

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

А.А. КУВШИНОВ, Э.Л. ГРЕКОВ

# ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
ЧАСТЬ 1

Рекомендовано Ученым советом государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности 140604 - Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов

Оренбург  
ИПКГОУОГУ  
2009

УДК 62-83 (075 8)  
ББК 31.291 Я 73  
К 88

Рецензент

доктор технических наук, профессор А.Я. Микитченко

**Кувшинов А.А.**  
**К 88 Теория электропривода: конспект лекций: в 2 ч. /**  
**А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009.**  
**Ч. 1, 2009. - 197 с.**

ISBN

Учебное пособие предназначено для студентов электротехнических специальностей очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Теория электропривода», «Основы электропривода» и «Электрический привод».

ББК 31.291 Я 73

К  $\frac{2202090100}{6Л9-09}$

ISBN

© Кувшинов А.А., 2009  
© Греков Э.Л., 2009  
© ГОУ ОГУ, 2009

## Содержание

Введение .....	6
1 Механика электропривода.....	13
1.1 Механические звенья .....	13
1.2 Механические характеристики .....	15
1.3 Типовые статические нагрузки электропривода.....	16
1.4 Расчетные схемы механической части электропривода .....	21
1.4.1 Приведение механических координат электропривода к скорости (валу) двигателя .....	22
1.4.2 Составление расчетных схем механической части электропривода.....	24
1.5 Уравнения движения электропривода.....	29
1.5.1 Уравнения движения электропривода с линейными механическими связями.....	29
1.5.2 Уравнения движения электропривода с нелинейными механическими связями.....	32
1.5.3 Режимы работы электропривода .....	34
1.6 Механическая часть электропривода как объект управления.....	35
1.7 Механические переходные процессы электропривода.....	40
1.8 Динамические нагрузки электропривода .....	47
1.9 Выводы по главе .....	53
1.10 Литература, рекомендуемая для изучения .....	54
2 Свойства электромеханических преобразователей постоянного тока..	55
2.1 Математическое описание процессов преобразования энергии в двигателе с независимым возбуждением .....	55
2.2 Статические свойства двигателя с независимым возбуждением .....	60
2.2.1 Естественные и искусственные характеристики двигателя с независимым возбуждением .....	60
2.2.2 Тормозные режимы двигателя с независимым возбуждением.....	67
2.3 Динамические свойства электромеханического преобразователя с независимым возбуждением .....	74
2.4 Математическое описание процессов преобразования энергии в двигателе с последовательным возбуждением.....	81
2.5 Статические свойства двигателя с последовательным возбуждением.....	83
2.5.1 Естественные и искусственные характеристики двигателя с последовательным возбуждением.....	83
2.5.2 Тормозные режимы двигателя с последовательным возбуждением.....	89

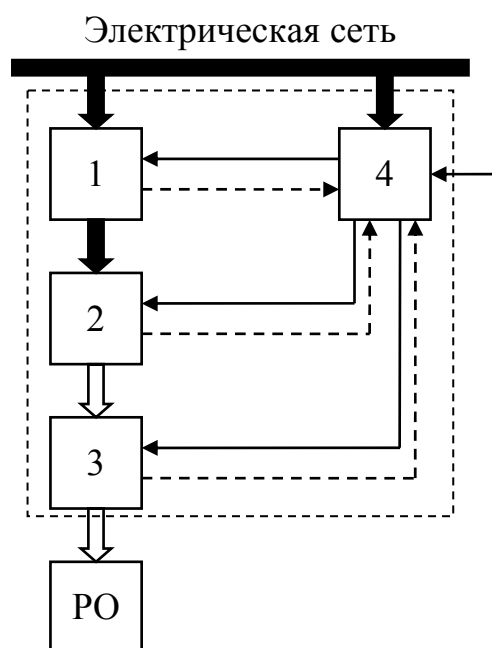
2.6	Динамические свойства электромеханического преобразователя с последовательным возбуждением.....	94
2.7	Статические характеристики двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением.....	97
2.8	Выводы по главе .....	100
2.9	Литература, рекомендуемая для изучения .....	101
3	Свойства электромеханических преобразователей переменного тока	102
3.1	Статические свойства асинхронного двигателя .....	103
3.1.1	Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя.....	110
3.1.2	Искусственные статические характеристики асинхронного двигателя.....	112
3.1.3	Особенности статических характеристик асинхронного короткозамкнутого двигателя.....	116
3.1.4	Тормозные режимы асинхронного двигателя.....	118
3.2	Динамические свойства асинхронного электромеханического преобразователя при питании от источника напряжения.....	122
3.3	Статические характеристики и динамические свойства асинхронного электромеханического преобразователя при питании от источника тока.....	126
3.4	Динамическое торможение асинхронного двигателя с независимым возбуждением .....	133
3.5	Статические свойства синхронного двигателя.....	135
3.6	Пусковые и тормозные режимы синхронного двигателя .....	140
3.7	Динамические свойства синхронного двигателя .....	142
3.8	Регулирование реактивной мощности синхронного двигателя .....	145
3.9	Шаговый режим работы синхронного электромеханического преобразователя .....	148
3.10	Выводы по главе .....	150
3.11	Литература, рекомендуемая для изучения .....	153
4	Расчет мощности и выбор электродвигателей .....	154
4.1	Общие положения.....	154
4.2	Потери энергии в установившихся режимах работы электропривода .....	154
4.3	Потери энергии в переходных режимах работы электропривода .....	160
4.3.1	Переменные потери энергии в электроприводах с нерегулируемой скоростью идеального холостого хода .....	161
4.3.2	Потери энергии в электроприводах со ступенчатым регулированием скорости идеального холостого хода .....	163

4.3.3	Потери энергии в электроприводах с плавным изменением скорости идеального холостого хода.....	164
4.3.4	Полные потери энергии в электроприводе с учетом статической нагрузки.....	166
4.4	Нагревание и охлаждение двигателей .....	167
4.5	Нагрузочные диаграммы электроприводов .....	170
4.5.1	Нагрузочные диаграммы механизмов непрерывного действия.....	171
4.5.2	Нагрузочные диаграммы механизмов циклического действия .....	174
4.6	Номинальные режимы работы двигателя .....	175
4.7	Расчет мощности двигателя при продолжительном режиме работы..	179
4.7.1	Постоянная нагрузка (режим S1).....	179
4.7.2	Переменная нагрузка (режимы S6, S7, S8).....	180
4.8	Расчет мощности двигателя при кратковременном режиме работы S2184	
4.9	Расчет мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы S3, S4, S5 .....	188
4.10	Допустимая частота включений асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором .....	190
4.11	Выводы по главе .....	194
4.12	Литература, рекомендуемая для изучения .....	195
	Список использованных источников.....	197

## Введение

**Электрическим приводом** 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 (ГОСТ Р 50369-92).

Ниже приведена структурная схема электрического привода, где показано взаимодействие преобразовательного 1, электродвигательного 2, передаточного 3 и управляющего 4 устройств для приведения в движение рабочего органа машины РО.



Рисунок

**Преобразовательное устройство** является согласующим звеном между электрической сетью и двигателем и управляет потоком электрической энергии для регулирования режимов работы двигателя и механизма. Оно представляет собой энергетическую исполнительную часть системы управления электроприводом.

**Электродвигательное устройство** – это различные выпускаемые электротехнической промышленностью двигатели, отличающиеся по принципу действия, роду тока, исполнению, степени защищенности и т.п.

**Передающее устройство** является согласующим звеном между двигателем и рабочим органом исполнительного механизма и содержит механические передачи и соединительные муфты, которые передают вырабатываемую электрическим двигателем механическую энергию исполнительному механизму.

**Управляющее устройство** предназначено для фиксации и обработки поступающей информации о задающих воздействиях и состоянии электромеханической системы и выработки сигналов управления преобразовательным, электродвигательным и передающим устройствами. Оно представляет собой информационную слаботочную часть системы управления электроприводом.

Электрический привод, как техническое устройство, появился тогда, когда основным источником механической энергии являлся паровой двигатель. Поэтому на первых порах электрический двигатель просто заменял паровую машину, приводящую в движение трансмиссии завода или цеха. Такая замена была прогрессивна, так как появлялась возможность централизованного производства электрической энергии и распределения ее по предприятиям с помощью электрической сети.

Следующим шагом в развитии электропривода явилась установка электрических двигателей на каждую рабочую машину. Но в случае, если рабочая машина имела несколько исполнительных механизмов, распределение механической энергии между ними производилось при помощи кинематических передач. Таким образом, функции электропривода в обоих случаях одинаковы: преобразовывать электрическую энергию в механическую и приводить в движение исполнительные механизмы.

Такие электроприводы, когда от одного электрического двигателя приводятся в движение несколько рабочих машин или несколько исполнительных механизмов одной машины, называются **групповыми электроприводами**.

Групповые электроприводы предприятий и цехов были быстро вытеснены более совершенными групповыми электроприводами рабочих машин, которые применяются до сих пор. Рабочие машины с такими электроприводами имеют сложную кинематику, снижающую точность выполнения технологических процессов и надежность оборудования. Но основным недостатком таких электроприводов является невозможность всестороннего управления технологическим процессом рабочей машины с несколькими рабочими органами из-за механической связи между ними. Все это привело к замене группового электропривода индивидуальным.

**Индивидуальным электроприводом** называется такой электропривод, когда каждый рабочий орган машины приводится в движение от-

дельным электрическим двигателем. Иногда один рабочий орган машины может приводиться в движение несколькими двигателями, и тогда индивидуальный электропривод называется **многодвигательным электроприводом**.

Только индивидуальный электропривод позволяет не только преобразовывать электрическую энергию в механическую, но и управлять технологическим процессом каждого рабочего органа машины, осуществлять связанное автоматическое управление взаимодействующими в технологическом процессе рабочими органами одной машины и отдельными механизмами. Электрический привод органически сливается с приводимым в движение рабочим органом машины в единую систему, от физических свойств которой зависят технические и экономические показатели работы механизма. К этим показателям относятся производительность механизма, точность выполнения технологических операций, динамические нагрузки на механические передачи и ряд других факторов.

Как объект изучения индивидуальный электропривод вместе с рабочим органом машины представляет собой единую систему, электрическая часть которой состоит из электромеханического преобразователя энергии и его системы управления, а механическая часть включает в себя все связанные движущиеся массы привода и механизма.

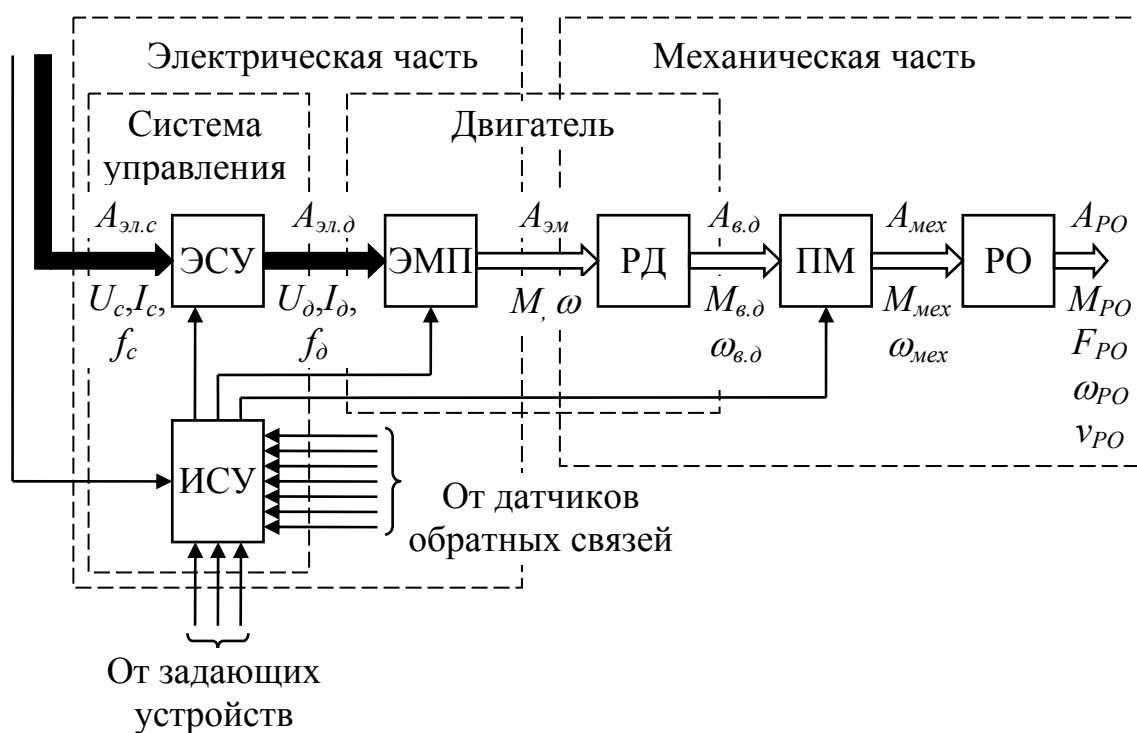
Соответствующая этому представлению структура индивидуального электропривода представлена ниже. Потребляемая из сети электрическая энергия  $A_{эл.с}$  с параметрами  $U_c, I_c, f_c$  поступает в энергетическую часть системы управления ЭСУ. В качестве ЭСУ в простейшем случае может быть автоматический выключатель или контактор, который подает электрическую энергию на двигатель от трансформатора или напрямую от сети. В более сложном случае под ЭСУ подразумевается один из управляемых преобразователей постоянного или переменного тока, обеспечивающих двигатель электрической энергией с переменными параметрами  $U_d, I_d, f_d$ . Электрическая энергия  $A_{эл.д}$  потребляется двигателем и преобразуется в механическую энергию.

Непосредственно электромеханическое преобразование энергии осуществляется в части двигателя, называемой электромеханическим преобразователем ЭМП, который можно представить как идеализированный двигатель, ротор которого не обладает механической инерцией и не имеет механических потерь. Вырабатываемая ЭМП энергия  $A_{ЭМ}$  передается реальному ротору двигателя РД, который, как механическое звено, входит в механическую часть электропривода. Эта энергия частично расходуется на увеличение кинетической энергии ротора и на преодоление механических потерь в двигателе. Оставшаяся часть механической энергии  $A_{е.д}$  поступает



через передаточный механизм ПМ на рабочий орган, уменьшаясь при этом до величины  $A_{мех}$ . На пути от вала двигателя до рабочего органа РО часть энергии затрачивается на увеличение кинетической энергии движущихся масс ПМ и РО, а также на преодоление всех механических потерь в ПМ и РО. Оставшаяся механическая энергия  $A_{РО}$  представляет собой полезную механическую работу, которая совершается моментом  $M_{РО}$  или усилием  $F_{РО}$  на рабочем органе при скорости  $\omega_{РО}$  или  $v_{РО}$ .

Следует отметить, что возможны такие режимы работы электропривода, в которых осуществляется передача энергии от РО в электрическую сеть. В этом случае уже механическая энергия, проходя путь преобразования в электрическую энергию, уменьшается до  $A_{эл.с.}$



Рисунок

Таким образом, электропривод при изучении и синтезе включает в себя три существенно различные части:

- механическая часть, законы движения которой исследуются методами теоретической механики;
- электромеханический преобразователь с энергетической системой управления, электромагнитные процессы в которых описаны и исследованы в теоретических основах электротехники, теории электрических машин и преобразовательной технике;
- информационная система управления, общие математические методы анализа и синтеза которой разработаны в теории автоматического управления.

Теория электропривода изучает взаимодействие этих трех частей в единой электромеханической системе при широком использовании методов механики, электромеханики, электротехники, преобразовательной техники и теории автоматического управления.

Индивидуальный автоматизированный электропривод в настоящее время широко применяется во всех областях деятельности человека, и совершенствование технических показателей электроприводов является основой технического прогресса.

Широта применения определяет большой диапазон мощностей электроприводов (от долей ватта до десятков тысяч киловатт) и значительное разнообразие их исполнения. Прокатные станы в металлургической промышленности, шахтные подъемные машины, экскаваторы в горнодобывающей промышленности, мощные строительные и монтажные краны, протяженные высокоскоростные конвейерные установки, мощные металлорежущие станки оборудуются электроприводами мощностью в сотни и тысячи киловатт. Преобразовательными устройствами для таких электроприводов служат генераторы постоянного тока и полупроводниковые преобразователи постоянного и переменного тока соответствующей мощности. В их управляющих устройствах используется микроэлектроника и зачастую управляющие вычислительные машины (микроконтроллеры, процессоры цифровой обработки сигналов, промышленные компьютеры и т.д.).

Аналогичной схемотехникой обеспечиваются и многие электроприводы малой мощности (высокоточные станки, роботы и манипуляторы). В современных электроприводах широко используются системы с программным управлением, с возможностью автоматической оптимизацией тех или иных параметров технологических процессов и самого электропривода.

Кроме регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока широко применяются нерегулируемые электроприводы переменного тока с асинхронными и синхронными двигателями. Однако управляющие устройства таких электроприводов постоянно усложняются в соответствии с требованиями технологических процессов, включающих повышение надежности работы установки, усложнение технических блокировок между механизмами. В таких управляющих устройствах широко используется современная вычислительная техника на базе специализированных микропроцессоров.

Индивидуальный электропривод является основным исполнительным элементом электромеханических систем комплексной механизации и автоматизации, непосредственно осуществляющим рабочие операции. По-

этому технические возможности электроприводов в технологической автоматике играют важную роль, а решение задач комплексной механизации и автоматизации, повышения качества, надежности, экономичности и производительности машин требует дальнейшего совершенствования и развития электропривода.

Одним из основных направлений развития электропривода в настоящее время является расширение области применения регулируемых электроприводов переменного тока, использующих двигатели более простой конструкции и с меньшей металлоемкостью. Современный уровень развития полупроводниковой преобразовательной техники позволяет решить эту задачу.

Вторым направлением развития современного электропривода следует считать совершенствование систем управления электроприводами. Постоянное повышение технологических требований к динамическим и точностным показателям работы электропривода, расширение и усложнение его функций по управлению технологическими процессами требуют создания систем числового программного управления и более широкого применения современной вычислительной техники (микропроцессоров, промышленных контроллеров и компьютеров).

Третьим направлением развития электропривода является унификация его элементной базы, создание унифицированных комплектных электроприводов с использованием современной микроэлектроники и блочно-модульного принципа. На этой основе уже созданы серии комплектных тиристорных и транзисторных электроприводов постоянного и переменного тока.

Четвертым направлением развития современного электропривода является тенденция к упрощению кинематики машин и механизмов за счет усложнения обслуживающих их электроприводов. Примером может служить создание безредукторных электроприводов прокатных станов, шахтных подъемных машин, основных механизмов экскаваторов, скоростных лифтов, в которых используются тихоходные двигатели с номинальной скоростью вращения 8–120 об/мин. Другим примером этого направления является развитие электроприводов с линейными двигателями, предельно упрощающих кинематику механизмов с поступательным движением рабочих органов. Здесь электропривод органически вписывается в общую конструкцию машины.

Тенденция упрощения кинематики рабочей машины приводит к конструктивному слиянию двигателя и механизма. Примерами таких устройств являются: электроинструменты; двигатели приводов роботов и манипуляторов (шарнирные соединения); электроприводы подъемных лебе-

док, в которых двигатели объединены с барабаном, выполняющим функции ротора; двигатель-ролики рольгангов в прокатном производстве.

Наконец, важнейшим направлением развития современного электропривода является снижение энергопотребления вновь создаваемых и уже существующих электроприводов. Важность этого направления обусловлена тем, что электропривод, как преобразователь электрической энергии в механическую, потребляет более половины производимой в нашей стране электроэнергии. Задача снижения энергопотребления должна решаться всеми возможными способами. Во-первых, это повышение КПД всех составляющих электропривода, начиная с ЭСУ и кончая РО. Во-вторых, это организация управления работой машины (электроприводов), исключая или минимизирующая непроизводительное потребление электроэнергии. В-третьих, это создание таких электроприводов, которые либо дополнительно повышают производительность труда, либо экономят электроэнергию не в самом электроприводе, а в том процессе, который он обслуживает (например, замена задвижек в продуктопроводах на регулируемые электроприводы насосов и компрессоров).

В настоящем пособии рассматриваются следующие вопросы:

- математическое описание механической части электропривода;
- статические и динамические характеристики электромеханических преобразователей постоянного и переменного тока;
- расчет потерь энергии в электроприводе и необходимой мощности двигателя.

В конце каждой главы приводятся основные выводы.

# 1 Механика электропривода

## 1.1 Механические звенья

Механическая часть электропривода передает механическую энергию от электромеханического преобразователя ЭМП к производственной машине, где эта энергия реализуется в полезную работу. Конструктивное исполнение механической части электропривода имеет бесчисленное множество вариантов, но, если абстрагироваться от конкретных конструкторских решений, любой электропривод содержит определенные механические звенья с общими для разных приводов функциями (рисунок 1.1а).

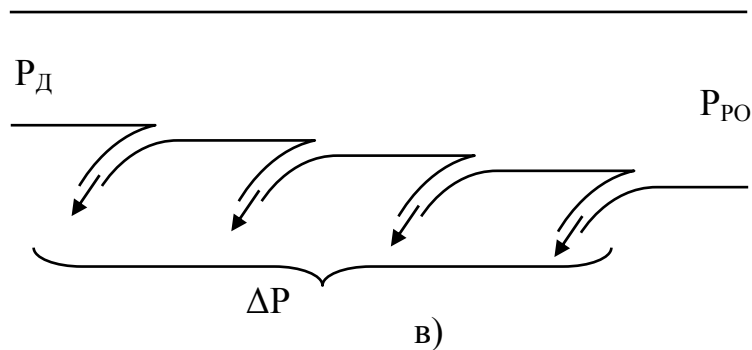
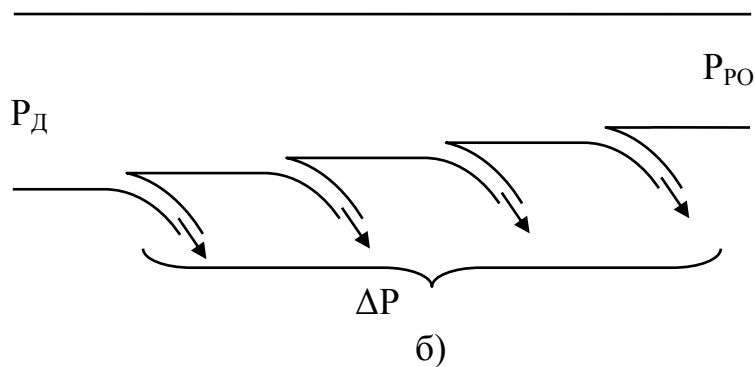
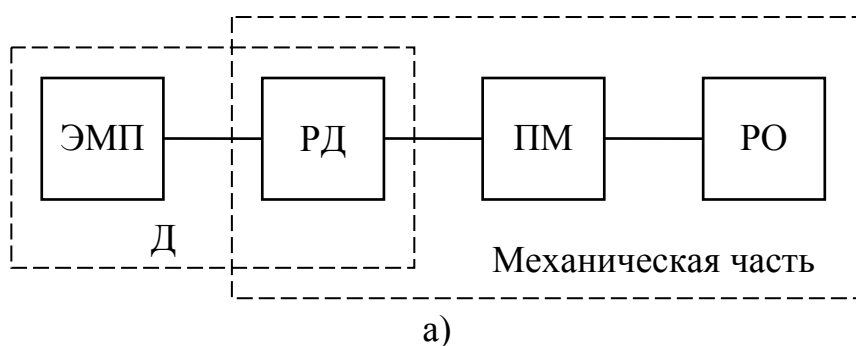


Рисунок 1.1

Электрический двигатель Д, как звено механической части электропривода, является источником или потребителем механической энергии в зависимости от направления ее потока. В механическую часть привода входит лишь ротор (якорь) двигателя РД, который обладает определенным моментом инерции, может вращаться с определенной скоростью под действием движущего или тормозного момента, развиваемого ЭМП.

Передаточный механизм ПМ преобразует движение в механической части электропривода (увеличивает или уменьшает скорость, изменяет вид движения и т.п.). К передаточным механизмам относятся редукторы, винтовые, зубчато-реечные, ременные и фрикционные передачи, барабан с тросом, кривошипно-шатунные, кулисные, кулачковые механизмы и т.п. Любой передаточный механизм характеризуется коэффициентом передачи, механической инерционностью и упругостью его элементов, зазорами и трением в зацеплениях и сочленениях механизма. В этом смысле передаточным механизмом является также обычная соединительная муфта с коэффициентом передачи, равным единице, обладающая определенной инерционностью и упругостью соединительных элементов.

Рабочий орган производственной машины РО реализует подведенную к нему механическую энергию в полезную работу. Чаще всего он является потребителем энергии. При этом поток механической мощности направлен от двигателя к рабочему органу (рисунок 1.1б). В качестве примера таких РО могут служить механизмы для обработки материалов, механизмы подъема и перемещения грузов и т.п.

Иногда рабочий орган может быть источником механической энергии, запасенной механизмом (например, спуск груза), или поступившей в механизм извне (например, «попутная» ветровая нагрузка на механизмы передвижения и поворота). В этом случае поток механической мощности направлен от рабочего органа к двигателю.

Рабочий орган характеризуется инерционностью, рабочим моментом при вращательном движении или рабочим усилием при поступательном движении.

Механическая мощность двигателя или рабочего органа  $P$  определяется по выражениям:

$$P = M \cdot \omega ; \quad (1.1)$$

$$P = F \cdot v , \quad (1.2)$$

где  $F$  и  $M$  - сила и момент (соответственно Н и Н·м);

$\omega$  и  $v$  - угловая и линейная скорости (соответственно 1/с и м/с).

Передача механической энергии от электромеханического преобразователя к рабочему органу или в обратном направлении связана с потерями энергии в механических звеньях (трение в подшипниках, направляющих, зацеплениях и т.п., а также потери, обусловленные деформацией упругих элементов). В результате этого поток мощности, проходя от источника к потребителю, уменьшается (рисунки 1.1б и 1.1в). Эти потери покрываются источником энергии – двигателем при прямом потоке энергии или рабочим органом при обратном.

## 1.2 Механические характеристики

В соответствии с вышеизложенным, нагрузкой для электромеханического преобразователя является механическая часть электропривода (рисунок 1.1а), **вращающаяся с той же скоростью  $\omega$ , что и двигатель**. В статическую нагрузку электромеханического преобразователя  $M_C$  входят моменты сопротивления ротора двигателя РД, передаточного механизма ПМ и рабочего органа РО. Этот суммарный момент и будем считать моментом сопротивления механизма  $M_C = M_{CРД} + M_{CПМ} + M_{CРО}$ .

Скорость вращения двигателя  $\omega$  изменяется при изменении развиваемого им момента  $M$ . В то же время при изменении скорости механической части электропривода  $\omega$  изменяется момент сопротивления механизма  $M_C$ . Зависимости угловой скорости  $\omega$  от момента для двигателя  $\omega = f(M)$  и для механизма  $\omega = f(M_C)$  называются **механическими характеристиками** соответственно двигателя и механизма. Эти механические характеристики могут быть представлены и обратными функциями  $M = \varphi(\omega)$  и  $M_C = \varphi_C(\omega)$ .

Механические характеристики принято изображать в декартовых координатах, на оси абсцисс которых откладывают момент на валу двигателя  $M$  или механизма  $M_C$ , на оси ординат – скорость вращения двигателя  $\omega$ , равная скорости вращения механической части электропривода (рисунок 1.2а).

При передаче механической энергии от электромеханического преобразователя к рабочему органу электрический двигатель работает в **двигательном режиме**, и развиваемая им мощность положительна. В том случае, когда энергия передается от рабочего органа к электромеханическому преобразователю, двигатель работает в **тормозном (генераторном) режиме**, и развиваемая им мощность отрицательна. Таким образом, в соответствии с выражением (1.1), если скорость  $\omega$  и момент  $M$  будут одного знака ( $\omega > 0, M > 0$  или  $\omega < 0, M < 0$ ), двигатель работает в двигательном режиме, а его механические характеристики располагаются в I или III квадрантах.

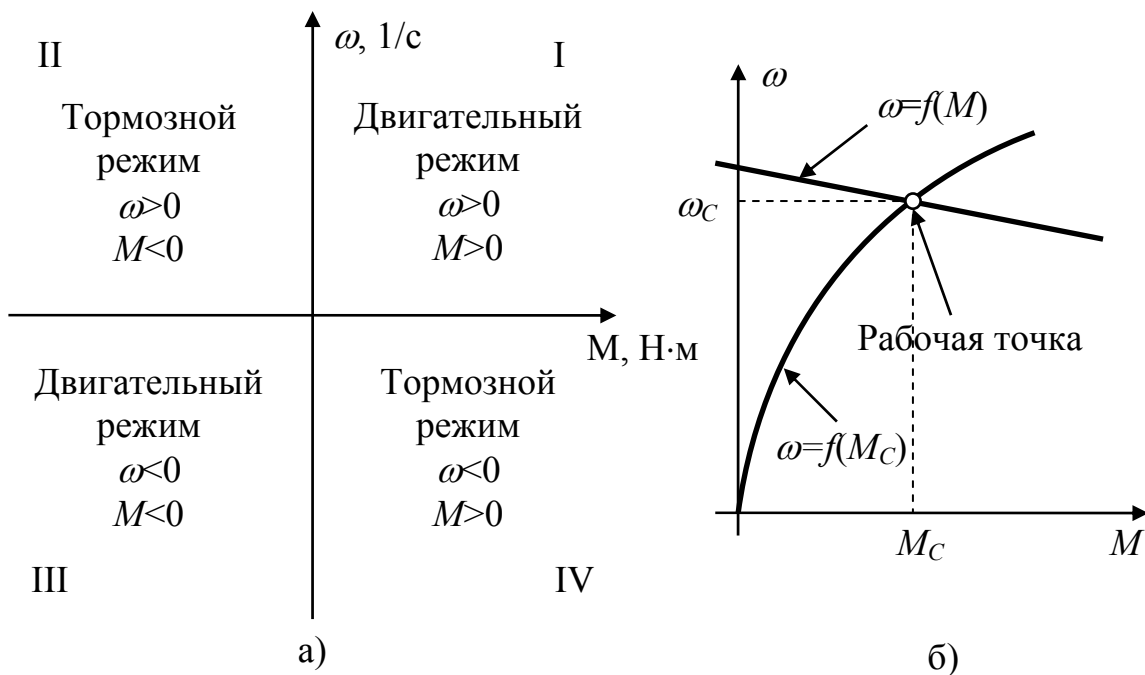


Рисунок 1.2

Если же скорость  $\omega$  и момент  $M$  будут с разными знаками ( $\omega > 0$ ,  $M < 0$  или  $\omega < 0$ ,  $M > 0$ ), двигатель работает в тормозном режиме, а его механические характеристики располагаются во II или IV квадрантах (рисунок 1.2а).

**Статическим режимом** работы электропривода считается такой режим, когда его скорость не изменяется ( $\omega = const$ ). В этом случае по законам механики движущий момент электромеханического преобразователя  $M$  должен быть равным моменту сопротивления механической части электропривода  $M_c$ . Другими словами, статический режим работы электропривода будет определяться точкой пересечения механических характеристик двигателя и механизма, называемой рабочей точкой (рисунок 1.2б). При этом двигатель будет развивать момент, равный моменту сопротивления  $M_c$  при скорости вращения  $\omega_c$ . Располагаться рабочая точка в зависимости от режима работы двигателя может в любом из четырех квадрантов.

### 1.3 Типовые статические нагрузки электропривода

Электромагнитный момент  $M$ , развиваемый электромеханическим преобразователем, является выходной величиной для электрической части электропривода и входной – для механической части. Поэтому этот момент при рассмотрении процессов в механической части электропривода выделен из всех действующих внешних моментов.



Все остальные силы и моменты определяют статическую нагрузку электропривода  $M_C$ . Их можно разделить на силы и моменты, представляющие полезные нагрузки исполнительного механизма, и силы и моменты механических потерь:

$$M_C = M_{пол\Sigma} + \Delta M_\Sigma, \quad (1.3)$$

где  $M_{пол\Sigma}$  - суммарный момент полезной нагрузки;

$\Delta M_\Sigma$  - суммарный момент потерь с учетом механических потерь в двигателе.

Силы и моменты полезной нагрузки в различных механизмах имеют различный характер. Выделим ограниченное число типовых нагрузок, присущих всему разнообразию производственных механизмов, и рассмотрим их механические характеристики  $\omega=f(M_C)$ .

По характеру взаимодействия с электроприводом все силы и моменты статической нагрузки делятся на **активные** и **реактивные**.

**Активными** силами и моментами называются такие, которые создаются внешними по отношению к двигателю источниками механической энергии и **не зависят от скорости, направления и траектории движения электропривода**. Такие силы и моменты имеют место при подъеме-спуске грузов, ветровой нагрузке на механизмы поворота и передвижения и т.п.

На рисунке 1.3 упрощенно показана кинематическая схема грузоподъемного механизма и его механическая характеристика. Сила тяжести, как при подъеме, так и при спуске груза направлена в одну сторону спуска и неизменна по величине. Соответственно механическая характеристика производственного механизма  $\omega=f(M_C)$  в этом случае имеет вид прямой  $M_{C.акт}=\text{const}$ .

Величина момента силы тяжести груза  $G$  равна:

$$M_{C.акт} = G \cdot R = m \cdot g \cdot R, \quad (1.4)$$

где  $m$  - масса груза;

$g$  - ускорение силы тяжести;

$G$  – вес груза;

$R$  – радиус подъемного барабана.

При изменении направления вращения знак этого момента сохраняется. Источник, создающий активный момент, может, как потреблять, так и отдавать энергию. Соответственно, при подъеме груза энергия передается от двигателя к механизму и затрачивается на увеличение потенциальной

энергии груза. При спуске потенциальная энергия груза передается двигателю.

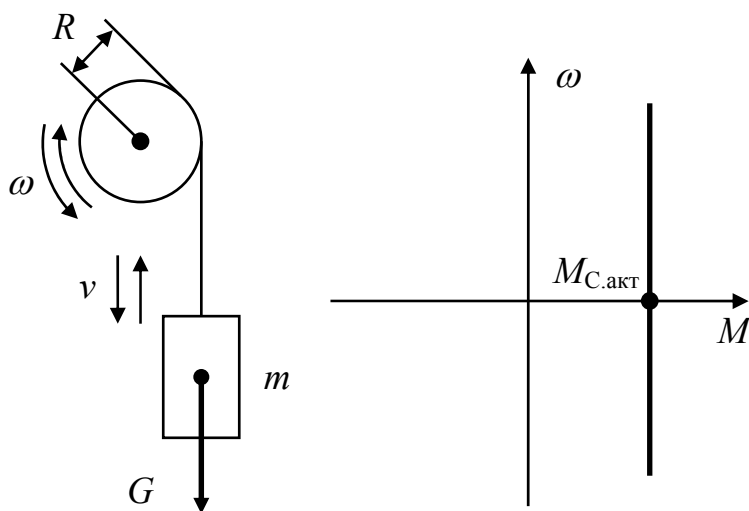


Рисунок 1.3

**Реактивными** силами и моментами называются силы и моменты сопротивления движению, возникающие как **противодействующая реакция механического звена на движение**. К ним относятся, например, моменты трения, возникающие во вращающихся и перемещающихся линейно элементах; моменты, действующие на рабочих органах металлорежущих станков; моменты на крыльчатках центробежных насосов и вентиляторов, на гребных винтах морских и речных судов и т.п.

**Реактивный момент** направлен всегда против движения, т.е. имеет **знак, противоположный знаку скорости**, и при изменении направления вращения знак реактивного момента изменяется на обратный. Поскольку реактивный момент возникает как реакция механического звена на движение, его величина зависит от скорости и направления движения. Реактивные моменты можно классифицировать по виду этой зависимости:

$$M_{C.reak} = M_{CH.reak} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^x, \quad (1.5)$$

где  $M_{CH.reak}$  - момент сопротивления при номинальной скорости  $\omega_H$ ;  
 $M_{C.reak}$  - момент сопротивления при скорости  $\omega$ ;  
 $x$  - показатель степени, характеризующий изменение момента сопротивления при изменении скорости.

Наиболее часто встречающиеся зависимости (1.5) показаны на рисунке 1.4.

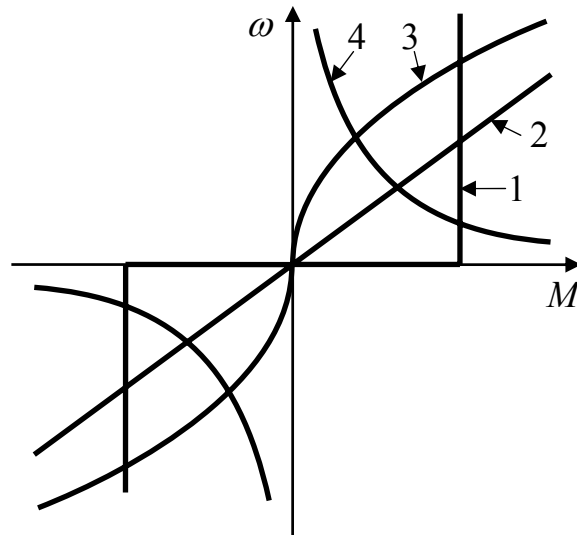


Рисунок 1.4

1. *Не зависящие от величины скорости реактивные нагрузки* (прямая 1 на рисунке 1.4). При этом  $x=0$  и  $M_C = \text{const}$ . Такой характеристикой обладают механизмы подачи металлорежущих станков, поршневые насосы при неизменной высоте подачи, конвейеры с постоянной массой перемещаемого материала. Сюда же могут быть отнесены с известным приближением все нагрузки типа сухого трения, так как обычно в пределах рабочих скоростей момент трения изменяется мало.

2. *Линейно возрастающие со скоростью механические нагрузки* (прямая 2 на рисунке 1.4). В этом случае  $x=1$  и  $M_C = \beta_{\text{вт}} \cdot \omega$ , где  $\beta_{\text{вт}}$  – коэффициент вязкого трения. Такие характеристики имеют нагрузки типа вязкого трения, встречающиеся довольно редко. Примером такой нагрузки является генератор постоянного тока с независимым возбуждением при замыкании его якоря на постоянный внешний резистор. Такую же характеристику имеют силы внутреннего вязкого трения, пропорциональные скорости деформации валов, канатов, муфт и других элементов. В этом случае момент внутреннего вязкого трения можно записать в виде:

$$M_{BT} = \beta_{BT} \cdot (\omega_1 - \omega_2), \quad (1.6)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – скорости на входе и выходе деформируемого элемента;

$\beta_{BT}$  – коэффициент вязкого трения.

3. *Нелинейно возрастающие со скоростью механические нагрузки* (кривая 3 на рисунке 1.4). Этой характеристике соответствует  $x=2$  и  $M_C = \beta_{\text{мех}} \cdot \omega^2$ . К механизмам, имеющим такие нагрузки, относятся вентиляторы, центробежные насосы, гребные винты и т.п.

4. *Нелинейно спадающие со скоростью механические нагрузки* (кривая 4 на рисунке 1.4). При этом  $x = -1$ , и максимальный момент сопротивления изменяется обратно пропорционально скорости  $M_C = \beta_{\text{мех}} / \omega$ . Мощность, потребляемая механизмом, согласно (1.1) остается постоянной. Такие характеристики соответствуют режиму работы главных (режущих) механизмов металлорежущих станков, моталок в металлургическом, электротехническом и других производствах и т.п., и специально формируются системой электропривода.

Перечисленные характеристики не исчерпывают всех практически возможных случаев, но дают представление о характеристиках некоторых типичных производственных механизмов.

Кроме выше рассмотренной классификации статических нагрузок, в механике все силы и моменты по *характеру влияния на механические колебания* делятся на **консервативные** и **диссипативные**.

**Консервативными** называются силы и моменты, при воздействии которых на систему не происходит поглощения энергии колебаний. Таковыми являются силы, не зависящие от скорости и направления, в частности сила тяжести, работа которой за период колебаний скорости всегда равна нулю.

**Диссипативными** называются силы и моменты, при воздействии которых на систему происходит поглощение энергии колебаний. К таковым могут быть отнесены силы вязкого трения и вентиляторные нагрузки. Работа данных сил за период колебаний скорости имеет положительное значение, что соответствует поглощению энергии.

Особое влияние на динамические процессы в механической части электропривода оказывают нагрузки, являющиеся периодической функцией угла поворота рабочего органа механизма. Появление периодических нагрузок могут вызвать нелинейные кинематические связи типа кривошипно-шатунных, кулисных и других механизмов (например, в поршневом компрессоре).

Электроприводы реальных механизмов обычно содержат не одну, а несколько рассмотренных типовых нагрузок. Так, в нагрузке электропривода подъемной лебедки, содержатся (рисунок 1.5):

- активный момент 1, обусловленный силой тяжести;
- момент потерь 2 в двигателе и передачах, который имеет вид момента сухого трения;
- вентиляторная составляющая момента 3, обусловленная наличием самовентиляции двигателя.

Результирующая механическая характеристика лебедки имеет вид характеристики 4.

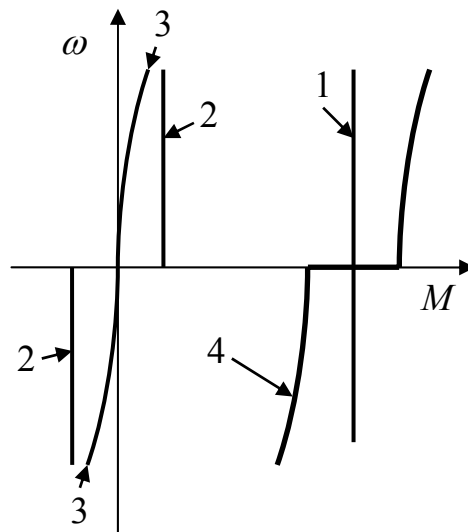


Рисунок 1.5

#### 1.4 Расчетные схемы механической части электропривода

**Кинематические схемы** дают представление об *идеальных* механических связях между движущимися массами конкретной рабочей машины, но они не отражают всех процессов, протекающих в механической части электропривода. Реальные элементы кинематической схемы (валы, шестерни, тросы и т.д.) обладают конечной жесткостью, т.е. при нагружении деформируются. Кроме того, инерционные массы электропривода могут двигаться с различными скоростями (ротор двигателя и поднимаемый груз). И сравнивать непосредственно моменты инерции (массы) и моменты (силы) сопротивления движущихся элементов, их перемещения, а также жесткости связей между ними нельзя.

Следовательно, необходимо по кинематической схеме составить расчетную механическую схему, в которой было бы учтено все сказанное выше. Это можно сделать путем **приведения** моментов инерции и моментов нагрузки вращающихся элементов, масс и действующих сил поступательно движущихся элементов, а также их перемещений и жесткостей механических связей между ними **к одной скорости**.

Обычно в электроприводе применяется приведение параметров его механической части к скорости вращения двигателя. Однако, при решении ряда задач, направленных на исследования поступательного движения рабочего органа, оказывается полезным приведение к линейной скорости механизма.

### 1.4.1 Приведение механических координат электропривода к скорости (валу) двигателя

Условием соответствия приведенной расчетной схемы реальной механической системе является выполнение закона сохранения энергии.

При приведении момента инерции  $J_i$  элемента системы, вращающегося со скоростью  $\omega_i$ , к скорости двигателя  $\omega_1$  должно выполняться условие равенства запасов кинетической энергии. Аналогично и при приведении массы  $m_j$  элемента системы, движущегося со скоростью  $v_j$ , к скорости вращения двигателя  $\omega_1$ . Следовательно:

$$J_{np.i} \cdot \frac{\omega_1^2}{2} = J_i \cdot \frac{\omega_i^2}{2}; \quad J_{np.j} \cdot \frac{\omega_1^2}{2} = m_j \cdot \frac{v_j^2}{2}, \quad (1.9)$$

где  $J_{np.i}$ ;  $J_{np.j}$  - приведенные к валу двигателя моменты инерции вращательно движущегося  $i$ -го и поступательно движущегося  $j$ -го звеньев.

Из (1.9) получаем формулы приведения:

$$J_{np.i} = J_i \cdot \frac{\omega_i^2}{\omega_1^2} = \frac{J_i}{i_{1i}^2}; \quad J_{np.j} = m_j \cdot \frac{v_j^2}{\omega_1^2} = m_j \cdot \rho_{1j}^2, \quad (1.10)$$

где  $i_{1i} = \frac{\omega_1}{\omega_i}$  - передаточное число от вала двигателя до  $i$ -го вала;

$\rho_{1j} = \frac{v_j}{\omega_1}$  - радиус приведения к валу двигателя  $j$ -го элемента.

