c$ ), Вт;  $\beta_0$  – коэффициент ухудшения охлаждения;  $\Delta A_{\Pi}$  – потери энергии в двигателе при пуске, Дж.

Номинальные потери мощности можно определить по выражению:

$$\Delta P_{\Pi} = P_{\Pi} \frac{1 - \eta_{\Pi}}{\eta_{\Pi}}. \quad (9.25)$$

Фактические потери мощности при нагрузке  $P_c$ :

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{сн} + \Delta P_{вн} \left( \frac{P_c}{P_{\Pi}} \right)^2, \quad (9.26)$$

где  $\Delta P_{сн}$  – постоянные потери мощности в электродвигателе, Вт;  $\Delta P_{вн}$  – переменные потери мощности в электродвигателе, Вт.

Постоянные и переменные потери могут быть найдены путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \Delta P_{\Pi} = \Delta P_{сн} + \Delta P_{вн}; \\ \alpha = \frac{\Delta P_{сн}}{\Delta P_{вн}}. \end{cases} \quad (9.27)$$

Потери энергии при пуске:

$$\Delta A_{\text{п}} = \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) \left[ \frac{J_{\text{пр}} \omega_0^2}{2} + M_c \left( \omega_0 t_{\text{п}} - \int_0^{t_{\text{п}}} \omega dt \right) \right]. \quad (9.28)$$

Интеграл  $\int_0^{t_{\text{п}}} \omega dt$  можно приближенно вычислить графически, имея зависимость  $\omega = \varphi(t)$  (рис. 9.5), которая равна заштрихованной площади, то есть:

$$F_{\text{п}} = \int_0^{t_{\text{п}}} \omega dt. \quad (9.29)$$

Тогда потери энергии при пуске:

$$\Delta A_{\text{п}} = \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) \left[ \frac{J_{\text{пр}} \omega_0^2}{2} + M_c (\omega_0 t_{\text{п}} - F_{\text{п}}) \right]. \quad (9.30)$$

3.4. Для определения параметров двигателя ( $R_1, R'_2, X_1, X'_2, I'_{2\text{н}}$ ) достаточно воспользоваться упрощенной Г-образной схемой замещения.

Активное сопротивление статора  $R_1$  может быть, определено из выражения для переменных потерь мощности в двигателе:

$$\Delta P_{\text{вн}} = 3I_{1\text{н}}^2 R_1 + M_{\text{н}} (\omega_0 - \omega_{\text{н}}). \quad (9.31)$$

Переменные потери мощности  $\Delta P_{\text{вн}}$  определяются путем решения системы уравнений (9.27).

Сумму реактивных сопротивлений статора и ротора ( $X_{\text{к}} = X_1 + X'_2$ ) можно определить из выражения (1.97) для критического момента двигателя.

Активное сопротивление ротора  $R'_2$  двигателя может быть определено следующим образом. Потери мощности в роторе в номинальном режиме, с одной стороны, определяются:

$$\Delta P_{2\text{н}} = M_{\text{н}} (\omega_0 - \omega_{\text{н}}). \quad (9.32)$$

С другой стороны:

$$\Delta P_{2\text{н}} = 3(I'_{2\text{н}})^2 R'_2. \quad (9.33)$$

Тогда номинальный ток ротора можно определить:

$$I'_{2\text{н}} = \sqrt{\frac{M_{\text{н}} (\omega_0 - \omega_{\text{н}})}{3R'_2}}. \quad (9.34)$$

Также номинальный ток ротора можно определить из упрощенной Г-образной схемы замещения:

$$I'_{2H} = \frac{U_{\Phi H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H}\right)^2 + X_K^2}}. \quad (9.35)$$

Приравняв правые части выражений (9.34) и (9.35), получим:

$$\frac{M_H (\omega_o - \omega_H)}{3R'_2} = \frac{U_{\Phi H}^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H}\right)^2 + X_K^2}. \quad (9.36)$$

Сопротивление  $R'_2$  определяется из выражения (9.36) после необходимых преобразований.

3.5. Для построения механических характеристик при частотном регулировании для каждого заданного значения частоты определить: синхронную угловую скорость  $\omega_{of}$ , критическое скольжение  $S_{kf}$  и соответствующую ему скорость  $\omega_{kf}$ , критический момент  $M_{kf}$ , используя следующие выражения:

$$\omega_{of} = \omega_o \frac{f}{50}; \quad (9.37)$$

$$S_{kf} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + \left(X_K \frac{f}{50}\right)^2}}; \quad (9.38)$$

$$\omega_{kf} = \omega_{of} (1 - S_{kf}); \quad (9.39)$$

$$M_{kf} = \frac{3 \left(U_{\Phi H} \frac{f}{50}\right)^2}{2\omega_o \frac{f}{50} \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + \left(X_K \frac{f}{50}\right)^2} \right]}. \quad (9.40)$$

Для построения механических характеристик для заданных частот в диапазоне изменения скольжения  $S = 0 \dots 1$  используем выражение

$$M_s = \frac{3U_{\Phi}^2 R'_2}{\omega_o \frac{f}{50} s \left[ \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(X_K \frac{f}{50}\right)^2 \right]}. \quad (9.41)$$

Фазное напряжение в зоне частот  $f \leq f_H$  принять по закону  $U_{\Phi} = U_{\Phi H} \frac{f}{50}$ , в зоне частот  $f > f_H$  принять  $U_{\Phi} = U_{\Phi H} = \text{const}$ .

Результаты расчетов представить в табл. 9.2.