При приведении вращательных  $\varphi_i$  и поступательных  $S_j$  перемещений к скорости  $\omega_1$  должно соблюдаться условие равенства времен  $t_i$ ,  $t_j$  этих перемещений:

$$t_i = \frac{\varphi_i}{\omega_i} = \frac{\varphi_{np.i}}{\omega_1}; \quad t_j = \frac{S_j}{v_j} = \frac{S_{np.j}}{\omega_1}, \quad (1.11)$$

где  $\varphi_{np.i}$ ,  $S_{np.j}$  - соответственно приведенные к валу двигателя перемещения вращательно движущегося  $i$ -го звена и поступательно движущегося  $j$ -го звена.

Из (1.11) получаем формулы приведения:

$$\varphi_{np.i} = \varphi_i \cdot \frac{\omega_1}{\omega_i} = \varphi_i \cdot i_{1i}; \quad S_{np.j} = S_j \cdot \frac{\omega_1}{v_j} = \frac{S_j}{\rho_{1j}}. \quad (1.12)$$

При приведении моментов и сил нагрузки элементов кинематической цепи к скорости двигателя  $\omega_1$  должно соблюдаться условие равенства мощностей в любом звене кинематической цепи при отсутствии потерь:

$$M_{np.i} \cdot \omega_1 = M_i \cdot \omega_i, \quad M_{np.j} \cdot \omega_1 = F_j \cdot v_j. \quad (1.13)$$

где  $M_{np.i}$ ,  $M_{np.j}$  – приведенные к валу двигателя моменты вращательно движущегося  $i$ -го звена и поступательно движущегося  $j$ -го звена.

Из формулы (1.13) получаем формулы приведения:

$$M_{np.i} = M_i \frac{\omega_i}{\omega_1} = \frac{M_i}{i_{1i}}; \quad M_{np.j} = F_j \frac{v_j}{\omega_1} = F_j \cdot \rho_{1j}. \quad (1.14)$$

В реальных условиях при передаче механической мощности от вала двигателя к  $i$ -му или  $j$ -му звену (или в обратном направлении от звена к валу двигателя) часть мощности теряется, что может быть учтено коэффициентом полезного действия этой передачи  $\eta_{1i}$  или  $\eta_{1j}$ . Тогда формулы приведения для прямого потока энергии выглядят так:

$$M_{np.i} = \frac{M_i}{i_{1i} \cdot \eta_{1i}}; \quad M_{np.j} = \frac{F_j \cdot \rho_{1j}}{\eta_{1j}}. \quad (1.15)$$

Так как к.п.д. всегда меньше 1, то из выражения (1.15) следует, что  $M_{np.i} > M_i / i_{1i}$ , и потери энергии покрываются за счет двигателя.

Для обратного потока энергии формулы приведения будут иметь вид:

$$M_{np.i} = \frac{M_i}{i_{1i}} \cdot \eta_{1i}; \quad M_{np.j} = F_j \cdot \rho_{1j} \cdot \eta_{1j}. \quad (1.16)$$

Соответственно  $M_{np.i} < M_i / i_{1i}$ , и до двигателя доходит лишь часть энергии, а потери покрываются за счет нагрузки.

Жесткости  $i$ -го упругого элемента системы при вращательном и  $j$ -го при поступательном движении определяются по выражениям:

$$C_i = \frac{M_{кр.i}}{\Delta\varphi_i}, \quad C_j = \frac{F_j}{\Delta S_j}, \quad (1.17)$$

где  $M_{кр.i}$ ,  $\Delta\varphi_i$  – соответственно крутящий момент и деформация  $i$ -го элемента;

$F_j$ ,  $\Delta S_j$  – соответственно сила, действующая на  $j$ -й элемент и его деформация.

Зависимости между моментом (силой) и деформацией, т.е. жесткости  $C_i$  и  $C_j$ , в общем случае являются нелинейными. Однако, для упрощения при небольших деформациях можно принять эти зависимости линейными, т.е.  $C_i = \text{const}$ ,  $C_j = \text{const}$ .

Из (1.17) следует, что формулы приведения для жесткостей  $i$ -го вращающегося и  $j$ -го поступательно движущегося элементов имеют вид:

$$C_{np.i} = \frac{M_{np.кр.i}}{\Delta\varphi_{np.i}} = \frac{M_{кр.i}}{i_{1i} \cdot \Delta\varphi_i \cdot i_{1i}} = \frac{C_i}{i_{1i}^2}; \quad (1.18)$$

$$C_{np.j} = \frac{M_{np.j}}{\Delta\varphi_{np.j}} = \frac{F_j \cdot \rho_{1j} \cdot \rho_{1j}}{\Delta S_j} = C_j \cdot \rho_{1j}^2. \quad (1.19)$$

Полученные формулы приведения позволяют при известных параметрах элементов реальной механической системы осуществить переход к расчетной механической схеме.

#### 1.4.2 Составление расчетных схем механической части электропривода

Каждый механизм имеет свою особую кинематическую схему. Возьмем для примера простейший механизм – центробежный вентилятор и более сложный – механизм передвижения тележки мостового крана (рисунок 1.6а, б).

Механическую часть электропривода вентилятора можно рассматривать как единую одномассовую систему, если полагать связи между двигателем **Д**, соединительной муфтой **СМ** и вентилятором **В** абсолютно жесткими. В действительности же валы имеют конечную жесткость, из-за чего различные массы движутся с различными мгновенными скоростями. При этом следует учитывать ограниченность реальных деформаций, вследствие чего средняя скорость движения масс на конечных отрезках времени одинакова.



На рисунке 1.7а приведена расчетная схема электропривода вентилятора, где  $J_D, J_B, J'_M$  – соответственно моменты инерции двигателя, вентилятора и полумуфты;  $C_1, C_2, C_3$  – жесткости вала двигателя, соединительной муфты и вала вентилятора. По правилам составления расчетных схем площади прямоугольников пропорциональны моментам инерции звеньев, а длины соединительных линий обратно пропорциональны соответствующим жесткостям.

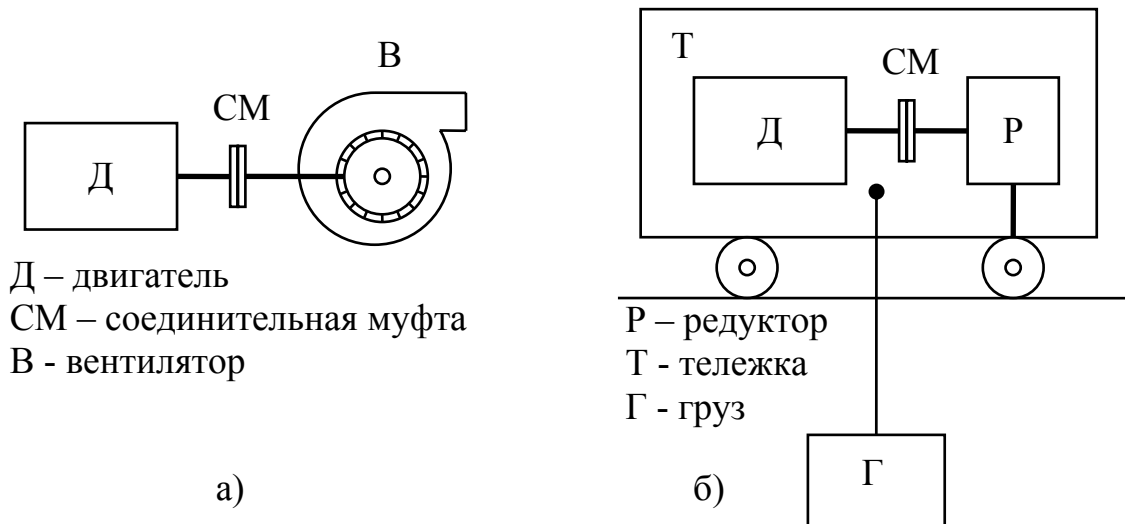


Рисунок 1.6

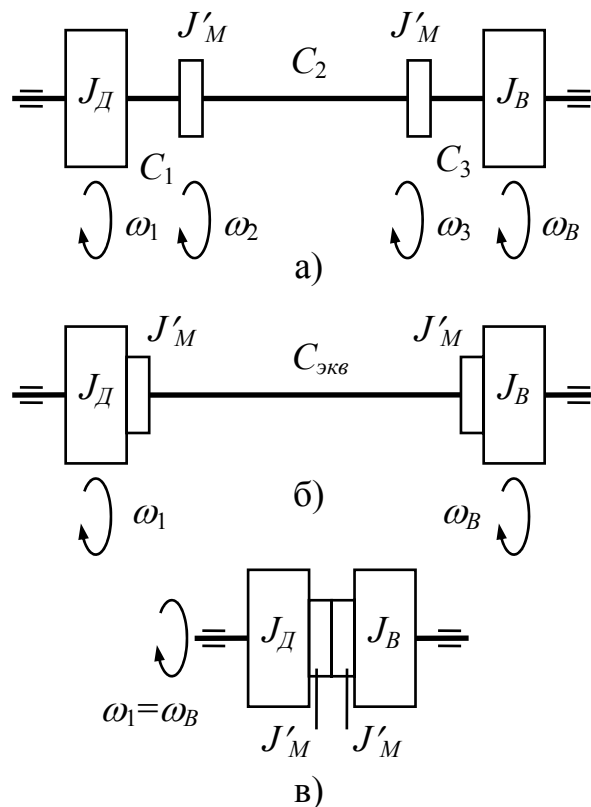


Рисунок 1.7

Многими теоретическими и экспериментальными исследованиями машин в различных отраслях промышленности доказано, что основные закономерности движения многомассовых упругих механических систем определяются наибольшими массами и наименьшими жесткостями связей системы. В большинстве случаев в механических схемах электроприводов основные массы и упругие связи выявить несложно.

В рассматриваемом случае главными массами являются ротор двигателя  $J_D$  и крыльчатка вентилятора  $J_B$ , а наименьшей жесткостью  $C_2$  обладает соединительная муфта. Поэтому схему можно значительно упростить, добавив малые массы  $J'_M$  к большим  $J_D$  и  $J_B$ , и соединив их эквивалентным упругим звеном с эквивалентной жесткостью  $C_{эkv}$ .

Для того чтобы определить  $C_{эkv}$ , воспользуемся понятием «**податливость**», являющейся величиной обратной жесткости. Результирующая (эквивалентная) податливость  $q_{эkv}$  равна сумме податливостей  $q_i$  последовательно соединенных участков. Из этого условия определяется  $C_{эkv}$ :

$$C_{эkv} = \frac{1}{q_{эkv}} = \frac{1}{q_1 + q_2 + q_3} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}, \quad (1.20)$$

где  $q_1, q_2, q_3, q_{эkv}$  - податливости первого, второго, третьего участков и эквивалентная податливость.

В полученной таким образом двухмассовой упругой системе (рисунок 1.7б) сохраняются достаточно правильные представления о фактической скорости двигателя  $\omega_I$  и вентилятора  $\omega_B$ , что, собственно, и требуется получить в результате исследования.

Для решения ряда задач динамики электропривода можно еще упростить расчетную схему за счет допущения абсолютной жесткости связи двигатель-вентилятор. Приняв  $C_{эkv} = \infty$ , получим простейшую расчетную схему этого электропривода (рисунок 1.7в), называемую **жестким приведенным механическим звеном**. В этом случае многомассовая механическая часть электропривода заменяется одной эквивалентной массой с моментом инерции  $J_\Sigma$ , на которую воздействует момент двигателя  $M$  и суммарный приведенный к валу двигателя момент нагрузки  $M_C$ .

Но если переход от схемы на рисунке 1.7а к схеме на рисунке 1.7б практически не искажает важнейших свойств исследуемой системы, то переход от упругой системы к жесткой (рисунок 1.7в) изменяет ее физические свойства. Поэтому при использовании простейшей расчетной схемы рисунка 1.7в следует четко представлять себе, для решения каких задач

она применима, а какие процессы в реальном электроприводе она не отражает.

Механическая часть электропривода передвижения тележки мостового крана гораздо сложнее по сравнению с предыдущим случаем. В кинематической схеме можно выделить три существенные массы, приведенные к валу двигателя: ротор двигателя  $J_D$ , тележка  $J_T$  и груз  $J_G$ . Остальные массы незначительны и могут быть учтены увеличением моментов инерции  $J_D$  и  $J_T$ , как показано на рисунке 1.8а. Жесткости связей между ними могут быть заменены эквивалентной связью  $C_{экр}$ . Границей разделения масс двигателя и тележки является связь быстроходной и тихоходной частей редуктора ( $J'_p$  и  $J''_p$ ), как наиболее слабое и наименее надежное звено.

Таким образом, получилась трехмассовая упругая механическая система. Приведенная расчетная схема отражает основные особенности движения механизма передвижения тележки мостового крана и позволяет получить представление о законах изменения скоростей трех существенных масс системы  $\omega_D(t)$ ,  $\omega_T(t)$ ,  $\omega_G(t)$ .

В зависимости от конкретных целей исследования схему можно без большой погрешности упростить следующим образом. Жесткость  $C$  обычно на порядок или на два меньше жесткости  $C_{экр}$ . Соответственно время переходных процессов в редукторе будет значительно меньше, чем период раскачивания груза.

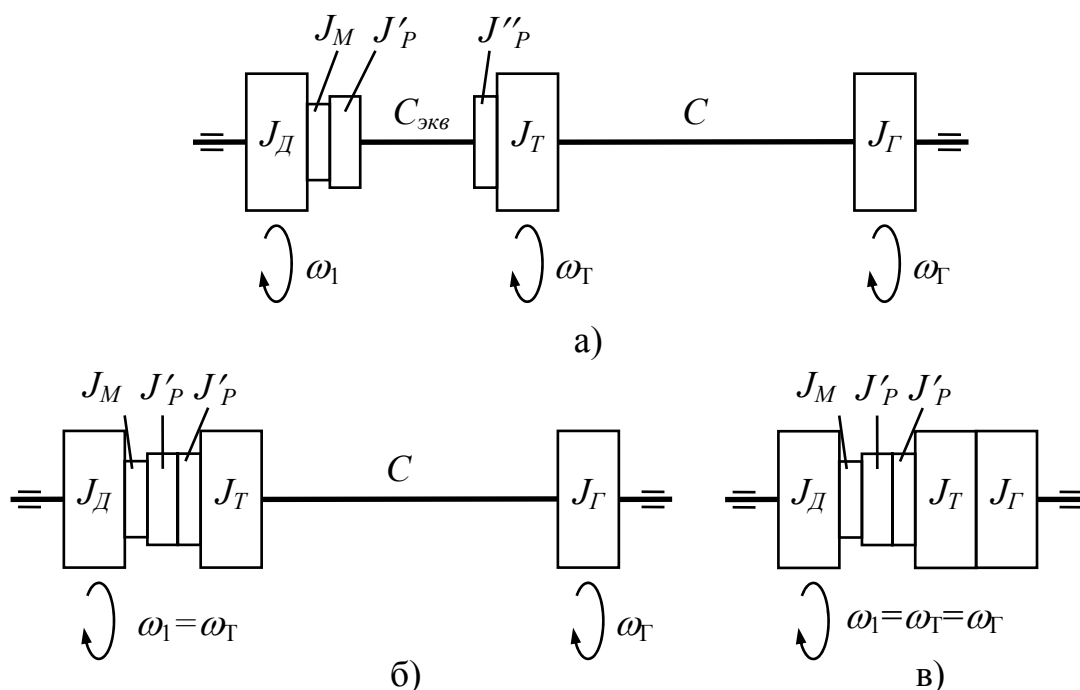


Рисунок 1.8

Поэтому при рассмотрении колебательных процессов в редукторе можно не рассматривать колебания груза, и наоборот, при рассмотрении влияния колебания груза на электропривод можно не рассматривать процессы в редукторе. Следовательно, в первом случае можно свести систему к двухмассовой, приняв  $C=0$  (оборвав эту связь). Если же задачей исследования будет процесс раскачивания груза при пусках и торможениях, то можно принять  $C_{экр} = \infty$  и получить двухмассовую систему, представленную на рисунке 1.8б.

Наконец, при определенных условиях можно пренебречь упругими связями в системе и свести ее к жесткому приведенному звену (рисунок 1.8в). Этот вариант расчетной механической схемы дает значительно упрощенное (соответственно неполное) представление о динамической системе, но при решении ряда задач его использование, благодаря простоте, оказывается наиболее предпочтительным.

Анализируя различные производственные механизмы, можно сделать вывод о том, что в большинстве случаев механические части электроприводов сводятся к трем типовым расчетным схемам: трехмассовая упругая система, двухмассовая упругая система и жесткое приведенное механическое звено (рисунок 1.9). Индексы жесткостей на рисунке 1.9 показывают, между какими массами они действуют.

Эти схемы позволяют изучать общие свойства электропривода, абстрагируясь от частных, присущих различным механизмам.

Трехмассовая упругая система при исследовании электропривода используется в редких случаях, когда возникает необходимость детального анализа условий движения его механической части. Для такого анализа обычно используется математическое моделирование на ЭВМ.

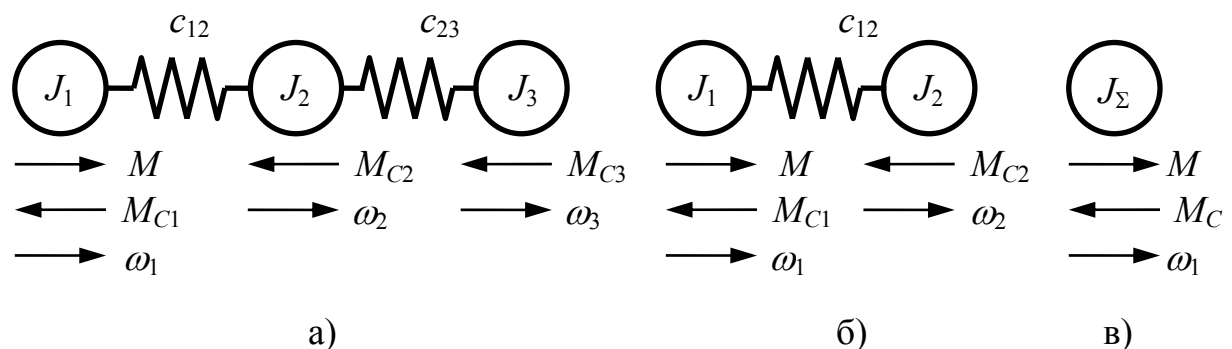


Рисунок 1.9

При исследовании отдельных физических особенностей трехмассовая система сводится к двухмассовой, которая является основным объектом, изучаемым в теории электропривода (например, разделение системы двигатель - тележка - груз).

Жесткое механическое звено позволяет наиболее простым путем учесть инерцию механической части электропривода и действующие здесь силы и моменты. Однако при использовании этой расчетной схемы следует помнить, что она не отражает ряда важнейших физических свойств реальной механической системы, а нагрузки, действующие в элементах кинематической цепи, оценивает весьма приближенно.

## 1.5 Уравнения движения электропривода

При изучении движения электропривода возникает необходимость в определении различных механических величин: пути и угла поворота, скорости и ускорения, а также моментов и сил, вызывающих движение и определяющих его характер.

Для того чтобы математическое описание движения электропривода было определенным, принимают одно из двух направлений вращения двигателя за положительное. *Принятое за положительное направление является единым для различных величин, характеризующих это движение: угла поворота, угловой скорости, углового ускорения и момента двигателя.*

Следует обратить внимание на то, что знаки величин не зависят от их соотношения, а определяются текущим режимом работы. Например, положительной скорости вращения может соответствовать как положительный, так и отрицательный угол поворота. Так, если в рассматриваемом интервале времени направление момента и скорости двигателя совпадают, то работа совершается за счет двигателя, который создает данный момент. Когда же знаки момента и скорости двигателя различны, то двигатель, который создает данный момент, потребляет механическую энергию.

### 1.5.1 Уравнения движения электропривода с линейными механическими связями

В соответствии с основным законом динамики для вращающегося тела векторная сумма моментов, действующих относительно оси вращения, равна производной момента количества движения:

$$\sum_{i=1}^n \overline{M}_i = \frac{d(J \cdot \overline{\omega})}{dt}. \quad (1.21)$$

В задачах электропривода суммарный момент, действующий относительно вала двигателя или любого другого вала механической части электропривода, определяется моментами, направленными либо в сторону движения, либо против него. Поэтому в уравнении (1.21) векторные вели-

чины могут быть заменены их проекциями на плоскость, перпендикулярную оси вращения. Следовательно, при  $J=\text{const}$  выражение (1.21) запишется в виде:

$$\sum_{i=1}^n M_i = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.22)$$

Составим уравнения движения для трехмассовой расчетной схемы с упругими связями (рисунок 1.10).

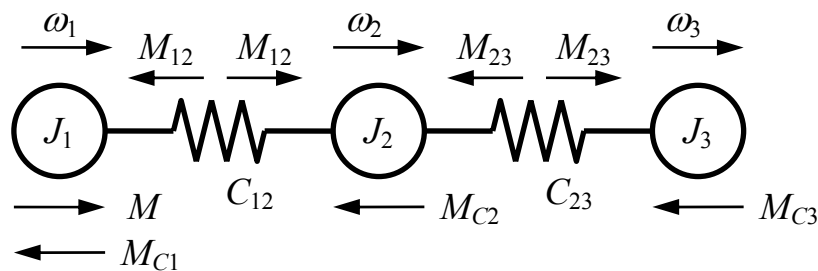


Рисунок 1.10

На этом рисунке  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  - моменты упругого взаимодействия между движущимися массами системы (соответственно между  $J_1$  и  $J_2$ , и между  $J_2$  и  $J_3$ );  $M_{C1}$ ,  $M_{C2}$ ,  $M_{C3}$  - части суммарной статической нагрузки электропривода, приложенные к различным массам системы.

Моменты упругого взаимодействия равны:

$$M_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2); \quad M_{23} = C_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3), \quad (1.23)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - углы поворота упругих масс  $J_1$  и  $J_2$ , (углы поворота двух противоположных концов жесткости  $C_{12}$ );

$\varphi_2$  и  $\varphi_3$  - углы поворота упругих масс  $J_2$  и  $J_3$ , (углы поворота двух противоположных концов жесткости  $C_{23}$ ).

Направление вектора  $\omega_1$  примем как положительное. Тогда в соответствии с (1.22) систему уравнений движения для данной расчетной схемы можно записать так:

$$\begin{cases} M - M_{12} - M_{C1} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{23} - M_{C2} = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_{23} - M_{C3} = J_3 \cdot \frac{d\omega_3}{dt}. \end{cases} \quad (1.24)$$

Как видно из (1.24), уравнения движения приведенных масс электропривода однотипны. Они отражают физический закон (второй закон Ньютона), в соответствии с которым ускорение твердого тела пропорционально сумме всех приложенных к нему моментов и сил, включая моменты и силы, обусловленные упругим взаимодействием с другими телами системы.

Для двухмассовой расчетной схемы  $J_3=0$ ,  $M_{23}=0$ , и система уравнений движения запишется следующим образом:

$$\begin{cases} M - M_{12} - M_{C1} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{C2} = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}. \end{cases} \quad (1.25)$$

Переход от двухмассовой упругой системы (рисунок 1.11а) к эквивалентному жесткому механическому звену проведем в два этапа. Вначале представим механическую связь между первой и второй массами абсолютно жесткой ( $C_{12}=\infty$ ). В результате получим двухмассовую жесткую систему, расчетная схема которой приведена на рисунке 1.11б. Отличием ее от схемы на рисунке 1.11а является равенство скоростей двух масс  $\omega_1=\omega_2$ .

Из второго уравнения системы (1.25) получаем:

$$M'_{12} = M_{C2} + J_2 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}, \quad (1.26)$$

где  $M'_{12}$  - нагрузка жесткой механической связи при работе электропривода.

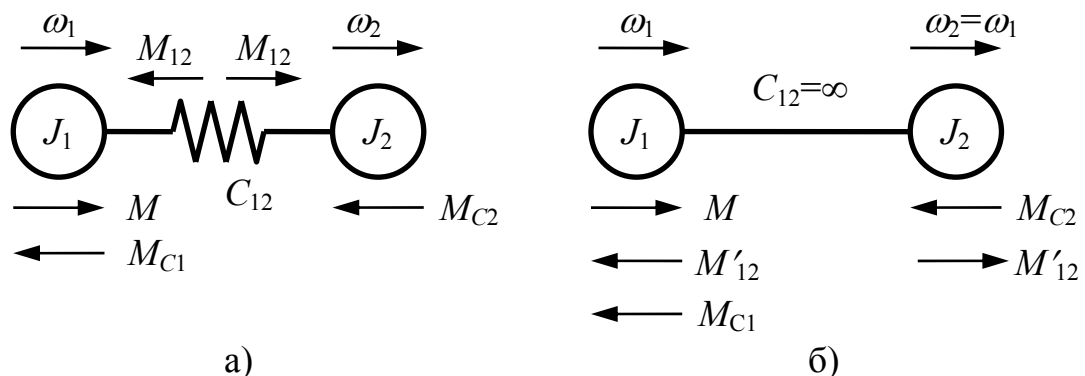


Рисунок 1.11

Подставив (1.26) в первое уравнение системы (1.25), получим:

$$M - M_{C1} - M_{C2} = (J_1 + J_2) \cdot \frac{d\omega_1}{dt}. \quad (1.27)$$

С учетом обозначений на рисунке 1.9в ( $M_C = M_{C1} + M_{C2}$ ,  $J_\Sigma = J_1 + J_2$ ) уравнение движения электропривода в случае представления его механической части жестким приведенным механическим звеном имеет вид:

$$M - M_C = J_\Sigma \cdot \frac{d\omega_1}{dt}. \quad (1.28)$$

Это уравнение часто называют основным уравнением движения электропривода. Его значение для анализа физических процессов в электроприводе очень велико. Оно описывает движение механической части электропривода в среднем. Поэтому с его помощью можно оценить среднее значение ускорения электропривода, рассчитать время, за которое двигатель достигнет заданной скорости, и решить многие другие практические вопросы даже в тех случаях, когда влияние упругих связей в системе существенно.

### 1.5.2 Уравнения движения электропривода с нелинейными механическими связями

Выше было отмечено, что передачи некоторых электроприводов содержат нелинейные кинематические связи типа кривошипно-шатунных, кулисных и тому подобных механизмов.

У таких механизмов радиус приведения и суммарные момент инерции и момент сопротивления будут зависеть от угла поворота вала двигателя. Так, для приведенной на рисунке 1.12 схемы кривошипно-шатунного механизма радиус приведения  $\rho$  равен:

$$\rho = R_k \cdot \sin \varphi, \quad (1.29)$$

где  $R_k$  – радиус кривошипа.

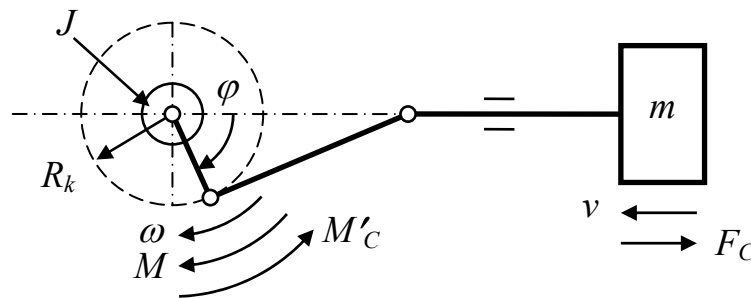


Рисунок 1.12



Рассмотрим двухмассовую систему, первая масса которой  $J$  вращается со скоростью двигателя  $\omega$ , а вторая масса  $m$  движется с линейной скоростью  $v$ . Первая масса жестко и линейно связана с валом двигателя, а вторая масса жестко и линейно связана с рабочим органом. Однако, связь между массами нелинейная и зависит от текущего положения угла кривошипа. Для получения уравнения движения такой системы при  $C_{12}=\infty$  необходимо воспользоваться уравнением Лагранжа (уравнение движения в обобщенных координатах). В результате его преобразования получим:

$$M - M_C(\varphi) = J_\Sigma(\varphi) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ_\Sigma(\varphi)}{d\varphi}, \quad (1.30)$$

где  $M_C(\varphi)$  - суммарный момент сопротивления, равный:

$$M_C(\varphi) = M'_C + F_C \cdot \rho(\varphi); \quad (1.31)$$

$J_\Sigma(\varphi)$  – суммарный момент инерции системы, равный:

$$J_\Sigma(\varphi) = J + m \cdot [\rho(\varphi)]^2; \quad (1.32)$$

$M'_C$  – приведенный к валу двигателя момент сопротивления от сил, воздействующих на линейно связанные с двигателем массы.

Уравнение движения (1.30) является нелинейным и содержит переменные коэффициенты, зависящие от угла поворота ротора двигателя  $\varphi$ . Решить его без значительных допущений и упрощений можно лишь с помощью ЭВМ.

В случаях, когда момент инерции электропривода изменяется из-за внешних воздействий, не связанных с собственным движением, уравнение движения принимает несколько иной вид. Такие условия создаются в машинах, перемещение рабочих органов которых в пространстве осуществляется несколькими индивидуальными электроприводами для каждой координаты перемещения (экскаваторы, краны, роботы и т.п.).

На схеме башенного крана, представленной на рисунке 1.13, изображен противовес  $\Pi$  и груз  $\Gamma$ . Радиус вращения груза  $R$  может меняться в зависимости от вылета стрелы и/или положения крановой тележки и не зависит от привода поворота. Таким образом, суммарный момент инерции электропривода поворота изменяется в зависимости от внешних факторов.

В этом и подобных случаях суммарный момент инерции такого электропривода следует считать независимой функцией времени  $J_\Sigma(t)$ . Тогда уравнение движения в соответствии с (1.21) примет вид:

$$M - M_C(t) = \frac{d}{dt} [J_{\Sigma}(t) \cdot \omega] = J_{\Sigma}(t) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega \cdot \frac{dJ_{\Sigma}(t)}{dt}. \quad (1.33)$$

Функции  $J_{\Sigma}(t)$  и  $M_C(t)$  можно определить, анализируя законы движения механизма, вызвавшего изменение момента инерции и нагрузки.

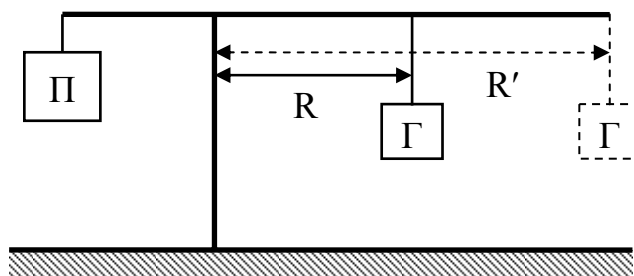


Рисунок 1.13

### 1.5.3 Режимы работы электропривода

Полученные уравнения движения электропривода позволяют исследовать процессы, происходящие в его механической части, и возможные режимы работы электропривода.

Для анализа статических режимов работы в уравнение движения электропривода необходимо подставить  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . При этом само уравнение примет наиболее простой вид:  $M = M_C = \text{const}$ .

Неравенства  $M \neq M_C$ ,  $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$  в процессе работы электропривода имеют место в двух случаях:

- в переходном динамическом процессе (например, пуск);
- в установившемся динамическом процессе, когда приложенные к системе моменты содержат периодическую составляющую.

В системах с нелинейными кинематическими связями статические режимы работы вообще отсутствуют. Если для двигателя  $\frac{d\omega}{dt} = 0$  и  $\omega = \text{const}$ , то массы, движущиеся линейно, совершают принужденное возвратно-поступательное движение, а их скорость и ускорение являются переменными величинами. В таких системах имеет место установившийся динамический процесс движения.

Как было сказано в п. 1.2, с энергетической точки зрения режимы работы электропривода делятся на двигательные и тормозные, отличающиеся направлением потока энергии через его механическую часть. Двига-

тельный режим соответствует прямому направлению передачи механической энергии от электродвигателя к рабочему органу, а тормозной – обратному направлению.

Двигательный режим обычно является основным для проектирования механического оборудования. Однако, при работе электропривода часто складываются условия для тормозного режима. Тормозные и двигательные режимы вероятны в равной степени для электроприводов с активной нагрузкой. В электроприводах с реактивной нагрузкой тормозные режимы работы возникают в переходных процессах замедления системы, когда освобождающаяся кинетическая энергия движущихся масс поступает к электродвигателю.

## 1.6 Механическая часть электропривода как объект управления

Полученные ранее расчетные схемы и уравнения движения позволяют проанализировать динамические особенности механической части электропривода, пользуясь методами теории автоматического управления.

Для получения структурной схемы двухмассовой упругой механической системы сначала продифференцируем (1.23):

$$\frac{dM_{12}}{dt} = C_{12} \cdot \frac{d(\varphi_1 - \varphi_2)}{dt} = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2). \quad (1.34)$$

Теперь, подставив в (1.25) и (1.34) оператор Лапласа  $\frac{d}{dt} = p$ , получим:

$$\begin{cases} M - M_{12} - M_{C1} = J_1 \cdot p \cdot \omega_1; \\ M_{12} - M_{C2} = J_2 \cdot p \cdot \omega_2; \\ p \cdot M_{12} = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2). \end{cases} \quad (1.35)$$

Системе уравнений (1.35) соответствует структурная схема, приведенная на рисунке 1.14а. Управляющим воздействием здесь является электромагнитный момент двигателя  $M$ , а возмущениями – моменты нагрузки  $M_{C1}$  и  $M_{C2}$ . Регулируемыми переменными здесь могут быть скорости  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , перемещения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , а также момент упругого взаимодействия  $M_{12}$ .

Механическая часть электропривода представляет собой сложный объект, состоящий из цепочки интегрирующих звеньев, замкнутых перекрестными внутренними обратными связями.

Для исследования динамических свойств системы, представленной на рисунке 1.14а, примем  $M_{C1}=M_{C2}=0$  и выполним преобразования этой структурной схемы согласно правилам теории автоматического управления.

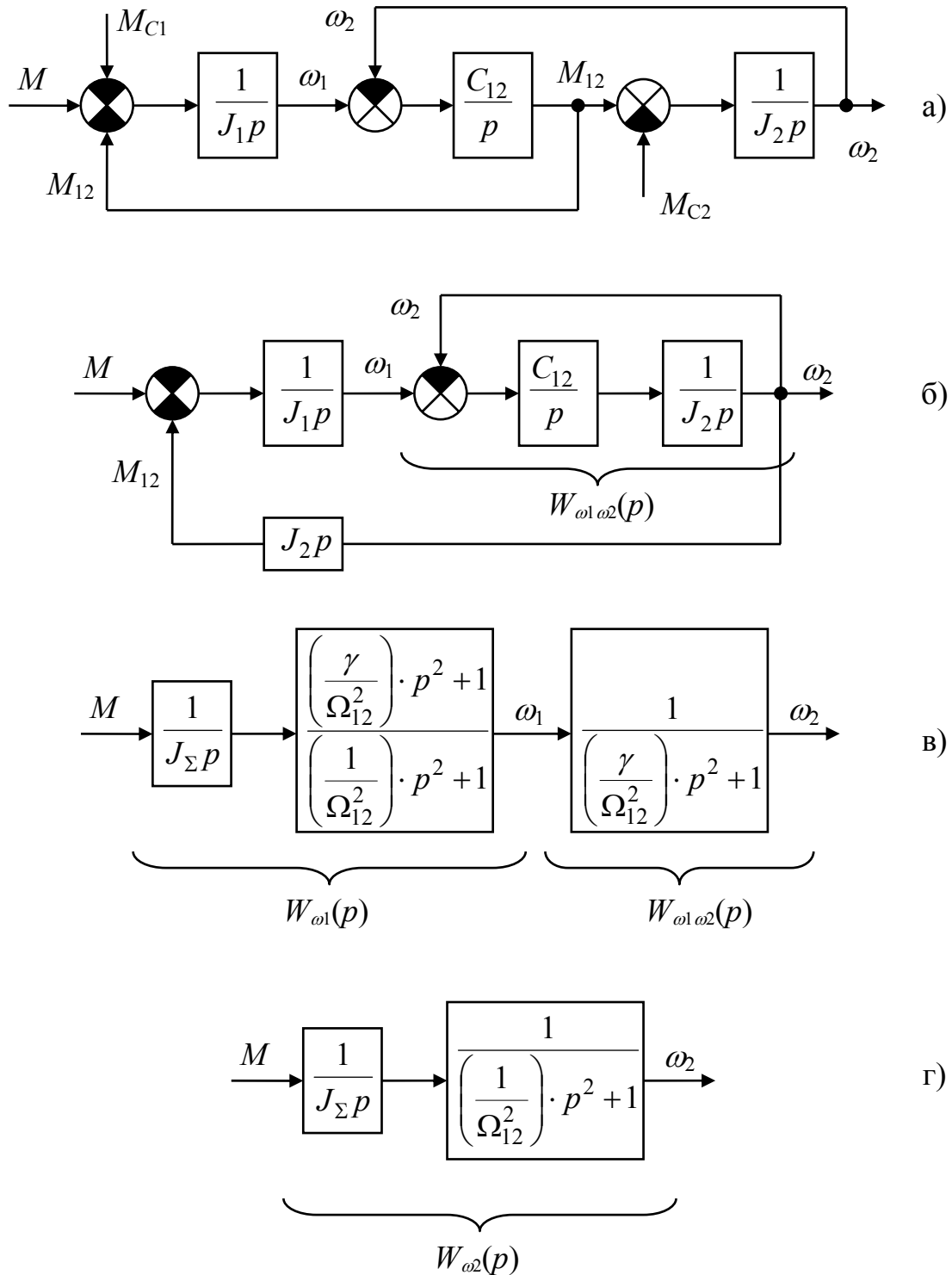


Рисунок 1.14

В соответствии с рисунком 1.14б после переноса обратной связи по моменту  $M_{12}$  на выход системы определим передаточную функцию, связывающую скорости  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$W_{\omega_1\omega_2}(p) = \frac{\omega_2(p)}{\omega_1(p)} = \frac{1}{\frac{J_2}{C_{12}} \cdot p^2 + 1}. \quad (1.36)$$

После этого определим передаточную функцию части системы, связывающую скорость  $\omega_1$ , с управляющим воздействием  $M$ :

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{W_{np}}{1 + W_{np} \cdot W_{oc}}, \quad (1.37)$$

где  $W_{np} = \frac{1}{J_1 \cdot p}$  - передаточная функция прямого канала;

$W_{oc} = J_2 \cdot p \cdot W_{\omega_1\omega_2}(p)$  - передаточная функция обратной связи.

Выполнив подстановку и преобразования, получим:

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\frac{J_2}{C_{12}} \cdot p^2 + 1}{J_{\Sigma} p \left( \frac{J_1 \cdot J_2}{C_{12} J_{\Sigma}} p^2 + 1 \right)}, \quad (1.38)$$

где  $J_{\Sigma} = J_1 + J_2$  - суммарный момент инерции.

Характеристическое уравнение системы:

$$J_{\Sigma} p \left( \frac{J_1 \cdot J_2}{C_{12} \cdot J_{\Sigma}} p^2 + 1 \right) = 0. \quad (1.39)$$

Корни этого уравнения:

$$p_1 = 0; \quad p_{2,3} = \pm j \sqrt{\frac{C_{12} \cdot J_{\Sigma}}{J_1 \cdot J_2}} = \pm j \Omega_{12}. \quad (1.40)$$

Как видно, характеристическое уравнение имеет пару чисто мнимых корней, следовательно, переходной процесс системы имеет колебательную составляющую с частотой  $\Omega_{12}$  – **резонансной частотой** двухмассовой упругой системы.

Для упрощения математических записей передаточных функций введем понятие «соотношение масс»  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{J_{\Sigma}}{J_1} = \frac{J_1 + J_2}{J_1}. \quad (1.41)$$

С учетом (1.40) и (1.41) выражения (1.36) и (1.38) могут быть представлены следующим образом:

$$W_{\omega_1\omega_2}(p) = \frac{1}{\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1}; \quad (1.42)$$

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p} \cdot \frac{\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1}{\frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1}. \quad (1.43)$$

Таким образом, механическая часть электропривода с выходной координатой  $\omega_1$  может быть представлена как объект управления в виде трех последовательно соединенных звеньев (рисунок 1.14в): интегрирующего, форсирующего второго порядка и консервативного колебательного. Относительно выходной координаты  $\omega_2$  двухмассовая механическая система представляется двумя последовательно соединенными звеньями (рисунок 1.14г): интегрирующим и консервативным колебательным.

Наличие консервативного колебательного звена обуславливает незатухающие колебания скоростей обеих масс  $\omega_1$  и  $\omega_2$  с резонансной частотой  $\Omega_{12}$ . Наличие же интегрирующего звена с постоянной интегрирования, равной  $J_{\Sigma}$ , определяет **движение системы в среднем**. Таким образом, при  $M = \text{const}$  скорость  $\omega_1$  изменятся по линейному закону, на который накладываются колебания, обусловленные упругой связью.

Из (1.43) видно, что на колебательность первой массы оказывают значительное влияние параметры  $\gamma$  и  $\Omega_{12}$ . При уменьшении момента инерции механизма (в пределе  $J_2 \ll J_1$  и  $\gamma \rightarrow 1$ ) передаточные функции форсирующего и колебательного звеньев сокращаются, и движение первой массы определяется только интегрирующим звеном  $W_{\omega_1}(p) = \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p}$ . То же самое произойдет и в случае, когда резонансная частота  $\Omega_{12}$  будет достаточно большой (в пределе  $\Omega_{12} \rightarrow \infty$ ).

Из этого следует, что при  $J_2 \ll J_1$  и/или  $\Omega_{12} \gg \Omega_C$ , где  $\Omega_C$  – частота среза ЛАЧХ разомкнутой системы регулирования электропривода, механическую часть электропривода можно представить жестким механическим звеном.

Сравнивая выражения передаточных функций для первой (1.43) и второй (1.42) масс, можно сделать вывод о том, что колебательность второй массы выше, чем первой, так как в числителе передаточной функции  $W_{\omega_1 \omega_2}(p)$  отсутствует передаточная функция форсирующего звена, и любые значения параметра  $\gamma$  не оказывают на колебательность второй массы ослабляющего действия.

Следовательно, в тех случаях, когда требуется обеспечить необходимые параметры движения второй массы (механизма), условие  $\Omega_{12} \gg \Omega_C$  является **достаточным** для представления механической части электропривода в виде жесткого приведенного механического звена.

В реальных системах всегда присутствуют диссипативные силы, которые оказывают на колебания демпфирующее действие. Это демпфирование, обусловленное внутренними силами вязкого трения, по данным технической литературы невелико и может быть оценено значениями **логарифмического декремента затухания**:

$$\lambda_{BT} = \frac{2\pi \cdot \alpha_{BT}}{\Omega_p} = 0.1 \div 0.3, \quad (1.44)$$

где  $\alpha_{BT}$  и  $\Omega_p = \Omega_{12}$  - коэффициент затухания и резонансная частота колебаний с учетом влияния внутренних сил вязкого трения.

При таких значениях  $\lambda_{BT}$  за время затухания совершается от 10 до 30 колебаний.

Сочетания параметров, при которых  $J_2 \ll J_1$  и/или  $\Omega_{12} \rightarrow \infty$ , характерно для большинства электроприводов, и поэтому представление механической части электропривода в виде жесткого приведенного звена часто используется (рисунок 1.15).

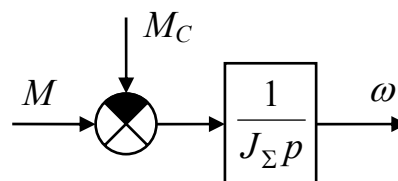


Рисунок 1.15

Эта структурная схема совпадает с входным звеном рассмотренной двухмассовой упругой системы, что подтверждает правомочность такого представления механической части электропривода.

## 1.7 Механические переходные процессы электропривода

Изменения управляющего или возмущающего воздействий вызывают в механической части электропривода переходные процессы изменения скоростей связанных масс от начальных значений до новых установившихся.

Естественно, что количественные и качественные параметры механических переходных процессов будут в значительной степени определяться тем, в каком виде будет представлена механическая часть электропривода.

### Механическая часть электропривода представлена в виде жесткого приведенного звена

Рассмотрим некоторые переходные процессы пуска и торможения электропривода, отличающиеся друг от друга характером управляющего (момент двигателя) и возмущающего (момент статический) воздействия.

1. Двигатель неподвижен ( $\omega_{нач}=0$ ), и в момент времени  $t=0$  к ротору (якорю) двигателя прикладывается электромагнитный момент (рисунок 1.16):

$$M = \Delta M \cdot e^{-\frac{t}{T}} + M_C = (M_{нач} - M_C) \cdot e^{-\frac{t}{T}} + M_C. \quad (1.45)$$

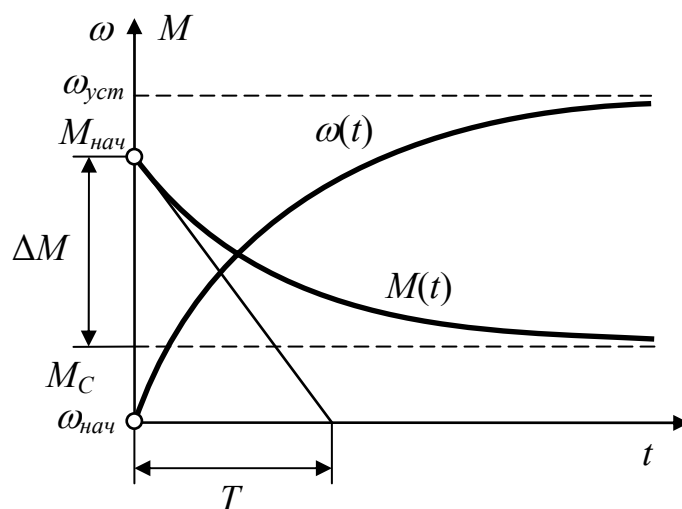


Рисунок 1.16



Уравнение движения электропривода:

$$M - M_C = J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt} = J_\Sigma \cdot \varepsilon, \quad (1.46)$$

где  $\varepsilon = \frac{M - M_C}{J_\Sigma}$  - ускорение двигателя.

Из (1.46):

$$d\omega = \varepsilon \cdot dt. \quad (1.47)$$

Проинтегрируем (1.47) по времени:

$$\int_0^\omega d\omega = \int_0^t \frac{M - M_C}{J_\Sigma} \cdot dt = \int_0^t \frac{M_{нач} - M_C}{J_\Sigma} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot dt = \int_0^t \varepsilon_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot dt, \quad (1.48)$$

где  $\varepsilon_{нач} = \left( \frac{d\omega}{dt} \right)_{нач} = \frac{M_{нач} - M_C}{J_\Sigma}$  - начальное ускорение.

Из (1.48) получим:

$$\omega = \varepsilon_{нач} \cdot T \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (1.49)$$

Скорость нарастает от нуля до установившегося значения  $\omega_{уст} = \varepsilon_{нач} T$  за время  $t_{ПП} = (3-4)T$  по экспоненциальному закону с уменьшающимся по мере разгона ускорением, так как действующий на систему момент  $(M - M_C)$  также уменьшается по экспоненциальному закону.

**2.** Постоянные моменты двигателя  $M = \text{const}$  и сопротивления  $M_C = \text{const}$ .

Проинтегрируем (1.47) по времени и получим:

$$\int_{\omega_{нач}}^\omega d\omega = \int_0^t \varepsilon \cdot dt, \quad (1.50)$$

$$\omega = \omega_{нач} + \varepsilon \cdot t. \quad (1.51)$$

Время переходного процесса  $t_{ПП}$  при изменении скорости от  $\omega_{нач}$  до  $\omega_{кон}$  определяется как:

$$t_{III} = \frac{\omega_{кон} - \omega_{нач}}{\varepsilon} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{кон} - \omega_{нач}}{M - M_C}. \quad (1.52)$$

На рисунке (1.17а) при  $t < 0$   $M = M_C$ , ускорение  $\varepsilon = 0$ , и электропривод находится в установившемся режиме с начальной скоростью  $\omega = \omega_{нач}$ . При  $t = 0$  момент двигателя скачком увеличивается до значения  $M = M_1$ , и электропривод переходит в режим равномерно ускоренного движения. Если оставить момент двигателя неизменным ( $M = M_1 = \text{const}$ ), этот режим будет продолжаться, а скорость будет неограниченно возрастать. В действительности же при достижении необходимой скорости момент двигателя  $M = M_1$  уменьшается до величины  $M = M_C$ , и наступает установившийся режим при  $\omega = \omega_{кон}$ , как показано на рисунке 1.17а.

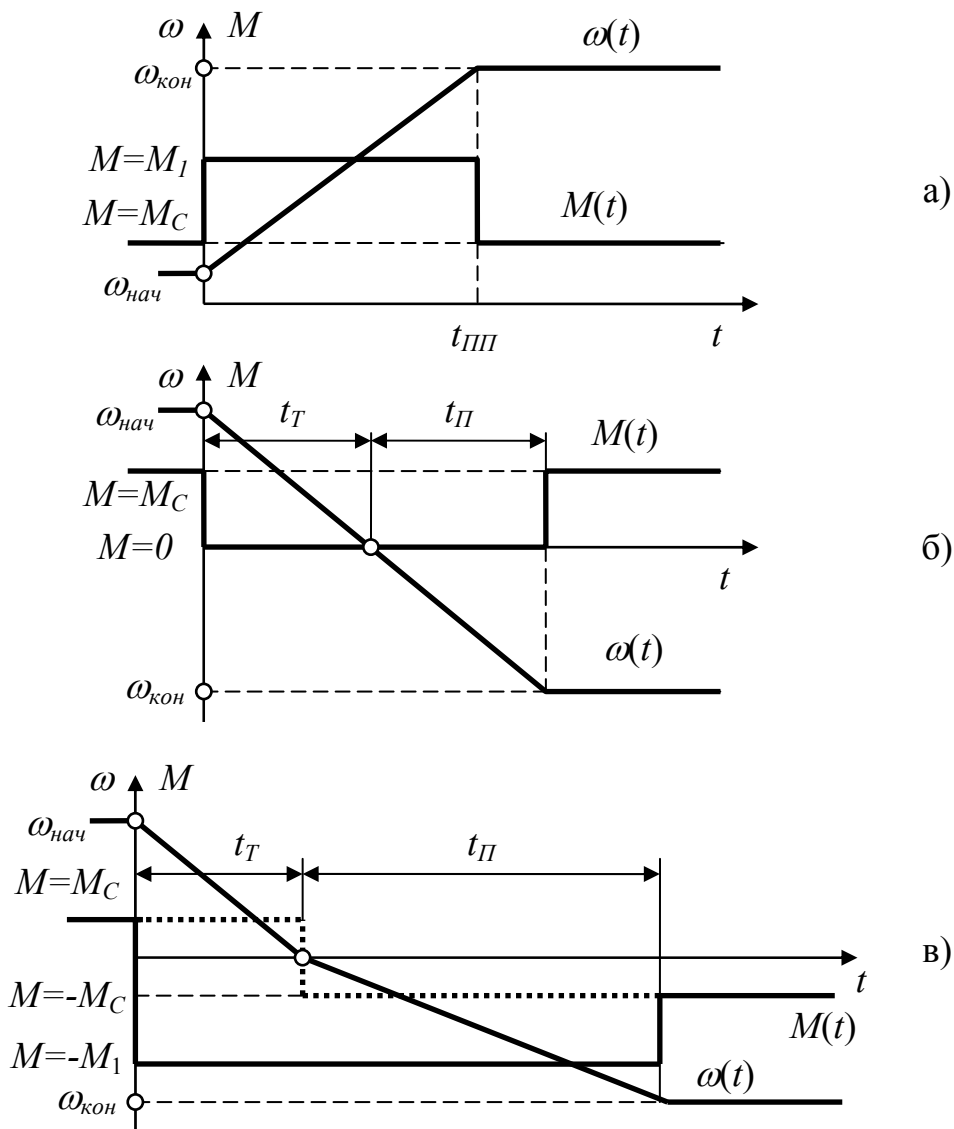


Рисунок 1.17

Кроме величин моментов двигателя  $M$  и сопротивления  $M_C$  на протекание переходных процессов существенное влияние оказывает характер момента сопротивления.

На рисунке 1.17б показан переходной процесс реверса электропривода от скорости  $\omega_{нач}$  до скорости  $\omega_{кон}$  другого направления под действием активного момента сопротивления  $M_C$ , при моменте на валу двигателя  $M=0$ . В этом случае ускорение  $\varepsilon = -\frac{M_C}{J_\Sigma}$  постоянно, а уравнение движения имеет вид:

$$\omega = \omega_{нач} - \frac{M_C}{J_\Sigma} \cdot t. \quad (1.53)$$

Время торможения  $t_T$  от  $\omega_{нач}$  до нулевой скорости составляет:

$$t_T = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_{нач}}{M_C}. \quad (1.54)$$

Время пуска в обратную сторону до  $\omega_{кон}$ :

$$t_{II} = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_{кон}}{M_C}. \quad (1.55)$$

При  $t=t_T+t_{II}$  момент двигателя увеличивается скачком до величины  $M=M_C$ , и наступает установившийся режим при  $\omega=\omega_{кон}$ .

На рисунке 1.17в представлен процесс реверса электропривода при реактивном моменте сопротивления  $M_C$  от скорости  $\omega_{нач}$  до скорости  $\omega_{кон}$  другого направления. В момент времени  $t=0$ , момент двигателя скачком изменяется от  $M=M_C$  до  $M=-M_1$ , и происходит замедление системы с ускорением  $\varepsilon_T = -\frac{M_1 + M_C}{J_\Sigma}$  по закону:

$$\omega = \omega_{нач} + \varepsilon_T \cdot t. \quad (1.56)$$

Время торможения электропривода от  $\omega_{нач}$  до нулевой скорости составляет:

$$t_T = \frac{\omega_{нач}}{\varepsilon_T} = J_\Sigma \cdot \frac{\omega_{нач}}{M_1 + M_C}. \quad (1.57)$$

При  $t > t_T$  скорость двигателя под действием момента  $M = -M_1$  меняет свой знак, и соответственно меняется знак реактивной нагрузки  $M_C$ . Модуль ускорения скачком уменьшается до величины  $|\varepsilon_{II}| = \left| -\frac{M_1 - M_C}{J_\Sigma} \right|$ , а уравнение движения имеет вид:

$$\omega = -\frac{M_1 - M_C}{J_\Sigma} \cdot t. \quad (1.58)$$

Время пуска двигателя до скорости  $-\omega_{кон}$  равно:

$$t_{II} = \frac{\omega_{кон}}{\varepsilon_{II}} = J_\Sigma \cdot \frac{\omega_{кон}}{M_1 - M_C}. \quad (1.59)$$

Таким образом, рассмотренные выше переходные процессы в жестком приведенном механическом звене позволяют сделать вывод о том, что при постоянстве статического момента закон изменения скорости электропривода в переходных процессах определяется законом изменения во времени момента двигателя.

Следовательно, формирование требуемых законов движения электропривода возможно производить формированием определенных законов изменения электромагнитного момента двигателя в переходных процессах.

### **Механическая часть электропривода представлена в виде двухмассовой упругой системы**

Примем  $M_{C1} = M_{C2} = 0$ . Проанализируем процесс пуска электропривода при приложении к системе скачком электромагнитного момента двигателя  $M = M_1 = \text{const}$ .

Дифференциальное уравнение движения системы, решенное относительно скорости двигателя  $\omega_1$ , можно получить из выражения (1.43) для передаточной функции  $W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)}$ :

$$J_\Sigma p \left[ \frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1 \right] \cdot \omega_1(p) = \left[ \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \cdot p^2 + 1 \right] \cdot M(p). \quad (1.60)$$

Подставив в (1.60)  $p = \frac{d}{dt}$  и  $M(p) = M_1 = \text{const}$ , получим:

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot \frac{d^3 \omega_1}{dt^3} + \frac{d\omega_1}{dt} = \varepsilon_{cp}, \quad (1.61)$$

где  $\varepsilon_{cp} = \frac{M_1}{J_\Sigma}$  - среднее ускорение системы.

Корни характеристического уравнения (1.61) были определены ранее (1.40):  $p_1=0$ ,  $p_{23} = \pm j\Omega_{12}$ . Нулевой корень определяет частное решение, соответствующее равноускоренному движению системы:  $\omega_1 = \varepsilon_{cp} \cdot t$ . Чисто мнимые корни определяют незатухающие колебания с частотой  $\Omega_{12}$ , и поэтому общее решение уравнения (1.61) следует искать в виде:

$$\omega_1 = \varepsilon_{cp} \cdot t + A \cdot \cos \Omega_{12} t + B \cdot \sin \Omega_{12} t. \quad (1.62)$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  определим из начальных условий. Пусть в момент времени  $t=0$  начальная скорость двигателя  $(\omega_1)_0=0$ , момент упругого взаимодействия  $(M_{12})_0=0$ . Тогда из первого уравнения системы (1.25)

$$\left( \frac{d\omega_1}{dt} \right)_0 = \frac{M_1}{J_1} = \frac{J_\Sigma}{J_1} \frac{M_1}{J_\Sigma} = \gamma \cdot \varepsilon_{cp}.$$

Подставив в (1.62) начальные условия, получим:

$$\begin{aligned} (\omega_1)_0 &= A \cdot \cos(\Omega_{12} \cdot 0) \rightarrow A = 0; \\ \left( \frac{d\omega_1}{dt} \right)_0 &= \varepsilon_{cp} + B \cdot \Omega_{12} \rightarrow \gamma \cdot \varepsilon_{cp} = \varepsilon_{cp} + B \cdot \Omega_{12} \rightarrow \\ &\rightarrow B = \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}}. \end{aligned} \quad (1.63)$$

Следовательно, уравнение движения первой массы электропривода принимает следующий вид:

$$\omega_1 = \varepsilon_{cp} \cdot t + \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}} \cdot \sin \Omega_{12} t. \quad (1.64)$$

Уравнение движения второй массы электропривода получим из первого уравнения системы (1.25) с учетом (1.23):

$$M_1 - C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}. \quad (1.65)$$

Продифференцировав (1.65) по времени с учетом (1.34), получим выражение для скорости  $\omega_2$ :

$$\omega_2 = \frac{J_1}{C_{12}} \cdot \frac{d^2 \omega_1}{dt^2} + \omega_1. \quad (1.66)$$

Подставив в выражение (1.66) значение скорости  $\omega_1$  (1.64) и второй ее производной, получим окончательно:

$$\omega_2 = \varepsilon_{cp} \cdot t - \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega_{12}} \cdot \sin \Omega_{12} \cdot t. \quad (1.67)$$

Характер полученных зависимостей  $\omega_1(t)$  и  $\omega_2(t)$  при  $\gamma < 2$  показан на рисунке 1.18. Отсюда видно, что переходные процессы в среднем протекают равномерно ускоренно, но мгновенные значения скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$  совершают колебания в противофазе. **Колебания скорости  $\omega_1$  тем меньше, чем меньше момент инерции механизма  $J_2$ , а увеличение резонансной частоты при том же ускорении  $\varepsilon_{cp}$  снижает амплитуды колебаний, как скорости  $\omega_1$ , так и скорости  $\omega_2$ .**

Присутствующее в реальной системе естественное демпфирование колебаний, как это указывалось выше, незначительно.

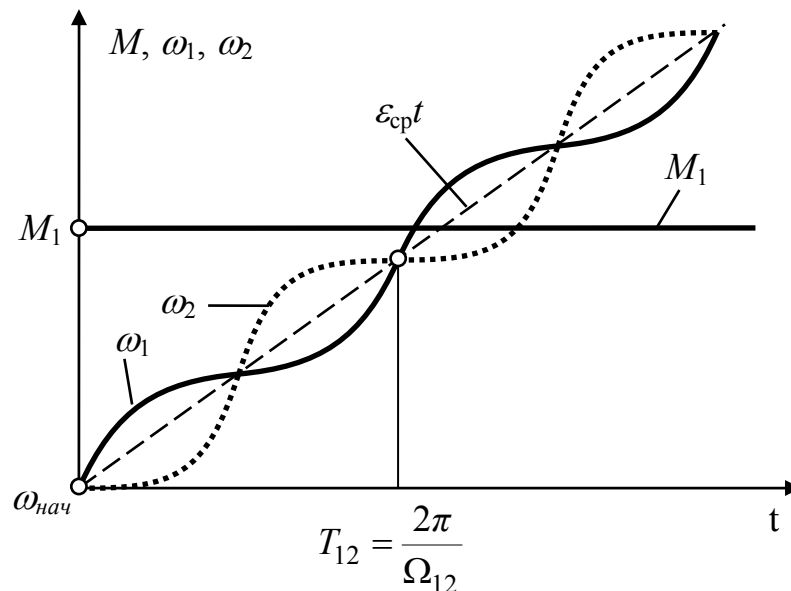


Рисунок 1.18

## 1.8 Динамические нагрузки электропривода

Уравнение движения приведенного жесткого механического звена определяет суммарную динамическую нагрузку  $M_{дин}$  электропривода:

$$M - M_C = J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{дин}. \quad (1.68)$$

Динамические силы и моменты, действующие на каждую массу механической системы, в отличие от статических моментов и электромагнитного момента двигателя пропорциональны ускорениям масс:

$$M_{дин.i} = J_i \cdot \frac{d\omega_i}{dt}; \quad F_{дин.j} = m_j \cdot \frac{dv_j}{dt}.$$

В свою очередь, ускорения масс определяются согласно (1.68) силами и моментами, действующими извне на механическую часть электропривода.

Динамический момент является важной составляющей полной нагрузки электропривода и представляет собой алгебраическую величину, знак которой при ускорении системы совпадает со знаком скорости, а при замедлении – противоположен ему. Динамический момент при ускорении системы является тормозным, и электрическая энергия расходуется на увеличение кинетической энергии системы и на преодоление сил сопротивления. При замедлении системы динамический момент становится движущим, и освобождающаяся кинетическая энергия расходуется на преодоление сил сопротивления и момента двигателя. Двигатель при этом может работать в тормозном режиме, если динамический момент по модулю будет больше момента сопротивления.

Максимально возможные при эксплуатации электропривода статический и динамический моменты определяют наибольшее значение электромагнитного момента двигателя  $M_{max}$ :

$$M_{max} = M_{c\ max} + M_{дин\ max} = M_{c\ max} + J_\Sigma \cdot \varepsilon_{тр\ max}, \quad (1.69)$$

где  $\varepsilon_{тр\ max}$  - максимально допустимое (или требуемое) ускорение системы.

Значение  $M_{max}$  определяет кратковременную перегрузку двигателя, которая не должна превышать максимально допустимый момент двигателя.

Действующий на механическую часть электропривода результирующий момент  $(M-M_C)$  частично тратится на ускорение ротора (якоря) самого двигателя, и поэтому **полная динамическая нагрузка механических передач** от двигателя к механизму увеличивается только на значение динамического момента механизма  $J_2 \cdot \varepsilon_{cp}$  (рисунок 1.11б):

$$M_{12} = M_{C2} + J_2 \cdot \varepsilon_{cp}. \quad (1.70)$$

При малых моментах инерции механизма это увеличение незначительно, и основной нагрузкой передач является статическая. При больших моментах инерции механизма ( $J_2 \gg J_1$ ) это увеличение может быть значительным, что необходимо учитывать при расчете кинематических цепей электропривода. Кроме того, динамические нагрузки передач и элементов кинематической цепи дополнительно увеличиваются при возникновении в системе упругих механических колебаний.

Нагрузки механического оборудования, **особенно знакопеременные**, определяют его износ, и поэтому ограничению максимальных нагрузок и уменьшению динамических колебаний следует уделять самое пристальное внимание. *Для правильных оценок нагрузок передач во многих случаях учет упругой связи между основными массами системы имеет более важное значение, чем строгий учет механических потерь.*

Рассмотрим пуск электропривода, механическая часть которого представлена двухмассовой расчетной схемой, при  $M = M_1 = \text{const}$ ,  $M_{C1} = \text{const}$ ,  $M_{C2} = \text{const}$ , а также при условии, что массы двигателя  $J_1$  и механизма  $J_2$  связаны конечной жесткостью передач  $C_{12}$ . Запишем систему дифференциальных уравнений двухмассовой системы (1.35) в несколько ином виде:

$$\begin{cases} M_1 - M_{12} - M_{C1} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_{C2} = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}; \\ \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} = C_{12} \cdot \left( \frac{d\omega_1}{dt} - \frac{d\omega_2}{dt} \right). \end{cases} \quad (1.71)$$

Для получения дифференциального уравнения системы, записанного относительно момента  $M_{12}$ , умножим первое уравнение на  $C_{12}/J_1$ , а второе - на  $C_{12}/J_2$ , и вычтем второе уравнение из первого:



$$\begin{aligned} \frac{C_{12}}{J_1} M_1 - \frac{C_{12}}{J_1} M_{12} - \frac{C_{12}}{J_1} M_{C1} - \frac{C_{12}}{J_2} M_{12} + \frac{C_{12}}{J_2} M_{C2} &= C_{12} \left( \frac{d\omega_1}{dt} - \frac{d\omega_2}{dt} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{C_{12}}{J_1} M_1 - \frac{C_{12}}{J_1} M_{C1} + \frac{C_{12}}{J_2} M_{C2} &= C_{12} \left( \frac{d\omega_1}{dt} - \frac{d\omega_2}{dt} \right) + \left( \frac{C_{12}}{J_1} M_{12} + \frac{C_{12}}{J_2} M_{12} \right). \end{aligned}$$

Затем прибавим и вычтем в левой части полученного уравнения величину  $(C_{12}/J_1) \cdot M_{C2}$  и перегруппируем члены полученного уравнения с учетом третьего уравнения системы (1.71):

$$\frac{C_{12}}{J_1} M_1 - \frac{C_{12}}{J_1} M_{C1} + \frac{C_{12}}{J_2} M_{C2} + \frac{C_{12}}{J_1} M_{C2} - \frac{C_{12}}{J_1} M_{C2} = \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} + \left( \frac{C_{12}}{J_1} + \frac{C_{12}}{J_2} \right) M_{12}$$

Наконец, учитывая, что в соответствии с (1.40)

$$\frac{C_{12}}{J_1} = \frac{J_2 \Omega_{12}^2}{J_1 + J_2} \Rightarrow \frac{C_{12}}{J_1} + \frac{C_{12}}{J_2} = \Omega_{12}^2,$$

получаем искомое дифференциальное уравнение:

$$J_2 \Omega_{12}^2 \frac{M_1 - M_{C1} - M_{C2}}{J_1 + J_2} + \Omega_{12}^2 M_{C2} = \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} + \Omega_{12}^2 M_{12}.$$

Обозначим в этом уравнении  $\frac{M_1 - M_{C1} - M_{C2}}{J_1 + J_2} = \varepsilon_{cp}$  и приведем его

к стандартному виду:

$$\frac{1}{\Omega_{12}^2} \cdot \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} + M_{12} = J_2 \cdot \varepsilon_{cp} + M_{C2}, \quad (1.72)$$

С учетом определяемого правой частью уравнения (1.72) частного решения и величин корней характеристического уравнения  $p_{12} = \pm j\Omega_{12}$  общее решение запишем в виде:

$$M_{12} = J_2 \cdot \varepsilon_{cp} + M_{C2} + A' \cdot \cos \Omega_{12} t + B' \cdot \sin \Omega_{12} t. \quad (1.73)$$

Начальные условия для определения коэффициентов  $A'$  и  $B'$  следующие: при  $t=0$  значения  $(M_{12})_0 = M_{C2}$  и  $\left( \frac{dM_{12}}{dt} \right)_0 = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2)_0 = 0$ .

Тогда из (1.73) получаем:  $A' = -J_2 \cdot \varepsilon_{cp}$ ;  $B' = 0$ .

Решение уравнения (1.73) при вышеуказанных начальных условиях имеет вид:

$$M_{12} = M_{C2} + J_2 \cdot \varepsilon_{cp} \cdot (1 - \cos \Omega_{12} \cdot t). \quad (1.74)$$

При тех же условиях нагрузка механической связи  $M_{12cp}$  в жестком приведенном двухмассовом звене (то есть без учета упругих связей) определяется выражением (1.70). Отличия в нагрузках передач, определенных с учетом и без учета упругости механических связей, хорошо видны на рисунке 1.19.

Из сравнения следует, что жесткое приведенное звено дает представление только о средней динамической нагрузке передач, без учета переменной составляющей, обусловленной механическими колебаниями упругой системы. За счет колебаний максимальная нагрузка может значительно превысить среднюю. Это превышение можно характеризовать так называемым динамическим коэффициентом, равным с учетом (1.70) и (1.74):

$$K_{дин} = \frac{M_{12max}}{M_{12cp}} = \frac{M_{C2} + 2 \cdot J_2 \cdot \varepsilon_{cp}}{M_{C2} + J_2 \cdot \varepsilon_{cp}} = 1 + \frac{M_{12cp} - M_{C2}}{M_{12cp}} = 1 + \left(1 - \frac{M_{C2}}{M_{12cp}}\right). \quad (1.75)$$

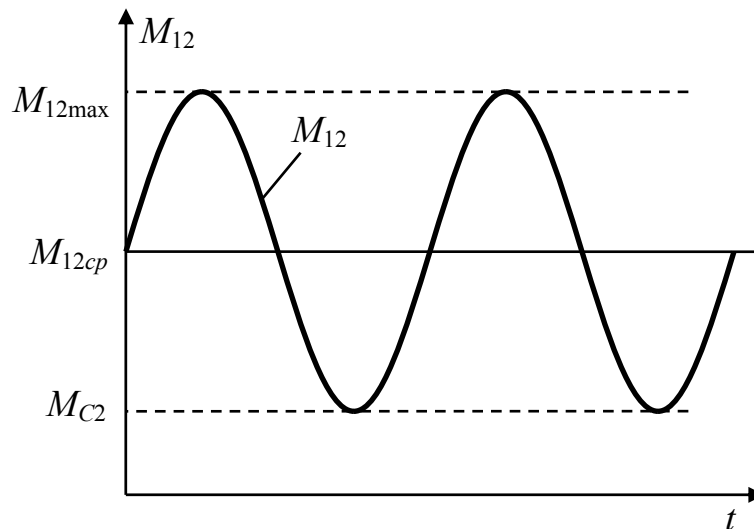


Рисунок 1.19

Из (1.75) видно, что величина динамического коэффициента напрямую определяется ускорением системы  $\varepsilon_{cp}$  и инерционностью механизма  $J_2$  и может достигать предельного значения  $K_{дин}=2$  при  $M_{C2}=0$ . При ненулевых начальных условиях значения  $K_{дин}$  могут быть гораздо выше.

Одним из примеров увеличения динамического коэффициента в случае ненулевых начальных условий являются дополнительные динамические нагрузки (удары), возникающие в реальных установках при выборе зазоров в передачах и сочленениях механизмов. На рисунке 1.20а представлена расчетная схема двухмассовой системы с учетом наличия в передаче кинематического зазора  $\Delta\varphi_3$ . Зависимость  $M_{12}=f(\varphi_1-\varphi_2)$  становится нелинейной и имеет вид, показанный на рисунке 1.20б.

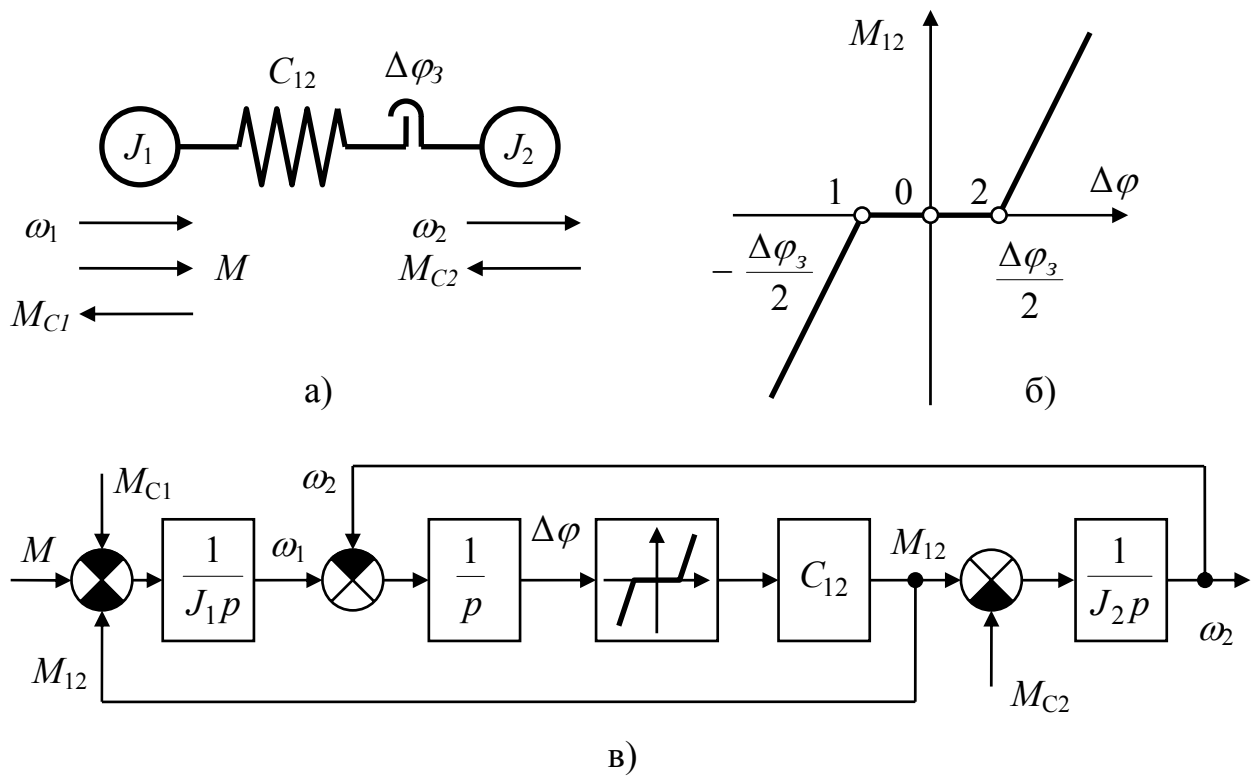


Рисунок 1.20

Уравнения движения для этой системы на основании (1.23) и (1.25) запишутся так:

$$\begin{cases} M - M_{12} - M_{C1} = J_1 \cdot p \cdot \omega_1; \\ M_{12} - M_{C2} = J_2 \cdot p \cdot \omega_2; \\ M_{12} = C_{12} \cdot \left( \varphi_1 - \varphi_2 \mp \frac{\Delta\varphi_3}{2} \right), \quad \text{при } |\varphi_1 - \varphi_2| > \frac{\Delta\varphi_3}{2}; \\ M_{12} = 0, \quad \text{при } |\varphi_1 - \varphi_2| \leq \frac{\Delta\varphi_3}{2}; \end{cases} \quad (1.76)$$

Структурная схема механической части электропривода, соответствующая системе уравнений (1.76), представлена на рисунке 1.20в.

Рассмотрим наиболее тяжелый случай выбора полного зазора, когда начальное значение  $\Delta\varphi$  на рисунке 1.20б соответствует точке 1, а заканчивается выбор зазора в точке 2. В этом случае при разомкнутом зазоре массы системы движутся независимо, причем  $M_{12}=0$  и при  $M=M_1=\text{const}$  система уравнений (1.76) принимает вид:

$$\begin{cases} M_1 - M_{C1} = J_1 \cdot p \cdot \omega_1; \\ -M_{C2} = J_2 \cdot p \cdot \omega_2. \end{cases} \quad (1.77)$$

К моменту соударения масс скорости  $\omega_1$  и  $\omega_2$  могут оказаться существенно разными. Если  $M_{C2}$  будет реактивным, то на первом этапе пуска, когда зазор выбирается и механизм с двигателем разъединены,  $\omega_2=0$ , а  $\omega_1$  увеличивается, так как  $M_1 > M_{C1}$ . К моменту окончания выбора зазора скорость  $\omega_1$  достигнет значения некоторой скорости  $\omega'_{1нач}$ , которое можно определить следующим образом. Время выбора зазора  $t_0$  определяется как  $t_0 = \frac{\omega'_{1нач}}{\varepsilon_{1B3}}$ , где  $\varepsilon_{1B3} = \frac{M_1 - M_{C1}}{J_1}$  - ускорение первой массы  $J_1$  при выборе

зазора. С другой стороны время  $t_0$  может быть определено как  $t_0 = \frac{2\Delta\varphi_3}{\omega'_{1нач}}$ .

Приравняв эти значения, получим равенство:

$$\frac{\omega'_{1нач}}{\varepsilon_{1B3}} = \frac{2 \cdot \Delta\varphi_3}{\omega'_{1нач}}. \quad (1.78)$$

Отсюда начальная скорость первой массы по окончании выбора зазора будет определяться выражением:

$$\omega'_{1нач} = \sqrt{2 \cdot \varepsilon_{1B3} \cdot \Delta\varphi_3}. \quad (1.79)$$

После окончания выбора зазора скорость  $\omega_2$  попрежнему будет оставаться равной нулю до тех пор, пока значение момента упругого взаимодействия  $M_{12}$ , возрастая, не превысит значение момента статического сопротивления  $M_{C2}$ . За это время скорость  $\omega_1$  еще увеличится до значения  $\omega_{1нач} > \omega'_{1нач}$ , которое и определит динамическую нагрузку механических передач в момент трогания с места второй массы.

Для количественного анализа увеличения динамической нагрузки передач из-за выбора зазора решим дифференциальное уравнение (1.72),

описывающее поведение механической системы после трогания с места второй массы, при других начальных условиях:

$$\text{при } t=0 \quad (M_{12})_0=M_{C2}, \quad \text{а} \quad \left(\frac{dM_{12}}{dt}\right)_0 = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2) = C_{12} \cdot \Delta\omega_{1нач}.$$

Опуская промежуточные довольно громоздкие преобразования, запишем выражение для динамического коэффициента двухмассовой упругой системы с зазором:

$$K_{дин 3} = \frac{M_{12 \max}}{M_{12 \text{cp}}} = 1 + \left(1 - \frac{M_{C2}}{M_{12 \text{cp}}}\right) \cdot \sqrt{1 + \frac{C_{12}^2 \cdot \Delta\omega_{1нач}^2}{J_2^2 \cdot \varepsilon_{cp}^2 \cdot \Omega_{12}^2}}. \quad (1.80)$$

Сравнивая (1.75) и (1.80) видим, что из-за подкоренного выражения, большего единицы, динамические нагрузки в системе с зазором больше чем в системе без зазоров.

Если подставить в (1.80) значения  $\varepsilon_{cp}$ ,  $\Omega_{12}$  и обозначить  $\gamma = \frac{J_{\Sigma}}{J_1}$ , получим:

$$K_{дин 3} = 1 + \left(1 - \frac{M_{C2}}{M_{12 \text{cp}}}\right) \cdot \sqrt{1 + \frac{\gamma \cdot J_1 \cdot C_{12} \cdot \Delta\omega_{1нач}^2}{(\gamma - 1) \cdot (M_1 - M_{C1} - M_{C2})^2}}. \quad (1.81)$$

Следует отметить, что в случае наличия зазора уменьшение жесткости передач  $C_{12}$  является фактором, снижающим динамические ударные нагрузки. Однако, при реальных конечных значениях  $C_{12}$  удары при выборе зазоров могут создавать недопустимо большие нагрузки, особенно при достаточно большом моменте инерции ротора (якоря) и жестко связанных с ним элементов  $J_1$ . В этих случаях в электроприводе предусматриваются законы управления, обеспечивающие плавность выбора зазоров и уменьшение скорости  $\omega_{1нач}$ .

## 1.9 Выводы по главе

1. Механическая часть электропривода в общем случае представляет систему связанных между собой упругими связями масс, движущихся вращательно или поступательно с различными скоростями.

2. Для возможности проведения исследования механической части электропривода и ее расчета необходимо привести координаты всех эле-

ментов системы к одной расчетной скорости на основе закона сохранения энергии.

3. Все многообразие неразветвленных схем механических частей конкретных электроприводов может быть сведено к трехмассовой, двухмассовой расчетным схемам или к жесткому приведенному механическому звену, описываемым типовыми дифференциальными уравнениями движения.

4. Двухмассовая упругая механическая часть электропривода представляет собой простейшую модель для изучения влияния упругих связей на поведение электропривода. Как объект управления, она может быть представлена последовательным соединением интегрирующего звена, характеризующего движение системы в среднем, и идеального колебательного звена.

5. Необходимый закон движения электропривода формируется соответствующим законом изменения электромагнитного момента двигателя. Так, при постоянном электромагнитном моменте двигателя движение электропривода происходит равномерно ускоренно, но мгновенные скорости упруго связанных масс при этом совершают колебания в противофазе.

6. Возникающие в механической части электропривода упругие колебания увеличивают динамические нагрузки механического оборудования и ускоряют его износ. Динамические нагрузки дополнительно увеличиваются при наличии зазоров в передачах и сочленениях оборудования.

7. При определенном сочетании параметров, когда влияние упругих связей незначительно, или при решении задач, в которых этим влиянием можно пренебречь, механическая часть электропривода может быть представлена жестким приведенным звеном.

### **1.10 Литература, рекомендуемая для изучения**

1. **Ключев, В.И.** Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – с. 24-101.

2. **Чиликин, М.Г.** Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – с. 10-71.

3. **Чиликин, М.Г.** Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – с. 14-46.

4. **Андреев, В.П.** Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – 2-е изд., перераб. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1963. – с. 173-208.

5. **Голован, А.Т.** Основы электропривода / А.Т. Голован. – М.: Энергия, 1959. – с. 25-38.

6. **Чиликин, М.Г.** Общий курс электропривода: учеб. для вузов/ М.Г. Чиликин., А.С. Сандлер. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – с. 26-48.

7. **Ильинский, Н.Ф.** Общий курс электропривода: учеб. для вузов / Н.Ф. Ильинский, В.Ф. Козаченко. - М.: Энергоатомиздат, 1992. -с.18-98.

8. **Кувшинов, А.А.** Теория электропривода. Учебное пособие по курсовому проектированию / А.А. Кувшинов, В.М. Вакулук, В.Б. Фатеев. – Оренбург, 2007. - с. 8-26, 83-99.

## **2 Свойства электромеханических преобразователей постоянного тока**

В данной главе рассматриваются статические и динамические свойства двигателей постоянного тока с независимым, последовательным и смешанным возбуждением.

Двигатели постоянного тока с независимым возбуждением широко используются в замкнутых системах регулируемого электропривода вследствие простоты формирования требуемых характеристик и различных способов регулирования скорости вращения в широком диапазоне.

Двигатели с последовательным и смешанным возбуждением характеризуются высокой перегрузочной способностью и используются в тех механизмах, в которых требуется получить высокий пусковой момент и ускоренное перемещение с малыми нагрузками при невысоких требованиях к быстродействию. Как правило, данные типы двигателей применяются в разомкнутых системах электропривода, управляемых оператором (электрический транспорт, подъемно-транспортные установки и т.п.).

### **2.1 Математическое описание процессов преобразования энергии в двигателе с независимым возбуждением**

Обмотка якоря и обмотка возбуждения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в общем случае получают питание от различных источников постоянного тока. Необходимым условием электромеханического преобразования энергии является протекание переменных токов по всем обмоткам машины, или хотя бы по их части. В машине постоянного тока протекание переменного тока в обмотке якоря обеспечивается коллектором, коммутирующим постоянный ток источника питания с частотой, равной электрической скорости ротора. Таким образом, двигатель постоянного тока в принципе является машиной переменного тока.

В то же время другим необходимым условием электромеханического преобразования энергии в двигателе является взаимная неподвижность магнитных полей статора и ротора. Так как обмотка возбуждения рассматриваемого двигателя расположена на статоре и подключена к источнику постоянного тока, ее магнитное поле неподвижно относительно статора. Следовательно, магнитное поле ротора, вращающегося со скоростью  $\omega$ , вращается с той же скоростью, но в обратную сторону, оставаясь неподвижным относительно статора двигателя. Таким образом, в неподвижных осях, связанных со статором, якорь представляется как обмотка, обтекаемая постоянным током  $i_{я}$  и создающая неподвижное магнитное поле, направление которого совпадает с осью щеток двигателя. В реальной машине по этой же оси направлены также МДС обмоток дополнительных полюсов ДП и компенсационной обмотки КО.

С учетом всего вышесказанного модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением представлена на рисунке 2.1а.

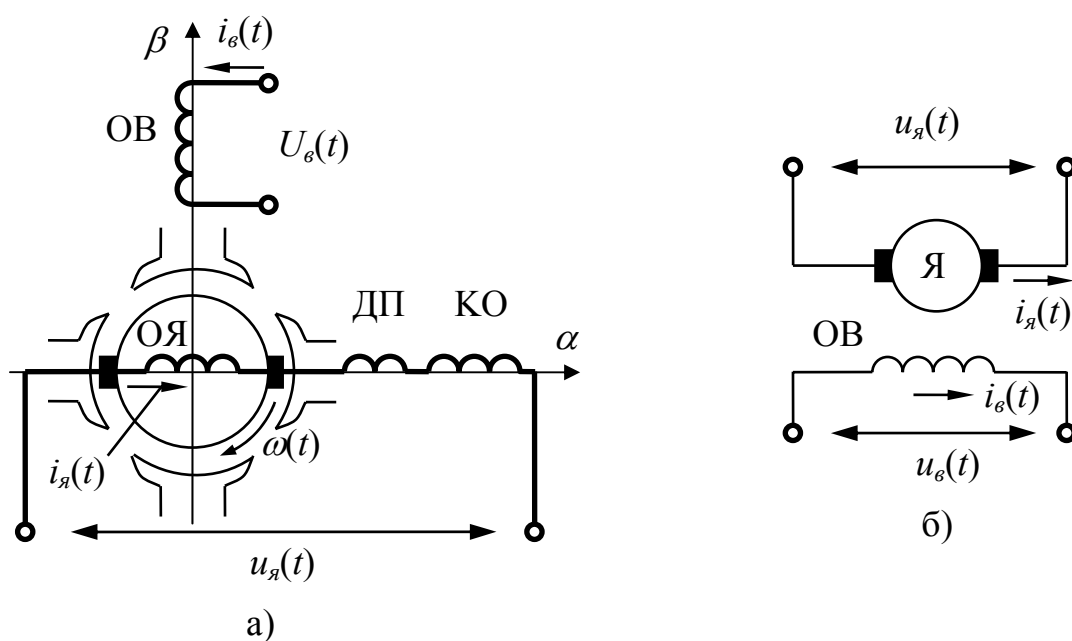


Рисунок 2.1

Обмотки ДП и КО непосредственно в процессе электромеханического преобразования энергии не участвуют. Обмотка ДП обеспечивает вблизи оси щеток  $\alpha$  такое магнитное поле, при котором процессы коммутации на коллекторе протекают наиболее благоприятно.

Обмотка КО обтекается током якоря и создает МДС, компенсирующую реакцию якоря по поперечной оси  $\alpha$ . В машинах без компенсационной обмотки эта реакция якоря создает размагничивающую продольную составляющую по оси  $\beta$ .



Такое вспомогательное назначение обмоток ДП и КО позволяет не показывать их на принципиальной схеме включения двигателя постоянного тока, используемой для записи уравнений электрического равновесия цепей двигателя и механической характеристики (рисунок 2.1б).

Математическое описание динамического процесса преобразования энергии в двигателе с независимым возбуждением выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} u_{\sigma}(t) = R_{\sigma} \cdot i_{\sigma}(t) + L_{\sigma} \frac{d i_{\sigma}(t)}{dt}; \\ u_{\text{я}\Sigma}(t) = R_{\text{я}\Sigma} \cdot i_{\text{я}}(t) + L_{\text{я}\Sigma} \frac{d i_{\text{я}}(t)}{dt} + K\Phi(i_{\sigma}) \cdot \omega(t); \\ M(t) = K\Phi(i_{\sigma}) \cdot i_{\text{я}}(t). \end{cases} \quad (2.1)$$

Здесь  $L_{\sigma}$  - полная индуктивность обмотки возбуждения;

$L_{\text{я}\Sigma}$  - суммарная индуктивность рассеяния обмоток ОЯ, ДП и КО, т.к. основная МДС обмотки ОЯ по оси  $\alpha$  компенсируется МДС обмотки КО;

$R_{\sigma}$  - активное сопротивление обмотки возбуждения;

$R_{\text{я}\Sigma}$  - суммарное активное сопротивление всех обмоток якорной цепи двигателя;

$\Phi$  - магнитный поток двигателя;

$K = \frac{p_n \cdot N}{2\pi \cdot a}$  - конструктивный коэффициент;

$p_n$  - число пар полюсов;

$N$  - число активных проводников обмотки якоря;

$a$  - число параллельных ветвей обмотки якоря.