Таблица 9.2

$S$	0	$S_H$	$S_K$	...	...	1
$f = 10 \text{ Гц}$						
$M_{\text{дв}}, \text{Н}\cdot\text{м}$						
$\omega, \text{с}^{-1}$						
$f = 25 \text{ Гц}$						
$M_{\text{дв}}, \text{Н}\cdot\text{м}$						
$\omega, \text{с}^{-1}$						
$f = 50 \text{ Гц}$						
$M_{\text{дв}}, \text{Н}\cdot\text{м}$						
$\omega, \text{с}^{-1}$						
$f = 100 \text{ Гц}$						
$M_{\text{дв}}, \text{Н}\cdot\text{м}$						
$\omega, \text{с}^{-1}$						

#### Раздел 4. Выбор электродвигателя с к.-з. ротором с повышенным пусковым моментом для режима S2

4.1. Для полного использования двигателя по нагреву в кратковременном режиме работы, предназначенного для продолжительного режима, какими являются электродвигатели с повышенным пусковым моментом, его следует перегружать, т.е. выбирать, исходя из условия

$$P_H < P_c. \quad (9.42)$$

Для количественной оценки перегрузки используются коэффициенты термической ( $p_T$ ) и механической ( $p_M$ ) перегрузок, которые определяются по выражениям (4.92) и (4.93а).

Постоянная времени нагрева определяется по выражению:

$$T_H = \frac{C}{2A}, \quad (9.43)$$

где  $C = c_0 m_{\text{дв}}$  – теплоемкость двигателя, Дж/°С;  $c_0$  – удельная теплоемкость стали, Дж/кг °С;  $m_{\text{дв}}$  – масса электродвигателя, кг;  $A = \frac{\Delta P_H}{\tau_{\text{доп}}}$  –

теплоотдача двигателя, Дж/с·°С;  $\Delta P_H$  – номинальные потери мощности в двигателе, Вт;  $\tau_{\text{доп}}$  – допустимое значение превышения температуры, соответствующее классу нагревостойкости изоляции (для класса изоляции В –  $\tau_{\text{доп}} = 80$  °С, для класса изоляции F –  $\tau_{\text{доп}} = 110$  °С, для класса изоляции H –  $\tau_{\text{доп}} = 135$  °С) либо по выражению (4.95).

Полное использование электродвигателей по нагреву ограничивается допустимой перегрузочной способностью, которая для асинхронных двигателей характеризуется кратностью критического момента  $\mu_K$ . Поэтому при  $\mu_K < p_M$  двигатель по нагреву будет недоиспользован и определяющим является кратность критического момента.

По известным для выбранного двигателя номинальной мощности  $P_H$  и коэффициенту механической перегрузки  $p_M$  определяют мощность  $P_K$ , которую может развивать данный двигатель, не перегреваясь, в течение времени  $t_p$  при кратковременном режиме работы:

$$P_K = p_M P_H. \quad (9.44)$$

При этом должно выполняться условие:

$$P_K \geq P_c. \quad (9.45)$$

Кроме проверки по условию нагрева двигатель проверяется по условию надежного пуска (9.5).

4.2. Превышение температуры двигателя в конце цикла работы может быть определено из уравнения кривой нагрева:

$$\tau_{t_p} = \tau_{уст.ф} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_p}{T_H}\right) \right], \quad (9.46)$$

где  $\tau_{уст.ф} = \tau_{доп} \frac{\Delta P_\phi}{\Delta P_H}$  – установившееся значение превышения температуры электродвигателя при нагрузке  $P_c$ , °С;  $\Delta P_\phi$  – потери мощности при нагрузке  $P_c$ , кВт;  $\Delta P_H$  – номинальные потери мощности, кВт.

## Приложение 1

### Варианты задания к курсовой работе

№ варианта	Тип АД основного исполнения	$m$ , кг	$V$ , м/с	$d$ , м	$J_6$ , кг·м <sup>2</sup>	$\eta_{п}$	ПВ, %
1	2	3	4	5	6	7	8
01	4А.... $n_0 = 1500$ об/мин	1900	1,1	0,4	15	0,9	29
02		2000	1,1	0,4	20	0,85	44
03		2100	1,1	0,55	22	0,9	48
04		2200	1,1	0,55	24	0,85	52
05		2300	1,0	0,5	21	0,9	56
06		2400	1,0	0,5	23	0,85	34
07		2500	1,0	0,5	20	0,9	36
08		2600	0,9	0,45	20	0,85	20
09		2700	0,9	0,55	18	0,9	10
10		2800	0,8	0,5	18	0,85	30
11	4А.... $n_0 = 3000$ об/мин	2900	0,7	0,4	16	0,9	50
12		3000	0,6	0,45	17	0,85	35
13		3100	0,6	0,55	22	0,9	35
14		3200	0,6	0,5	20	0,85	55
15		3300	0,6	0,55	22	0,9	13
16		3400	0,5	0,55	20	0,85	19
17		3500	0,5	0,6	22	0,9	29
18		3600	0,5	0,6	22	0,85	35
19		3700	0,4	0,6	24	0,9	12
20		3800	0,4	0,6	24	0,85	20
21	АИР.... $n_0 = 1500$ об/мин	500	1,5	0,4	17	0,9	12
22		700	1,5	0,5	20	0,8	20
23		900	1,5	0,4	17	0,85	30
24		1000	1,2	0,35	10	0,9	12
25		800	1,2	0,4	17	0,8	20
26		1200	1,2	0,35	10	0,85	30
27		1500	1,0	0,35	8	0,8	12
28		1700	1,0	0,35	10	0,85	20
29		1900	1,0	0,35	8	0,9	30
30		2000	0,8	0,4	10	0,8	12
31	АИР.... $n_0 = 3000$ об/мин	2700	0,8	0,35	8	0,85	20
32		3000	0,8	0,35	10	0,9	30
33		2500	0,6	0,5	20	0,85	12
34		3300	0,6	0,4	8	0,9	20
35		3700	0,7	0,5	20	0,85	30
36		3500	0,6	0,45	11	0,9	35
37		3100	0,7	0,5	12	0,8	45
38	АИР.... $n_0 = 3000$ об/мин	1800	0,7	0,4	13	0,85	50
39		3200	0,9	0,35	14	0,9	55
40		2600	0,9	0,45	15	0,85	20