Так как уравнения системы (2.1) содержат произведения переменных, то, если в процессе работы двигателя магнитный поток изменяется, математическое описание механической характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением нелинейно. В большинстве реальных электроприводов рассматриваемый двигатель работает при постоянном магнитном потоке. В этом случае система (2.1) линеаризуется, и уравнение динамической механической характеристики двигателя с независимым возбуждением при  $\Phi = \text{const}$  запишется в виде:

$$\omega(t) = \frac{u_{\text{я}}(t)}{K\Phi} - \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{(K\Phi)^2} \cdot M(t) - \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{(K\Phi)^2} \cdot \frac{dM(t)}{dt}. \quad (2.2)$$

Подставив в (2.2) выражение  $M(t)=K\Phi \cdot i_{я}(t)$  получим уравнение **динамической электромеханической характеристики**, под которой понимается зависимость скорости вращения двигателя от тока в якорной цепи  $\omega=f(I_{я})$ :

$$\omega(t) = \frac{u_{я}(t)}{K\Phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{K\Phi} \cdot i_{я}(t) - \frac{L_{я\Sigma}}{K\Phi} \cdot \frac{d i_{я}(t)}{dt}. \quad (2.3)$$

Уравнения **статических** электромеханической и механической характеристик двигателя могут быть получены при  $\Phi=\text{const}$  и  $U_{я}=\text{const}$  подстановкой в (2.3) и (2.2)  $\frac{dM(t)}{dt} = \frac{d i_{я}(t)}{dt} = 0$ :

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{K\Phi} I_{я}; \quad (2.4)$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{(K\Phi)^2} M. \quad (2.5)$$

Из (2.4) и (2.5) следует, что при  $\Phi=\text{const}$  электромеханическая и механическая характеристики двигателя с независимым возбуждением являются прямыми линиями, пересекающими оси координат. Ось ординат пересекается обеими характеристиками в одной точке (**точке идеального холостого хода**) с координатами  $[I_{я}=0; \omega=\omega_0]$  и  $[M=0; \omega=\omega_0]$ .

Подставив в (2.4) и (2.5)  $I_{я}=0$ ,  $M=0$ , получим величину скорости идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_{я}}{K\Phi}. \quad (2.6)$$

Точки пересечения характеристиками оси абсцисс определяют ток и момент короткого замыкания двигателя  $I_{я.кз}$  и  $M_{кз}$ . Их величины получим, подставив в (2.4) и (2.5)  $\omega=0$ :

$$I_{я.кз} = \frac{U_{я}}{R_{я\Sigma}}, \quad M_{кз} = K\Phi \cdot \frac{U_{я}}{R_{я\Sigma}} = K\Phi \cdot I_{я.кз}. \quad (2.7)$$

Так как электромеханическая и механическая характеристики двигателя являются прямыми линиями, их можно совместить в координатах  $[M(I_{я}); \omega]$ , подобрав соответствующим образом масштабы  $M$  и  $I_{я}$  на оси абсцисс (рисунок 2.2).

Координаты двух точек прямой полностью характеризуют ее положение на плоскости. Но при рассмотрении характеристик двигателя важно иметь показатель того, в какой степени изменяется скорость двигателя при изменении момента (нагрузки), насколько характеристика жесткая. Таким показателем электромеханических свойств двигателя является **жесткость механической характеристики**  $\beta_{cm}$  и ее **модуль**, который может быть определен из (2.5):

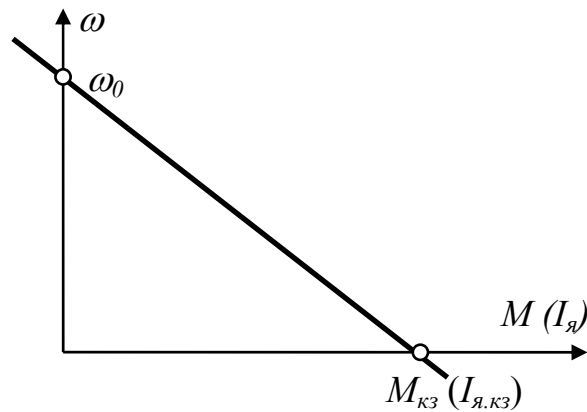


Рисунок 2.2

$$\beta = |\beta_{cm}| = \left| \frac{dM}{d\omega} \right| = \left| -\frac{(K\Phi)^2}{R_{я\Sigma}} \right| = \frac{(K\Phi)^2}{R_{я\Sigma}}. \quad (2.8)$$

Отрицательный знак жесткости механической характеристики  $\beta_{cm}$  определяет ее «падающий» характер в координатах  $[M(I_{я}), \omega]$ .

Таким образом, электромеханическая и механическая характеристики двигателя с независимым возбуждением расположены в I, II и IV квадрантах.

Учитывая (2.6) и (2.8) уравнения статических механической (2.5) и электромеханической (2.4) характеристик рассматриваемого двигателя могут быть записаны следующим образом:

$$\omega = \omega_0 - \frac{1}{\beta} M, \quad \omega = \omega_0 - \frac{K\Phi}{\beta} \cdot I_{я}, \quad (2.9)$$

$$M = \beta \cdot (\omega_0 - \omega), \quad I_{я} = \frac{\beta}{K\Phi} \cdot (\omega_0 - \omega), \quad (2.10)$$

$$M = M_{кз} - \beta \cdot \omega, \quad I_{я} = I_{я.кз} - \frac{\beta}{K\Phi} \cdot \omega. \quad (2.11)$$

## 2.2 Статические свойства двигателя с независимым возбуждением

### 2.2.1 Естественные и искусственные характеристики двигателя с независимым возбуждением

**Естественной схемой** включения двигателя, обеспечивающей номинальный режим работы, является схема, в которой в цепи якоря отсутствуют добавочные сопротивления, а значения напряжения на якоре и магнитного потока равны номинальным ( $U_{я}=U_n$  и  $\Phi=\Phi_n$ ). Электромеханическая и механическая статические характеристики двигателя, полученные в такой схеме включения, называются **естественными характеристиками**:

$$\omega = \omega_{0н} - \frac{R_{я\Sigma}}{K\Phi_n} I_{я} = \omega_{0н} - \frac{K\Phi_n}{\beta_e} I_{я}, \quad (2.12)$$

$$\omega = \omega_{0н} - \frac{R_{я\Sigma}}{(K\Phi_n)^2} M = \omega_{0н} - \frac{1}{\beta_e} M, \quad (2.13)$$

где  $\omega_{0н}$  - скорость идеального холостого хода на естественной характеристике;

$\beta_e$  - модуль статической жесткости естественной механической характеристики.

Естественная механическая характеристика двигателя с компенсационной обмоткой (рисунок 2.3а) дает основные представления об электромеханических свойствах двигателя и о его технических возможностях. Основным показателем естественной характеристики является ее модуль статической жесткости  $\beta_e$ . Чем выше  $\beta_e$  (**жестче характеристика**), тем меньше изменяется скорость двигателя при изменении его нагрузки, и наоборот, чем меньше  $\beta_e$  (**мягче характеристика**), тем более значительными будут изменения скорости при колебаниях нагрузки двигателя.

Зачастую более удобной оценкой стабильности рабочей скорости двигателя (жесткости его механической характеристики) является **статизм механической характеристики**, количественной оценкой которого служит номинальный перепад (изменение) скорости  $\Delta\omega_n$  при изменении нагрузки от  $M=0$  до  $M=M_n$ :

$$\Delta\omega_n = \omega_{0н} - \omega_n = \frac{R_{я\Sigma}}{(K\Phi)_n} I_{я.н} = \frac{M_n}{\beta_e}, \quad (2.14)$$

где  $I_{я.н}$ ,  $M_n$  - номинальные ток и момент двигателя.

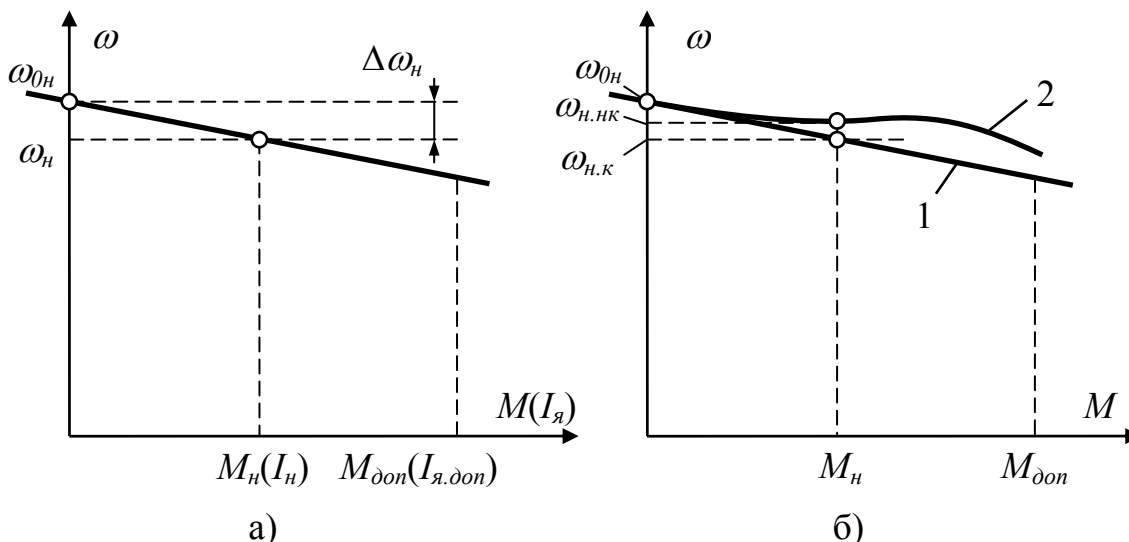


Рисунок 2.3

Из (2.14) видно, что номинальный перепад скорости прямо пропорционален величине суммарного активного сопротивления якорной цепи двигателя  $R_{я\Sigma}$ . Так как  $R_{я\Sigma}$  - величина достаточно малая, то относительный номинальный перепад скорости естественных характеристик двигателей большой и средней мощности составляет (3–10)% от скорости идеального холостого хода и уменьшается с увеличением мощности. Модуль же статической жесткости при увеличении мощности двигателя увеличивается. Двигатели небольшой мощности имеют относительный номинальный перепад более 10%.

Благодаря тому, что  $R_{я\Sigma}$  мало, ток короткого замыкания на естественной характеристике у двигателей средней и большой мощности (>10 кВт) в 10–20 раз больше номинального (при мощностях 0.5–10 кВт - в 5–10 раз). Эти значения токов гораздо больше **допустимого по условиям коммутации тока якоря  $I_{я.дон}$** . Этот ток определяет **перегрузочную способность** двигателя, которая для двигателей с независимым возбуждением нормального исполнения лежит в пределах:

$$\lambda = \frac{M_{дон}}{M_n} = 2 \div 2,5.$$

Для компенсированных двигателей перегрузочные способности по моменту и по току совпадают. У некомпенсированных двигателей это равенство нарушается.

Итак, двигатели с независимым возбуждением с компенсационной обмоткой имеют линейные механические характеристики. Однако, все

двигатели малой мощности и значительная часть двигателей средней мощности не имеют компенсационной обмотки, и форма их механических характеристик отклоняется от показанной на рисунке 2.3а из-за действия продольной составляющей поперечной реакции якоря. Эта составляющая уменьшает поток возбуждения двигателя в нелинейной зависимости от возрастающего тока якоря.

При малых значениях тока якоря и, соответственно, момента двигателя действие реакции якоря практически не проявляется, и основной магнитный поток машины остается примерно постоянным. Жесткость естественной характеристики при этом тоже остается примерно постоянной. При дальнейшем увеличении тока якоря магнитный поток машины уменьшается, что вызывает отклонение характеристик от линейных в сторону больших скоростей. Уже в номинальном режиме ( $I_{я}=I_n$ ) реакция якоря заметно снижает основной магнитный поток двигателя, вследствие чего номинальный перепад скорости меньше, чем у компенсированного двигателя того же типа (см. характеристику 2 на рисунке 2.3б).

В области перегрузок ( $I_{я}>I_n$ ) размагничивающее действие реакции якоря возрастает, причем в выражениях (2.4) и (2.5) увеличиваются как уменьшаемые, так и вычитаемые. Поэтому в механической характеристике может появиться участок с положительной жесткостью  $\left(\beta_{cm} = \frac{dM}{d\omega} > 0\right)$ .

При дальнейшем увеличении тока и момента двигателя жесткость характеристик снова становится отрицательной, что подтверждается величинами тока и момента короткого замыкания:

$$I_{я.кз.нк} = I_{я.кз.к} = \frac{U_n}{R_{я\Sigma}}, \quad M_{кз.нк} = K\Phi_{нк} \cdot I_{я.кз.нк} < M_{кз.к}, \quad (2.15)$$

где индекс «нк» относится к некомпенсированному, а индекс «к» - к компенсированному двигателю.

Проведенный анализ позволяет представить форму естественной механической характеристики некомпенсированного двигателя (кривая 2 на рисунке 2.3б) в сравнении с прямолинейной характеристикой 1 компенсированного двигателя. Отсутствие компенсации реакции якоря нарушает пропорциональность между током и моментом, уменьшает перегрузочную способность двигателя из-за уменьшения потока, а также может привести к неустойчивой работе двигателя на участках с  $\beta_e=0$  и  $\beta_e>0$ . Кроме того, изменение магнитного потока из-за реакции якоря неблагоприятно сказывается на динамических свойствах двигателя.

Для устранения этих недостатков в некомпенсированных двигателях мощностью до 100 кВт применяют так называемые стабилизирующие обмотки, размещаемые на главных полюсах машины. Эти обмотки являются, по сути, маломощными обмотками последовательного возбуждения, создающими небольшую положительную МДС, компенсирующую действие реакции якоря. Такие двигатели не могут работать в реверсивных приводах, так как при обратном направлении тока якоря эта обмотка будет лишь усиливать влияние реакции якоря.

Анализируя уравнения статических электромеханической и механической характеристик (2.4), (2.5) с учетом значения модуля статической жесткости (2.8), можно обозначить основные способы изменения вида характеристик двигателя (схема включения двигателя на рисунке 2.4а):

- изменением суммарного сопротивления якорной цепи  $R_{я\Sigma} + R_p$ ;
- изменением величины магнитного потока двигателя  $\Phi$  (изменением тока  $I_\sigma$ );
- изменением величины напряжения на якоре двигателя  $U_{я}$ .

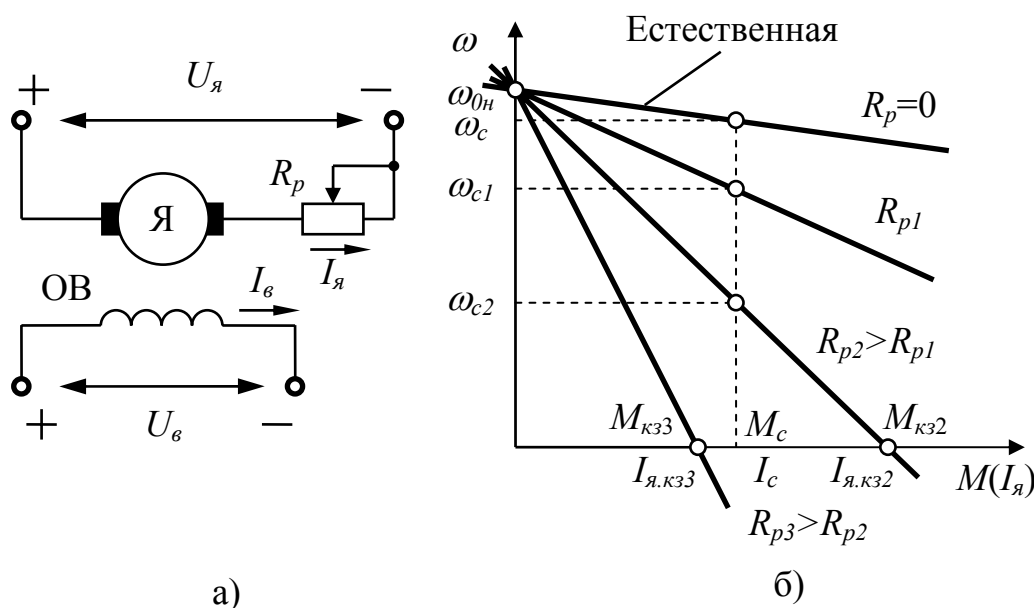


Рисунок 2.4

Реализуя вышеперечисленные способы, можно регулировать скорость вращения двигателя, ток и момент короткого замыкания и жесткость статических характеристик, то есть формировать необходимые для того или иного режима работы механизма характеристики двигателя. Такие характеристики, полученные с помощью изменения параметров электрических цепей двигателя, называются **искусственными**.

При введении добавочных резисторов  $R_p$  в цепь якоря получают искусственные характеристики, называемые **реостатными**. При этом умень-

шаются модуль жесткости статической механической характеристики, а также ток и момент короткого замыкания двигателя:

$$\beta = \frac{(K\Phi_n)^2}{R_{я\Sigma} + R_p}, \quad I_{я.кз} = \frac{U_n}{R_{я\Sigma} + R_p}, \quad M_{кз} = K\Phi \frac{U_n}{R_{я\Sigma} + R_p}.$$

Скорость идеального холостого хода на реостатных характеристиках остается той же, что и на естественной характеристике, и семейство реостатных характеристик для ряда значений  $R_p$  выглядит так, как показано на рисунке 2.4б. Уравнения электромеханических и механических реостатных характеристик согласно (2.12), (2.13) имеют вид:

$$\omega = \omega_{0н} - \frac{R_{я\Sigma} + R_p}{K\Phi_n} I_{я} = \omega_{0н} - \frac{K\Phi_n}{\beta} I_{я}, \quad (2.16)$$

$$\omega = \omega_{0н} - \frac{R_{я\Sigma} + R_p}{(K\Phi_n)^2} M = \omega_{0н} - \frac{1}{\beta} M. \quad (2.17)$$

**Введение резисторов в цепь якоря двигателя является простейшим средством регулирования скорости и ограничения тока и момента в различных переходных процессах, что широко используется в разомкнутых системах электроприводов при питании их от сети постоянного тока.**

Изменение магнитного потока двигателя  $\Phi$  возможно только в сторону его ослабления, так как в номинальном режиме магнитная цепь двигателя близка к насыщению  $\Phi_n \approx \Phi_{нас}$ . В соответствии с (2.6)–(2.8) при ослаблении потока скорость идеального холостого хода увеличивается, ток короткого замыкания остается неизменным, а момент короткого замыкания и модуль статической жесткости уменьшаются. Семейства электромеханических и механических характеристик для этого случая представлены на рисунке 2.5.

Особенностью этих характеристик является то, что с ослаблением магнитного потока при постоянном токе якоря уменьшается момент, развиваемый двигателем. На рисунке 2.5б рабочие участки механических характеристик в пределах перегрузочной способности двигателя показаны утолщенными линиями.



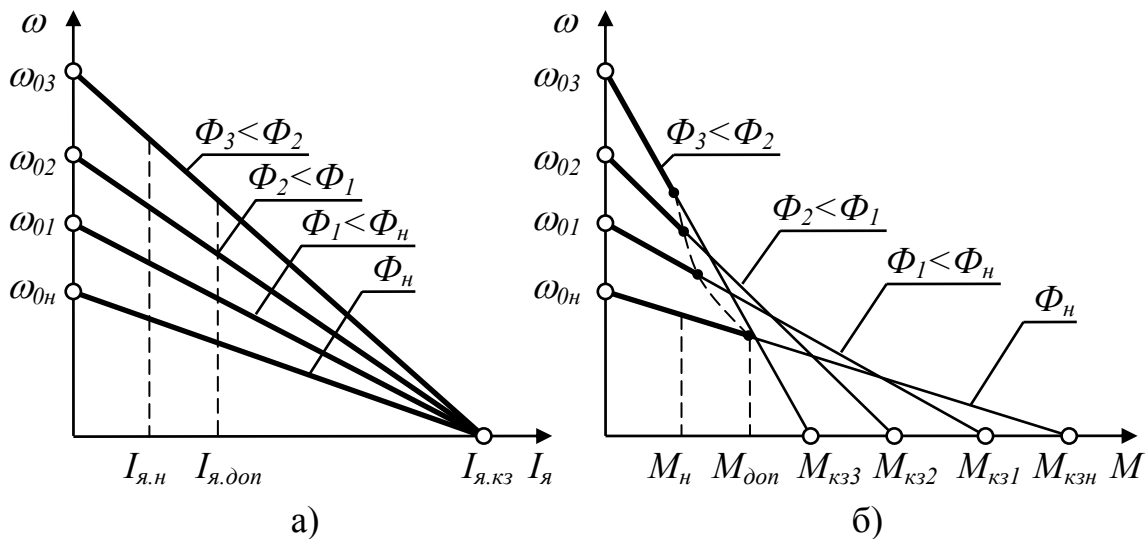


Рисунок 2.5

**Ослабление магнитного поля** двигателя с независимым возбуждением используется в электроприводах для **регулирования скорости вверх от номинальной** в пределах перегрузочной способности для получения так называемой второй зоны регулирования скорости.

**Изменение напряжения на якоре двигателя  $U_{я}$** , как правило, возможно только в сторону уменьшения, так как работа электрооборудования при напряжении выше номинального крайне нежелательна по правилам устройства и эксплуатации электроустановок. Кроме того, по условиям работы коллектора двигателя постоянного тока запас повышения напряжения, особенно у мощных двигателей, невелик. Другими словами, повышение напряжения на якоре возможно только у тех двигателей, которые рассчитаны на такой режим работы. Допустимое напряжение при этом должно быть указано в каталожных данных. Например, высокомоментные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов, используемые в приводах подач металлорежущих станков, допускают увеличение питающего напряжения в 2-4 раза.

Из уравнений (2.6) и (2.8), видно, что при изменении напряжения на якоре изменяется только скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ , а модуль жесткости механической характеристики при  $\Phi = \text{const}$  остается неизменным. Таким образом, **при изменении напряжения  $U_{я}$  получаем семейство характеристик, параллельных друг другу**. Если источник напряжения реверсивный, то характеристики располагаются во всех четырех квадрантах, как это показано на рисунке 2.6.

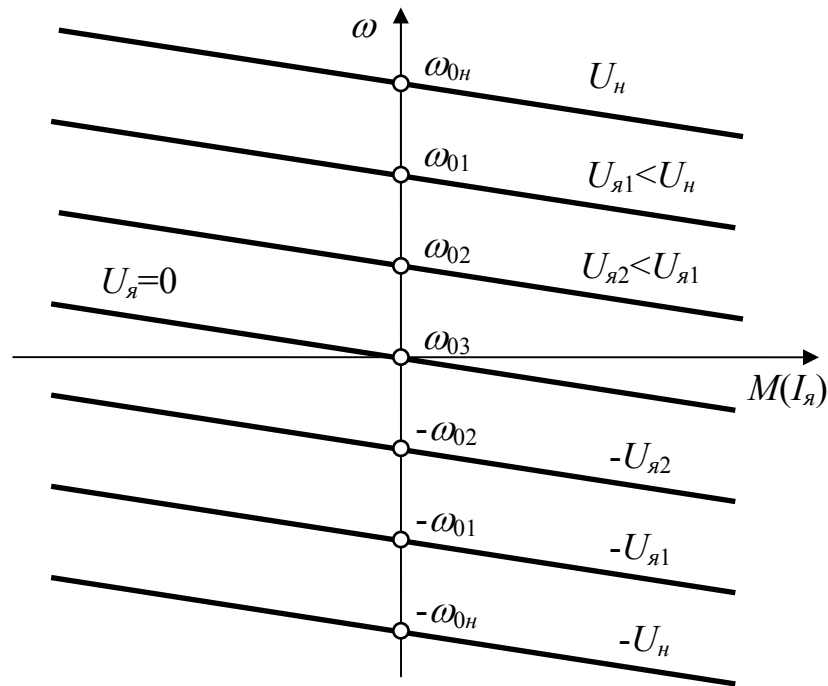


Рисунок 2.6

Так как регулируемое напряжение можно получить только от какого-либо преобразователя, имеющего конечное внутреннее сопротивление, жесткость характеристик для разомкнутых систем управления электропривода будет определяться не только сопротивлением якорной цепи двигателя  $R_{я\Sigma}$ , но и внутренним сопротивлением преобразователя  $R_{вн}$ :

$$\beta = \frac{(K\Phi_n)^2}{R_{я\Sigma} + R_{вн}}.$$

Механическая характеристика двигателя, подключенного к преобразователю с нулевым выходным напряжением  $U_{я}=0$ , проходит через начало координат  $\omega_0=0$  и является характеристикой динамического торможения рассматриваемого двигателя. Этот режим, в котором двигатель работает генератором на сопротивление якорной цепи, подробно будет рассмотрен ниже.

Поскольку естественные и искусственные характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением линейны, их построение осуществляется по двум точкам: точке идеального холостого хода  $[\omega=\omega_0, I_{я}=0, M=0]$  и точке номинальной нагрузки  $[\omega=\omega_{н.н} \text{ (скорость при номинальной нагрузке)}, I_{я}=I_n, M=M_n]$ . Значения скоростей в этих точках зависят от того, на какой характеристике работает двигатель. На естественной характеристике  $\omega=\omega_0=\omega_{0.н}$  и  $\omega=\omega_{н.н}=\omega_n$ , на искусственной характеристике  $\omega=\omega_0=\omega_{0.и}$ ,  $\omega=\omega_{н.н}=\omega_{н.и}$ . Скорости идеального холостого хода  $\omega_{0.и}$  и

скорости при номинальной нагрузке  $\omega_{н.и}$  определяются по соответствующим выражениям искусственных характеристик.

Проведенный анализ естественных и искусственных характеристик двигателя с независимым возбуждением подтверждает целесообразность его использования в разомкнутых системах электропривода с изменяющейся в широком диапазоне нагрузкой и регулированием скорости в не-большом диапазоне.

В замкнутых системах электропривода возможность простыми способами формировать требующиеся для механизма характеристики определили его широкое применение в современных электроприводах по системе тиристорный (транзисторный) преобразователь - двигатель.

### 2.2.2 Тормозные режимы двигателя с независимым возбуждением

Как известно, все электрические машины обратимы, то есть могут работать и в двигательном, и в генераторном режимах.

Проанализируем преобразование энергии в двигателе постоянного тока независимого возбуждения с помощью эквивалентной схемы цепи якоря двигателя на рисунке 2.7. На схеме показаны напряжение питающей сети  $U_c$  и ЭДС обмотки якоря двигателя  $E$ .

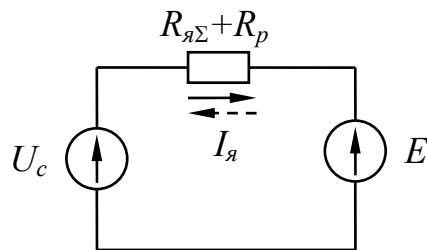


Рисунок 2.7

Направления напряжения, ЭДС и тока, показанные сплошными стрелками, соответствуют двигательному режиму, так как ток в источнике ЭДС противоположен по направлению самой ЭДС. Это соответствует потреблению энергии источником ЭДС, то есть электрическая энергия в двигателе преобразуется в механическую. В этом случае мощность двигателя и момент на его валу положительны.

Уравнение электрического равновесия для схемы на рисунке 2.7 при обходе контура по направлению, совпадающему с направлением  $U_c$ , запишется в виде:

$$U_c - E = (R_{я\Sigma} + R_p) \cdot I_{я}.$$

Умножив правую и левую части уравнения на ток якоря  $I_{я}$ , получим уравнение баланса мощностей:

$$U_c I_{я} = E \cdot I_{я} + (R_{я\Sigma} + R_p) \cdot I_{я}^2. \quad (2.18)$$

В уравнении (2.18) левая часть представляет собой мощность, потребляемую двигателем из сети. Первое слагаемое правой части является электромагнитной мощностью двигателя  $P_{эм}$ :

$$P_{эм} = E \cdot I_{я} = K\Phi \cdot \omega \cdot I_{я} = M \cdot \omega. \quad (2.19)$$

Принято считать, что знак электромагнитной мощности будет положительным когда ток якоря и ЭДС противоположны по направлению (работа в двигательном режиме).

Второе слагаемое правой части – мощность потерь  $\Delta P$  в активных сопротивлениях якорной цепи. Таким образом, мощность, потребляемая из сети в двигательном режиме:

$$P_c = P_{эм} + \Delta P. \quad (2.20)$$

Полезная механическая мощность на валу двигателя  $P_m$  меньше электромагнитной мощности  $P_{эм}$  на величину механических потерь в подшипниках и вентиляторных потерь, а также потерь в стали якоря, обусловленных его перемагничиванием.

Если направления тока и ЭДС двигателя совпадают, то двигатель будет являться источником электрической энергии (генератором), преобразующим механическую энергию с вала в электрическую. Этот режим для двигателя является **тормозным режимом**. При этом электромагнитная мощность двигателя имеет отрицательный знак  $P_{эм} < 0$ .

Совпадение направлений тока и ЭДС двигателя возможно в трех случаях:

- 1) ЭДС  $E$  больше напряжения сети  $U_c$ ;
- 2) ЭДС  $E$  и напряжение  $U_c$  совпадают по направлению;
- 3) напряжение сети  $U_c = 0$  (сеть отсутствует).

Соответственно у двигателя постоянного тока с независимым возбуждением возможны три тормозных режима.

Первый из них возникает при  $E > U_c$  и называется режимом **рекуперативного торможения**. При этом двигатель отдает (возвращает) энергию в сеть. Условию рекуперации энергии  $E > U_c$  соответствует условие  $\omega > \omega_0$ . Этот режим может быть осуществлен тогда, когда к валу двигателя со стороны рабочей машины будет приложен движущий момент, совпадающий

по направлению с вращением двигателя. В результате скорость двигателя станет больше скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . В этом режиме нагрузка как бы «подкручивает» двигатель, при этом двигатель создает тормозной момент, работая генератором параллельно с сетью.

Поскольку при переходе в режим рекуперативного торможения схема включения двигателя не изменяется, характеристики этого режима являются продолжением электромеханических и механических характеристик двигательного режима в область второго (четвертого) квадранта (рисунок 2.8). Классическим примером работы двигателя в режиме рекуперативного торможения является спуск груза со скоростью  $-\omega'_c$ , несколько большей скорости подъема  $\omega_c$  на естественной характеристике (рисунок 2.8а).

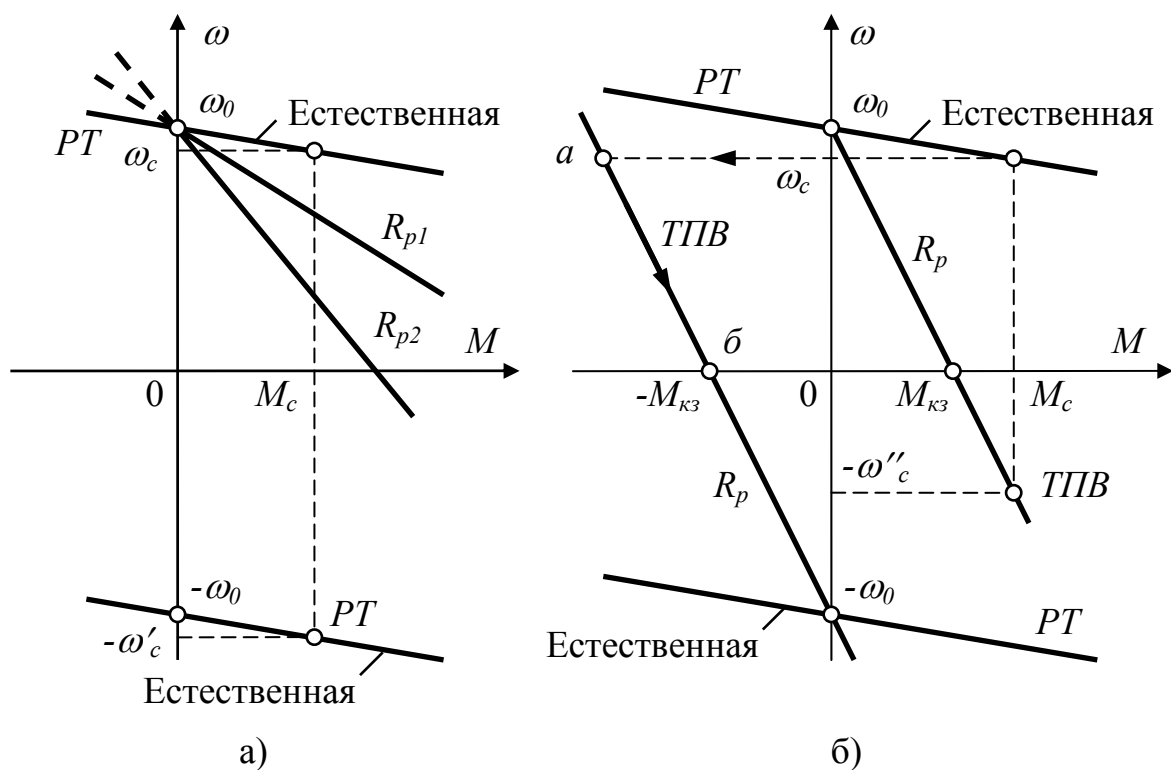


Рисунок 2.8

Так как направление (знак) тока при переходе в тормозной режим меняется, то меняются и знаки мощностей  $P_c$  и  $P_{эм}$  на противоположные. Следовательно, уравнение баланса (2.18) можно записать следующим образом:

$$-P_c = -P_{эм} + (R_{я\Sigma} + R_p)I_{я}^2 = -P_{эм} + \Delta P.$$

Изменив знаки на противоположные, получим:

$$P_c = P_{эм} - (R_{я\Sigma} + R_p) I_{я}^2 = P_{эм} - \Delta P, \quad (2.21)$$

где  $P_c$  - мощность, возвращаемая двигателем в сеть.

Так как  $E > U_c$ , то  $P_{эм} > P_c$ , что и следует из уравнения (2.21).

Второй тормозной режим возникает при совпадении направлений  $E$  и  $U_c$ , что возможно в двух случаях. В первом из них двигатель изменяет направление вращения под действием активного статического момента  $M_c$ , большего по величине момента короткого замыкания  $M_{кз}$ . Таким образом, при переходе из двигательного режима в тормозной изменяет свой знак ЭДС  $E$ . Такой режим используется для выполнения определенных технологических операций, например спуска груза на реостатной характеристике со скоростью  $-\omega''_c$  (рисунок 2.8б).

Второй случай имеет место тогда, когда при переходе из двигательного режима в тормозной с помощью схемных переключений изменяет свой знак напряжение на якоре двигателя. Двигатель, работавший до этого в естественной схеме включения со скоростью  $\omega_c$ , переходит на характеристику обратного направления вращения в точку "а" (рисунок 2.8б). Скорость при этом не изменяется из-за инерционности электропривода. Двигатель развивает момент, действующий в направлении, противоположном направлению вращения (тормозной момент), что приводит к торможению двигателя. Торможение будет осуществляться до полной остановки в точке "б" на механической характеристике двигателя. В этот момент двигатель должен быть отключен от сети, если торможение имело целью остановку электропривода. Если этого не сделать, двигатель будет разгоняться в другую сторону.

В обоих рассмотренных случаях двигатель включен для одного направления вращения, а под действием внешних сил (груз, инерция) вращается в противоположную сторону (против включения). Поэтому этот тормозной режим называется **торможением противовключением**.

Поскольку в этом режиме ЭДС двигателя  $E$  совпадает по направлению с напряжением сети  $U_c$  и током якоря  $I_{я}$ , ток и момент двигателя в этом случае будут больше тока и момента короткого замыкания. Это обстоятельство заставляет ограничивать ток при торможении включением в якорную цепь значительного по величине добавочного сопротивления:

$$R_{я\Sigma} + R_p = \frac{U_c + E}{I_{я доп}}. \quad (2.22)$$

Для оценки величины этого добавочного сопротивления рассмотрим случай торможения противовключением со скорости идеального хо-

постоянного хода  $\omega_{0,n}$  ( $E=U_c=U_n$ ). Для большинства двигателей  $I_{я.доп}=(2-2.5)I_{я.н}$ ,  $R_{я\Sigma}\approx 0.1 \cdot \frac{U_n}{I_{я.н}}$ . Тогда из (2.22) получим:

$$R_p = \frac{2U_n}{(2-2.5)I_{я.н}} - R_{я\Sigma} = (1.0-0.8)\frac{U_n}{I_{я.н}} - R_{я\Sigma} = (10-8)R_{я\Sigma} - R_{я\Sigma} = (9.0-7.0)R_{я\Sigma}.$$

Вследствие больших величин сопротивлений в цепи якоря жесткость механических характеристик в режиме противовключения невелика, а сами характеристики являются продолжением реостатных характеристик двигательных режимов в первом или третьем квадрантах в области второго или четвертого квадрантов (рисунок 2.8б).

Анализируя эквивалентную схему на рисунке 2.7 при согласном направлении  $U_c$  и  $E$ , можно заключить, что знак мощности  $P_{эм}$  меняется на противоположный ( $P_{эм}<0$ ). Поэтому уравнение баланса мощностей (2.18) для этого режима можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_c &= -P_{эм} + \Delta P; \\ P_c + P_{эм} &= \Delta P. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Таким образом, двигатель в режиме торможения противовключением работает генератором последовательно с сетью. При этом и мощность  $P_c$ , потребляемая из сети, и мощность  $P_{эм}$ , генерируемая электрической машиной в процессе торможения, преобразуются в потери, выделяемые в виде тепла в сопротивлениях якорной цепи двигателя.

Третий тормозной режим при  $U_c=0$ , можно получить, отключив якорь двигателя от сети и замкнув его накоротко или через добавочное сопротивление  $R_{дм}$ , не отключая при этом обмотку возбуждения (рисунок 2.9а). В этом случае двигатель работает автономным генератором с независимым возбуждением, а режим называется режимом **динамического торможения**. Уравнения электромеханической и механической характеристик для этого режима могут быть получены, если в (2.16) и (2.17) подставить  $U_я=0$  и  $R_p=R_{дм}$ :

$$\omega = -\frac{R_{я\Sigma} + R_{дм}}{K\Phi} \cdot I_я, \quad (2.24)$$

$$\omega = -\frac{R_{я\Sigma} + R_{дм}}{(K\Phi)^2} \cdot M. \quad (2.25)$$

Из сопоставления (2.16), (2.17) с (2.24), (2.25) видно, что характеристики динамического торможения при равенстве  $R_p$  и  $R_{\text{дт}}$  представляют собой прямые, параллельные реостатным характеристикам, и проходящие через начало координат. В частности, при  $R_{\text{дт}}=0$  и  $\Phi=\Phi_n$  характеристика динамического торможения будет параллельна естественной (рисунок 2.9б). При постоянном магнитном потоке  $\Phi=\text{const}$  электромеханические и механические характеристики могут быть совмещены соответствующим подбором масштабов по оси абсцисс.

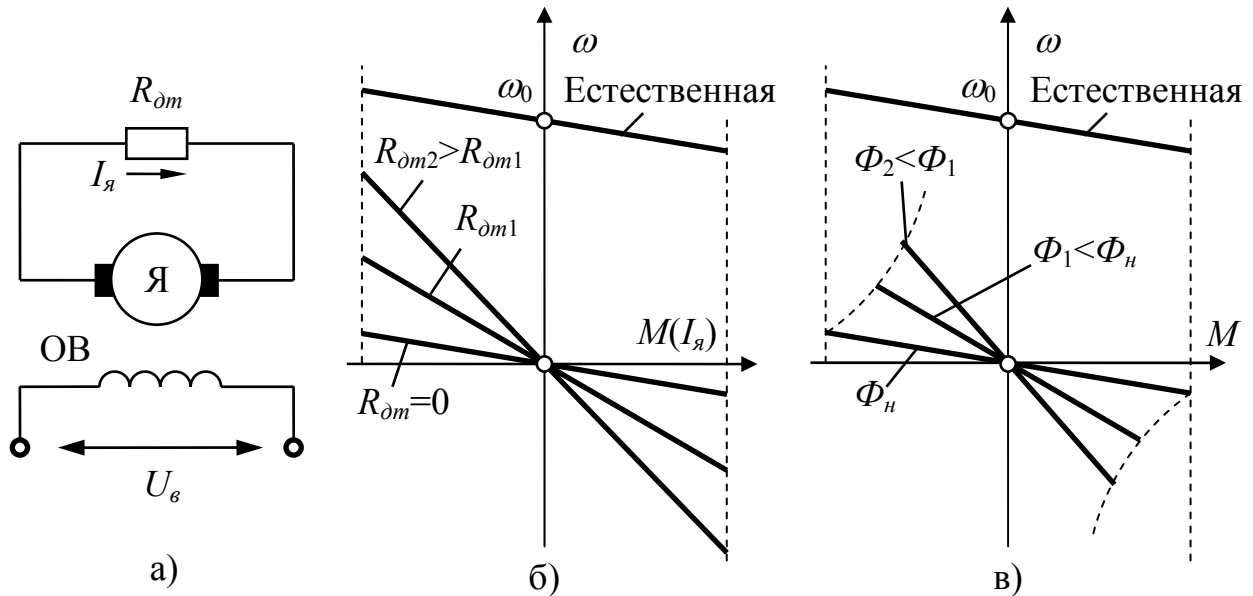


Рисунок 2.9

Жесткость механических характеристик при динамическом торможении можно изменять не только изменением сопротивления якорной цепи, но и изменением магнитного потока двигателя. В этом случае коэффициент пропорциональности между током и моментом для различных характеристик неодинаков, и поэтому на рисунке 2.9в представлены только механические характеристики. Следует помнить, что при уменьшении магнитного потока уменьшается и максимальный тормозной момент, создаваемый двигателем.

Баланс мощностей в режиме динамического торможения можно получить из (2.23), подставив  $P_c=0$ :

$$P_{\text{эм}} = \Delta P. \quad (2.26)$$

Таким образом, вся энергия  $P_{\text{эм}}$ , генерируемая электрической машиной в процессе торможения, преобразуется в электрические потери, выделяемые в виде тепла в сопротивлениях якорной цепи двигателя.



Сравнивая режим динамического торможения с режимом противовключения, можно отметить, что потери энергии в первом случае меньше, чем во втором. Но в отличие от режима противовключения динамическое торможение при снижении скорости становится малоэффективным из-за снижения тормозного момента. С другой стороны, в режиме динамического торможения может быть обеспечена жесткая механическая характеристика при  $R_{dm}=0$ , которая используется в электроприводах подъемных механизмов для спуска тяжелых грузов на низкой скорости. Рекуперативное торможение – самый экономичный тормозной режим. Его недостатком является торможение при скоростях, больших скорости идеального холостого хода. Однако, в современных замкнутых системах тиристорных и транзисторных электроприводов постоянного тока имеется возможность эффективного рекуперативного торможения контролируемым снижением напряжения на якоре двигателя.

Основные достоинства и недостатки, а также области применения рассмотренных способов торможения приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Сравнительные характеристики способов торможения

	Способы торможения		
	Противовключение	Динамическое	Рекуперативное
Достоинства	<ul style="list-style-type: none"> <li>- простота схем</li> <li>- наличие тормозного момента вплоть до останова двигателя</li> <li>- высокая интенсивность торможения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- отсутствие силовой питающей сети (простота схем)</li> <li>- возможность получения жестких механических характеристик с малыми скоростями вращения</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- рекуперация энергии в тормозном режиме</li> <li>- высокий КПД</li> </ul>
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> <li>- отсутствие рекуперации</li> <li>- низкий КПД</li> <li>- мягкие механические характеристики</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- отсутствие рекуперации</li> <li>- тормозной момент интенсивно уменьшается с уменьшением скорости вращения (невысокая интенсивность торможения)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- сложность схем (наличие регулируемого источника напряжения с возможностью режима рекуперации)</li> </ul>
Область применения	<ul style="list-style-type: none"> <li>- торможение (реверс) двигателей в разомкнутых системах</li> <li>- спуск грузов в подъемных механизмах, управляемых оператором</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- торможение двигателей в разомкнутых системах</li> <li>- получение малых посадочных скоростей в подъемных механизмах</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- замкнутые системы электроприводов с широким диапазоном регулирования скорости</li> </ul>

### 2.3 Динамические свойства электромеханического преобразователя с независимым возбуждением

Для анализа динамических свойств преобразуем систему уравнений (2.1) и запишем ее в операторной форме:

$$\begin{cases} U_{\epsilon}(p) = \frac{R_{\epsilon}}{K_{\phi}} \cdot (1 + T_{\epsilon}p) \cdot \Phi(p), \\ U_{\text{я}}(p) = R_{\text{я}\Sigma} \cdot (1 + T_{\text{я}}p) \cdot I_{\text{я}}(p) + K\Phi(p) \cdot \omega(p), \\ M(p) = K\Phi(p) \cdot I_{\text{я}}(p), \end{cases} \quad (2.27)$$

где  $T_{\epsilon} = \frac{L_{\epsilon}}{R_{\epsilon}}$  - электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения;

буждения;

$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{R_{\text{я}\Sigma}}$  - электромагнитная постоянная времени цепи якоря;

$K_{\phi} = \frac{\Phi_n}{I_{\epsilon.\text{лин}}}$  - коэффициент линейной части кривой намагничивания двигателя;

вания двигателя;

$I_{\epsilon.\text{лин}}$  - ток возбуждения, создающий номинальный поток  $\Phi_n$  при отсутствии насыщения магнитной цепи (рисунок 2.10).

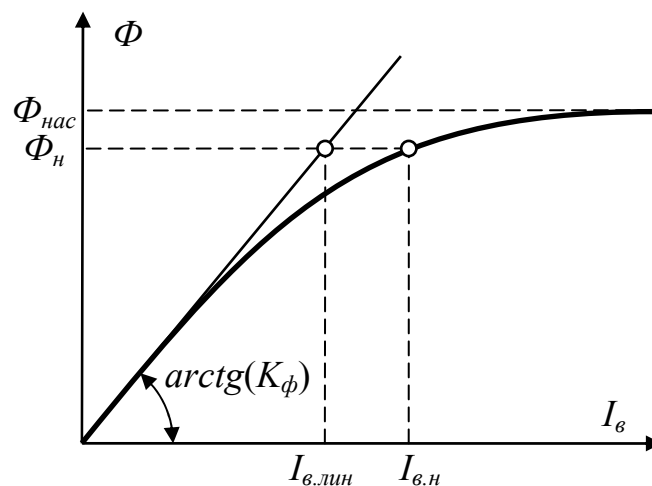


Рисунок 2.10

Индуктивность обмотки возбуждения  $L_{\epsilon}$  зависит не только от числа ее витков  $w_{\epsilon}$ , расположения обмотки и объема стали статора, но и от величины тока возбуждения  $I_{\epsilon}$  (места расположения рабочей точки на кривой намагничивания).

При работе на линейной части кривой намагничивания индуктивность обмотки возбуждения определяется по формуле:

$$L_{\epsilon} = 2 \cdot p_n \cdot w_{\epsilon} \cdot K_{\phi} = \frac{2 p_n w_{\epsilon} \Phi_n}{I_{\epsilon.лин}}. \quad (2.28)$$

При работе двигателя в области насыщения индуктивность обмотки возбуждения уменьшается тем больше, чем выше насыщение, а ее величина определяется выражением:

$$L_{\epsilon.нас} = 2 p_n w_{\epsilon} \left( \frac{d\Phi}{dI_{\epsilon}} \right)_{нас}. \quad (2.29)$$

У двигателей мощностью от одного до нескольких тысяч киловатт постоянная времени обмотки возбуждения  $T_{\epsilon}$  лежит в пределах (0,2–5) с., причем с увеличением мощности двигателя она быстро возрастает.

Индуктивность якорной цепи двигателя может быть вычислена по приближенной формуле:

$$L_{я\Sigma} \approx \frac{\gamma \cdot U_n}{p_n \omega_n I_{я.н}}, \quad (2.30)$$

где  $\gamma = 0.6$  для некомпенсированных и  $\gamma = 0.25$  для компенсированных двигателей.

У двигателей средней и большой мощности постоянная времени якорной цепи  $T_{я}$  лежит в пределах (0,02–0,1) с., причем наибольшие значения  $T_{я}$  имеют некомпенсированные или тихоходные двигатели большой мощности.

Структурная схема электромеханического преобразователя с независимым возбуждением, соответствующая системе уравнений (2.27), приведена на рисунке 2.11а. Эта схема, как и все схемы и характеристики, рассмотренные выше, предполагает питание двигателя от источника напряжения, имеющего необходимую мощность и внутреннее сопротивление, равное нулю.

В данном случае есть два возможных канала управления: канал управления полем двигателя с управляющим воздействием  $U_{\epsilon}$  и канал управления цепью якоря с управляющим воздействием  $U_{я}$ . При строгом учете всех физических процессов в двигателе, особенно реакции якоря, эти два канала сложно взаимодействуют друг с другом. Если пренебречь влиянием реакции якоря (предположить наличие компенсационной обмотки),

то процессы в цепи возбуждения протекают независимо от процессов в якорной цепи. В этом случае цепь обмотки возбуждения двигателя можно представить как апериодическое звено с постоянной времени  $T_e$ .

Процессы же в якорной цепи зависят от изменений магнитного потока двигателя  $\Phi$ . Причем, изменение магнитного потока вносит нелинейность в математическое описание процессов преобразования энергии даже при ненасыщенной магнитной цепи. Поэтому при переменном магнитном потоке структурная схема на рисунке 2.11а используется для анализа динамических свойств электроприводов постоянного тока с помощью численных методов.

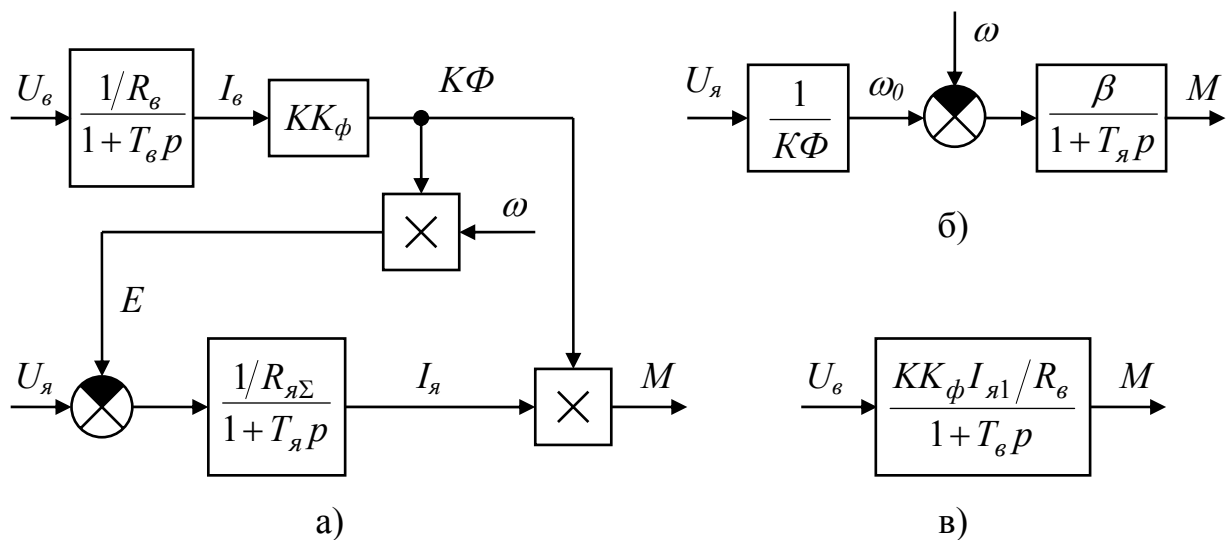


Рисунок 2.11

В реальных электроприводах двигатель с независимым возбуждением очень часто работает при постоянном магнитном потоке. В этом случае второе уравнение системы (2.27) после несложных преобразований с учетом (2.8) превращается в уравнение динамической механической характеристики:

$$(1 + T_я p) \cdot M(p) = \beta \cdot [\omega_0(p) - \omega(p)]. \quad (2.31)$$

Этому уравнению соответствует структурная схема, представленная на рисунке 2.11б. Таким образом, при  $\Phi = \text{const}$  электромеханический преобразователь с независимым возбуждением представляет собой апериодическое звено с постоянной времени  $T_я$ .

Уравнение динамической механической характеристики устанавливает связь между механическими переменными рассматриваемого двигателя в общем виде, справедливом для любых режимов работы электропривода. Конкретные же динамические характеристики, которых в принципе

бесчисленное множество, зависят от многих факторов (вид механической части, начальные условия и т.д.) и несут информацию о свойствах всей динамической системы, в которую кроме электромеханического преобразователя входит механическая часть электропривода.

Уравнение (2.31) и структурная схема на рисунке 2.11б показывают, что изменение скорости электропривода  $\omega$  для электромеханического преобразователя является возмущающим воздействием, определяющим изменение электромагнитного момента при данном управляющем воздействии  $\omega_0$ . Передаточная функция электромагнитного преобразователя по возмущению называется динамической жесткостью механической характеристики:

$$\beta_{дин}(p) = \frac{M(p)}{\omega(p)} = -\frac{\beta}{1+T_я p}. \quad (2.32)$$

Динамическая жесткость механической характеристики (2.32) позволяет анализировать реакцию электромеханического преобразователя на изменения скорости электропривода во всех режимах работы частотным методом теории автоматического управления.

Уравнение амплитудно-фазочастотной характеристики АФЧХ динамической жесткости определяется подстановкой в (2.32)  $p=j\Omega$ :

$$\beta_{дин}(j\Omega) = -\frac{\beta}{1+jT_я\Omega} = \beta \frac{-1+jT_я\Omega}{1+T_я^2\Omega^2} = P(\Omega) + jQ(\Omega) = A(\Omega) \cdot e^{j\psi(\Omega)}, \quad (2.33)$$

где  $P(\Omega)$  и  $Q(\Omega)$  - действительная и мнимая частотные функции, являющиеся координатами амплитудно-фазочастотной характеристики в комплексной плоскости;

$A(\Omega) = |\beta_{дин}|$  - модуль АФЧХ (модуль динамической жесткости механической характеристики);

$\psi(\Omega)$  - аргумент АФЧХ (сдвиг по фазе между колебаниями момента и скорости двигателя).

Величины модуля и аргумента АФЧХ определяется с учетом (2.33) по выражениям:

$$A(\Omega) = |\beta_{дин}| = \frac{\beta}{\sqrt{1+T_я^2\Omega^2}}, \quad (2.34)$$

$$\psi(\Omega) = -\pi - \arctg T_я\Omega. \quad (2.35)$$

АФЧХ динамической жесткости и соответствующие ей ЛАЧХ и ЛФЧХ представлены на рисунке 2.12а,б.

Анализируя выражение (2.34), (2.35) и рисунок 2.12 можно сделать вывод о том, что электромагнитная инерция электромеханического преобразователя приводит к уменьшению модуля динамической жесткости механической характеристики, причем с увеличением частоты вынужденных колебаний  $\Omega$  это уменьшение становится более значительным. При этом сдвиг по фазе между колебаниями момента и скорости изменяется от  $-\pi$  до  $-3\pi/2$  при изменении  $\Omega$  от 0 до  $\infty$ .

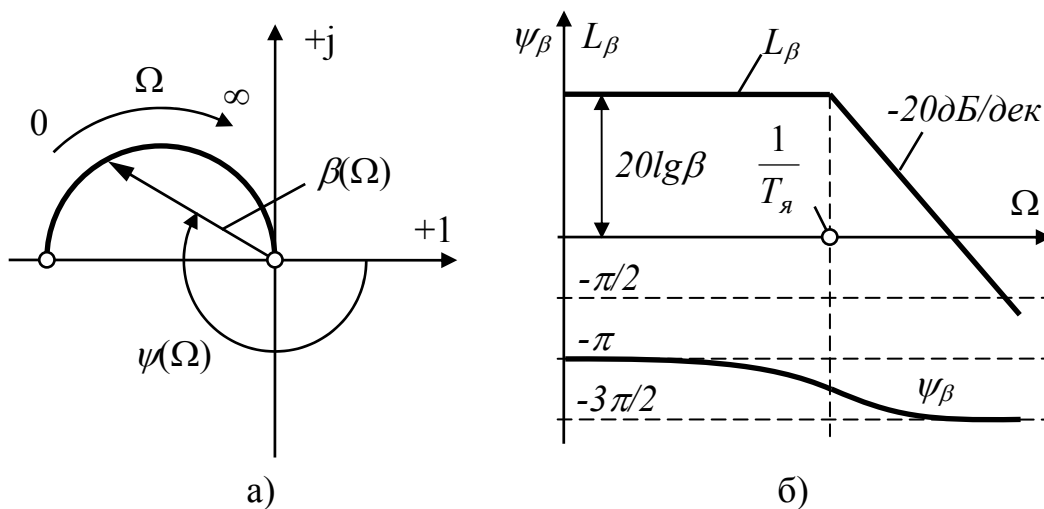


Рисунок 2.12

Так, при введении в цепь якоря двигателя добавочного сопротивления уменьшается  $T_я$ . Если при этом в пределах возможных частот колебаний нагрузки модуль динамической жесткости снижается незначительно, а фазовый сдвиг остается близким к  $-\pi$ , то без существенных погрешностей можно исследовать динамические процессы электропривода, пользуясь выражением статической механической характеристики (пренебрегая  $T_я$ ).

Частотные характеристики динамической жесткости характеризуют также точность поддержания установленных значений скорости или момента в динамических режимах работы электропривода. Особенно удобно ими пользоваться в случаях, когда электропривод работает в установившемся динамическом режиме, обусловленном наличием периодической составляющей нагрузки. Примем, что *электромагнитный момент двигателя* в установившемся динамическом режиме изменяется по закону:

$$M(t) = M_{cp} + \Delta M_{max} \cdot \sin \Omega t . \quad (2.36)$$

В этом случае зависимость скорости вращения от времени  $\omega(t)$  определяется простым выражением:

$$\omega(t) = \omega_{cp} + \frac{\Delta M_{max}}{|\beta_{дин}|} \cdot \sin(\Omega t - \psi(\Omega)). \quad (2.37)$$

Значения  $|\beta_{дин}|$  и  $\psi$  определяются по выражениям (2.34) и (2.35).

На рисунке 2.13 показаны характеристики  $M(t)$  и  $\omega(t)$  соответствующие выражениям (2.36) и (2.37), и динамическая механическая характеристика двигателя – замкнутая кривая 2. Наличие электромагнитной инерции вызывает значительные отклонения динамической характеристики 2 от статической 1. Уменьшение частоты вынужденных колебаний (пунктирные линии  $M(t)$  и  $\omega(t)$  на рисунке 2.13) или снижение постоянной времени  $T_я$  приводят в соответствии с выражениями (2.34) и (2.35) к уменьшению этих отклонений (кривая 3), и в пределе при  $T_я \rightarrow 0$  или  $\Omega \rightarrow 0$  динамическая характеристика «сольется» со статической.

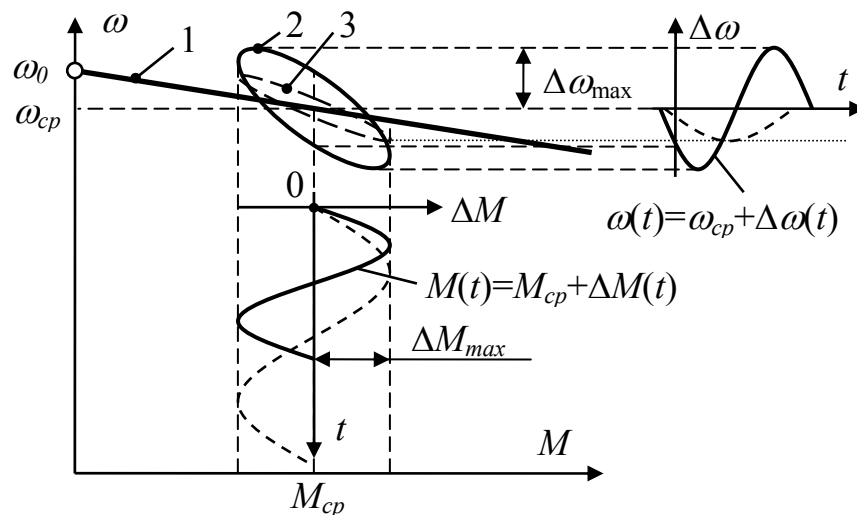


Рисунок 2.13

Зависимость электромагнитного момента двигателя  $M(t)$  по известной функции  $\omega(t) = \omega_{cp} + \Delta\omega_{max} \sin(\Omega t)$  определяется аналогичным путем:

$$M(t) = M_{cp} + |\beta_{дин}| \cdot \Delta\omega_{max} \cdot \sin(\Omega t + \psi(\Omega)). \quad (2.38)$$

Таким образом, модуль статической жесткости  $\beta$  характеризует жесткость механической характеристики только в статических или достаточно плавно протекающих динамических режимах работы. При изменении управляющих или возмущающих воздействий, а также в установившихся

колебательных режимах динамическая характеристика может существенно отклоняться от статической. Эти отклонения необходимо оценивать по динамической жесткости механической характеристики или расчетом соответствующих переходных процессов с учетом индуктивности якоря двигателя.

**При анализе сложных переходных процессов следует рассматривать всю электромеханическую систему электропривода во взаимодействии ее электрической и механической частей.**

Достоинством электромеханического преобразователя с независимым возбуждением при  $\Phi = \text{const}$  является его высокое быстродействие, обусловленное малой постоянной времени  $T_{\text{я}}$ . Однако, это относится только к компенсированным двигателям. У некомпенсированных двигателей реакция якоря уменьшает магнитный поток на величину до (10–20)%. Эти изменения происходят в гораздо более инерционной цепи обмотки возбуждения, в результате чего инерционность преобразователя возрастает, и расхождения между статическими и динамическими характеристиками появляются при меньших частотах колебаний нагрузки.

Все вышеизложенное справедливо для случая питания двигателя от источника напряжения. Однако, в регулируемом электроприводе в некоторых режимах возможно питание якорной цепи двигателя от преобразователя, работающего в режиме источника тока. Кроме того, существует большая группа электроприводов, работающих по системе «источник тока – двигатель».

При питании якоря двигателя от источника тока выполняется условие  $i_{\text{я}} = I_{\text{я1}} = \text{const}$  при любых изменениях ЭДС двигателя. Отсутствие зависимости тока якоря от скорости исключает наличие электромеханической связи в двигателе. Второе уравнение системы (2.27) теряет смысл, и статическая механическая характеристика двигателя  $M = f(\omega)$  при  $\Phi = \text{const}$  имеет жесткость равную нулю (становится **абсолютно мягкой**).

Для получения уравнения динамической механической характеристики в случае питания двигателя от источника тока умножим обе части первого уравнения системы (2.27) на  $KI_{\text{я1}}$  и получим выражение:

$$(1 + T_{\text{э}} p) \cdot M(p) = \frac{KK_{\phi} I_{\text{я1}}}{R_{\text{э}}} U_{\text{э}}(p). \quad (2.39)$$

Этому уравнению соответствует структурная схема, представленная на рисунке 2.11в. Как объект управления электромеханический преобразователь представляет собой в этом случае апериодическое звено с большой постоянной времени  $T_{\text{э}}$  и управляющим воздействием в виде напряжения



$U_{\epsilon}$ . Уравнение статической механической характеристики получим, подставив в (2.39)  $p=0$ . Из сравнения структурных схем на рисунке 2.11б и 2.11в следует вывод о том, что в режиме питания рассматриваемого двигателя от источника тока отсутствует зависимость момента двигателя от скорости, и статическая характеристика двигателя  $M=f(\omega)$  при  $U_{\epsilon}=\text{const}$  имеет жесткость, равную нулю.

В соответствии с вышесказанным электромеханический преобразователь постоянного тока с независимым возбуждением при  $I_{\text{я}}=\text{const}$  является источником постоянного момента, величину которого можно регулировать изменением напряжения или тока возбуждения двигателя (рисунок 2.14).

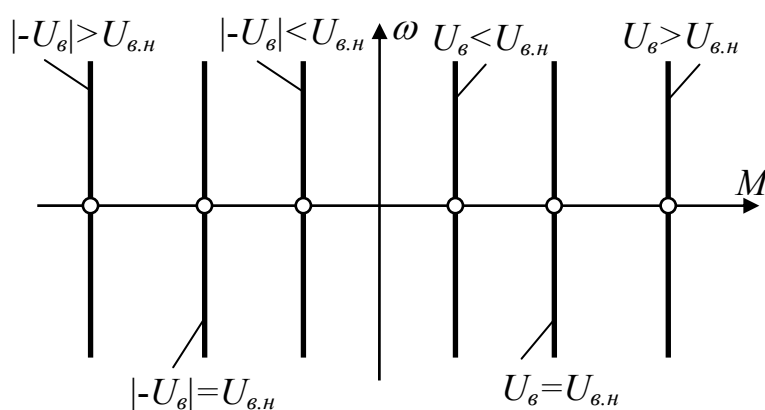


Рисунок 2.14

## 2.4 Математическое описание процессов преобразования энергии в двигателе с последовательным возбуждением

На рисунке 2.15а представлена принципиальная схема включения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Соответствующая ей схема модели электромеханического преобразователя представлена на рисунке 2.15б.

Отличие данной модели от модели для двигателя с независимым возбуждением состоит в том, что обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря в силовую цепь, мощность которой намного больше мощности возбуждения. Поэтому происходящие с большой скоростью изменения силового тока двигателя приводят к форсированным изменениям магнитного потока, что в свою очередь вызывает наведение в полюсах и станине двигателя значительных по величине вихревых токов.

Чтобы учесть влияние вихревых токов на динамические процессы, в схему модели введена фиктивная короткозамкнутая обмотка, расположенная на оси  $\beta$  и имеющая условное число витков  $w_{\text{вт}}$ . По этой обмотке про-

текает условный ток  $i_{\text{эм}}$ , и она связана с магнитным потоком машины  $\Phi$  по продольной оси  $\beta$  коэффициентом связи, равным единице.

С учетом вышесказанного математическое описание динамического процесса электромеханического преобразования энергии в двигателе с последовательным возбуждением имеет следующий вид:

$$\begin{cases} 0 = i_{\text{эм}}(t) \cdot R_{\text{эм}} + w_{\text{эм}} \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt}, \\ u_{\text{я}}(t) = R_{\text{я}\Sigma} \cdot i_{\text{я}}(t) + L_{\text{я}\Sigma} \cdot \frac{di_{\text{я}}(t)}{dt} + K\Phi(t) \cdot \omega(t) + w_{\text{в}} \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt}, \\ M(t) = K\Phi(t) \cdot i_{\text{я}}(t), \end{cases} \quad (2.40)$$

где  $R_{\text{я}\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{в}}$  – суммарное сопротивление якорной цепи;  
 $w_{\text{в}}$  – число витков обмотки возбуждения;  
 $L_{\text{я}\Sigma}$  – индуктивность рассеяния якорной цепи двигателя.

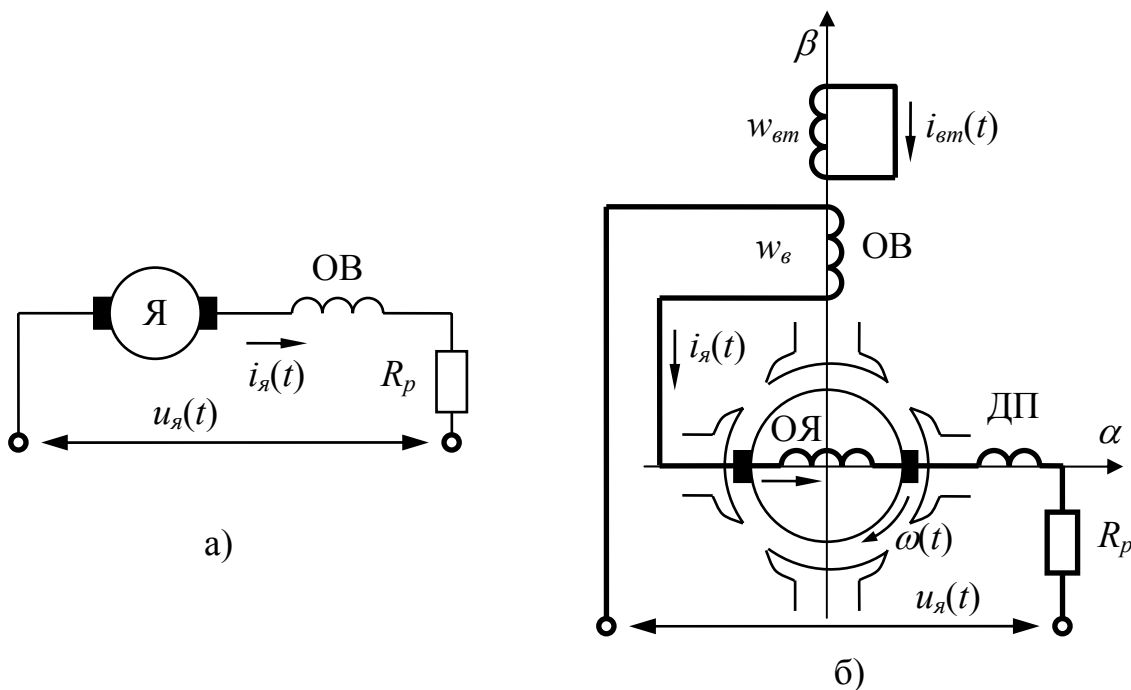


Рисунок 2.15

Индуктивность рассеяния  $L_{\text{я}\Sigma}$  гораздо меньше индуктивности обмотки возбуждения  $L_{\text{в}}$ . Но пренебрегать ею при исследовании динамических процессов не следует, так как при  $L_{\text{я}\Sigma} = 0$  скачкообразные изменения приложенного к двигателю напряжения согласно (2.40) должны вызывать мгновенные изменения тока двигателя, что в принципе невозможно.

Уравнения *статических* электромеханической и механической характеристик получим, приняв  $\frac{di_{я}(t)}{dt} = \frac{d\Phi(t)}{dt} = 0$  и  $i_{см}(t) = 0$ :

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi(I_{я})} - \frac{R_{я\Sigma}}{K\Phi(I_{я})} I_{я}, \quad (2.41)$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi(I_{я})} - \frac{R_{я\Sigma}}{[K\Phi(I_{я})]^2} M, \quad (2.42)$$

где  $\Phi(I_{я})$  – статическая зависимость потока  $\Phi$  от тока якоря  $I_{я}$  (рисунок 2.16).

Сравнивая (2.41) и (2.42) с (2.4) и (2.5), можно сделать вывод о том, что выражения для статических электромеханической и механической характеристик двигателя с последовательным возбуждением по форме совпадают с аналогичными характеристиками двигателя с независимым возбуждением. В то же время имеется значительное отличие в том, что у двигателя с последовательным возбуждением магнитный поток зависит от тока якоря, и эта зависимость, определяемая кривой намагничивания, является нелинейной.

## 2.5 Статические свойства двигателя с последовательным возбуждением

### 2.5.1 Естественные и искусственные характеристики двигателя с последовательным возбуждением

**Естественные характеристики** двигателя с последовательным возбуждением, также как и двигателя с независимым возбуждением, могут быть получены в естественной схеме включения, в которой в цепи якоря отсутствуют добавочные сопротивления и значение напряжения на якоре равно номинальному.

В связи с тем, что для кривой намагничивания нет точного аналитического выражения, невозможно дать точное аналитическое выражение для статических характеристик рассматриваемого двигателя. Для приближенного анализа формы статических электромеханической и механической характеристик двигателя можно воспользоваться аппроксимацией характеристики намагничивания двумя прямыми (рисунок 2.16).

Выражение для магнитного потока при этом можно выразить следующим образом:

$$\begin{cases} \Phi = K_{\phi} I_{\epsilon}, & \text{при } I_{\epsilon} < I_{\epsilon p}; \\ \Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}, & \text{при } I_{\epsilon} \geq I_{\epsilon p}, \end{cases} \quad (2.43)$$

где  $K_{\phi} = \text{tg } \alpha$ .

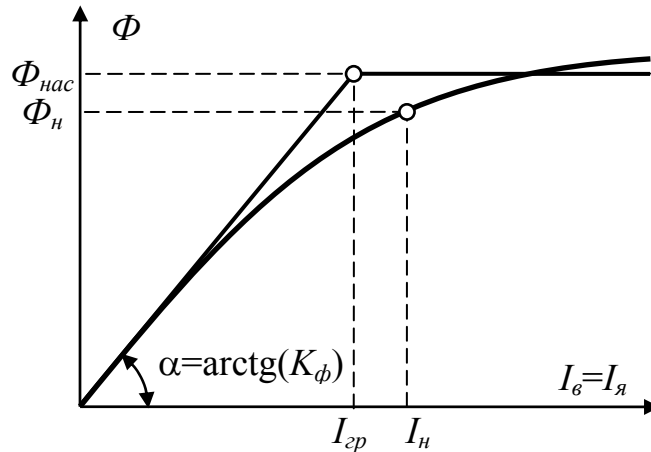


Рисунок 2.16

При такой аппроксимации электромеханическая и механическая характеристики имеют различные выражения при различных значениях тока возбуждения. Так как обмотки якоря и возбуждения включены последовательно, то ток возбуждения  $I_{\epsilon}$  равен току якоря  $I_{я}$ .

Следовательно, при  $I_{я} < I_{\epsilon p}$  уравнения (2.41) и (2.42) преобразуются к виду:

$$\omega = \frac{U_{я}}{KK_{\phi} \cdot I_{я}} - \frac{R_{я\Sigma}}{KK_{\phi}}, \quad (2.44)$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{\sqrt{KK_{\phi} \cdot M}} - \frac{R_{я\Sigma}}{KK_{\phi}}. \quad (2.45)$$

При  $I_{я} \geq I_{\epsilon p}$ , те же характеристики определяются другими выражениями:

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{я\Sigma}}{K\Phi_{\text{нас}}} \cdot I_{я}, \quad (2.46)$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{я\Sigma}}{(K\Phi_{\text{нас}})^2} \cdot M. \quad (2.47)$$

Таким образом, в области малых нагрузок ( $I_{я} < I_{эп}$ ) статические характеристики двигателя с последовательным возбуждением имеют гиперболический характер и при  $I_{я} \rightarrow 0$  и  $M \rightarrow 0$  приближаются асимптотически к оси ординат, не пересекаясь с нею (**скорость идеального холостого хода у двигателя теоретически отсутствует**).

В области больших нагрузок ( $I_{я} \geq I_{эп}$ ), когда при принятой аппроксимации кривой намагничивания магнитная цепь двигателя насыщена ( $\Phi = \Phi_{нас} = \text{const}$ ), характеристики двигателя линейны, как у двигателя с независимым возбуждением.

Отсутствие у двигателя с последовательным возбуждением скорости идеального холостого хода подтверждается тем, что при равенстве нулю тока и, соответственно, падения напряжения в якорной цепи напряжение на двигателе  $U_{я}$  уравнивается ЭДС двигателя  $E$ :

$$E = K\Phi \cdot \omega = U_{я}. \quad (2.48)$$

Учитывая то, что при  $I_{я}$ , стремящемся к нулю, магнитный поток  $\Phi$  также стремится к нулю, соблюдение равенства (2.48) возможно только при  $\omega \rightarrow \infty$ .

Однако, в реальной машине за счет гистерезиса имеется остаточный магнитный поток  $\Phi_{ост}$  даже при отсутствии тока возбуждения. Этот небольшой по величине магнитный поток обеспечивает реальную скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = U_{я} / K\Phi_{ост}$ . Эта скорость по величине намного превышает допустимое для двигателей значение, обусловленное механической прочностью якоря и его обмотки. Поэтому при проектировании и эксплуатации электроприводов с двигателями последовательного возбуждения необходимо приводить в соответствие величины минимальных нагрузок с максимально допустимой для данного двигателя скоростью.

В связи с отсутствием точных аналитических выражений статических характеристик двигателя, рассчитать естественную характеристику по его номинальным данным невозможно. Поэтому в каталогах приводятся усредненные естественные характеристики двигателей с последовательным возбуждением в относительных единицах, которые следует использовать для построения естественных и искусственных характеристик (рисунок 2.17).

Естественные электромеханическая и механическая характеристики приведены на рисунке 2.18а,б. Статическая жесткость этих характеристик непостоянна и зависит от нагрузки. В области малых нагрузок характеристики очень мягкие, но с возрастанием нагрузки модуль статической жесткости  $\beta$  увеличивается и при  $M > M_n$  (в области насыщения кривой намаг-

ничивания) стремится к постоянному значению, определяемому выражением:

$$\beta = \frac{(K\Phi_{нас})^2}{R_{я\Sigma}}. \quad (2.49)$$

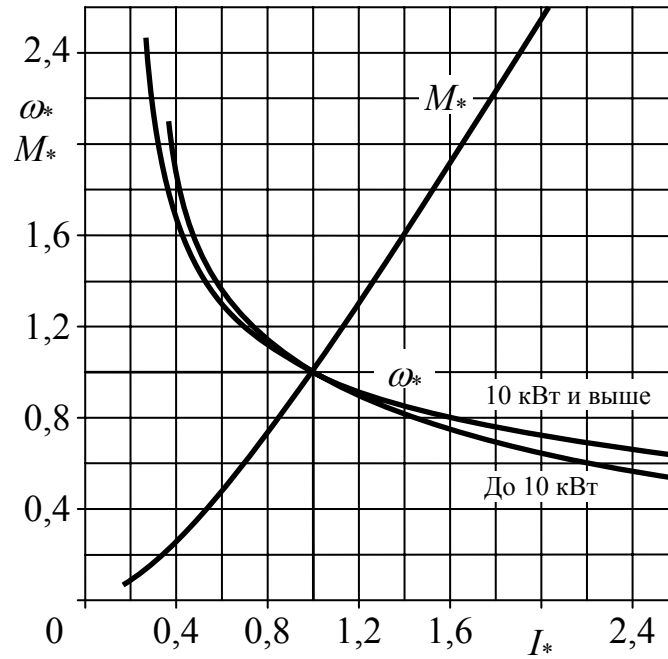


Рисунок 2.17

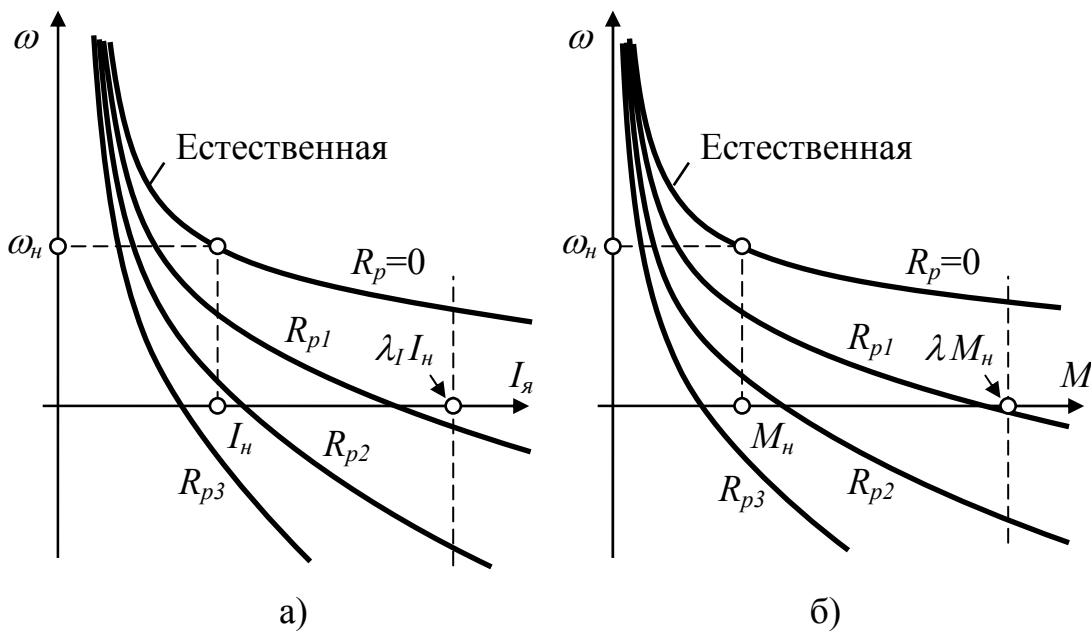


Рисунок 2.18

В двигателе независимого возбуждения для устранения размагничивающего действия реакции якоря применяется компенсационная обмотка, включенная последовательно с обмоткой якоря. Магнитный поток машины в этом случае не зависит от тока якоря. В двигателе же с последовательным возбуждением обмотка возбуждения одновременно и устраняет реакцию якоря, и создает основной магнитный поток. Это приводит к тому, что в области допустимых перегрузок с ростом тока якоря магнитный поток увеличивается сверх номинального на (10÷15)%. Поэтому при одинаковой с двигателем независимого возбуждения допустимой перегрузке по току  $\lambda_f=2\div 2.5$  перегрузочная способность по моменту у двигателей последовательного возбуждения выше и лежит в пределах  $\lambda=2.3\div 2.9$ .

**Искусственными характеристиками** двигателя с последовательным возбуждением, также как и двигателя с независимым возбуждением, являются **реостатные характеристики, характеристики при пониженном напряжении и при ослабленном магнитном потоке.**

Введение в цепь якоря добавочных сопротивлений (рисунок 2.15а) уменьшает жесткость механических и электромеханических характеристик и ограничивает ток и момент короткого замыкания. Кроме того, реостатные характеристики используются для регулирования скорости двигателя при питании его от сети постоянного тока или от автономного источника питания (аккумулятора). Реостатные электромеханические и механические характеристики при разных величинах добавочных сопротивлений реостата приведены на рисунке 2.18а,б.

Все искусственные характеристики двигателя можно построить с помощью естественной характеристики. При одинаковом токе  $I_a$ , протекающем через обмотку возбуждения, магнитный поток в естественной и в искусственной схемах включения двигателя одинаков. Соответственно частоты вращения в различных схемах будут пропорциональны величинам ЭДС обмотки якоря:

$$\frac{\omega_u}{\omega_e} = \frac{E_u}{E_e}, \quad (2.50)$$

где  $E_e$  и  $\omega_e$  - ЭДС и скорость двигателя на естественной характеристике;

$E_u$  и  $\omega_u$  - ЭДС и скорость двигателя на искусственной характеристике при том же, что и на естественной характеристике, токе возбуждения.

Подставив в (2.50) значения ЭДС на естественной и реостатной характеристиках, получим выражение для построения электромеханических реостатных характеристик:

$$\omega_{u.p} = \omega_e \cdot \frac{U_{я.н} - I_{я} \cdot (R_{я\Sigma} + R_p)}{U_{я.н} - I_{я} \cdot R_{я\Sigma}}. \quad (2.51)$$

Искусственные электромеханические характеристики при пониженном напряжении и  $R_p=0$  могут быть тоже рассчитаны с помощью (2.51) подстановки в числитель этого выражения вместо  $U_{я.н}$  значения пониженного напряжения  $U_{я}$ :

$$\omega_{u.н} = \omega_e \cdot \frac{U_{я} - I_{я} \cdot R_{я\Sigma}}{U_{я.н} - I_{я} \cdot R_{я\Sigma}}. \quad (2.52)$$

Эти характеристики приведены на рисунке 2.19. Механические искусственные характеристики строятся с помощью универсальной каталожной характеристики  $M^*=f(I^*)$  (рисунок 2.17).

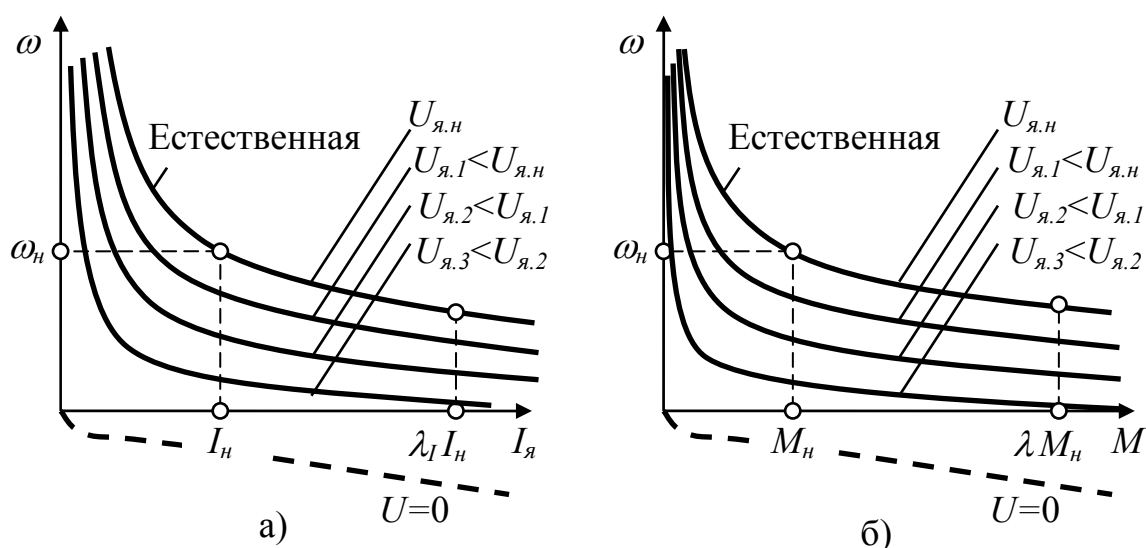


Рисунок 2.19

Уменьшение напряжения питания двигателя приводит к снижению скорости при данной нагрузке, практически не изменяя соответствующей этой нагрузке жесткости электромеханической и механической характеристик. Электромеханическая и механическая характеристики при  $U=0$  располагаются в 4-м квадранте и соответствуют режиму динамического торможения двигателя с самовозбуждением при замкнутой накоротко его якорной цепи. Этот режим будет рассмотрен ниже.



Ослабление магнитного потока у рассматриваемого двигателя можно осуществить только шунтированием обмотки возбуждения резистором  $R_{ш}$  (рисунок 2.20а). Характеристики при этом расположены выше естественной, причем их жесткость несколько меньше жесткости естественной характеристики (рисунок 2.20б).

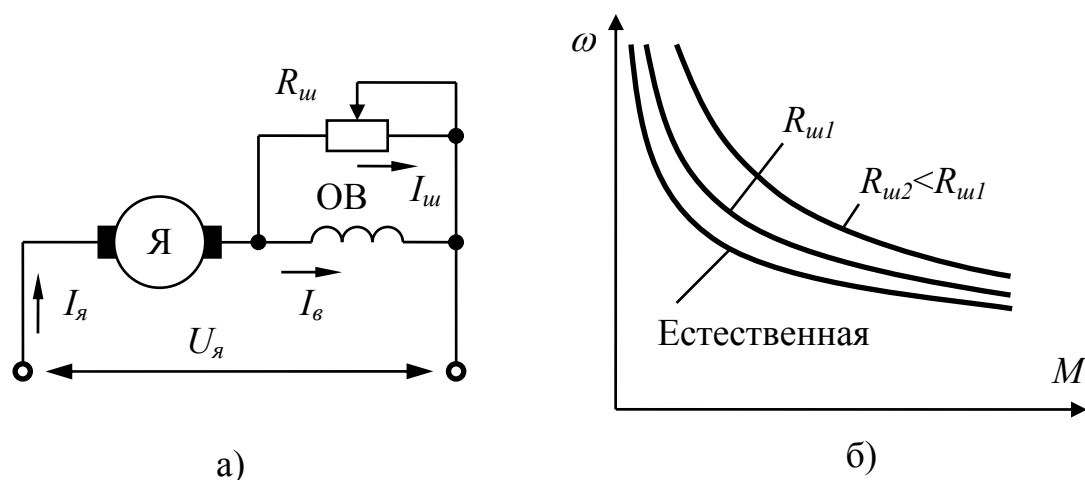


Рисунок 2.20

Форма естественной и искусственных механических характеристик и более высокая по сравнению с двигателями независимого возбуждения перегрузочная способность по моменту определяют область применения двигателей с последовательным возбуждением. Они применяются в электроприводах механизмов с тяжелыми условиями пуска и с ускоренным перемещением в области малых нагрузок (тяговый электропривод, грузоподъемные и поворотные механизмы и пр.).

### 2.5.2 Тормозные режимы двигателя с последовательным возбуждением

У двигателя с последовательным возбуждением рекуперативное торможение невозможно, так как статические характеристики не пересекают ось ординат (отсутствует скорость идеального холостого хода), и его ЭДС не может быть больше приложенного к двигателю напряжения.

При торможении противовключением для ограничения величины тока двигателя в цепь якоря вводится дополнительный резистор. Так же как и для двигателя с независимым возбуждением, здесь возможны два варианта торможения: торможение при наличии активной нагрузки на валу двигателя и торможение при реактивной нагрузке (рисунок 2.21).

В первом случае торможение противовключением происходит при моменте нагрузки  $M_c$ , большем момента короткого замыкания  $M_{к2}$  на реостатной характеристике. Такое торможение используется для выполнения

технологических операций (например, спуск груза). Механические характеристики для этого случая являются продолжением характеристик двигательного режима в область отрицательной угловой скорости. Эти характеристики представлены на рисунке 2.21а и расположены в первом и четвертом квадрантах.