1	2	3	4	5	6	7	8
41	РА.... $n_0 = 1500$ об/мин	2100	0,9	0,5	16	0,8	20
42		2300	1,3	0,55	18	0,85	15
43		1400	1,3	0,45	19	0,9	18
44		1100	1,3	0,5	20	0,85	20
45		600	1,4	0,35	6	0,8	35
46		1500	1,4	0,4	7	0,85	28
47		1600	1,4	0,5	10	0,9	37
48		1700	1,1	0,55	8	0,85	46
49		2000	1,1	0,35	15	0,8	50
50		850	1,1	0,4	12	0,9	55
51		800	1,6	0,35	6	0,8	12
52		900	1,6	0,4	7	0,85	15
53		1000	1,6	0,45	8	0,9	20
54		1100	0,7	0,5	15	0,85	29
55		1200	0,7	0,55	14	0,8	32
56		РА.... $n_0 = 3000$ об/мин	1300	0,7	0,35	13	0,85
57	1400		0,8	0,4	12	0,9	45
58	1500		0,8	0,45	10	0,85	50
59	850		0,8	0,5	11	0,8	48
60	950		0,9	0,55	9	0,85	30
61	1700		0,9	0,4	17	0,9	50
62	1600		0,9	0,45	20	0,85	34
63	1900		1,0	0,35	18	0,8	12
64	1800		1,0	0,5	21	0,85	35
65	2000		1,0	0,55	19	0,9	20
66	2700		1,1	0,45	10	0,85	12
67	2500		1,1	0,55	11	0,8	17
68	2000		1,1	0,5	12	0,85	20
69	2100		1,2	0,45	17	0,9	28
70	2300	1,2	0,5	20	0,85	30	
71	РА.... $n_0 = 1500$ об/мин	3000	1,2	0,55	17	0,8	35
72		1400	1,3	0,35	15	0,85	45
73		1500	1,3	0,4	13	0,9	49
74		1600	1,3	0,45	8	0,85	53
75		800	1,4	0,35	8	0,8	50
76	РА.... $n_0 = 1500$ об/мин	1100	1,5	0,35	14	0,85	20
77		1200	1,5	0,45	16	0,8	28
78		1300	1,5	0,5	18	0,85	33
79		1400	1,5	0,4	12	0,9	35
80		1500	1,4	0,35	15	0,85	45
81	РА.... $n_0 = 3000$ об/мин	1600	1,4	0,4	20	0,8	50
82		1700	1,4	0,45	22	0,85	20
83		1800	1,3	0,3	15	0,9	10
84		1900	1,3	0,35	14	0,85	32



1	2	3	4	5	6	7	8
85		2000	1,2	0,4	19	0,8	48
86		2200	1,2	0,45	24	0,85	22
87		2400	1,1	0,4	13	0,9	18
88		2600	1,1	0,35	21	0,85	45
89		2800	1,0	0,5	18	0,8	55
90		3000	1,0	0,55	20	0,85	50
91	4А.... $n_0 = 1500$ об/мин	600	1,6	0,3	6	0,9	20
92		700	1,6	0,35	7	0,85	30
93		800	1,6	0,4	8	0,8	35
94		900	1,5	0,4	9	0,85	12
95		2000	1,2	0,5	15	0,9	18
96		1500	1,3	0,45	12	0,85	50
97		1700	1,2	0,4	14	0,8	20
98		2300	1,1	0,5	17	0,85	12
99		1500	1,3	0,4	15	0,9	11
100		1700	1,2	0,45	10	0,85	37
101	4А.... $n_0 = 3000$ об/мин	2500	1,1	0,35	20	0,8	28
102		2900	0,9	0,4	22	0,85	55
103		750	1,5	0,35	10	0,9	45
104		850	1,5	0,3	12	0,85	35
105		1400	1,0	0,35	16	0,8	20
106		3000	0,8	0,55	24	0,85	10
107		700	1,3	0,45	18	0,9	13
108		800	1,5	0,4	16	0,85	18
109		900	1,4	0,35	14	0,8	30
110		1000	1,3	0,4	12	0,85	20
111		1100	1,4	0,45	18	0,9	28
112		1200	1,4	0,5	20	0,85	32
113		1300	1,3	0,55	22	0,8	38

## Приложение 2

### Технические данные электродвигателей серии 4А основного исполнения

Тип	$P_{н\text{,}}$ кВт	$I_{н\text{,}}$ А	$n_{н\text{,}}$ об/мин	$\cos\varphi_{н}$	$\eta_{н}$	$K_i$	$\mu_{п}$	$\mu_{\min}$	$\mu_{к}$	$J_{дв\text{,}}$ кг·м <sup>2</sup>	$m$ , кг
4А80А2	1,5	3,3	2790	0,85	0,81	6,5	2,1	1,4	2,6	0,0018	17,5
4А80В2	2,2	4,6	2790	0,87	0,83	6,5	2,1	1,4	2,6	0,0021	20
4А90L2	3,0	6,1	2820	0,88	0,845	6,5	2,1	1,6	2,5	0,0035	26
4А100S2	4,0	7,9	2880	0,89	0,865	7,5	2,0	1,6	2,5	0,0059	34,5
4А100L2	5,5	10,0	2880	0,91	0,875	7,5	2,0	1,6	2,5	0,0075	41
4А112M2	7,5	14,8	2895	0,88	0,875	7,5	2,0	1,8	2,8	0,01	56
4А132M2	11,0	21,2	2895	0,90	0,88	7,5	1,7	1,5	2,8	0,023	93
4А160S2	15,0	28,5	2850	0,91	0,88	7,0	1,4	1,0	2,2	0,048	130
4А160M2	18,5	34,6	2850	0,92	0,885	7,0	1,4	1,0	2,2	0,053	165
4А180S2	22,0	41,7	2940	0,91	0,885	7,5	1,4	1,1	2,5	0,07	165
4А180M2	30,0	55,0	2940	0,92	0,90	7,5	1,4	1,1	2,5	0,085	185
4А200M2	37,0	70,0	2950	0,89	0,90	7,5	1,4	1,0	2,5	0,15	255
4А80В4	1,5	3,5	1400	0,83	0,77	5,0	2,0	1,6	2,2	0,0033	20,4
4А90L4	2,2	5,0	1420	0,83	0,80	6,0	2,1	1,6	2,4	0,0056	28,7
4А100S4	3,0	6,7	1435	0,83	0,82	6,0	2,0	1,6	2,4	0,0087	36
4А100L4	4,0	8,6	1430	0,84	0,84	6,0	2,1	1,6	2,4	0,011	42
4А112M4	5,5	11,5	1445	0,85	0,855	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0175	56
4А132S4	7,5	15,1	1455	0,86	0,875	7,5	2,2	1,7	3,0	0,0275	77
4А132M4	11,0	22,0	1460	0,87	0,875	7,5	2,2	1,7	3,0	0,04	93
4А160S4	15,0	29,3	1465	0,88	0,885	7,0	1,4	1,0	2,3	0,10	135
4А160M4	18,5	35,7	1465	0,88	0,895	7,0	1,4	1,0	2,3	0,13	160
4А180S4	22,0	41,3	1470	0,90	0,90	6,5	1,4	1,0	2,3	0,19	175
4А180M4	30,0	56,0	1470	0,89	0,91	6,5	1,4	1,0	2,3	0,23	195
4А200M4	37,0	68,0	1475	0,90	0,91	7,0	1,4	1,0	2,5	0,37	270