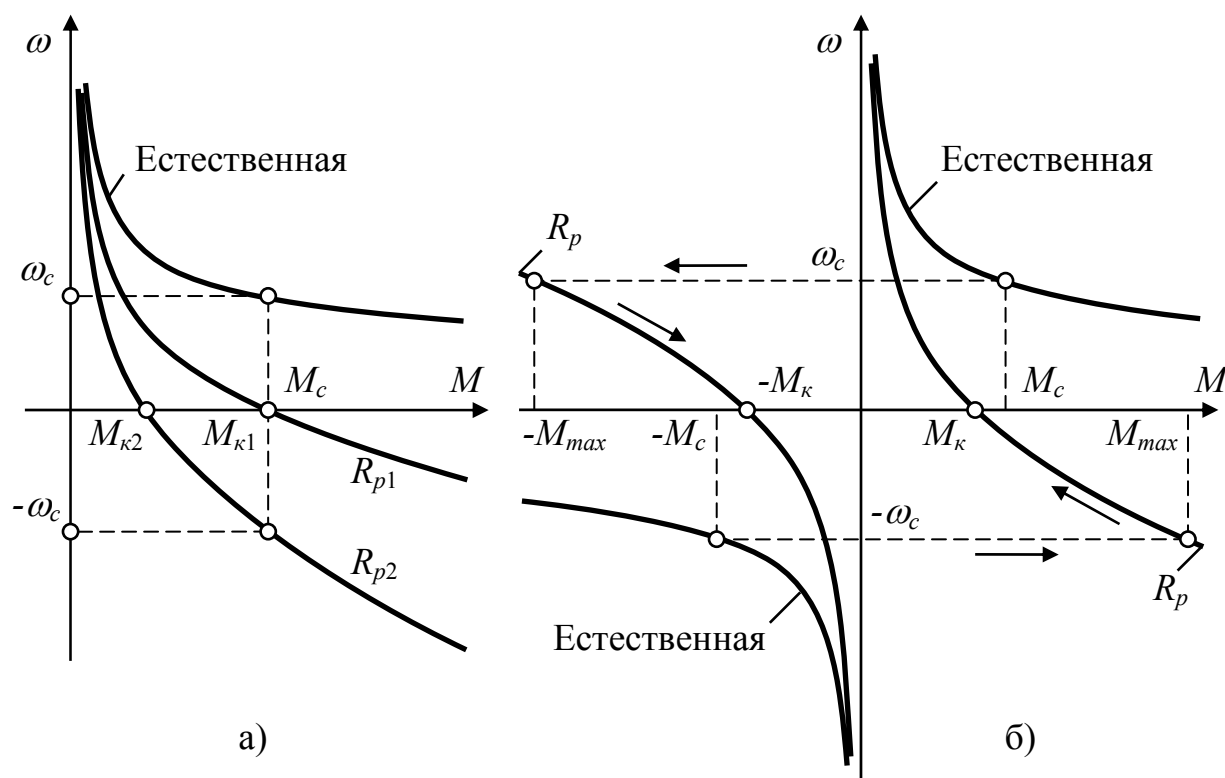


Рисунок 2.21

Во втором случае режим торможения противовключением используется для ускоренной остановки электропривода или уменьшения его скорости до определенной величины при наличии на валу двигателя реактивной нагрузки, изменяющей свой знак при изменении знака скорости. Для осуществления такого торможения необходимо, так же как и для двигателя с независимым возбуждением, **изменить полярность напряжения, подводимого к якорю двигателя. В этом случае следует, изменив направление тока через обмотку якоря, оставить прежним направление тока в обмотке возбуждения** (то есть изменить схему подключения обмотки якоря или обмотки возбуждения).

Механические характеристики для двигателя с последовательным возбуждением, работающего в реверсивном электроприводе, представлены на рисунке 2.21б. Торможение противовключением происходит во втором и в четвертом квадрантах.

Динамическое торможение двигателя с последовательным возбуждением может быть осуществлено двумя способами: **с независимым возбуждением** и **с самовозбуждением**.

Динамическое торможение с независимым возбуждением осуществляется по схеме, представленной на рисунке 2.22а. В этом случае ток в обмотке возбуждения ограничивается резистором  $R_{\partial\epsilon}$  или напряжением  $U_{\epsilon}$  до номинального или другого необходимого значения. Поскольку схема на рисунке 2.22а полностью аналогична схеме динамического торможения двигателя с независимым возбуждением, то аналогичны и их характеристики (рисунок 2.22б).

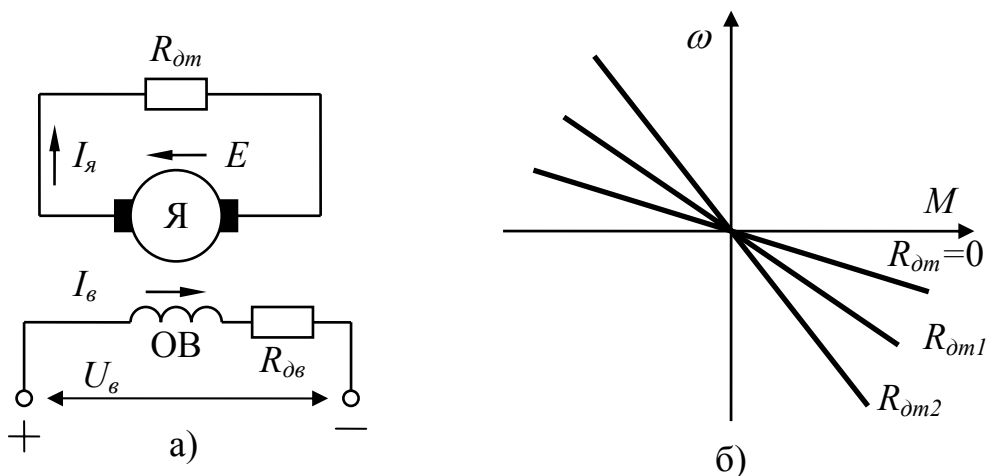


Рисунок 2.22

**Динамическое торможение с самовозбуждением** рассматриваемого двигателя осуществляется по схеме генератора с последовательным возбуждением, замкнутого на активное сопротивление. Если теперь двигатель будет вращаться (по инерции или от движущей активной нагрузки), то процесс самовозбуждения может возникнуть только при выполнении двух обязательных условий.

**Первым условием** самовозбуждения является согласование направлений токов обмоток якоря и возбуждения. Ток в цепи двигателя в начальный момент будет протекать под действием ЭДС, наведенной остаточным магнитным потоком. Обмотка возбуждения должна быть включена так, чтобы создаваемый ток возбуждения поток увеличивал результирующий магнитный поток двигателя. В противном случае создаваемый магнитный поток размагнитит машину, и самовозбуждение станет невозможным.

При наличии активной нагрузки на валу двигателя схему соединения якоря и обмотки возбуждения можно оставить без изменения в том случае, когда динамическое торможение будет осуществляться с реверсом

электропривода. Тогда при изменении направления вращения двигателя под действием изменившей свой знак ЭДС ток возбуждения сохранит свое направление (рисунок 2.23а). Такая схема может быть использована для технологических целей (спуск груза и т.п.), а механическая характеристика в этом случае расположена в четвертом квадранте (рисунок 2.24в).

Обеспечить торможение или снижение скорости с помощью динамического торможения во втором квадранте (то есть с сохранением направления вращения двигателя) можно только в том случае, если переключить либо выводы якоря, либо выводы обмотки возбуждения (рисунок 2.23б).

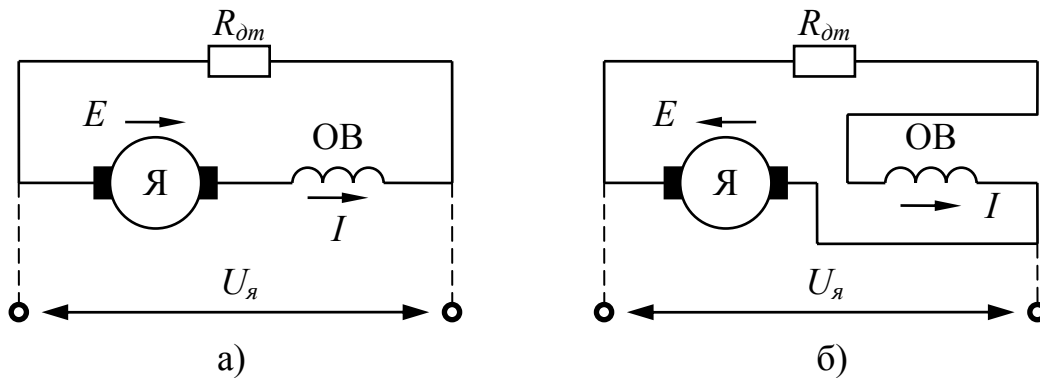


Рисунок 2.23

**Второе условие** самовозбуждения известно из теории электрических цепей и из курса электрических машин. Рассмотрим электрическую цепь, представленную на рисунке 2.23а и состоящую из источника ЭДС с нелинейной характеристикой и активного сопротивления  $R_{я\Sigma} = R_{я} + R_{\epsilon} + R_{ом}$ . Вольтамперные характеристики ЭДС и активного сопротивления представлены на рисунке 2.24а.

Вольтамперная характеристика активного сопротивления представляет собой прямую линию  $I_{я}R_{я\Sigma}$ , угол наклона которой определяется величиной  $R_{я\Sigma}$ . Вольтамперные характеристики источника ЭДС  $E(I_{я})$  построены для ряда скоростей  $\omega_1 \div \omega_4$ . Каждая характеристика аппроксимирована двумя линейными участками, причем при  $I_{я} \geq I_{\epsilon p}$  ЭДС принимается постоянной.

При  $E(I_{я}) < I_{я}R_{я\Sigma}$  самовозбуждение невозможно, так как вырабатываемая двигателем ЭДС не может обеспечить необходимого тока возбуждения машины. Самовозбуждение возможно только в случае, когда  $E(I_{я}) \geq I_{я}R_{я\Sigma}$ . Поскольку наклон начального участка характеристики  $E(I_{я})$  определяется скоростью вращения двигателя, то и начало самовозбуждения определяется этой скоростью. Данный режим возникает при скорости вращения, большей или равной скорости, при которой наклон линейной части характеристики  $E(I_{я})$  совпадает с наклоном прямой  $I_{я}R_{я\Sigma}$ .

Таким образом, граничной скоростью самовозбуждения  $\omega_{cp}$  на рисунке 2.24а является скорость  $\omega_3$ . При увеличении сопротивления якорной цепи  $R_{я\Sigma}$  будет увеличиваться и граничная скорость самовозбуждения.

Форма характеристики динамического торможения с самовозбуждением, исходя из вышесказанного, может быть представлена ломаной 1 на рисунке 2.24б. При скорости  $\omega_{cp} = \omega_3$  возникает лавинообразное самовозбуждение, ток якоря при принятой аппроксимации возрастает до  $I_{я} = I_{cp}$ , и при дальнейшем увеличении скорости двигатель имеет практически линейную характеристику  $\omega = f(I_{я})$ , если считать что магнитный поток  $\Phi = \Phi_{нас} = \text{const}$ .

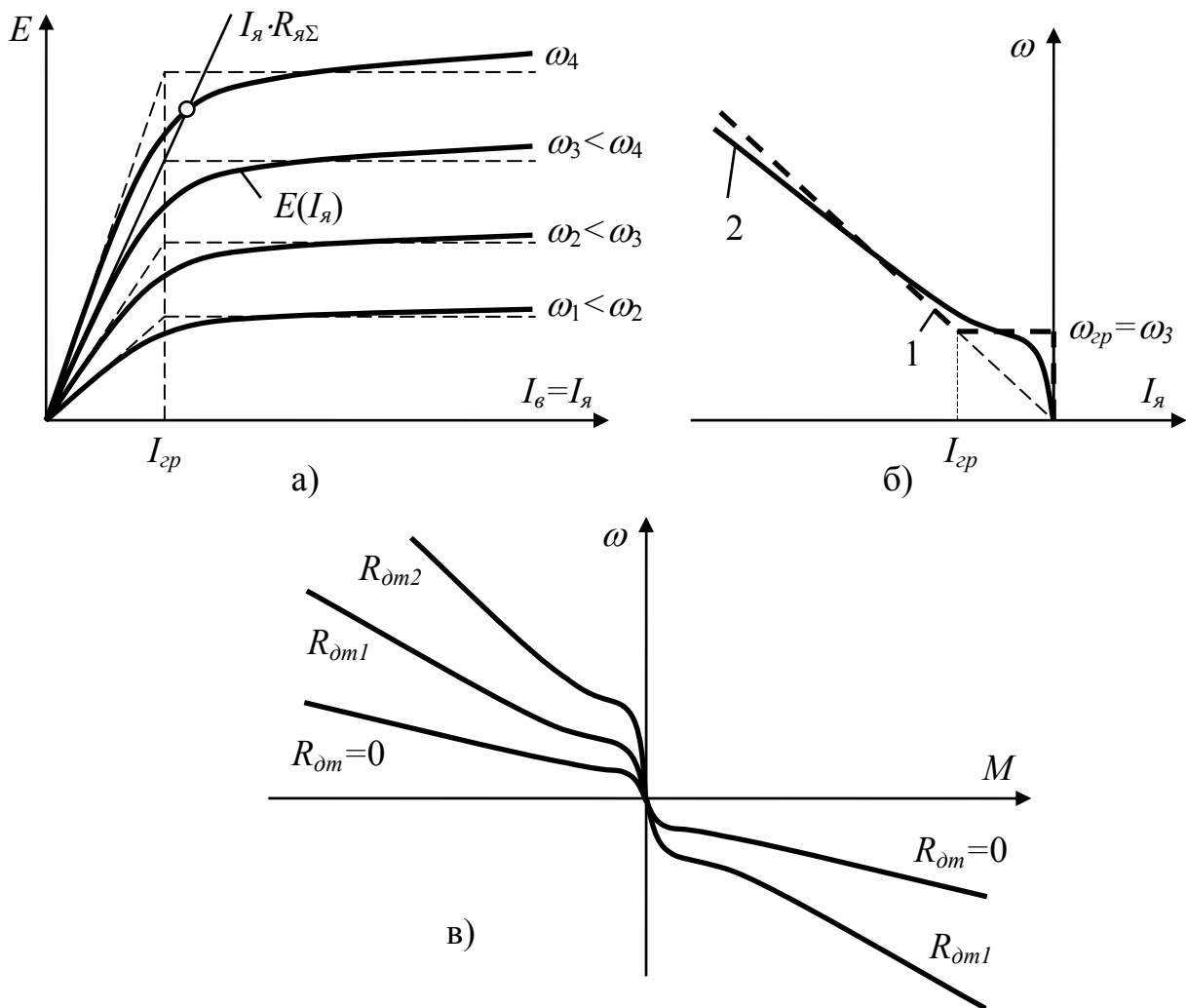


Рисунок 2.24

Поскольку при скоростях  $\omega < \omega_{cp}$  под действием остаточного магнитного потока ток в якорной цепи несколько возрастает и при отсутствии самовозбуждения, реальная характеристика  $\omega = f(I_{я})$  отличается от идеальной (кривая 2 на рисунке 2.24б). К дополнительным отклонениям этой характеристики приводит также реальная форма кривой намагничивания.

Форма механических характеристик двигателя, работающего в режиме динамического торможения, аналогична форме электромеханических характеристик (рисунок 2.24в).

**Недостатком торможения с самовозбуждением является отсутствие тормозного момента при скоростях, меньших  $\omega_{эр}$ .** Оно используется в качестве аварийного при исчезновении напряжения совместно с механическим тормозом.

## 2.6 Динамические свойства электромеханического преобразователя с последовательным возбуждением

Полученное ранее математическое описание динамического процесса преобразования энергии в двигателе с последовательным возбуждением (2.40) содержит произведения переменных, которые, в свою очередь, имеют нелинейную взаимосвязь. Поэтому аналитическое решение системы дифференциальных уравнений (2.40) невозможно. Однако, если ограничиться рассмотрением только малых отклонений, основные динамические свойства электромеханического преобразователя с последовательным возбуждением могут быть выявлены аналитически с помощью линеаризации этих уравнений. Для этого воспользуемся разложением в ряд Тэйлора уравнений в окрестностях точки статического равновесия на электромеханической характеристике двигателя  $(I_{я}^0, \omega^0)$ . Кривую намагничивания линеаризуем касательной в точке  $(I_{я}^0, \Phi^0)$  (рисунок 2.25):

$$\Phi = \Phi_0 + K'_{\phi} \cdot (i_{я} + i_{эм}), \quad (2.53)$$

где  $K'_{\phi} = \text{tg } \alpha$ .

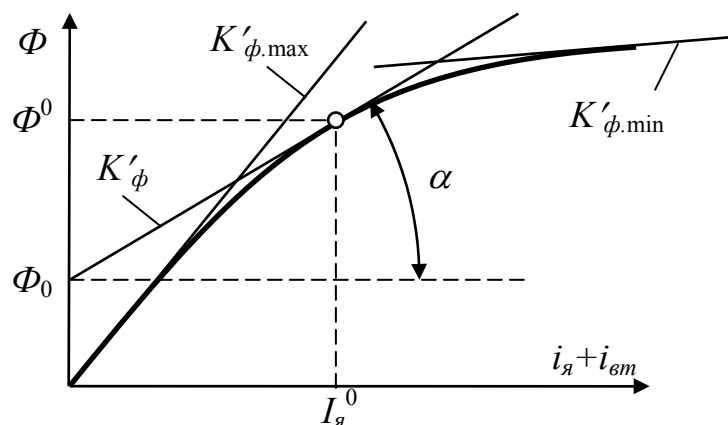


Рисунок 2.25

В результате линеаризации можно получить уравнение динамической механической характеристики в приращениях, а также выражение динамической жесткости механической характеристики [1]. После упро-

щения эти выражения имеют такой же вид, как и для двигателя с независимым возбуждением:

$$(T_3 p + 1) \cdot \Delta M(p) = \beta \cdot [\Delta \omega_0(p) - \Delta \omega(p)], \quad (2.54)$$

$$\beta_{\text{дин}} = -\frac{\beta}{T_3 p + 1}, \quad (2.55)$$

где  $T_3$  – эквивалентная электромагнитная постоянная времени:

$$T_3 = \frac{R_{я\Sigma}(T_{\epsilon\Sigma} + T_я)}{R_{я\Sigma} + KK'_{\phi}\omega^0}, \quad (2.56)$$

$T_{\epsilon\Sigma}$  – суммарная постоянная времени возбуждения:

$$T_{\epsilon\Sigma} = \frac{K'_{\phi}W_{\epsilon m}}{R_{\epsilon m}} + \frac{K'_{\phi}W_{\epsilon}}{R_{\epsilon\Sigma}} = T_{\epsilon m} + T_{\epsilon} \approx (1.1 \div 1.2)T_{\epsilon}; \quad (2.57)$$

$T_{\epsilon}$ ,  $T_{\epsilon m}$  – постоянные времени обмотки возбуждения и эквивалентного контура вихревых токов;

$T_я = \frac{L_{я\Sigma}}{R_{я\Sigma}}$  – постоянная времени обмотки якоря;

$\beta = \frac{K\Phi^0(K\Phi^0 + KK'_{\phi}I_я^0)}{R_{я\Sigma} + KK'_{\phi}\omega^0}$  – модуль статической жесткости;

$\Delta\omega_0(p) = \frac{\Delta U_я(p)}{K\Phi^0}$  – приращение условной скорости идеального

холостого хода линеаризированной механической характеристики;

$\Delta\omega(p)$  – приращение скорости вращения двигателя;

$\Delta M(p)$  – приращение момента двигателя.

Динамическая жесткость механической характеристики двигателя с последовательным возбуждением по сравнению с двигателем независимого возбуждения существенно зависит от положения точки статического равновесия на механической характеристике. Кроме того, что каждой точке статической характеристики соответствуют различные значения  $\Phi^0$ ,  $I_я^0$ ,  $\omega^0$ , различными будут и постоянная времени  $T_{\epsilon\Sigma}$  и коэффициент  $K'_{\phi}$ .

Как можно видеть из рисунка 2.25, с уменьшением нагрузки коэффициент  $K'_{\phi}$  возрастает и на линейной части кривой намагничивания становится равным  $K'_{\phi} = K'_{\phi \text{ max}} = K_{\phi} = \text{const}$ . В этом случае  $\Phi_0$  становится рав-

ным нулю, и согласно (2.53)  $K'_\phi I_\alpha^0 = \Phi^0$ . Соответственно модуль статической жесткости определится соотношением:

$$\beta = \frac{2 \cdot (K\Phi^0)^2}{R_{\alpha\Sigma} + KK_\phi \omega^0}. \quad (2.58)$$

С уменьшением нагрузки модуль статической жесткости  $\beta$  уменьшается как за счет уменьшения магнитного потока  $\Phi^0$ , так и за счет увеличения скорости  $\omega^0$ . Модуль динамической жесткости  $\beta_{дин}$  при этом дополнительно уменьшается за счет электромагнитной постоянной времени  $T_\alpha$ , также, как и у двигателя с независимым возбуждением. В свою очередь величина  $T_\alpha$  зависит как от коэффициента  $K'_\phi$  (2.56), так и от величины скорости  $\omega^0$ .

В области насыщения при  $I_\alpha^0 > I_n$  коэффициент  $K'_\phi \approx 0$ , и значение модуля статической жесткости определяется выражением:

$$\beta = \frac{(K\Phi^0)^2}{R_{\alpha\Sigma}} = \frac{(K\Phi_{нас})^2}{R_{\alpha\Sigma}}. \quad (2.59)$$

Электромагнитная постоянная времени при этом в соответствии с (2.56) и (2.57) становится, как и у двигателя с независимым возбуждением, равной:

$$T_\alpha = T_\alpha = \frac{L_{\alpha\Sigma}}{R_{\alpha\Sigma}}, \quad (2.60)$$

где  $L_{\alpha\Sigma}$  - суммарная индуктивность рассеивания якорной обмотки двигателя и обмотки возбуждения в области насыщения.

**Таким образом, в области перегрузок динамические свойства двигателей с последовательным и с независимым возбуждением практически совпадают.**

Линеаризованные динамические механические и электромеханические характеристики двигателя с последовательным возбуждением могут быть использованы в тех случаях, когда электропривод работает в установленном динамическом режиме, обусловленном наличием периодической составляющей нагрузки, либо при малых отклонениях от точки статического равновесия.



## 2.7 Статические характеристики двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением

Двигатель со смешанным возбуждением имеет две обмотки возбуждения: независимую ОВН и последовательную ОВП (рисунок 2.26 а).

В двигательном режиме результирующая намагничивающая сила (н.с.) главных полюсов двигателя определяется суммой н.с. двух обмоток возбуждения:

$$F_{\Sigma} = F_{нез} + F_{пос} = w_{нез} I_{в.нез} + w_{пос} I_{я}, \quad (2.61)$$

где  $w_{нез}$  и  $w_{пос}$  – числа витков независимой и последовательной обмоток возбуждения.

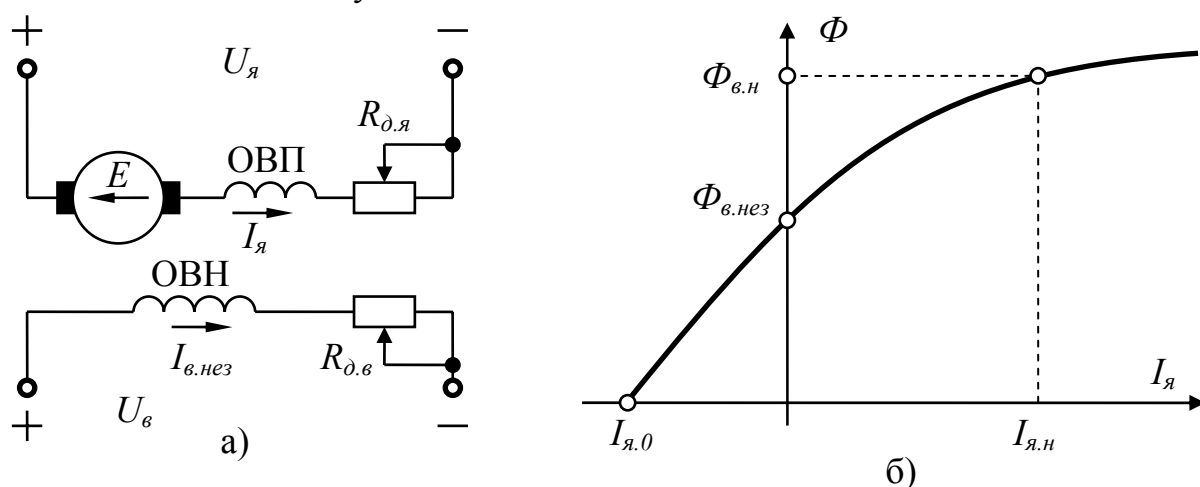


Рисунок 2.26

Магнитный поток этого двигателя как и двигателя с последовательным возбуждением, зависит от тока якоря, и поэтому электромеханические и механические характеристики двигателя со смешанным возбуждением описываются теми же уравнениями (2.41) и (2.42). Однако, кривая намагничивания  $\Phi(I_{я})$  этого двигателя будет выглядеть иначе за счет наличия постоянной н.с. независимой обмотки возбуждения ( $F_{нез} = \text{const}$ ). Эта кривая смещается влево по оси абсцисс на величину тока  $I_{я.0}$ , соответствующего полностью размагниченному двигателю (рисунок 2.26). Этот ток можно определить из (2.61) при  $F_{\Sigma} = 0$ :

$$I_{я.0} = -\frac{F_{нез}}{w_{пос}} = -I_{в.нез} \frac{w_{нез}}{w_{пос}}. \quad (2.62)$$

Вид статических характеристик двигателя будет отличаться от соответствующих характеристик двигателя с последовательным возбуждени-

ем прежде всего наличием скорости идеального холостого хода. Эта скорость определяется величиной магнитного потока независимой обмотки возбуждения:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{K\Phi_{\text{в.нез}}}. \quad (2.63)$$

Таким образом, статические характеристики двигателя со смешанным возбуждением занимают промежуточное положение между характеристиками двигателей постоянного тока с независимым и с последовательным возбуждением. Степень их приближения к тем или иным характеристикам определяется соотношением магнитных потоков независимой и последовательной обмоток возбуждения. Как правило, это соотношение таково, что при идеальном холостом ходе  $\Phi_{\text{в.нез}} = (0.7-0.85)\Phi_{\text{н}}$ , а скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = (1.3-1.6)\omega_{\text{н}}$ .

Естественная электромеханическая характеристика двигателя со смешанным возбуждением повторяет форму характеристики двигателя с последовательным возбуждением, если асимптоту, к которой она приближается при  $\omega \rightarrow \infty$ , сместить так же, как и кривую намагничивания, влево от оси ординат на величину тока  $I_{\text{я}0}$  (рисунок 2.27а). Это объясняется тем, что результирующий магнитный поток двигателя будет равен нулю тогда, когда ток двигателя, а значит и ток последовательной обмотки возбуждения, станет равным  $I_{\text{я}0}$ .

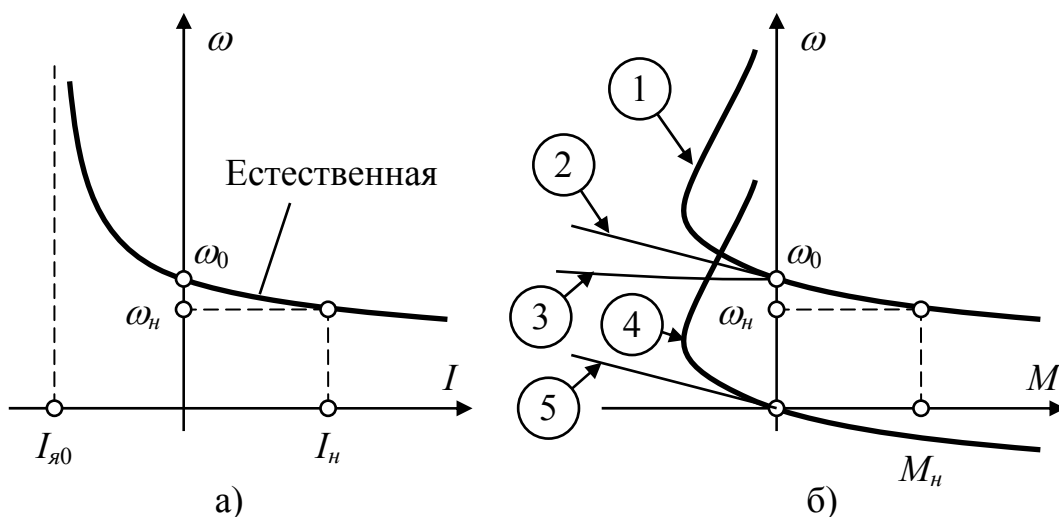


Рисунок 2.27

Естественная механическая характеристика двигателя со смешанным возбуждением по форме отличается от электромеханической, так как в генераторном режиме при  $\omega > \omega_0$  при возрастании по модулю тока якоря

магнитный поток уменьшается. Это приводит к тому, что кривая  $\omega=f(M)$  при  $\omega > \omega_0$  имеет экстремум, а затем по мере уменьшения магнитного потока асимптотически приближается к оси ординат слева (кривая 1 на рисунке 2.27б).

По этой же причине механическая характеристика динамического торможения, осуществляемого замыканием якорной цепи двигателя на сопротивление, повторяет по форме естественную механическую характеристику при  $\omega_0=0$  (кривая 4 на рисунке 2.27). Как видно из рисунка 2.27б, эффективность как рекуперативного, так и динамического торможения (во втором квадранте) из-за размагничивающего действия обмотки последовательного возбуждения значительно снижается. Для получения эффективного торможения в этих режимах последовательная обмотка возбуждения отключается, и механические характеристики двигателя становятся линейными аналогично двигателю с независимым возбуждением (прямая 2 и 5 на рисунке 2.27б).

Эффективность рекуперативного торможения можно увеличить, если изменить полярность включения последовательной обмотки возбуждения. Тогда магнитный поток машины по мере возрастания тока якоря будет увеличиваться, и механическая характеристика будет более жесткой (кривая 3 на рисунке 2.27б).

Режим торможения противовключением осуществляется как и для двигателя с последовательным возбуждением. Механические характеристики при этом, как и для других двигателей постоянного тока, являются продолжением характеристик двигательного режима в области II или IV квадрантов.

Поскольку электромеханические и механические характеристики двигателя со смешанным возбуждением аналитического выражения не имеют, то построить их можно только по каталожным универсальным зависимостям момента и скорости от тока якоря. Эти характеристики в относительных единицах представлены на рисунке 2.28.

Искусственные характеристики рассматриваемого двигателя рассчитываются так же, как и для двигателя с последовательным возбуждением. Аналогичны и математические методы исследования динамических процессов электромеханического преобразования энергии. Сами же динамические свойства электромеханического преобразователя со смешанным возбуждением занимают промежуточное положение между преобразователями с последовательным и с независимым возбуждением.

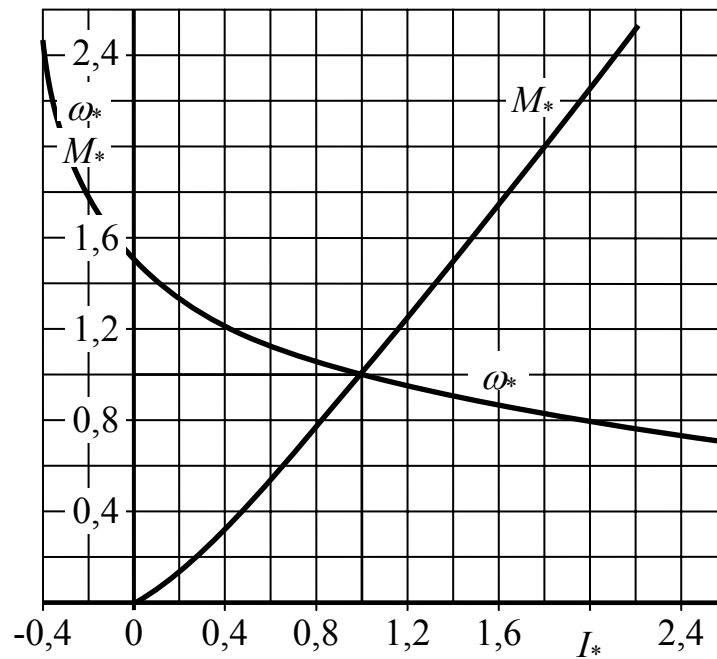


Рисунок 2.28

## 2.8 Выводы по главе

1. Двигатели постоянного тока в зависимости от типа возбуждения могут иметь разные по форме и жесткости характеристики.

2. Двигатели с независимым возбуждением большой мощности имеют компенсационную обмотку, компенсирующую поперечную реакцию якоря, и вследствие этого их характеристики линейны. Двигатели с независимым возбуждением средней мощности (до 100 кВт) могут иметь так называемую стабилизирующую обмотку, которая, по сути, является маломощной обмоткой последовательного возбуждения. Она компенсирует реакцию якоря только при прямом направлении вращения, усиливая ее при обратном. Некомпенсированные двигатели с независимым возбуждением имеют нелинейные характеристики и худшую динамику вследствие изменения магнитного потока при изменении тока якоря.

3. Перегрузочная способность по моменту двигателей с независимым возбуждением равна (у компенсированных) или меньше (у некомпенсированных) перегрузочной способности по току.

4. Двигатели постоянного тока с независимым возбуждением применяются в разомкнутых системах электропривода с изменяющейся в широком диапазоне нагрузкой и в замкнутых быстродействующих системах электропривода с широким диапазоном регулирования скорости (электроприводы станков, прокатных станов, землеройных машин и пр).

5. У двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением обмотка возбуждения выполняет две функции – создает основной маг-

нитный поток, зависящий от тока нагрузки, и является компенсационной обмоткой. Так как при увеличении тока якоря магнитный поток увеличивается, перегрузочная способность этих двигателей по моменту больше перегрузочной способности по току.

6. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением вследствие зависимости магнитного потока от тока нагрузки имеет нелинейные характеристики. Скорость идеального холостого хода при этом теоретически стремится к бесконечности (отсутствует).

7. Двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением применяются для механизмов с тяжелыми условиями пуска и с ускоренным перемещением в области малых нагрузок (тяговый электропривод, грузоподъемные и поворотные механизмы и пр.).

8. У двигателя со смешанным возбуждением вследствие наличия независимой и последовательной обмоток возбуждения имеется скорость идеального холостого хода, а характеристики в двигательном режиме аналогичны по форме характеристикам двигателя с последовательным возбуждением.

9. Двигатель со смешанным возбуждением в генераторном режиме (2 квадрант) из-за размагничивающего действия последовательной обмотки возбуждения имеет неблагоприятную форму механических характеристик ( $\omega \rightarrow \infty$ ;  $M \rightarrow 0$ ), и поэтому в режимах рекуперативного и динамического торможения обмотка последовательного возбуждения отключается.

10. При питании от источника напряжения двигателя постоянного тока, как объекты управления, могут быть представлены апериодическими звеньями с постоянными времени, зависящими от режима возбуждения. Наименьшей постоянной времени обладают двигатели с независимым возбуждением. В двигателях же с последовательным и смешанным возбуждением постоянная времени зависит от степени насыщения магнитной цепи, увеличиваясь при уменьшении нагрузки.

12. При питании от источника тока двигатель с независимым возбуждением может быть представлен апериодическим звеном со значительной по величине постоянной времени цепи обмотки возбуждения. В данном режиме двигатель является источником момента, величина которого может регулироваться его потоком возбуждения.

## 2.9 Литература, рекомендуемая для изучения

1. **Ключев, В.И.** Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – с. 135-187.

2. **Чиликин, М.Г.** Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – с. 112-141.
3. **Чиликин, М.Г.** Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – с. 46-83.
4. **Андреев, В.П.** Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – 2-е изд., перераб. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1963. – с. 14-81.
5. **Голован, А.Т.** Основы электропривода / А.Т. Голован. – М.: Энергия, 1959. – с. 38-51, 62-78.
6. **Чиликин, М.Г.** Общий курс электропривода: учеб. для вузов / М.Г. Чиликин., А.С. Сандлер. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – с. 48-74.
7. **Вешеневский, С.Н.** Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – с. 28-181.
8. **Кувшинов, А.А.** Теория электропривода. Учебное пособие по курсовому проектированию / А.А. Кувшинов, В.М. Вакулук, В.Б. Фатеев. – Оренбург, 2007. - с. 27-65.
9. **Кувшинов, А.А.** Теория электропривода. Методические указания к расчетно-графической работе / А.А. Кувшинов, С.Р. Подлесная. – Оренбург, 2007. – с. 5-30.

### **3 Свойства электромеханических преобразователей переменного тока**

В данной главе рассматриваются статические и динамические свойства асинхронных и синхронных двигателей переменного тока.

Вследствие относительной простоты конструкции и низкой стоимости двигателя переменного тока практически всегда используются для приводов механизмов, не требующих регулирования скорости вращения (конвейеры, компрессоры, вентиляторы, насосы, преобразовательные агрегаты и т.п.). Для больших мощностей, как правило, используются синхронные двигатели, для меньших – асинхронные. К достоинству синхронных двигателей можно отнести высокие энергетические показатели. К достоинствам асинхронных – простоту конструкции, подключения к сети и эксплуатации, а также низкий момент инерции.

Если в недалёком прошлом эти двигатели использовались только в нерегулируемых по скорости электроприводах, то в настоящее время в связи с развитием полупроводниковой преобразовательной техники регулирование скорости двигателей переменного тока стало возможным. Из-за вышеуказанных преимуществ двигателей переменного тока в современной

практике имеет место тенденция перехода от регулируемых электроприводов постоянного тока к регулируемым электроприводам переменного тока.

### 3.1 Статические свойства асинхронного двигателя

Математическое описание асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором достаточно сложно вследствие изменения активного сопротивления беличьей клетки в различных режимах работы. Это обусловлено эффектом вытеснения тока на поверхность проводников ротора. В двигателях с фазным ротором этот эффект значительно ослаблен, так как в пазах ротора находится многовитковая обмотка, и проводники в пазу разделены между собой изоляцией. Поэтому в настоящем пособии при анализе основных закономерностей асинхронных двигателей подразумевается наличие фазного ротора (если не будет оговорено особо).

Схема включения трёхфазного асинхронного двигателя с фазным ротором приведена на рисунке 3.1а.

Математический аппарат обобщенной машины и двухфазная модель асинхронного двигателя, известные из курсов «Электрические машины» и «Математическое моделирование в электроприводе», позволяют получить уравнения электрического равновесия фазы реального двигателя в комплексной форме для статического режима:

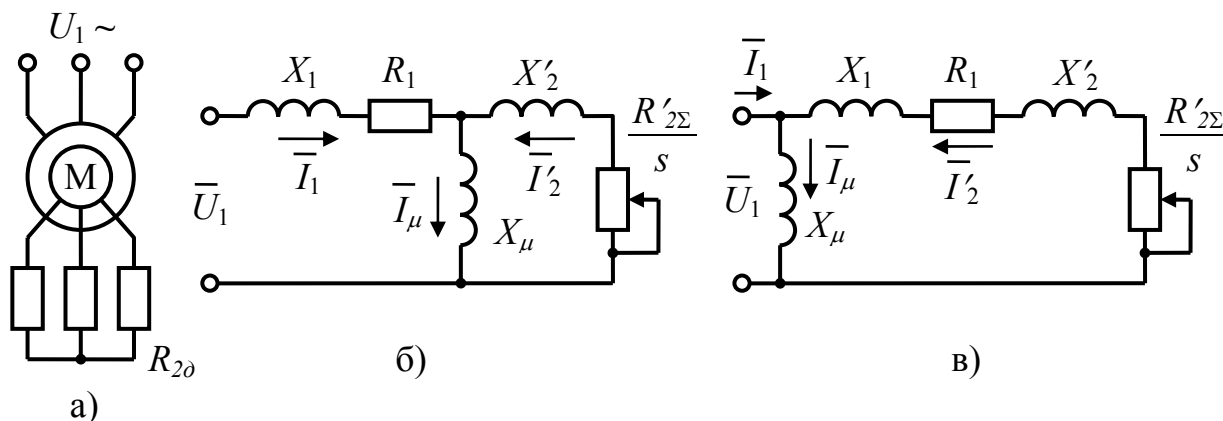


Рисунок 3.1

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \bar{I}_1 R_1 + j\bar{I}_1 X_1 + \bar{E}_1; \\ \bar{E}'_2 = \bar{I}'_2 \frac{R'_{2\Sigma}}{s} + j\bar{I}'_2 X'_2; \\ \bar{E}_1 = -\bar{E}'_2 = j\bar{I}'_2 X_\mu, \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $\bar{U}_1, \bar{E}_1, \bar{I}_1$  - напряжение, ЭДС и ток фазы статора двигателя;

$\bar{E}'_2, \bar{I}'_2$  - приведённые к обмотке статора ЭДС и ток фазы ротора;

$R_1, X_1$  - активное и индуктивное (рассеивания) сопротивления фазы статора;

$R'_{2\Sigma}, X'_2$  - приведённые к обмотке статора активное и индуктивное (рассеивания) сопротивления фазы ротора с учётом возможных активных добавочных сопротивлений;

$\bar{I}_\mu, X_\mu$  - ток и сопротивление намагничивающего контура двигателя;

$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  - скольжение двигателя;

$\omega$  - угловая скорость вращения двигателя;

$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p_n}$  - угловая скорость вращения магнитного поля

двигателя (скорость идеального холостого хода, синхронная скорость);

$f_1$  - частота напряжения питающей сети;

$p_n$  - число пар полюсов двигателя.

Соответствующая этой системе уравнений схема замещения представлена на рисунке 3.1б.

С целью упрощения намагничивающая ветвь схемы может быть вынесена на выводы напряжения сети. В этом случае схема замещения будет выглядеть так, как это представлено на рисунке 3.1в. Это допущение приводит к появлению небольшой ошибки в определении тока ротора  $I'_2$ , так как падение напряжения на сопротивлениях обмотки статора от намагничивающего тока  $I_\mu$  не учитывается.

В соответствии со схемой на рисунке 3.1в ток фазы ротора определится по выражению:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_{2\Sigma}}{s}\right)^2 + X_\kappa^2}}, \quad (3.2)$$

где  $X_\kappa = X_1 + X'_2$  - индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания.

Зависимость  $I'_2 = f(s)$  (3.2) является **статической электромеханической характеристикой асинхронного двигателя.**



Активная электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор ротору двигателя, определяется выражением:

$$P_{12} = M \cdot \omega_0 = \frac{3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_{2\Sigma}}{s}, \quad (3.3)$$

где  $M$  - электромагнитный момент двигателя.

Подставив (3.2) в (3.3), получим уравнение **статической механической характеристики двигателя**  $M=f(s)$ :

$$M = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R'_{2\Sigma}}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_{2\Sigma}}{s} \right)^2 + X_\kappa^2 \right]}. \quad (3.4)$$

Поскольку скольжение двигателя  $s$  присутствует и в числителе и в знаменателе выражения (3.4), эта функция имеет точки экстремумов. Параметры этих точек могут быть определены дифференцированием (3.4) по переменной  $s$  и приравниванием нулю этой производной. Точки экстремумов на механической характеристике называются **критическими точками** (точки  $k$  на рисунке 3.3), а параметры этих точек – соответственно **критическими скольжениями** и **критическими моментами**:

$$s_\kappa = \pm \frac{R'_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + X_\kappa^2}}; \quad (3.5)$$

$$M_\kappa = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_\kappa^2} \right)}. \quad (3.6)$$

В выражениях (3.5) и (3.6) знак «плюс» берется для двигательного режима, а знак «минус» – для генераторного режима. В генераторном режиме в соответствии с (3.6) критический момент  $M_{\kappa 2}$  больше, чем критический момент  $M_{\kappa 1}$  в двигательном режиме. Это объясняется тем, что при переходе в генераторный режим изменяются фазы активной составляющей тока статора и падения напряжения на активном сопротивлении статорной обмотки. Вследствие этого ЭДС статора и поток намагничивания в области малых отрицательных скольжений возрастают и превышают значения, соответствующие режиму идеального холостого хода. В двигательном же режиме, напротив, ЭДС статора и поток намагничивания уменьшаются по сравнению со значениями, соответствующими режиму идеального холо-

стого хода. Таким образом, при одинаковых по абсолютной величине скольжениях ЭДС и магнитный поток, и, следовательно, момент двигателя в генераторном режиме больше, чем в двигательном.

В области больших скольжений, как и в двигательном режиме, определяющим становится падение напряжения на индуктивном сопротивлении статорной обмотки, и ЭДС и поток намагничивания снижаются. Этим объясняется наличие максимумов ЭДС, потока статора и тока ротора в генераторном режиме.