### Технические данные электродвигателей серии АИР основного исполнения

Тип	$P_{н\text{,}}$ кВт	$I_{н\text{,}}$ А	$n_{н\text{,}}$ об/мин	$\cos\varphi_{н}$	$\eta_{н}$	$K_i$	$\mu_{п}$	$\mu_{\min}$	$\mu_{к}$	$J_{дв\text{,}}$ кг·м <sup>2</sup>	$m$ , кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
АИР80А2	1,5	3,3	2850	0,85	0,81	7,0	2,1	1,6	2,2	0,0018	9,8
АИР80В2	2,2	4,6	2850	0,87	0,83	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0021	13,2
АИР90L2	3,0	6,1	2850	0,88	0,845	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0035	16,7
АИР100S2	4,0	8,0	2850	0,88	0,87	7,5	2,0	1,6	2,2	0,0059	21,6
АИР100L2	5,5	10,7	2850	0,89	0,88	7,5	2,0	1,6	2,2	0,0075	27,4
АИР112M2	7,5	14,8	2895	0,88	0,875	7,5	2,0	1,6	2,2	0,01	41
АИР132M2	11,0	21,0	2910	0,9	0,88	7,5	1,6	1,2	2,2	0,023	64

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
АИР160S2	15,0	29,0	2910	0,89	0,90	7,0	1,8	1,7	2,7	0,039	100
АИР80В4	1,5	3,5	1395	0,83	0,78	5,5	2,2	1,6	2,2	0,0033	12,1
АИР90L4	2,2	5,0	1395	0,83	0,81	6,5	2,1	1,6	2,2	0,0056	17
АИР100S4	3,0	6,7	1410	0,83	0,82	7,0	2,0	1,6	2,2	0,0087	21,6
АИР100L4	4,0	8,5	1410	0,84	0,85	7,0	2,0	1,6	2,2	0,011	27,3
АИР112М4	5,5	11,4	1430	0,86	0,855	7,0	2,0	1,6	2,5	0,017	41
АИР132S4	7,5	15,0	1440	0,86	0,875	7,5	2,0	1,6	2,5	0,028	53
АИР132М4	11,0	22,2	1445	0,86	0,875	7,5	2,0	1,6	2,7	0,040	70
АИР160S4	15,0	28,4	1455	0,89	0,90	7,0	1,9	1,8	2,9	0,078	100
АИР160М4	18,5	35,1	1455	0,89	0,905	7,0	1,9	1,8	2,9	0,1	110
АИР180S4	22,0	42,5	1460	0,87	0,905	7,0	1,7	1,5	2,4	0,15	170
АИР180М4	30,0	57,0	1470	0,87	0,92	7,0	1,7	1,5	2,7	0,19	190

### Технические данные электродвигателей серии РА основного исполнения

Тип	$P_{\text{н}}$ , кВт	$I_{\text{н}}$ , А	$n_{\text{н}}$ , об/мин	$\cos\varphi_{\text{н}}$	$\eta_{\text{н}}$	$\kappa_i$	$\mu_{\text{п}}$	$\mu_{\text{min}}$	$\mu_{\text{к}}$	$J_{\text{дв}}$ , кг·м <sup>2</sup>	$m$ , кг
РА90S2	1,5	3,0	2835	0,87	0,79	6,5	2,8	2,3	3,0	0,001	13
РА90L2	2,2	4,0	2820	0,87	0,82	6,5	2,9	2,4	3,4	0,0015	15
РА100L2	3,0	6,0	2895	0,86	0,83	7,0	2,4	2,0	2,6	0,0038	20
РА112М2	4,0	9,0	2895	0,87	0,84	6,8	2,2	1,9	3,3	0,0082	41
РА132SA2	5,5	11,0	2880	0,89	0,89	6,5	2,4	2,0	3,0	0,0155	43
РА132SB2	7,5	15,0	2890	0,89	0,89	7,0	2,5	2,1	3,2	0,0185	49
РА160МА2	11,0	22,0	2940	0,89	0,875	6,8	2,0	1,8	3,3	0,0438	112
РА160МВ2	15,0	29,0	2940	0,86	0,90	7,5	2,0	1,8	3,2	0,047	116
РА160L2	18,5	35,0	2940	0,88	0,90	7,5	2,0	1,8	3,2	0,0533	133
РА180М2	22,0	42,0	2940	0,89	0,905	7,5	2,1	1,8	3,5	0,0604	147
РА200LA2	30,0	55,0	2950	0,89	0,92	7,5	2,4	2,0	3,0	0,1164	170
РА200LB2	37,0	68,0	2950	0,89	0,92	7,5	2,4	2,0	3,0	0,1326	230
РА90L4	1,5	4,0	1420	0,80	0,785	5,5	2,3	1,9	2,8	0,0042	15,5
РА100LA4	2,2	5,0	1420	0,82	0,79	6,0	2,2	1,8	2,6	0,0048	22
РА100LB4	3,0	7,0	1420	0,81	0,81	6,2	2,2	1,9	2,6	0,0058	24
РА112М4	4,0	9,0	1430	0,84	0,855	6,5	2,2	1,9	2,9	0,0103	37
РА132S4	5,5	11,0	1450	0,85	0,85	7,0	2,4	2,0	3,0	0,0229	45
РА132М4	7,5	15,0	1455	0,83	0,83	7,0	2,8	2,3	3,2	0,0277	52
РА160МА4	11,0	22,0	1460	0,86	0,885	6,5	1,8	1,6	2,8	0,0613	110
РА160МL4	15,0	29,0	1460	0,87	0,90	7,0	1,9	1,6	2,9	0,0862	129
РА180М4	18,5	35,0	1460	0,89	0,905	7,0	1,9	1,6	2,9	0,1038	149
РА180L4	22,0	42,0	1460	0,88	0,91	7,0	2,1	1,6	2,9	0,1131	157
РА200L4	30,0	59,0	1475	0,86	0,91	7,7	2,7	2,2	3,2	0,32	200

**Технические данные электродвигателей серии 4А  
с повышенным пусковым моментом**

Тип	$P_n$ , кВт	$I_n$ , А	$n_n$ , об/мин	$\cos\varphi_n$	$\eta_n$	$K_i$	$\mu_n$	$\mu_{\min}$	$\mu_k$	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	$m$ , кг
4AP160S4	15,0	29,9	1470	0,87	0,875	7,5	2,0	1,6	2,2	0,1	160
4AP160M4	18,5	36,4	1475	0,87	0,885	7,5	2,0	1,6	2,2	0,13	160
4AP180S4	22,0	42,6	1475	0,87	0,90	7,5	2,0	1,6	2,2	0,19	175
4AP180M4	30,0	58,1	1475	0,87	0,90	7,5	2,0	1,6	2,2	0,23	195
4AP200M4	37,0	70,0	1480	0,88	0,91	7,5	2,0	1,6	2,2	0,37	270
4AP160S6	11,0	23,5	980	0,83	0,855	7,0	2,0	1,6	2,2	0,14	135
4AP160M6	15,0	31,3	980	0,83	0,875	7,0	2,0	1,6	2,2	0,18	160
4AP180M6	18,5	40,3	980	0,80	0,87	6,0	2,0	1,6	2,2	0,22	195
4AP200M6	22,0	43,3	985	0,85	0,905	6,5	2,0	1,6	2,2	0,40	270
4AP200L6	30,0	58,4	990	0,86	0,905	6,5	2,0	1,6	2,2	0,45	310
4AP225M6	37,0	73,7	990	0,84	0,905	7,0	2,0	1,6	2,2	0,74	355
4AP160S8	7,5	17,6	730	0,75	0,86	6,0	1,8	1,5	2,0	0,14	135
4AP160M8	11,0	25,5	735	0,75	0,87	6,0	1,8	1,5	2,0	0,18	160
4AP180M8	15,0	34,1	730	0,77	0,865	5,5	1,8	1,5	2,0	0,25	195
4AP200M8	18,5	40,8	730	0,78	0,88	5,5	1,8	1,5	2,0	0,40	270
4AP200L8	22,0	47,1	730	0,80	0,885	5,5	1,8	1,5	2,0	0,45	310
4AP225M8	30,0	63,1	735	0,80	0,90	5,5	1,8	1,5	2,0	0,74	355
4AP250S8	37,0	86,5	740	0,72	0,90	5,5	1,8	1,5	2,0	1,16	490
АИРР160S4	15		1455	0,87	0,90	7,5	2,1	1,7	3,2	0,1	130
АИРР160M4	18,5		1455	0,88	0,905	7,5	2,2	1,6	3,2	0,13	145
АИРР180S4	22		1455	0,81	0,905	6,5	2,1	1,6	2,2	0,19	170
АИРР180M4	30		1455	0,84	0,92	7,5	2	1,7	3	0,23	190
АИРР200M4	37		1460	0,87	0,92	6,5	2,5	2,2	2,6	0,37	245
АИРР200L4	45		1460	0,86	0,925	6,8	2,5	2,2	2,6	0,4	270
АИРР160S6	11		970	0,83	0,88	6,5	2,0	1,8	2,8	0,14	125
АИРР160M6	15		965	0,84	0,88	6,5	2,0	1,9	2,8	0,18	155
АИРР180M6	18,5		975	0,85	0,895	6,5	2,0	1,6	2,2	0,22	180
АИРР200M6	22		980	0,85	0,91	6,0	2,2	2,0	2,2	0,4	245
АИРР200L6	30		980	0,85	0,91	6,0	2,2	2,0	2,2	0,45	265
АИРР225M6	37		980	0,83	0,91	6,0	2,0	2,1	1,7	0,74	325
АИРР160S8	7,5		725	0,75	0,87	5,5	1,8	1,5	2,5	0,14	130
АИРР160M8	11		725	0,74	0,875	6,0	2,0	1,7	2,7	0,18	160
АИРР180M8	15		730	0,74	0,885	6,0	1,8	1,5	2,5	0,25	180
АИРР200M8	18,5		735	0,80	0,898	6,4	1,8	1,5	2,4	0,4	240
АИРР200L8	22,0		735	0,82	0,90	6,0	1,8	1,5	2,4	0,45	260
АИРР225M8	30,0		730	0,78	0,905	5,5	2,0	1,7	2,0	0,74	335