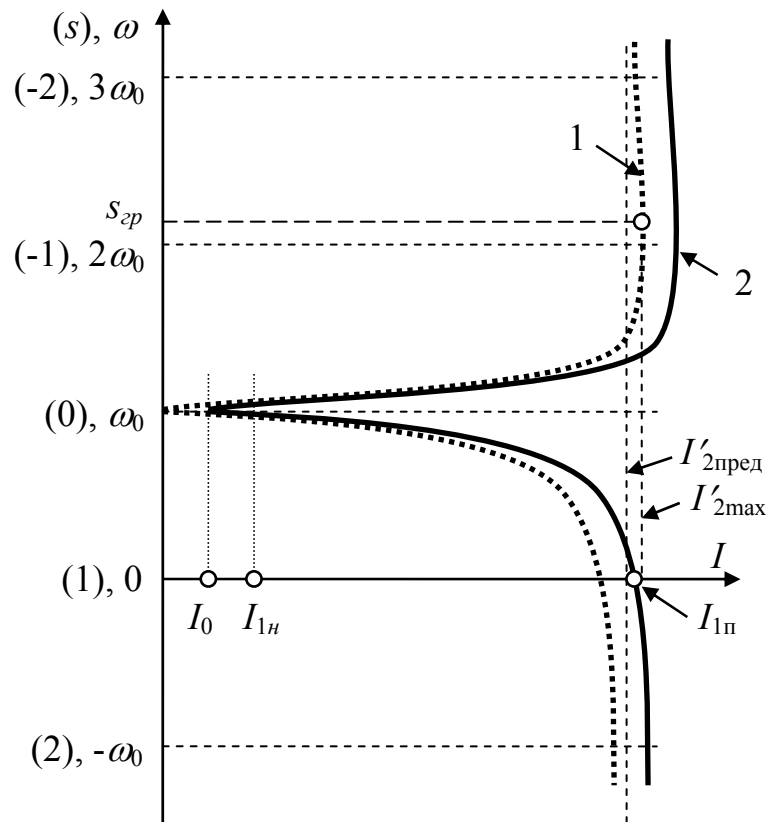
Из уравнения электромеханической характеристики (3.2) следует, что в генераторном режиме при скольжении  $s_{cp} = -R'_{2\Sigma} / R_1$  ток ротора достигает максимума, величина которого определяется выражением:

$$I'_{2\max} = \frac{U_1}{X_\kappa}. \quad (3.7)$$

При дальнейшем увеличении скольжения вплоть до  $s \rightarrow \infty$  ток  $I'_2$  уменьшается и стремится к предельному значению, такому же как и в двигательном режиме:

$$I'_{2\text{пред}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_\kappa^2}}. \quad (3.8)$$

Учитывая вышесказанное и выражения (3.2), (3.7) и (3.8) зависимость  $\omega = f(I'_2)$  выглядит так, как это представлено на рисунке 3.2 (кривая 1). Здесь же представлена зависимость  $\omega = f(I_1)$  (кривая 2), которая в основном повторяет форму кривой  $\omega = f(I'_2)$ , так как связана с нею соотношением  $\bar{I}_1 = \bar{I}_\mu - \bar{I}'_2$ . В режиме идеального холостого хода, когда ток ротора  $I'_2$  равен нулю, эти кривые отличаются друг от друга на величину тока холостого хода двигателя  $I_0$ , основную часть которого составляет ток намагничивания  $I_\mu = I_{\mu 0}$ . По мере роста нагрузки и тока ротора эти кривые сближаются, так как увеличивается падение напряжения на обмотке статора, и намагничивающий ток  $I_\mu$  уменьшается.



Двигатель МТМ412-6 ( $P_{2н}=22$  кВт,  $I_{1н}=48.5$  А,  $n_n=960$  об/мин)

Рисунок 3.2

С учётом (3.5) и (3.6) уравнение (3.4) статической механической характеристики запишется в форме так называемой **уточнённой формулы Клосса**:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\kappa} \cdot (1 + a \cdot s_{\kappa})}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s} + 2 \cdot a \cdot s_{\kappa}}, \quad (3.9)$$

где  $a = \frac{R_1}{R'_{2\Sigma}}$ .

У двигателей средней и большой мощности сопротивление  $R_1$  невелико по сравнению с  $R'_{2\Sigma}$  (особенно при наличии добавочных сопротивлений в цепи ротора), и величиной  $a$  можно пренебречь. Тогда уравнение механической характеристики упростится и запишется в виде:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\kappa}}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s}}. \quad (3.10)$$

Таким образом, механическая характеристика асинхронного двигателя может быть построена по выражению (3.4), либо по выражениям (3.9) или (3.10). В первом случае для построения необходимо знание величин внутренних сопротивлений и коэффициентов трансформации двигателя, которые в справочной литературе зачастую отсутствуют.

Преимуществом записи уравнения механической характеристики в форме (3.9) или (3.10) по сравнению с (3.4) является то, что для расчёта механической характеристики в этом случае требуется знать лишь те параметры, которые указаны в каталогах, или могут быть определены по данным каталогов. Такими параметрами являются:

$$\begin{aligned} P_n & - \text{номинальная мощность, Вт;} \\ \omega_n & - \text{номинальная частота вращения с}^{-1}; \\ \omega_0 & - \text{синхронная частота вращения с}^{-1}; \\ \lambda & = \frac{M_{\max}}{M_n} - \text{перегрузочная способность, о.е.} \end{aligned}$$

Для построения механической характеристики в этом случае определяются номинальный момент и номинальное скольжение двигателя:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad s_n = \frac{(\omega_0 - \omega_n)}{\omega_0}.$$

Затем, приняв  $M_{\max} = M_k$ , находят критический момент  $M_k = \lambda M_n$ . Критическое скольжение  $s_k$  для машин малой мощности, когда сопротивление  $R_1$  сравнимо по величине с сопротивлением  $R_2'$ , может быть определено по выражению, полученному из (3.9):

$$s_k = s_n \cdot \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1 + 2 \cdot s_n \cdot a \cdot (\lambda - 1)}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot a \cdot (\lambda - 1)}. \quad (3.11)$$

Для крупных машин эта величина может быть получена из выражения (3.10):

$$s_k = s_n \cdot \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (3.12)$$

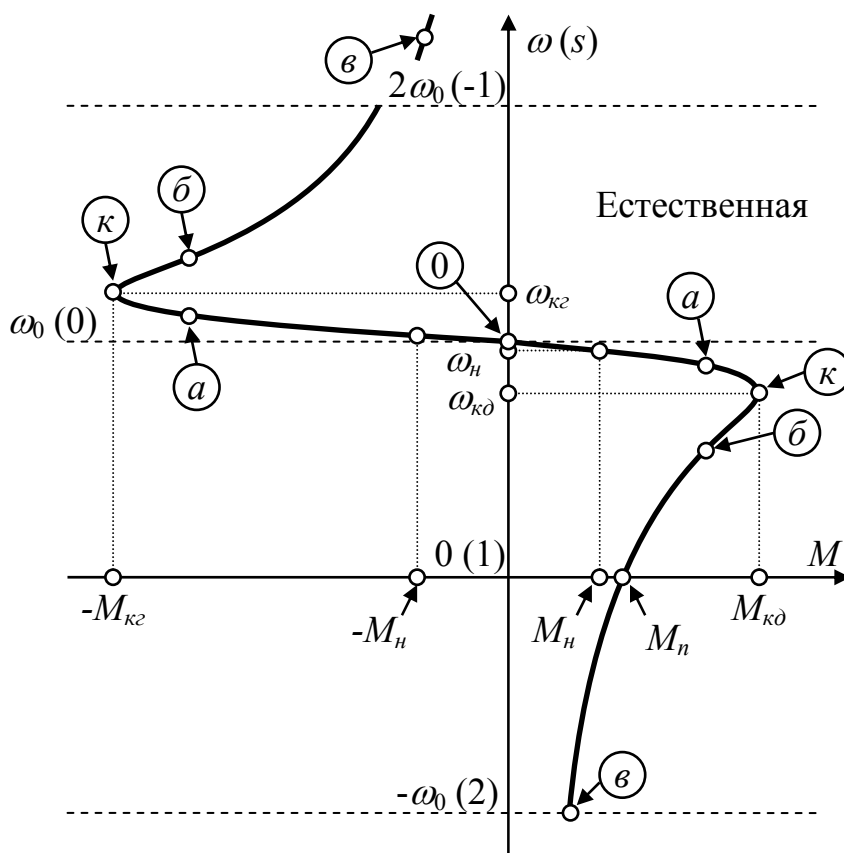
**Необходимо отметить, что максимальный момент на валу двигателя  $M_{\max}$  меньше, чем электромагнитный критический момент  $M_k$ , вследствие потерь в двигателе. Поэтому построенная по каталожным данным механическая характеристика будет иметь некоторую погрешность.**

Форму механической характеристики асинхронного двигателя можно представить, проанализировав выражение (3.10). При малых значениях скольжения  $s$  можно пренебречь величиной  $\frac{s}{s_k}$ , и механическая характеристика при таких значениях  $s$  может быть представлена прямой линией (участки 0 - а на рисунке 3.3):

$$M \approx \frac{2 \cdot M_k \cdot s}{s_k} \quad (3.13)$$

При больших значениях скольжения ( $s \gg s_k$ ) можно пренебречь величиной  $\frac{s_k}{s}$ , и механическая характеристика на этих участках будет описываться уравнением гиперболы (участки б - в на рисунке 3.3):

$$M \approx \frac{2 \cdot M_k \cdot s_k}{s} \quad (3.14)$$



Двигатель МТМ412-6 ( $P_{2н}=22$  кВт,  $I_{1н}=48.5$  А,  $n_n=960$  об/мин)

Рисунок 3.3

Значение критического момента двигателя  $M_k$ , определяющее перегрузочную способность двигателя, в соответствии с (3.6) пропорционально квадрату напряжения сети. Это обстоятельство снижает *реальную* перегрузочную способность двигателя по сравнению с *теоретической*, так как допустимое на 10% снижение напряжения сети приводит к уменьшению критического момента  $M_k$  на 19%.

### 3.1.1 Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя.

**Естественной механической характеристикой** будет называться характеристика, полученная при включении двигателя по схеме на рисунке 3.1а с накоротко замкнутой роторной обмоткой ( $R_{2\delta}=0$ ) при номинальных значениях питающего напряжения  $U_{1н}$  и частоты  $f_{1н}$ . Эта характеристика имеет диапазон изменения момента  $-M_{к2} \leq M \leq M_{к\delta}$ , а диапазон изменения скорости (скольжения) ограничен лишь величиной максимально допустимой скорости вращения двигателя. В этом диапазоне изменения момента и скорости двигатель работает в различных режимах (рисунок 3.3).

Рабочий участок характеристики расположен в диапазоне изменения скольжений  $[-s_k \leq s \leq s_k]$  или скоростей  $[\omega_{к2} \geq \omega \geq \omega_{к\delta}]$ . В диапазоне изменения моментов  $[-M_n \leq M \leq M_n]$  жёсткость характеристики высокая и практически постоянная. Она может быть определена по выражению:

$$\beta_{см.н} = - \frac{M_n}{\omega_0 - \omega_n} = - \frac{M_n}{\omega_0 \cdot s_n}. \quad (3.15)$$

В диапазонах  $[M_n < M \leq M_{к\delta}]$  и  $[-M_{к2} \leq M < -M_n]$  жёсткость характеристики уменьшается и при  $M=M_{к\delta}$  ( $\omega=\omega_{к\delta}$ ) и  $M=-M_{к2}$  ( $\omega=\omega_{к2}$ ) становится равной нулю. В частности, на участке  $|s| < (0.35 \div 0.4) \cdot |s_k|$ , который с известным приближением может быть принят линейным [3], жёсткость также может быть принята постоянной, а величина её определяется дифференцированием выражения (3.13) по переменной  $\omega$ :

$$\beta_{см} = \frac{d}{d\omega}(M) = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{2M_k s}{s_k} \right) = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{2M_k}{s_k} \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right) = - \frac{2M_k}{\omega_0 \cdot s_k}. \quad (3.16)$$

Кстати, за счёт того, что по модулю критический момент в генераторном режиме больше чем в двигательном ( $|M_{к2}| > |M_{к\delta}|$ ), модуль жёсткости рабочего участка механической характеристики в генераторном режиме выше, чем в двигательном. Таким образом, жёсткость всего рабочего уча-

стка отрицательная, характеристика здесь имеет «падающий» характер, и двигатель может работать устойчиво практически с любой нагрузкой.

При увеличении скольжения в диапазоне  $[s_k < s \leq 1]$  или скоростей  $[\omega_{кд} \geq \omega > 0]$  электромагнитный момент двигателя уменьшается, и жесткость характеристики становится положительной (рисунок 3.4).

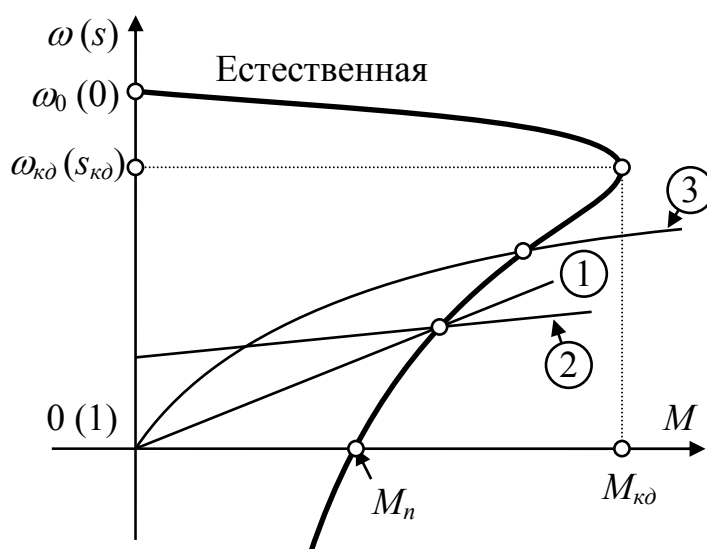


Рисунок 3.4

На этом участке характеристики режим работы двигателя будет неустойчивым практически со всеми видами нагрузок. Устойчивая работа возможна с нагрузками, механические характеристики которых в рабочей точке имеет большую по сравнению с механической характеристикой двигателя жесткость. Примерами таких нагрузок могут служить генератор постоянного тока с независимым возбуждением, работающий автономно или параллельно с сетью, и некоторые нагрузки вентиляторного типа (кривые 1, 2 и 3 на рисунке 3.4).

Для двигателей с фазным ротором этот участок практически не используется, так как легко обеспечить возможность работы двигателя при любой скорости на рабочем участке характеристики. Асинхронный короткозамкнутый двигатель работает на участке с положительной жесткостью в переходных процессах, а также в замкнутых по скорости электроприводах с регулированием скорости скольжением

При изменении направления вращения двигателя ( $s > 1$ ,  $\omega < 0$ ) под воздействием какого-то внешнего момента двигатель переходит в тормозной режим **противовключения**. Так как в этом режиме частота тока в роторной обмотке велика ( $f_2 > 50$  Гц) и соответственно велико её индуктивное сопротивление,  $\cos \varphi_2$  и развиваемый двигателем тормозной момент значительно уменьшаются. При этом ток, потребляемый из сети, в основном

имеет реактивный характер и значительно (в  $5 \div 10$  раз) превышает номинальное значение. Поэтому для двигателей с фазным ротором режим противовключения *на естественной характеристике* не применяется. Этот режим используется для торможения и реверса асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Область сверхсинхронных скоростей вращения  $\omega > \omega_0$  ( $s < 0$ ) соответствует тормозным режимам работы двигателя. При  $[\omega_{к2} \geq \omega > \omega_0]$  подводимая к двигателю механическая энергия преобразуется в электрическую, частично теряется в двигателе в виде тепла, а в основном отдаётся в сеть (режим **рекуперативного торможения**).

При дальнейшем возрастании скорости ( $\omega > \omega_{к2}$ ,  $|s| > |s_{к2}|$ ) увеличивается частота тока в роторной обмотке и уменьшается  $\cos \varphi_2$ . В пределе при  $s = s_{zp} = -R'_{2\Sigma} / R_1$  ток  $I_2$  становится чисто реактивным (3.7),  $\cos \varphi_2$  и отдаваемая в сеть *активная мощность* становятся равными нулю, а вся подведённая к двигателю механическая энергия идет на нагревание двигателя. Таким образом, при  $s = s_{zp}$  двигатель работает в режиме динамического торможения. При дальнейшем увеличении скорости ( $\omega > \omega_{zp}$ ,  $|s| > |s_{zp}|$ ) двигатель начинает потреблять энергию из сети, как и в тормозном режиме противовключения. Так как величина  $s_{zp}$  зависит от соотношения  $R'_{2\Sigma} / R_1$ , то обычно (особенно у мощных двигателей)  $|s_{zp}| > 1$ , а частота вращения  $\omega > 2\omega_0$ . Такие скорости в реальных электроприводах с постоянной частотой питающего напряжения  $f_1$  используются очень редко.

### 3.1.2 Искусственные статические характеристики асинхронного двигателя.

Искусственные характеристики асинхронного двигателя можно получить:

- 1) введением активных и индуктивных сопротивлений в цепь фазного ротора;
- 2) введением активных и индуктивных сопротивлений в цепь статора;
- 3) изменением величины питающего напряжения на статоре;
- 4) изменением частоты питающего напряжения на статоре.

Для получения искусственных характеристик двигателя с фазным ротором на практике широко используется введение активных добавочных сопротивлений в цепь ротора (рисунок 3.1а). Механические характеристики, получаемые при этом, называются реостатными, и они имеют вид, показанный на рисунке 3.5а. В соответствии с (3.5) и (3.6) критический момент  $M_k$  остаётся при этом постоянным, а критическое скольжение увели-



чивается пропорционально суммарному сопротивлению роторной цепи  $R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{2доб}$ . Из характеристик, а также из выражения (3.2) можно установить, что введение добавочных активных сопротивлений в цепь ротора является эффективным средством ограничения тока в переходных процессах, увеличения пускового момента двигателя, а также регулирования скорости двигателя.

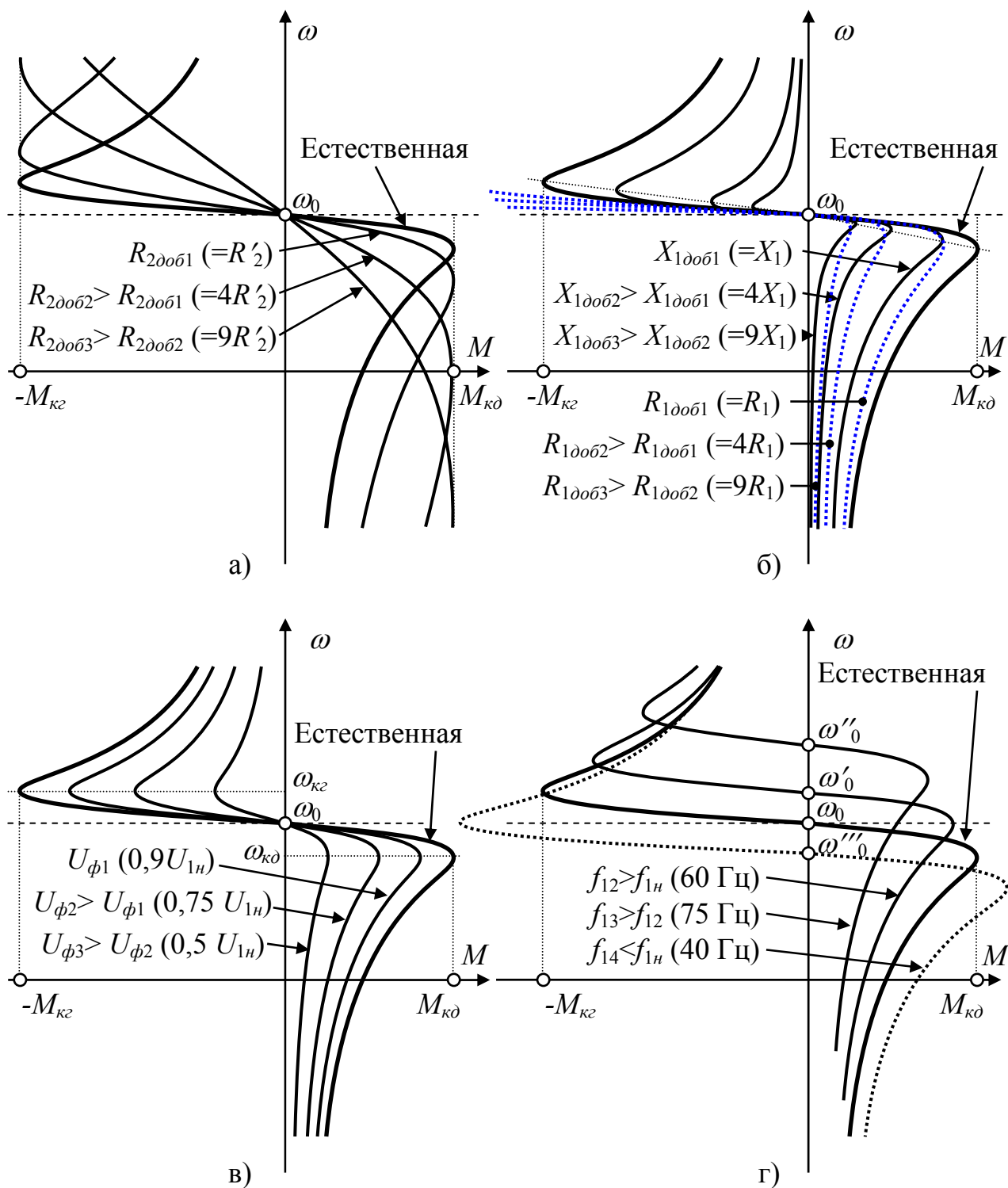
Пусковой момент двигателя при увеличении добавочного **активного сопротивления** роторной цепи сначала увеличивается до максимального  $M_k$  ( $R_{2доб2}$  на рисунке 3.5а), а затем уменьшается. Это объясняется тем, что при увеличении  $R_{2доб}$  увеличивается  $\cos\varphi_2$  и, соответственно, активная составляющая тока ротора, которая и определяет величину пускового момента. Но дальнейшее увеличение  $R_{2доб}$  приводит к значительному уменьшению полного тока роторной цепи  $I'_2$  и, соответственно, к уменьшению активной его составляющей.

Модуль жёсткости рабочего участка реостатной механической характеристики в соответствии с (3.16) и (3.5) обратно пропорционален величине сопротивления роторной цепи  $R'_{2\Sigma}$ .

Искусственные характеристики при введении добавочных **индуктивных сопротивлений**  $X_{1доб1}$ ,  $X_{1доб2}$ ,  $X_{1доб3}$  в цепь статора представлены на рисунке 3.5б. В этом случае увеличивается индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_k = X_{1\Sigma} + X'_2$ , что в соответствии с (3.5) и (3.6) приводит к уменьшению критического момента  $M_k$  и критического скольжения  $s_k$ . Введение добавочных индуктивных сопротивлений в цепь ротора также увеличивает  $X_k$  и уменьшает  $M_k$  и  $s_k$ .

Примерно к такому же эффекту в двигательном режиме (1 квадрант) приводит введение в цепь статора добавочных **активных сопротивлений**. В генераторном же режиме (2 квадрант) вследствие увеличения ЭДС  $E$  и потока намагничивания  $\Phi_{\mu}$ , критический момент  $M_{к2}$  больше, чем в двигательном  $M_{к0}$ . Механические характеристики при этом более жесткие, чем естественная характеристика. Такие искусственные характеристики показаны на рисунке 3.5б пунктирными линиями.

Следует отметить тот факт, что при введении в силовые цепи асинхронного двигателя емкостного сопротивления индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_k$  может быть снижено, что приводит к увеличению  $M_k$  и перегрузочной способности двигателя. Однако, на практике эта возможность в связи с трудностями реализации (большие значения емкостей конденсаторов) используется редко.



Двигатель МТМ412-6 ( $P_{2н}=22$  кВт,  $I_{1н}=48.5$  А,  $n_n=960$  об/мин)

Рисунок 3.5

Изменение величины напряжения  $U_1$ , подводимого к статору асинхронного двигателя, при  $f_1=\text{const}$  может рассматриваться как управляющее воздействие, определяющее величину магнитного потока двигателя. Это подтверждается тем, что в пределах рабочего участка механической характеристики, когда ток статора существенно не превышает номинального

значения, ЭДС двигателя  $E$  приблизительно равна напряжению сети, и справедливо следующее выражение:

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_{\mu \max}, \quad (3.17)$$

где  $w_1$  - число витков обмотки статора;

$\Phi_{\mu \max}$  - амплитудное значение основного магнитного потока двигателя.

Так как электрические машины в номинальном режиме имеют практически насыщенную магнитную цепь, повышение напряжения сверх номинального приводит к резкому увеличению тока холостого хода, что может привести к нагреванию двигателя выше допустимой температуры даже при работе на холостом ходу. Поэтому возможно лишь снижение напряжения на статоре, что приведёт в соответствии с (3.5), (3.6) и (3.17) к уменьшению магнитного потока и критического момента  $M_k$  при постоянном критическом скольжении  $s_k$ . Форма механических характеристик при  $f_1 = \text{const}$  и  $U_1 = \text{var}$  показана на рисунке 3.5в.

Во всех вышерассмотренных вариантах искусственных характеристик скорость идеального холостого хода (синхронная скорость)  $\omega_0$  оставалась неизменной. Поскольку эта скорость пропорциональна частоте питающей сети  $f_1$ , изменения этой частоты при  $U_1 = \text{const}$  приводят к обратно пропорциональным изменениям потока двигателя  $\Phi_{\mu}$  (согласно (3.17)). Из-за возможности насыщения двигателя и недопустимого роста тока статора уменьшение частоты  $f_1 < f_{1н}$  при сохранении номинального напряжения недопустимо. Возможно только увеличение частоты  $f_1 > f_{1н}$ . Согласно (3.17) это приводит к уменьшению потока  $\Phi_{\mu}$ , которое в соответствии с выражениями (3.5) и (3.6) приведет к уменьшению критического момента  $M_k$  и критического скольжения  $s_k$  из-за увеличения скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  и индуктивного сопротивления короткого замыкания  $X_k$ . Механические характеристики при этом имеют вид, представленный на рисунке 3.5г. Там же приведена характеристика при уменьшенной частоте питающего напряжения (пунктирная линия).

Для того чтобы сохранить во всем диапазоне регулирования скорости постоянное значение перегрузочной способности, необходимо вместе с частотой  $f_1$  изменять и величину напряжения  $U_1$  так, чтобы магнитный поток двигателя поддерживался примерно постоянным. Таким образом, наиболее эффективное управление асинхронным двигателем, также как и двигателем постоянного тока с независимым возбуждением, может быть осуществлено по двум каналам: каналу регулирования скорости (изменением частоты напряжения питания) и каналу регулирования магнитного потока

(изменением величины напряжения питания). Самым элементарным законом регулирования скорости двигателя является закон  $\frac{U_1}{f_1} = const$ . Способ регулирования скорости двигателя изменением частоты питающего напряжения подробно будет рассмотрен ниже.

### 3.1.3 Особенности статических характеристик асинхронного короткозамкнутого двигателя.

Проведённый анализ естественных и искусственных статических характеристик асинхронного двигателя основывался на предположении, что его параметры  $R_1, R'_2, X_1, X'_2$  во всех точках механической характеристики неизменны. Это допущение вполне приемлемо в пределах рабочего участка характеристики, когда частота тока в роторной обмотке минимальна (значительно меньше номинальной). При больших токах сказывается насыщение магнитной цепи, что приводит к уменьшению индуктивного сопротивления рассеяния. При низких скоростях, когда значительно повышается частота тока ротора, усиливается явление вытеснения тока на поверхность проводников, приводящее к увеличению активного сопротивления обмотки ротора  $R'_2$ .

Для двигателя с фазным ротором в пределах рабочих участков естественной и искусственных характеристик указанные изменения параметров незначительны. Для асинхронного короткозамкнутого двигателя, применяемого в промышленности наиболее широко, это влияние значительно, и его необходимо учитывать.

Схема включения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором приведена на рисунке 3.6а.

В большинстве практических случаев пуск этих двигателей осуществляется прямым включением в сеть, а торможение происходит при больших скольжениях. Поэтому вид механических характеристик при  $s > s_k$  для короткозамкнутых двигателей имеет большое значение. Если у двигателей с фазным ротором пусковой момент может быть увеличен до значения  $M_k$  на реостатных характеристиках, то у короткозамкнутых двигателей пусковой момент – величина постоянная, зависящая от конструкции роторной обмотки. Соответственно, и величина пускового тока, уменьшающаяся у двигателя с фазным ротором на реостатных характеристиках, у короткозамкнутых двигателей есть величина постоянная, достигающая (5÷7)-кратного относительно номинального значения. Поэтому для двига-

телей с короткозамкнутым ротором в каталогах указывается кратность пускового момента  $\frac{M_n}{M_H}$  и кратность пускового тока  $\frac{I_n}{I_H}$ .

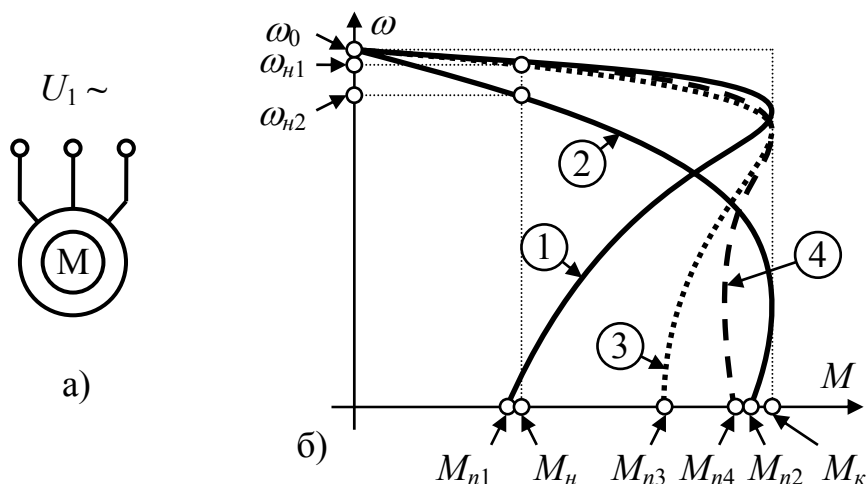


Рисунок 3.6

Двигатель с ротором нормального исполнения (с круглыми пазами) может иметь пусковой момент, близкий к номинальному. Также необходимо учитывать, что при допустимом снижении напряжения в сети на 10%, пусковой момент уменьшается на 19%. Явление вытеснения тока на поверхность стержней ротора в пусковом режиме у таких двигателей незначительно и не вызывает заметного увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока (характеристика 1 на рисунке 3.6б).

Если по аналогии с двигателем с фазным ротором увеличить активное сопротивление беличьей клетки, то можно увеличить пусковой момент и соответственно уменьшить пусковой ток. Это реализовано в **асинхронных короткозамкнутых двигателях с повышенным скольжением** (характеристика 2 на рисунке 3.6б). Такие двигатели имеют номинальное скольжение  $s_n=0,04\div 0,12$ , что в 2-3 раза превышает номинальное скольжение двигателя нормального исполнения. При этом снижается номинальная скорость, и увеличиваются потери в роторной цепи двигателя:

$$\Delta P_2 = M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot \omega_0 \cdot s.$$

Это приводит к снижению мощности двигателя по сравнению с двигателем нормального исполнения в тех же габаритах и уменьшению КПД. Поэтому такие двигатели нецелесообразно использовать в установках, длительно работающих с номинальной нагрузкой.

Кардинально решается проблема пускового режима в **двигателях с глубоким пазом** и, особенно, с двойной беличьей клеткой (характеристи-

ки 3 и 4 на рисунке 3.6б). За счёт формы стержней возрастает степень вытеснения тока на поверхность в пусковом режиме, и сопротивление при пуске значительно увеличивается, оставаясь низким на рабочем участке, когда  $s < s_k$ . Это приводит к значительному увеличению пускового момента и уменьшению пускового тока, причем жёсткость рабочего участка механической характеристики и КПД остаются близкими к двигателям нормального исполнения. Двигатели с двойной беличьей клеткой имеют практически постоянный пусковой момент, по величине приближающийся к критическому моменту  $M_k$ . Всё вышесказанное справедливо и для тормозного режима противовключением, осуществляющегося при скольжениях  $s > 1$ , то есть при частотах тока ротора, больших 50 Гц.

### **3.1.4 Тормозные режимы асинхронного двигателя.**

Асинхронная машина может работать во всех трёх тормозных режимах: рекуперативного торможения, торможения противовключением и динамического торможения.

#### **Рекуперативное торможение.**

В этом режиме двигатель работает генератором параллельно с сетью при скоростях вращения, больших скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  (сверхсинхронные скорости вращения). Механические характеристики при этом являются продолжением характеристик двигательного режима в область второго квадранта (рисунки 3.3 и 3.5). Вид механических и электромеханических характеристик этого режима подробно описан выше (раздел 3.1).

В режиме рекуперативного торможения асинхронный двигатель, отдавая активную энергию в сеть, потребляет из сети реактивную энергию, необходимую для создания магнитного потока. Вследствие этого, асинхронный двигатель не может работать как автономный источник напряжения.

#### **Торможение противовключением.**

Режим торможения противовключением может быть получен также, как и для двигателя постоянного тока, двумя способами. При наличии активной нагрузки на валу асинхронного двигателя с фазным ротором (грузоподъёмный механизм) введением добавочного сопротивления в цепь ротора можно не только снизить скорость подъёма (точка *a* характеристики 1 на рисунке 3.7), но и получить режим спуска груза, когда ротор двигателя вращается в сторону, противоположную направлению вращения поля статора. Этот режим будет соответствовать торможению противовключением (точка *b* характеристики 2 на рисунке 3.7).

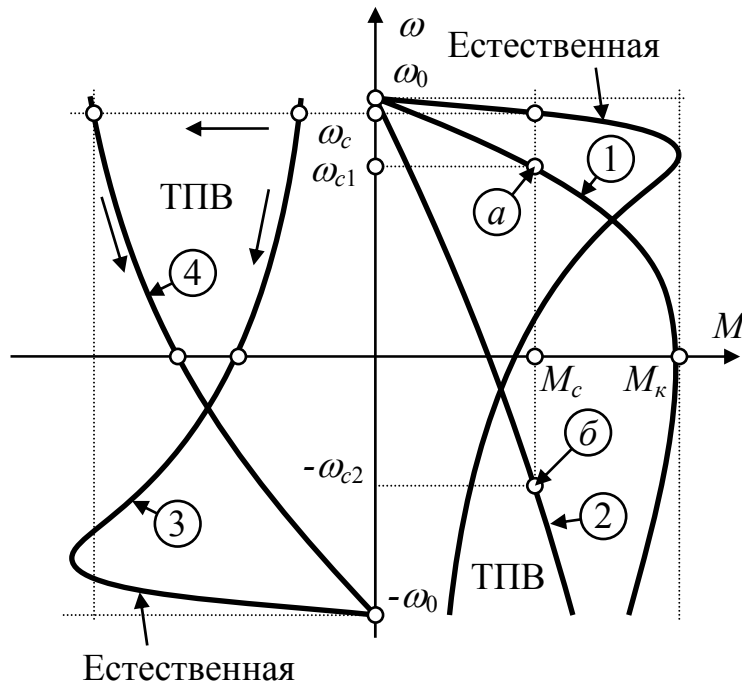


Рисунок 3.7

Для того, чтобы затормозить вращающийся двигатель или произвести его реверсирование, изменяется направление вращения магнитного поля путем изменения чередования фаз на обмотке статора при прежнем направлении вращения ротора. При таком переключении двигатель переходит при скорости  $\omega_c$  на характеристику обратного направления вращения и тормозится в режиме противовключения до нулевой скорости (характеристика 3 на рисунке 3.7).

В режиме торможения противовключением двигатель работает с большими скольжениями  $1 < s < 2$ . Без добавочных сопротивлений токи двигателя в этой области достигают 10-кратных значений номинального тока, а момент двигателя в значительной степени снижается из-за уменьшения  $\cos \varphi$ . Поэтому для повышения эффективности торможения и ограничения тока в тормозном режиме в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором включаются добавочные сопротивления (характеристика 4 на рисунке 3.7).

Для асинхронных короткозамкнутых двигателей небольшой и средней мощности режим противовключения осуществляется на естественной характеристике при значительных кратковременных перегрузках, которые нужно учитывать при выборе двигателя.

#### **Динамическое торможение.**

Для асинхронных двигателей, также как и для двигателей постоянного тока, возможны два режима динамического торможения: торможение

с самовозбуждением и торможение с независимым возбуждением постоянным током. Режим динамического торможения с независимым возбуждением будет рассмотрен ниже.

Для возникновения самовозбуждения необходимо обеспечить опережение вектором намагничивающего тока вектора наводимой в двигателе ЭДС. При отсутствии внешних источников питания такое соотношение между фазами этих векторов может быть получено при включении параллельно обмоткам статора конденсаторов по схеме, представленной на рисунке 3.8. Поэтому динамическое торможение с самовозбуждением часто называют **конденсаторным торможением**.

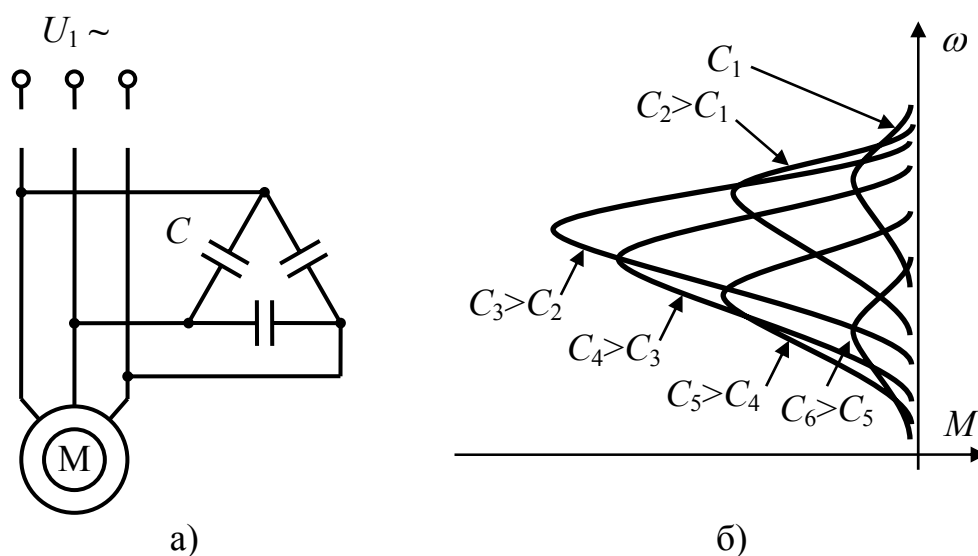


Рисунок 3.8

Процесс самовозбуждения асинхронного двигателя происходит аналогично процессу самовозбуждения машин постоянного тока. Установившийся режим самовозбуждения определяется точкой пересечения вольт-амперной характеристики  $E_1(I_\mu)$  и прямой  $I_1 \cdot Z_1(f_1)$ , где  $Z_1$  – полное сопротивление контура обмотки статора, величина которого зависит от частоты тока статора  $f_1$  (скорости вращения  $\omega$ ).

Также как и у двигателя постоянного тока, у асинхронного двигателя существует критическая (нижняя) скорость начала самовозбуждения, величина которой, если пренебречь падением напряжения на активных сопротивлениях обмотки статора, определяется равенством реактивных сопротивлений контура намагничивания и конденсаторов (явление резонанса):



$$\begin{cases} X_{c.f} = X_{\mu.f}; \\ X_{c.f} = \frac{X_c}{f_{11*}}; \\ X_{\mu.f} = X_{\mu} \cdot f_{11*}, \end{cases} \quad (3.18)$$

где  $X_{\mu.f}, X_{c.f}$  - реактивные сопротивления контура намагничивания и конденсаторов при частоте (скорости) самовозбуждения;  
 $X_{\mu}, X_c$  - реактивные сопротивления контура намагничивания и конденсаторов при  $f_n=50$  Гц;  
 $f_{11}, f_{11*}$  - абсолютная и относительная частота начала самовозбуждения:

$$f_{11*} = \frac{f_{11}}{f_n}.$$

Из (3.18) можно определить частоту и скорость начала самовозбуждения (с учётом того, что в начале самовозбуждения  $s_{нач}=0$ ):

$$f_{11*} = \sqrt{\frac{X_c}{X_{\mu}}} = \sqrt{\frac{1}{314 \cdot C \cdot X_{\mu}}}; \quad (3.19)$$

$$\omega_{нач} = \omega_{01}(1 - s_{нач}) = f_{11*} \cdot \omega_0 = \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{X_c}{X_{\mu}}} = \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{314 \cdot C \cdot X_{\mu}}}, \quad (3.20)$$

где  $C$  – емкость конденсаторов.

При  $\omega > \omega_{нач}$  растут частота, напряжение и токи асинхронной машины, которая работает автономным генератором, когда механическая энергия, поступающая с вала двигателя, преобразуется в электрическую и выделяется в виде тепла в сопротивлениях роторной цепи.

В отличие от двигателя постоянного тока, у асинхронного двигателя, также как при питании от сети, имеется верхняя граница существования генераторного режима – граничное скольжение  $s_{zp} = -\frac{1}{a} = -\frac{R'_{2\Sigma}}{R_1}$ . При скорости, соответствующей этому скольжению, активная составляющая тока ротора и момент двигателя становятся равными нулю. Физически это означает, что вся реактивная мощность, генерируемая конденсаторами, передаётся индуктивностям рассеяния двигателя  $X_1 + X'_2$ , исключая основной контур намагничивания, что и является причиной прекращения самовозбуждения. В этом режиме при  $s = s_{zp}$ :

$$\frac{X_c}{f_{12*}} = (X_1 + X'_2) \cdot f_{12*} = X_k \cdot f_{12*}, \quad (3.21)$$

где  $f_{12*}$  - относительная частота верхней границы самовозбуждения;

$X_1, X'_2, X_k$  - индуктивные сопротивления двигателя при номинальной частоте  $f_{1н}$ .

Из (3.21) можно определить частоту  $f_{12*}$ :

$$f_{12*} = \sqrt{\frac{X_c}{X_k}} = \sqrt{\frac{1}{314 \cdot C \cdot X_k}}. \quad (3.22)$$

Тогда максимальная угловая скорость, при которой заканчивается режим самовозбуждения, определяется из выражения:

$$\omega_{кон} = \omega_{02} \cdot (1 - s_{zp}) = f_{12*} \cdot \omega_0 \cdot (1 - s_{zp}) = \omega_0 \left( 1 + \frac{R'_{2\Sigma}}{R_1} \right) \sqrt{\frac{1}{314 \cdot C \cdot X_k}}. \quad (3.23)$$

Из (3.20) и (3.23) видно, что с увеличением ёмкости конденсаторов зона действия самовозбуждения перемещается в область низких скоростей, причём ширина этой зоны определяется соотношением индуктивных сопротивлений контура намагничивания  $X_\mu$  и рассеяния  $X_k$ . Чем больше величина  $X_\mu / X_k$ , тем шире зона действия конденсаторного торможения. На рисунке 3.8б приведены механические характеристики асинхронного двигателя при конденсаторном торможении. Увеличение ёмкости конденсаторов ведёт к снижению скорости начала самовозбуждения. Однако максимум тормозного момента на валу двигателя имеет место только при определенных значениях ёмкости конденсаторов ( $C_3$ ). Увеличение или снижение ёмкости приводит к уменьшению тормозного момента двигателя.

### 3.2 Динамические свойства асинхронного электромеханического преобразователя при питании от источника напряжения

Как было показано выше, наиболее эффективным способом управления асинхронным двигателем является одновременное изменение частоты и амплитуды питающего напряжения. Такое управление возможно лишь при наличии управляемого преобразователя частоты.

Рассмотрим динамические процессы в асинхронном двигателе, получающем питание от такого индивидуального преобразователя, обла-

дающего свойствами источника напряжения (выходное напряжение при изменении тока нагрузки не изменяется).

Уравнения электрического равновесия (3.1) в этом случае запишутся в виде:

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \bar{I}_1 R_1 + j\bar{I}_1 f_{*1} X_{1H} + j\bar{I}_\mu f_{*1} X_{\mu.H}; \\ 0 = \bar{I}'_2 \frac{R'_{2\Sigma}}{s} + j\bar{I}'_2 f_{*1} X'_{2H} + j\bar{I}_\mu f_{*1} X_{\mu.H}, \end{cases} \quad (3.24)$$

где  $f_{*1} = \frac{f_1}{f_{1H}}$  - относительная частота питающего напряжения;

$X_{1H}$ ,  $X_{2H}$ ,  $X_{\mu.H}$  - индуктивные сопротивления двигателя при номинальной частоте  $f_{1H}(\omega_{0H})$ .