### Технические данные электродвигателей серии 4А с фазным ротором

Тип	$P_{н\gamma}$ кВт	$I_{н\gamma}$ , А	$n_{н\gamma}$ об/мин	$\eta_n$	$\cos\varphi_n$	$\mu_k$	Данные ротора	
							$I_{2н\gamma}$ , А	$E_{2к\gamma}$ , В
4АК160S4	11,0	22,4	1435	0,865	0,86	3,0	22	305
4АК160M4	14,0	27,5	1445	0,885	0,87	3,5	29	300
4АК180M4	18,5	35,8	1455	0,89	0,88	4,0	38	295
4АК200M4	22,0	42,6	1465	0,9	0,87	4,0	45	340
4АК200L4	30,0	57,7	1465	0,905	0,87	4,0	55	350
4АК225M4	37,0	71,6	1450	0,9	0,87	3,0	160	160
4АК160S6	7,5	18,0	950	0,825	0,77	3,5	18	300
4АК160M6	10,0	24,0	960	0,845	0,76	3,8	20	310
4АК180M6	13,0	29,0	955	0,855	0,80	4,0	25	325
4АК200M6	18,5	39,5	965	0,88	0,81	3,5	35	360
4АК200L6	22,0	47,5	965	0,88	0,80	3,5	45	330
4АК225M6	30,0	60,0	965	0,89	0,85	2,5	150	140
4АК250S6	37,0	75,0	965	0,89	0,84	2,5	165	150
4АНК160S8	5,5	14,9	700	0,80	0,70	2,5	14	300
4АНК160M8	7,5	19,8	705	0,82	0,70	3,0	16	240
4АНК180M8	11	27,1	720	0,855	0,72	3,5	25	270
4АНК200M8	15	34,8	725	0,86	0,70	3,0	28	360
4АНК200L8	18,5	44,6	725	0,86	0,73	3,0	40	300
4АНК225M8	22	46,7	715	0,87	0,82	2,2	140	102
4АНК250L8	30	63,1	720	0,885	0,81	2,2	155	125
4АНК250M8	37	78,7	725	0,89	0,80	2,2	155	148
4АНК160S4	14	28,9	1425	0,865	0,85	3,0	27	330
4АНК160M4	17	33,6	1425	0,88	0,87	3,5	34	315
4АНК180S4	22	44,6	1420	0,87	0,86	3,2	43	300
4АНК180M4	30	63,8	1430	0,88	0,81	3,3	63	290
4АНК200M4	37	70,9	1455	0,90	0,88	3,0	62	360
5АНК200M4	30	58	1439	0,89	0,88	3,0	76	255
5АНК200L4	37	71	1448	0,89	0,88	3,0	74	316
5АНК200M6	18,5	39	949	0,865	0,81	2,8	65	187
5АНК200L6	22	46	955	0,875	0,82	2,8	63	224
5АНК225MA6	30	60	955	0,875	0,85	2,2	86	227
5АНК225MB6	37	74	964	0,89	0,85	2,2	82	287
5АНК250S6	45	88	966	0,89	0,85	2,2	90	320
5АНК200M8	15	37	706	0,85	0,73	2,2	64	153
5АНК200L8	18,5	44	712	0,86	0,73	2,2	64	187
5АНК225MA8	22	49	710	0,86	0,78	2,0	90	161
5АНК225MB8	30	66	713	0,87	0,79	2,0	97	200
5АНК250S8	37	79	715	0,875	0,79	2,0	110	218

**Технические данные электродвигателей серии 4А с повышенным скольжением**

Тип	$P_{н\delta}$ , кВт при ПВ = 40 %	$n_{н\delta}$ , об/мин	$I_{н\delta}$ , А	$\eta_{н\delta}$	$\cos\varphi_{н\delta}$	$k_i$	$\mu_{п}$	$\mu_{min}$	$\mu_k$	Наибольшая допустимая мощность (кВт) при ПВ, %			$J$ , кг·м <sup>2</sup>	$m$ , кг
										15	25	60		
4АС90L4	2,4	1360	5,9	0,76	0,82	6,0	2,0	1,6	2,2	3,1	2,4	2,2	0,0055	28,7
4АС100S4	3,2	1395	7,8	0,77	0,82	6,0	2,0	1,6	2,2	4,0	3,7	2,8	0,0088	36
4АС100L4	4,25	1395	10,1	0,78	0,82	6,0	2,0	1,6	2,2	5,5	5,0	3,8	0,011	42
4АС112M4	5,6	1395	13,0	0,79	0,83	7,0	2,0	1,6	2,2	8,0	6,7	5,0	0,017	56
4АС132S4	8,5	1395	18,4	0,83	0,85	7,0	2,0	1,6	2,2	11,8	9,5	7,5	0,028	77
4АС132M4	11,8	1410	25,0	0,84	0,85	7,0	2,0	1,6	2,2	16,0	14,0	10,0	0,04	93
4АС160S4	17,0	1425	33,3	0,85	0,86	7,0	2,0	1,6	2,2	22,0	19,0	15,0	0,1	135
4АС160M4	20,0	1430	37,6	0,87	0,87	7,0	2,0	1,6	2,2	25,0	23,0	18,5	0,13	160
4АС180S4	21,0	1420	40,3	0,86	0,82	7,0	2,0	1,6	2,2	26,5	24,0	20,0	0,19	175
4АС180M4	26,5	1440	50,0	0,89	0,91	7,0	2,0	1,6	2,2	32,0	30,0	25,0	0,23	195
4АС200M4	31,5	1410	59,4	0,88	0,92	7,0	2,0	1,6	2,2	42,0	35,0	28,0	0,38	270
4АС200L4	40,0	1410	73,5	0,89	0,93	7,0	2,0	1,6	2,2	50,0	47,5	37,5	0,445	310
4АС80B2	2,5	2870	5,7	0,76	0,87	6,5	2,0	1,6	2,2	3,2	2,7	2,2	0,0021	20,4
4АС90L2	3,5	2870	7,7	0,80	0,86	6,5	2,0	1,6	2,2	4,6	4,0	3,2	0,0035	28,7
4АС100S2	4,8	2890	10,3	0,82	0,86	7,5	2,0	1,6	2,2	6,0	5,0	4,2	0,0059	36
4АС100L2	6,3	2910	13,5	0,82	0,86	7,5	2,0	1,6	2,2	8,4	7,0	5,8	0,0075	42
4АС112M2	8,0	2890	17,2	0,84	0,84	7,5	2,0	1,6	2,4	11,0	9,5	7,1	0,01	56
4АС132M2	11,0	2860	22,3	0,84	0,89	7,5	2,0	1,6	2,4	17,0	14,0	11,0	0,023	93

Технические данные электродвигателей серий 5А, 6А и 7А по нормам SENELEC, класс нагревостойкости изоляции F

Тип двигателя	$P_{н\delta}$ , кВт	$n_{н\delta}$ , об/мин	$\eta_{н\delta}$ , %	$\cos\varphi_{н\delta}$	$I_{н\delta}$ , А	$M_{н\delta}$ , Н·м	Индекс механической характеристики				$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	$m_{дв}$ , кг	Сервис-фактор
							$\mu_{п}$	$\kappa_i$	$\mu_{к}$	$\mu_{к}$			
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
5A90S2K	1,5	2850	80,0	0,84	3,2	5,0	I	2,4	6,5	2,5	0,0018	14,3	1,15
5A90L2K	2,2	2850	81,0	0,85	4,6	7,4	I	2,7	6,5	2,8	0,0021	15,8	1,15
6AM132SA2	5,5	2915	87,0	0,87	10,5	18,0	I	2,5	7,5	3,3	0,0100	44	1,15
6A132SA2	5,5	2915	87,0	0,87	10,5	18,0	I	2,5	7,5	3,3	0,0100	55	1,15
6AM132SB2	7,5	2920	88,0	0,89	13,8	24,5	I	2,4	7,5	3,3	0,0131	48,5	1,15
6A132SB2	7,5	2920	88,0	0,89	13,8	24,5	I	2,4	7,5	3,3	0,0131	58,5	1,15
7AVEC160MA2ie1C	11	2920	88,4	0,89	21,3	36,1	I	2,0	7,3	2,8	0,030	109	1,15
7AVEC 160MA2ie2C	11	2920	89,5	0,90	20,8	36,1	I	2,3	7,8	3,1	0,034	115	1,15
7AVEC 160MB2ie1C	15	2920	89,4	0,89	28,7	49,5	I	2,2	7,3	3,0	0,034	114	1,15
7AVEC 160MB2ie2C	15	2920	91,3	0,90	27,8	49,5	I	2,4	7,7	3,2	0,039	120	1,15
7AVEC 160MB2ie1	15	2920	89,4	0,89	28,7	49,5	I	2,2	7,3	3,0	0,034	98	1,15
7AVEC 160MB2ie2	15	2920	91,3	0,90	27,8	49,5	I	2,4	7,7	3,2	0,039	104	1,15
7AVEC 160L2ie1	18,5	2920	90,0	0,89	35,1	60,5	I	2,2	7,0	2,9	0,039	104	1,15
7AVEC 160L2ie2	18,5	2920	91,8	0,90	34,1	60,5	I	2,4	7,4	3,1	0,045	112	1,15
6AM180M2	22	2915	90,5	0,89	39,4	72,1	I	2,3	6,8	2,9	0,052	118	1,15
6AM200LA2	30	2940	91,5	0,89	53,2	97,4	I	2,1	6,8	3,0	0,076	185	1,10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5A200LB2K	37	2940	93,0	0,90	63,8	120	I	2,3	7,4	3,0	0,13	255	1,15
5A225M2K	45	2940	93,4	0,90	77,3	146	I	2,4	7,4	3,0	0,15	275	1,10
5A250M2K	55	2950	93,4	0,91	93,4	178	I	2,3	7,5	2,8	0,21	340	1,10
5A90S4K	1,1	1410	73,0	0,79	2,8	7,5	I	2,0	4,8	2,3	0,0034	13,3	1,15
5A90L4K	1,5	1410	75,0	0,81	3,6	10,2	I	1,9	5,0	2,2	0,0036	15	1,15
6AM132S4	5,5	1440	86,0	0,85	10,9	36,5	I	2,4	7,0	3,0	0,02	48,5	1,15
6AM132M4	7,5	1450	87,5	0,86	14,4	49,4	I	2,3	7,0	2,9	0,025	64	1,15
7AVEC 160M4ie1 C	11	1450	88,4	0,82	23,1	72,4	I	2,1	6,5	2,6	0,06	113	1,15
7AVEC 160M4ie2C	11	1450	91,0	0,82	22,4	72,4	I	2,5	7,5	3,0	0,07	121	1,15
7AVEC 160M4ie1	11	1450	88,4	0,82	23,1	72,4	I	2,1	6,5	2,6	0,06	97	1,15
7AVEC160M4ie2	11	1450	91,0	0,82	22,4	72,4	I	2,5	7,5	3,0	0,07	110	1,15
7AVEC 160L4ie1 C	15	1450	89,4	0,82	31,1	98,8	I	2,2	6,0	2,6	0,07	121	1,15
7AVEC 160L4ie2C	15	1450	91,8	0,82	30,3	98,8	I	2,4	7,2	3,0	0,087	136	1,15
7AVEC 160L4ie1	15	1450	89,4	0,82	31,1	98,8	I	2,2	6,0	2,6	0,07	105	1,15
7AVEC 160L4ie2	15	1450	91,8	0,82	30,3	98,8	I	2,4	7,2	3,0	0,087	120	1,15
6AM180M4	18,5	1450	90,0	0,86	34,5	122	I	2,2	6,5	2,6	0,087	121	1,15
6AM180L4	22	1450	90,5	0,84	41,8	145	I	2,3	6,1	2,6	0,096	131	1,15
6A180L4	22	1450	90,5	0,84	41,8	145	I	2,3	6,1	2,6	0,096	152	1,15
6AM200L4	30	1455	91,4	0,86	55,1	197	I	2,5	6,8	2,6	0,20	190	1,10
5A225S4K	37	1470	92,0	0,85	68,3	240	I	2,4	6,7	2,5	0,27	260	1,15
5A225M4K	45	1470	92,5	0,85	82,6	292	I	2,8	7,1	2,8	0,32	280	1,10
5A250M4K	55	1475	93,0	0,86	99,3	356	I	2,2	6,5	2,2	0,50	350	1,10



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5A280S4K	75	1485	94,3	0,85	135	482	II	2,2	7,2	2,3	1,00	490	1,15
5A280M4K	90	1485	95,0	0,88	155	579	II	2,2	7,3	2,3	1,20	525	1,15
5A90L6K	1,1	930	71	0,69	3,2	11,3	I	2,0	4,5	2,3	0,0048	16,3	1,15
6AM132S6	3	950	81	0,78	6,9	30,2	I	2,3	5,5	2,8	0,024	43	1,15
6AM132MA6	4	955	82	0,78	9,0	40,0	I	2,2	5,5	2,6	0,029	47,5	1,15
6AM132MB6	5,5	955	84,5	0,80	11,7	55,0	I	2,2	6,0	2,8	0,036	63	1,15
6A132MB6	5,5	955	84,5	0,80	11,7	55,0	I	2,2	6,0	2,8	0,036	74	1,15
7AVEC 160M6ie1 C	7,5	960	84,5	0,78	17,3	74,6	I	2,0	6,8	2,7	0,083	107	1,15
7AVEC 160M6ie2C	7,5	960	86	0,79	16,8	74,6	I	2,1	7,5	3,0	0,011	118	1,15
7AVEC 160M6ie1	7,5	960	84,5	0,78	17,3	74,6	I	2,0	6,8	2,7	0,083	93	1,15
7AVEC 160M6ie2	7,5	960	86	0,79	16,8	74,6	I	2,1	7,5	3,0	0,011	104	1,15
6AM160L6	11	970	87,0	0,82	22,3	108	I	1,9	6,5	2,5	0,11	109	1,15
7AVEC 160L6ie1 C	11	970	87	0,81	23,7	108	I	1,9	6,1	2,5	0,011	119	1,15
7AVEC 160L6ie2C	11	970	88,5	0,80	23,6	108	I	2,1	7,2	2,7	0,013	133	1,15
7AVEC 160L6ie1	11	970	87	0,81	23,7	108	I	1,9	6,1	2,5	0,011	104	1,15
6AM180L6	15	970	88,5	0,83	29,5	148	I	2,0	6,8	2,7	0,15	130	1,15
6AM200LA6	18,5	975	89	0,84	35,7	181	I	2,0	6,5	2,8	0,24	160	1,15
5A200LB6K	22	975	90,5	0,83	42,3	216	I	2,2	6,0	2,2	0,41	250	1,15
5A225M6K	30	975	90,5	0,84	57,0	294	I	2,4	6,0	2,2	0,46	285	1,10
5A250M6K	37	975	91,5	0,84	69,5	361	I	2,3	6,2	2,5	0,65	335	1,15
6AM132S8	2,2	710	77,0	0,70	5,9	29,6	I	2,0	4,5	2,5	0,024	42,5	1,15
6AM132M8	3	710	78,0	0,70	7,9	40,4	I	2,0			0,029	47	1,15

Окончание таблицы прил. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
7AVEC 160MA8	4	715	86	0,70	10,1	53,4	I	2	5	2,5	0,072	87	1,15
6AM160MB8	5,5	715	83,0	0,73	13,1	73,5	I	2,0	5,3	2,5	0,074	75	1,15
7AVEC 160MB8	5,5	715	87	0,71	13,5	73,5	I	2	5,3	2,5	0,09	98	1,15
7AVEC160L8	7,5	725	82	0,72	19,3	98,8	II	1,6	5	2,2	0,11	108	1,15
6AM180L8	11	725	87,0	0,74	24,7	145	II	1,6	5,0	2,2	0,15	125	1,15
6AM200L8	15	730	88,0	0,75	32,8	196	II	1,9	6,2	2,3	0,25	160	1,15
5A225S8K	18,5	735	90,0	0,76	39,0	240	II	2,0	6,4	2,7	0,41	250	1,15
5A225M8K	22	735	90,0	0,77	45,8	286	II	2,0	6,2	2,6	0,46	265	1,15
5J1250M8K	30	735	91,0	0,78	61,0	300	II	2,1	5,5	2,2	0,70	345	1,15
5A280S8K	37	740	92,0	0,73	79,5	478	II	1,8	6,5	2,6	1,20	440	1,15
5A280M8K	45	740	93,0	0,75	93,1	581	II	1,8	6,8	2,6	1,40	470	1,15
6A315S8	55	740	93,6	0,83	102	710	V	1,9	5,9	2,0	3,29	705	1,15

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов А.М., Шаповалов А.Т., Кожевников С.А. Основы электропривода и автоматическое управление электроприводом в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1972. – 344 с.
2. Герасенков А.А., Кабдин Н.Е. Автоматизированный электропривод. Основные понятия, терминология и условные обозначения. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2009. – 108 с.
3. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. – М.: МЭИ, 2003. – 226 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
5. Малайчук Л.М., Гуцинский А.Г., Елифанов А.П. Электропривод в сельском хозяйстве. – СПб.: Лань, 2012. – 224 с.
6. Онищенко Г.Б. Электрический привод. – М.: РАСХН, 2003. – 314 с.
7. Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов [и др.]. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
8. Романов А.В. Электрический привод: курс лекций. – Воронеж: Воронежский гос. техн. ун-т, 2006. – 144 с.
9. Флоров Ю.М., Шелякин В.П. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2012. – 368 с.
10. Шичков Л.П., Коломиец А.П. Электрооборудование и средства автоматизации сельскохозяйственной техники. – М.: Колос, 1995. – 368 с.

*Учебное издание*

КАБДИН Николай Егорович  
СТОРЧЕВОЙ Владимир Фёдорович

ЭЛЕКТРОПРИВОД

*Учебник*

*Издается в авторской редакции*

Техн. редактор *Т.Б. Самсонова*

Подписано в печать 18.08.2021. Формат 60×84/16.  
Печ. л. 17,75. Уч.-изд. л. 16,1. Тираж 500 экз. Заказ № 551.

Отпечатано в АНО Редакция журнала «МЭСХ»  
127412, Москва, ул. Б. Академическая, д. 44, корп. 2,  
e-mail: t\_sams@mail.ru