Разделив обе части уравнений (3.24) на  $f_{*1}$  и приняв  $R_1=0$ ,  $\omega_0=f_{*1} \cdot \omega_{0H}$ ,  $U_1=f_{*1} U_{1H}$  (закон регулирования  $U_1 / f_1 = \text{const}$ ), получим:

$$\begin{cases} \bar{U}_{1H} = j\bar{I}_1 X_{1H} + j\bar{I}_\mu X_{\mu.H}; \\ 0 = \bar{I}'_2 \frac{R'_{2\Sigma}}{s_a} + j\bar{I}'_2 X'_{2H} + j\bar{I}_\mu X_{\mu.H}, \end{cases} \quad (3.24a)$$

где  $s_a = f_{*1} s = f_{*1} \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{0H}}$  - абсолютное скольжение,

$\omega_{0H}$  - скорость вращения поля при номинальной частоте  $f_{1H}$ .

Таким образом, система уравнений (3.24a), описывающая процессы в асинхронном двигателе при изменении частоты по закону  $U_1 / f_1 = \text{const}$ , аналогична системе уравнений (3.1) для постоянной частоты питающей сети ( $f_{1H} = \text{const}$ ) при  $R_1=0$  и замене скольжения  $s$  на абсолютное скольжение  $s_a$ .

Анализ динамических процессов преобразования энергии в асинхронном двигателе представляет собой сложную задачу в связи с существенной нелинейностью уравнений, описывающих эти процессы. Эта задача при широких пределах изменения скольжения может быть решена только с применением вычислительной техники.

Рассмотрим динамический режим работы двигателя по истечении некоторого времени после его включения, достаточного для затухания колебаний, обусловленных переходными процессами включения. При этом примем следующие допущения:

- отклонения скорости от статического значения полагаются малыми;

- изменения токов не приводят к существенным изменениям магнитного потока (потокосцепление  $\Psi_1 = \text{const}$ );

- сопротивление статора пренебрежимо мало ( $R_1 = 0$ ).

Математический аппарат обобщённой машины и двухфазная модель асинхронного двигателя, известные из курсов «Электрические машины» и «Математическое моделирование в электроприводе», позволяют получить уравнение механической динамической характеристики двигателя для случая малых отклонений в виде:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\kappa}}{(1 + T_{\vartheta} \cdot p) \cdot \left[ \frac{s_{\kappa}}{s_a} \cdot (1 + T_{\vartheta} \cdot p) \right] + \frac{s_a}{s_{\kappa}}}, \quad (3.25)$$

где  $s_{\kappa} = \frac{R'_2}{X_{1H} + X'_{2H}} = \frac{R'_2}{X_{\kappa}}$  - критическое скольжение;

$M_{\kappa} = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \omega_{0H}}{2 \cdot \omega_0^2 \cdot (X_{1H} + X'_{2H})}$  - критический момент;

$T_{\vartheta} = \frac{L_1 + L'_2}{R'_2} = \frac{X_{1H} + X'_{2H}}{\omega_{0эл.н} \cdot R'_2} = \frac{1}{\omega_{0эл.н} \cdot s_{\kappa}}$  - электромагнитная постоянная времени;

$L_1, L'_2$  - индуктивности рассеивания обмоток статора и ротора (приведенная);

$\omega_{0эл.н} = 2\pi \cdot f_{1H}$  - номинальная угловая частота питающего напряжения.

Из уравнения (3.25) подстановкой  $p=0$  можно получить уравнение статической механической характеристики при  $R_1=0$ :

$$M = \frac{2 \cdot M_{\kappa}}{\frac{s_{\kappa}}{s_a} + \frac{s_a}{s_{\kappa}}}. \quad (3.26)$$

Пренебрежение величиной  $R_1$  делает уравнение (3.26) приближенным, но преимуществом его является то, что оно описывает не только естественную характеристику двигателя, но и все искусственные при изменении частоты  $f_1$  и напряжения  $U_1$  по закону  $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ .

На рисунке 3.9а представлены механические характеристики асинхронного двигателя при питании от источника напряжения при различных частотах  $f_1$ , построенные по выражению (3.26) (кривые 1, 2, 3, 4).

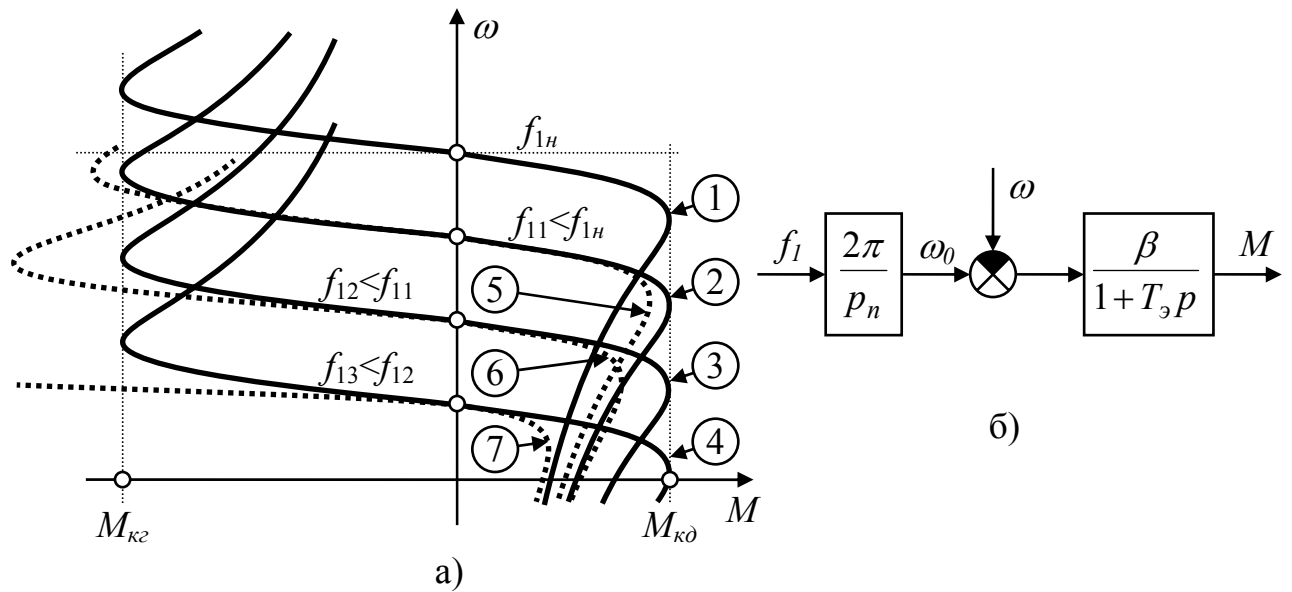


Рисунок 3.9

При условии  $R_1=0$  момент критический на всех частотах остаётся постоянным. В действительности же пренебрегать величиной  $R_1$  можно лишь на частотах больших и близких к номинальной ( $f_1 \geq f_{1.n}$ ), когда  $U_1 \gg I_1 \cdot R_1$ . При снижении частоты и напряжения по закону  $U_1/f_1 = const$  доля падения напряжения на активном сопротивлении статора  $R_1$  увеличивается, вследствие чего намагничивающий ток и магнитный поток уменьшаются, стремясь к нулю при  $f_1 \rightarrow 0$ . Реальные механические характеристики при таком законе управления имеют снижающийся при уменьшении частоты  $f_1$  критический момент в двигательном режиме (кривые 1, 5, 6, 7). Поэтому для сохранения перегрузочной способности применяются более сложные законы регулирования.

Уравнение (3.25) учитывает влияние электромагнитной инерции на протекание переходных процессов в электромеханическом преобразователе при малых отклонениях от точки статического равновесия. Наибольший интерес при частотном регулировании скорости представляют динамические процессы, происходящие на рабочем участке механической характеристики при  $|s_a| < |s_k|$ .

Линеаризация с помощью разложения в ряд Тэйлора уравнения (3.25) после соответствующих преобразований позволяет получить уравнение механической динамической характеристики на линейном участке в следующем виде:

$$(1 + T_s \cdot p) \cdot M = \beta \cdot (\omega_0 - \omega), \quad (3.27)$$

где  $\beta = \frac{2M_k}{\omega_{0.н} s_k}$  - модуль жёсткости линеаризованной механической характеристики.

Структурная схема асинхронного электромеханического преобразователя при такой линеаризации представлена на рисунке 3.9б. Из этой схемы следует, что передаточная функция динамической жёсткости в этом случае запишется выражением:

$$\beta_{дин}(p) = \frac{M(p)}{\omega(p)} = - \frac{\beta}{(1 + T_\omega p)}. \quad (3.28)$$

Сравнивая (3.27) и (3.28) с аналогичными выражениями для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, можно сделать вывод о том, что в пределах рабочего участка  $[-s_k < s_a < s_k]$ , асинхронный двигатель при питании от источника напряжения имеет динамические свойства, аналогичные двигателю с независимым возбуждением, то есть представляет собой апериодическое звено с постоянной времени  $T_\omega$ .

Диапазон значений электромагнитной постоянной времени рассматриваемого двигателя определим, исходя из того, что критическое скольжение двигателей лежит в пределах  $s_k = (0.05 \div 0.5)$ , причем меньшие значения соответствуют более мощным двигателям. Тогда значения электромагнитной постоянной асинхронных двигателей будут находиться в пределах:

$$T_\omega = \frac{1}{\omega_{0.н} s_k} = \frac{1}{314 \cdot (0.05 \div 0.5)} = (0.06 \div 0.006) \text{ с.}$$

Меньшие значения  $T_\omega$  имеют двигатели малой мощности. В целом электромагнитная постоянная асинхронного двигателя меньше, чем двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Поэтому электропривод на базе асинхронного двигателя имеет более высокое быстродействие, чем электропривод постоянного тока.

### 3.3 Статические характеристики и динамические свойства асинхронного электромеханического преобразователя при питании от источника тока

В регулируемых асинхронных электроприводах с частотным управлением нередко используются статические преобразователи частоты, обладающие свойствами источника тока. Такие преобразователи формируют в фазах двигателя токи, которые не зависят от режима работы и парамет-

ров двигателя, а определяются только сигналом задания тока  $U_{zm}$ , который формируется системой управления (рисунок 3.10а). Значение выходной частоты преобразователя определяется напряжением задания  $U_{3y}$ .

Уравнение механической динамической характеристики асинхронного электромеханического преобразователя при питании от источника тока для случая малых отклонений от точек статического равновесия и  $R_1=0$  может быть получено аналогично случаю питания от источника напряжения, и это уравнение по форме совпадает с (3.25):

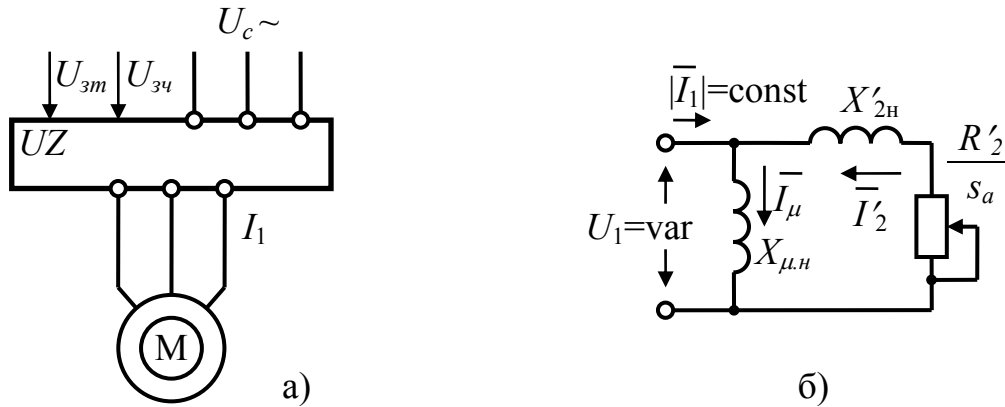


Рисунок 3.10

$$M = \frac{2 \cdot M_{\kappa 1}}{(1 + T_{\text{эл}} p) \cdot \left[ \frac{s_{\kappa 1}}{s_a} \cdot (1 + T_{\text{эл}} p) \right] + \frac{s_a}{s_{\kappa 1}}}, \quad (3.29)$$

где  $s_{\kappa 1} = \frac{R'_2}{X_{\mu, n} + X'_{2n}}$  - критическое скольжение при питании от источника тока;

$M_{\kappa 1} = \frac{3I_1^2 X_{\mu, n}^2}{2\omega_{0n} (X_{\mu, n} + X'_{2n})}$  - критический момент при питании от источника тока;

$T_{\text{эл}} = \frac{L_{\mu} + L'_2}{R'_2} = \frac{X_{\mu, n} + X'_{2n}}{\omega_{0\text{эл.н}} \cdot R'_2} = \frac{1}{\omega_{0\text{эл.н}} \cdot s_{\kappa 1}}$  - электромагнитная по-

стоянная времени двигателя при питании от источника тока;  
 $X_{\mu, n}$  - индуктивное сопротивление намагничивания при номинальной частоте  $f_{1n}$ .

Поскольку в режиме питания от источника тока ток статора всегда остаётся постоянным, уравнения электрического равновесия (3.24а) для этого режима принимают следующий вид:

$$|\bar{I}_1| = const; \quad 0 = \bar{I}'_2 \frac{R'_{2\Sigma}}{s_a} + j\bar{I}'_2 \cdot X'_{2н} + j\bar{I}_\mu \cdot X_{\mu.н}. \quad (3.30)$$

Схема замещения фазы двигателя для этого случая представлена на рисунке 3.10б. Из этой схемы замещения с помощью правила определения тока параллельной ветви по общему току получим выражения для тока ротора  $I'_2$  и намагничивающего тока  $I_\mu$ :

$$I'_2 = I_1 \cdot \frac{X_{\mu.н}}{X_{\mu.н} + \sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_a}\right)^2 + (X'_{2н})^2}}; \quad (3.31)$$

$$I_\mu = I_1 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_a}\right)^2 + X'_{2н}{}^2}}{X_{\mu.н} + \sqrt{\left(\frac{R'_2}{s_a}\right)^2 + (X'_{2н})^2}}. \quad (3.32)$$

Зависимости  $I'_2=f(s_a)$  и  $I_\mu=f(s_a)$ , представленные на рисунке 3.11а, показывают, что при увеличении скольжения ток  $I'_2$  монотонно возрастает, стремясь к предельному значению при  $s_a \rightarrow \infty$  и  $X'_{2н} \ll X_{\mu.н}$ :

$$I'_{2пред} = I_1 \frac{X_{\mu.н}}{X_{\mu.н} + X'_{2н}} \approx I_1. \quad (3.33)$$

Ток намагничивания, равный при  $s_a=0$  току  $I_1$ , при этом непрерывно уменьшается, стремясь при тех же условиях к значению:

$$I_{\mu.пред} = I_1 \frac{X'_{2н}}{X_{\mu.н} + X'_{2н}}. \quad (3.34)$$

В реальных машинах, так как  $X'_{2н} \ll X_{\mu.н}$ , ток  $I_{\mu.пред}$  весьма мал.

Таким образом, при питании от источника тока вследствие размагничивающего действия тока ротора (которое не компенсируется постоянным по величине током статора) ток намагничивания  $I_\mu$  и магнитный поток



$\Phi_\mu$  изменяются при изменении скольжения  $s_a$  в широких пределах. В этом заключается коренное отличие рассматриваемого режима работы асинхронного двигателя от режима питания его от источника напряжения.

Как видно из рисунка 3.11а в области малых скольжений (при  $s_a \ll s_n$ ) магнитная цепь насыщена, и это обстоятельство необходимо учитывать при анализе его статических характеристик.

На рисунке 3.11б представлена кривая намагничивания двигателя  $\Phi_\mu = f(I_\mu)$ , а также зависимость  $X_\mu = f(I_\mu)$ , соответствующая данной кривой намагничивания.

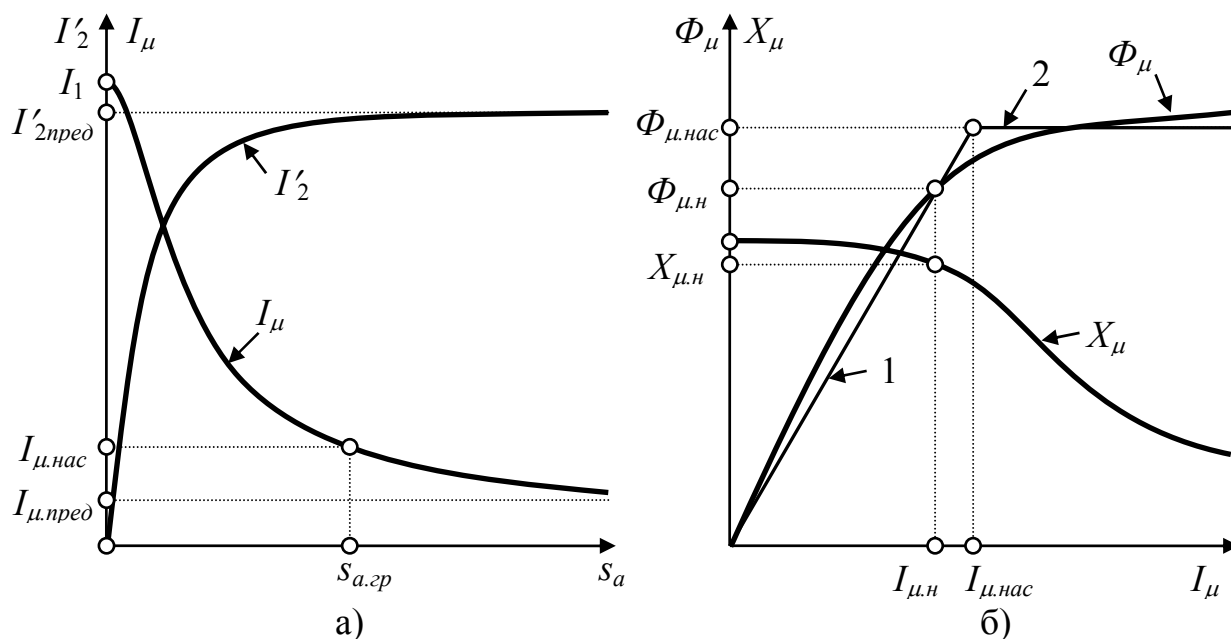


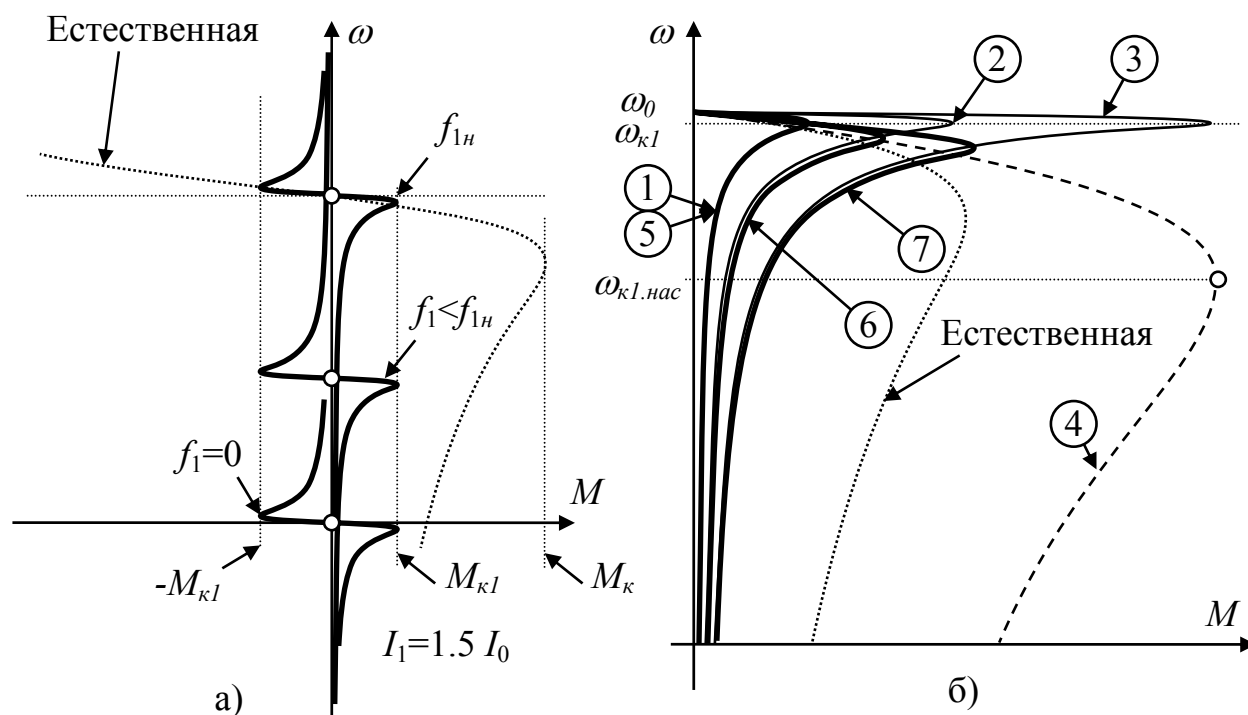
Рисунок 3.11

Для анализа формы статических характеристик с приближённым учётом насыщения характеристика  $\Phi_\mu = f(I_\mu)$  аппроксимирована двумя прямыми (1 и 2 на рисунке 3.11б). Так как  $I_\mu \leq I_1$ , то при  $I_1 \leq I_{\mu,нас}$  магнитная цепь двигателя при любых скольжениях не насыщается и  $X_\mu \cong X_{\mu,n} \cong \text{const}$ . В этой области значений  $I_1$  статические механические характеристики двигателя описываются уравнением, полученным из (3.29) при  $p=0$ :

$$M = \frac{2M_{\kappa 1}}{\frac{s_{\kappa 1}}{s_a} + \frac{s_a}{s_{\kappa 1}}}. \quad (3.35)$$

Семейство механических характеристик  $\omega = f(M)$ , построенных по выражению (3.35) при  $f_1 = \text{var}$  и  $I_1 \leq I_{\mu,нас}$ , представлено на рисунке 3.12а. При изменении частоты изменяется только скорость идеального холостого хо-

да, а форма характеристик неизменна. Особенностью этих характеристик является намного меньшее по сравнению с питанием от источника напряжения значение критического скольжения, так как  $(X_\mu + X'_2) \gg (X_1 + X'_2)$ . Однако, при  $I_1 \leq I_{\mu,нас}$  значение  $M_{к1}$  также мало (на рисунке 3.12а показаны характеристики при токе статора  $I_1 = 1.5 I_0$ ). Поэтому для получения необходимой перегрузочной способности в режиме питания от источника тока необходимо значительно увеличивать ток  $I_1$ . В этом случае при  $I_1 > I_{\mu,нас}$  и  $s_a = 0$  магнитная цепь машины находится в глубоком насыщении, и при малых скольжениях можно считать, что  $\Phi_\mu = \Phi_{\mu,нас} = const$ .



Двигатель МТМ412-6 ( $P_{2н} = 22$  кВт,  $I_{1н} = 48.5$  А,  $n_n = 960$  об/мин)

Рисунок 3.12

При увеличении скольжения намагничивающий ток  $I_\mu$  уменьшается, однако в соответствии с аппроксимацией кривой намагничивания до значения  $I_\mu = I_{\mu,нас}$  ( $s_a = s_{a,сп}$ ) двигатель находится в насыщении. Отсюда следует, что в области малых скольжений, когда магнитная цепь насыщена, реальная характеристика не может быть рассчитана по (3.35).

В области же больших скольжений ( $s_a > s_{a,сп}$ ) магнитная цепь не насыщена, и реальная характеристика сближается с рассчитываемой по (3.35).

При насыщении, когда  $\Phi_\mu = \Phi_{\mu,нас} = const$ ,  $X_\mu = 0$ ,  $X_1 = 0$ ,  $I'_2 = const$ , ЭДС  $E'_2$  будет величиной постоянной, не зависящей от  $f_1$  и  $s_a$ . С другой стороны, при  $f_1 = f_{1н}$  и  $s_a = 0$  ( $\omega = \omega_{0н}$ )  $E'_2$  по величине будет близка к напряжению  $U_{1н}$ . С

учётом вышесказанного для режима насыщения можно принять  $E'_2 = U_{1н} = \text{const}$  и считать, что асинхронный электромеханический преобразователь при питании от источника тока в режиме насыщения переходит в режим питания от источника напряжения. При этом  $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ .

Уравнение механической характеристики в области насыщения записывается так же как и (3.35) выражением:

$$M = \frac{2M_{\kappa 1.нас}}{\frac{s_{\kappa 1.нас}}{s_a} + \frac{s_a}{s_{\kappa 1.нас}}}, \quad (3.36)$$

где  $s_{\kappa 1.нас} = \frac{R'_2}{X'_{2.н}}$  - критическое скольжение в области насыщения,

$$M_{\kappa 1.нас} = \frac{3U_{1н}^2}{2\omega_{0н}X'_{2.н}} - \text{критический момент в области насыщения.}$$

ния.

Таким образом, насыщение смещает максимум момента в область больших скольжений, так как  $s_{\kappa 1.нас} > s_{\kappa 1}$ . Критический же момент здесь по величине больше, чем критический момент на естественной характеристике.

Всё вышесказанное позволяет представить реальную форму механических характеристик асинхронного двигателя в режиме питания от источника тока при различных значениях тока  $I_1$ . На рисунке 3.12б приведены механические характеристики 1, 2, 3, соответствующие токам  $I_{11} = I_{\mu.нас}$ ,  $I_{12} > I_{11}$ , и  $I_{13} > I_{12}$ . Эти характеристики построены по (3.35) без учёта насыщения. Механическая характеристика 4 построена по выражению (3.36) для насыщенного состояния магнитной цепи. Реальные механические характеристики 6, 7 при токах  $I_1 > I_{\mu.нас}$  в зоне насыщения приближаются к характеристике 4, а при выходе из насыщения приближаются к соответствующим кривым 2, 3.

При токе статора  $I_{11} = I_{\mu.нас}$  граничное скольжение  $s_{a.зр} = 0$  и с увеличением тока статора увеличивается. Поэтому при  $I_{11} = I_{\mu.нас}$  магнитная цепь не насыщается при любых скольжениях, и характеристика 5 сливается с характеристикой 1. С увеличением  $I_1$  и возрастанием  $s_{a.зр}$  увеличивается зона совпадения реальных характеристик с характеристикой 4 и сокращается зона, где насыщение не учитывается. Это приводит к постепенному увеличению критического скольжения и критического момента.

Анализ динамических свойств асинхронного электромеханического преобразователя при питании от источника тока проведём также, как и при

питании от источника напряжения, для рабочего участка механической характеристики  $[-s_k \leq s_a \leq s_k]$ . Поскольку выражения динамических механических характеристик при малых отклонениях от точки статического равновесия и  $R_1=0$  для того и другого случая идентичны (уравнения (3.25) и (3.29)), то результатом линеаризации будет аналогичное (3.27) приближенное уравнение динамической механической характеристики:

$$(1 + T_{\vartheta 1} p) \cdot M = \beta_1 \cdot (\omega_0 - \omega), \quad (3.37)$$

где  $\beta_1 = \frac{2M_{\kappa 1}}{\omega_{0H} s_{\kappa 1}}$  - модуль жёсткости линеаризованной механической характеристики при питании от источника тока.

Структурная схема электромеханического преобразователя при питании от источника тока совпадает с приведённой на рисунке 3.9б схемой при питании от источника напряжения. Передаточная функция динамической жёсткости также совпадает по форме с (3.28):

$$\beta_{дин}(p) = - \frac{\beta_1}{1 + T_{\vartheta 1} p}. \quad (3.38)$$

Однако динамические свойства асинхронного электромеханического преобразователя в режиме питания от источника тока существенно отличаются из-за изменения магнитного потока машины в широких пределах, что приводит к замедлению переходных процессов.

Электромагнитные постоянные времени при питании от источника напряжения и источника тока определяются выражениями:

$$T_{\vartheta} = \frac{1}{\omega_{0эл.н} \cdot s_{\kappa}} = \frac{X_{1н} + X'_{2н}}{\omega_{0эл.н} \cdot R'_2} \quad \text{и} \quad T_{\vartheta 1} = \frac{1}{\omega_{0эл.н} \cdot s_{\kappa 1}} = \frac{X_{\mu н} + X'_{2н}}{\omega_{0эл.н} \cdot R'_2}.$$

Из их сравнения видно, что  $T_{\vartheta 1} \gg T_{\vartheta}$ , так как  $X_{\mu} \gg X_1$ . С ростом тока статора, когда магнитная система начинает насыщаться, сопротивление намагничивания  $X_{\mu}$  уменьшается, уменьшая электромагнитную постоянную  $T_{\vartheta 1}$ , которая при больших насыщениях приближается к  $T_{\vartheta}$ .

При питании асинхронного двигателя от частотно-регулируемого источника тока для регулирования скорости можно изменять только частоту, не изменяя величины тока статора  $I_1$ . Основные параметры механических характеристик при этом соответствуют вышеприведенным выражениям. Но для обеспечения определённых показателей качества протекания переходных процессов ток статора изменяют в функции частоты, по тем

или иным законам частотного управления. Более того, чтобы избежать чрезмерного насыщения магнитной цепи двигателя, необходимо регулировать ток статора в соответствии с нагрузкой на валу двигателя.

### 3.4 Динамическое торможение асинхронного двигателя с независимым возбуждением

Для осуществления динамического торможения с независимым возбуждением обмотка статора двигателя отключается от сети переменного тока и подключается к источнику постоянного тока. Один из вариантов схемы динамического торможения с независимым возбуждением показан на рисунке 3.13а.

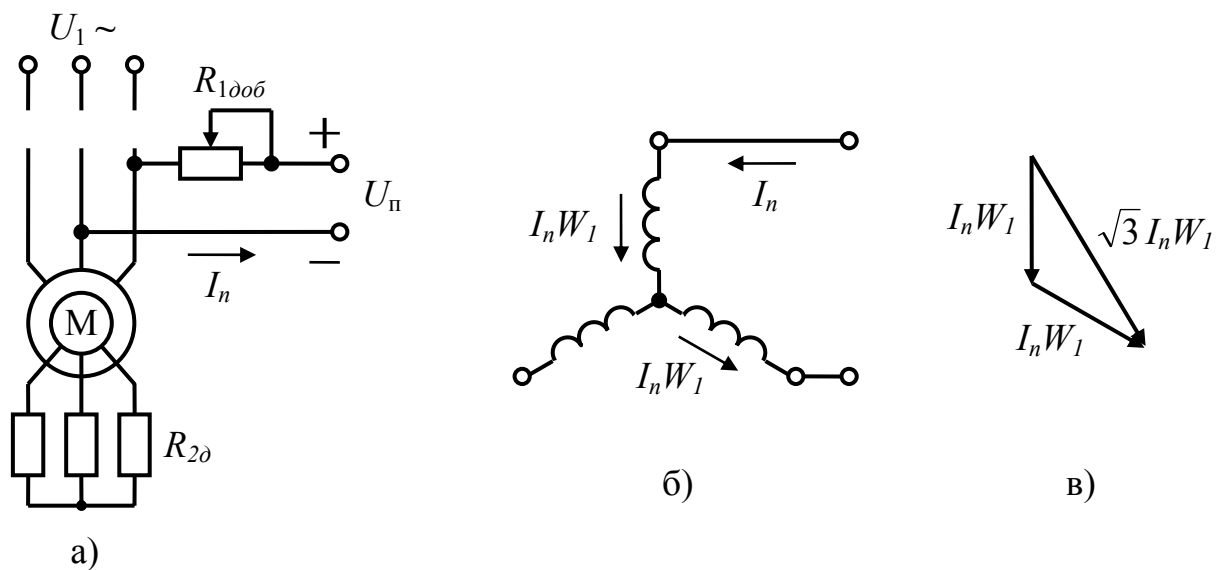


Рисунок 3.13

Так как постоянный ток  $I_n$  не зависит от тока ротора в статике, а при достаточно большом  $R_{1дооб}$  и в динамике, режим динамического торможения является частным случаем питания асинхронного двигателя от источника тока ( $f_1=0$ ,  $\omega_0=0$ ). В связи с наличием различных схем включения обмоток статора на постоянное напряжение необходимо установить связь между постоянным током в схеме динамического торможения  $I_n$  и трёхфазным током  $I_1$ , для которого проводился анализ статических характеристик асинхронного двигателя при питании от источника тока. Условием эквивалентности является равенство МДС, создаваемых постоянным током  $I_n$  при данной схеме соединения обмоток и переменным трёхфазным током  $I_1$ .

В качестве примера на рисунке 3.13б приведена одна из схем подачи постоянного тока в обмотку статора, а на рисунке 3.13в – векторное суммирование МДС фаз обмоток. Эквивалентный ток определяется из ра-

венства постоянной МДС и амплитуды результирующей МДС, создаваемой трёхфазным током  $I_1=I_{\text{экв}}$ :

$$\sqrt{3} \cdot I_n \cdot W_1 = \left(\frac{3}{2}\right) \sqrt{2} \cdot I_{\text{экв}} \cdot W_1 \Rightarrow I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_n; \quad (3.39)$$

Аналогично можно определить  $I_{\text{экв}}$  для других схем включения. Данные о схемах включения и коэффициентах пересчёта приведены в [3, 4].

Подставляя в полученные в предыдущем параграфе соотношения  $I_1=I_{\text{экв}}$ ,  $\omega_0=0$ ,  $s_a = -\frac{\omega}{\omega_{0н}}$ , можно определить все интересующие параметры механических характеристик и построить их по выражению (3.35) при условии, что магнитная система двигателя будет ненасыщенной (эквивалентный ток  $I_{\text{экв}}$  не будет превышать тока холостого хода  $I_0$ ). Значения критических момента и скольжения в режиме динамического торможения при отсутствии насыщения определяются выражениями:

$$M_{к1} = \frac{3I_{\text{экв}}^2 \cdot X_{\mu}^2}{2\omega_{0н}(X_{\mu} + X'_2)}; \quad s_{к1} = \frac{R'_2 + R'_{2\text{доб}}}{X_{\mu} + X'_2}. \quad (3.40)$$

При таких значениях тока  $I_{\text{экв}}$  величина критического момента  $M_{к1}$  будет значительно меньше момента  $M_{к0}=\lambda M_n$ . Для увеличения тормозного момента необходимо увеличить ток  $I_{\text{экв}}$  (постоянный ток  $I_n$ ). Тогда при больших значениях эквивалентного тока в области малых скольжений магнитная система будет насыщенной, и при построении механических характеристик это необходимо учитывать. Методика построения механических характеристик асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением с учетом насыщения подробно изложена в [1, 3, 7, 9, 10].

Механические характеристики в режиме динамического торможения приведены на рисунке 3.14. Интенсивность торможения можно регулировать, изменяя  $I_n$  ( $I_{\text{экв}}$ ) и  $R_{2\text{доб}}$ .

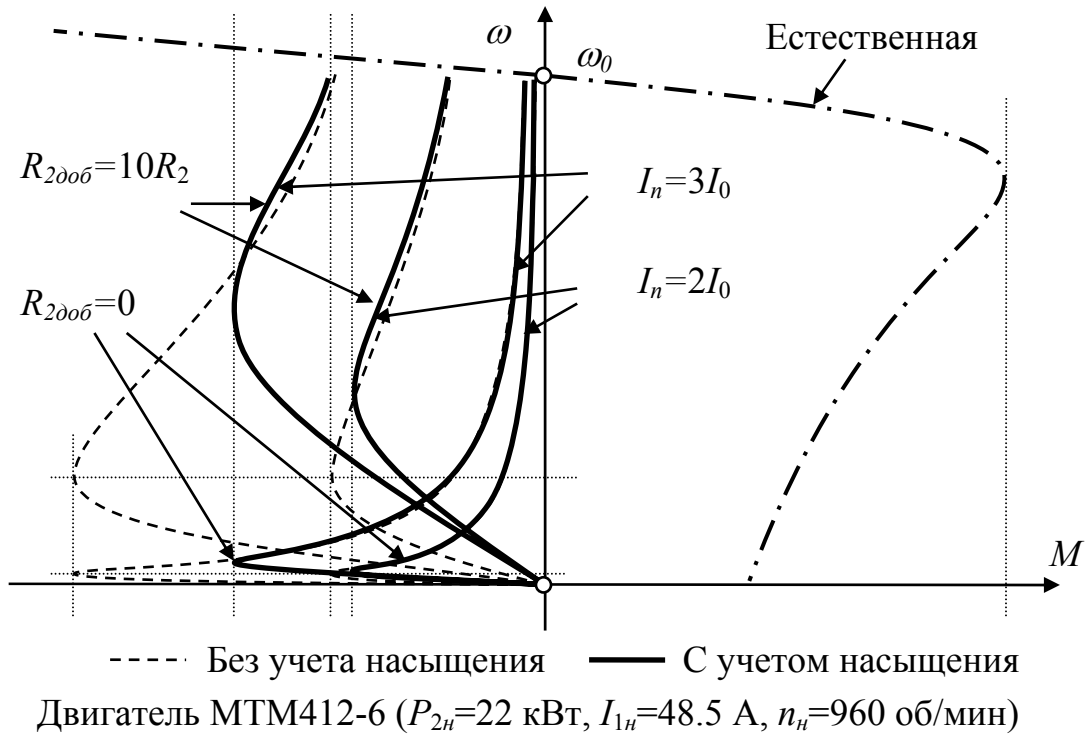


Рисунок 3.14

### 3.5 Статические свойства синхронного двигателя

Схема включения синхронного двигателя показана на рисунке 3.15а. Угловая скорость синхронного двигателя при работе в установившемся режиме с возрастанием нагрузки на валу до определенной величины, не превышающей максимального значения  $M_{max}$ , остается строго постоянной и равной синхронной скорости:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}. \quad (3.41)$$

Поэтому его механическая характеристика имеет вид прямой линии, параллельной оси абсцисс (рисунок 3.15б), с модулем жесткости, равным бесконечности (**абсолютно жесткая** характеристика).

Однако, мгновенные значения скорости ротора  $\omega$  синхронного двигателя в процессе работы могут отличаться от синхронной скорости  $\omega_0$ . Это может произойти, например, вследствие отставания ротора от поля статора в момент увеличения нагрузки на валу, так как при этом происходит увеличение угла  $\theta_{эл}$  между векторами напряжения сети и ЭДС статора, определяемой потоком возбуждения. В связи с этим, для анализа работы синхронного двигателя необходимо знать зависимость момента двигателя

$M$  от угла  $\theta_{эл}$ , называемую угловой характеристикой синхронного двигателя.

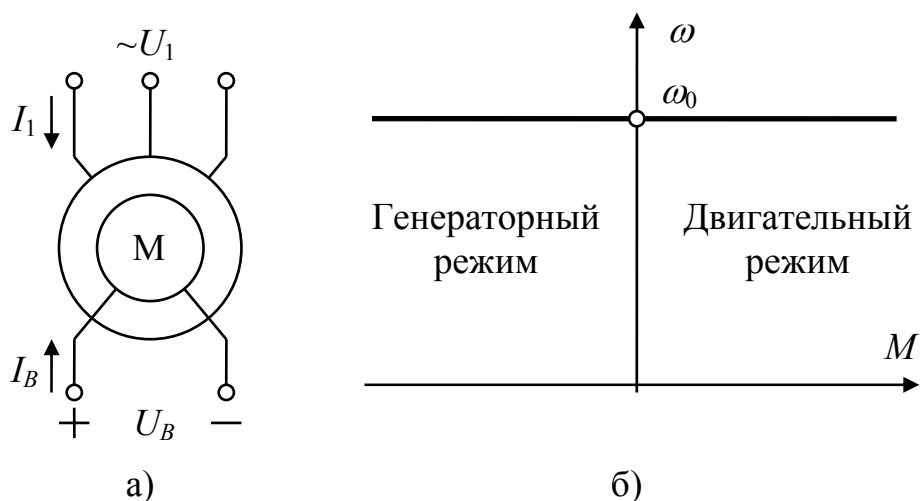


Рисунок 3.15

Как правило, синхронные двигатели выполняются явнополюсными (ротор двигателя с явновыраженными полюсами), и поэтому магнитное сопротивление ротора зависит от его положения. Следовательно, потокосцепление статора  $\Psi_1$ , индуктивное сопротивление рассеяния  $X_1$  и ток статора  $I_1$ , могут быть разложены на две составляющие по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям. В соответствии с этим на рисунке 3.16а представлена модель синхронного двигателя в осях  $d$  и  $q$ , а на рисунке 3.16б – его векторная диаграмма.

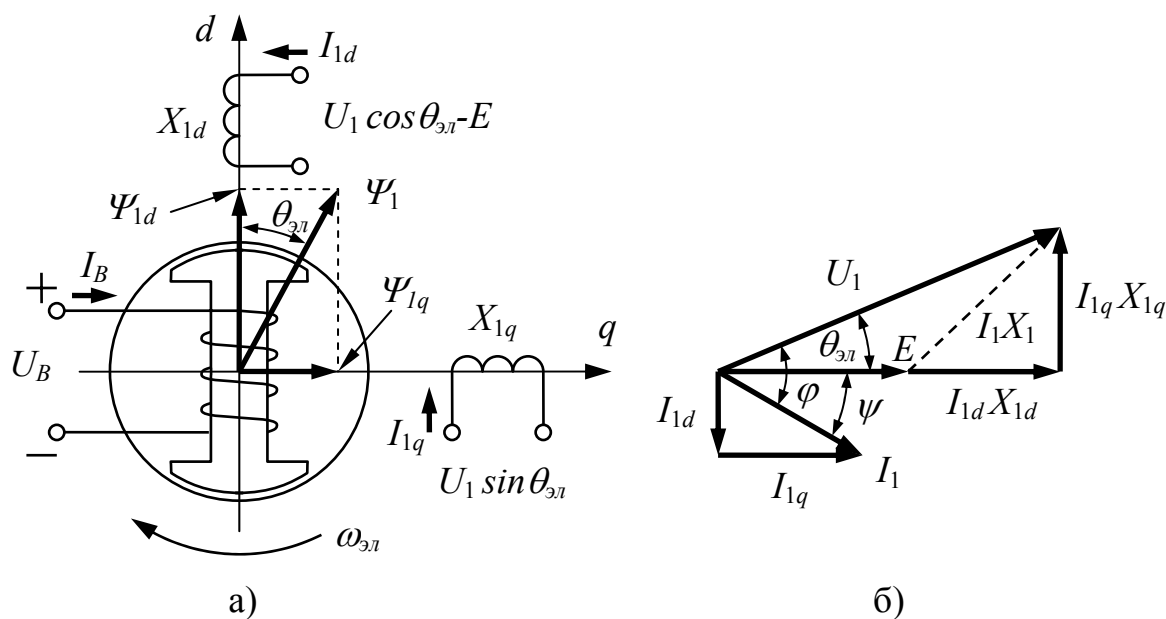


Рисунок 3.16



Здесь:

$U_1$  - фазное напряжение сети;

$E$  - ЭДС, индуцированная в обмотках статора вращающимся полем ротора;

$\theta_{эл}$  – электрический угол отставания оси магнитного поля ротора от оси магнитного поля статора.

Из векторной диаграммы видно, что

$$I_{1d} \cdot X_{1d} = U_1 \cdot \cos \theta_{эл} - E; \quad I_{1q} \cdot X_{1q} = U_1 \cdot \sin \theta_{эл}. \quad (3.42)$$

При построении векторной диаграммы принято, что активное сопротивление статора  $R_1 \approx 0$ . В этом случае вся активная мощность, потребляемая из сети, передается ротору, то есть:

$$P_{эм} = P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\psi + \theta_{эл}) = M \cdot \omega_0. \quad (3.43)$$

Произведя тригонометрические преобразования и подставив значения  $I_{1d}$  и  $I_{1q}$  из (3.42), получим:

$$\begin{aligned} P_{эм} &= 3 \cdot U_1 \cdot [I_1 \cdot (\cos \psi \cdot \cos \theta_{эл} - \sin \psi \cdot \sin \theta_{эл})] = \\ &= 3 \cdot U_1 (I_{1q} \cdot \cos \theta_{эл} - I_{1d} \cdot \sin \theta_{эл}) = \\ &= 3 \cdot U_1 \cdot \left[ \frac{U_1 \cdot \sin \theta_{эл} \cdot \cos \theta_{эл}}{X_{1q}} - \frac{U_1 \cdot \cos \theta_{эл} \cdot \sin \theta_{эл}}{X_{1d}} + \frac{E \cdot \sin \theta_{эл}}{X_{1d}} \right] = \\ &= 3 \cdot \left[ \frac{U_1 \cdot E \cdot \sin \theta_{эл}}{X_{1d}} + \frac{U_1^2 \cdot \sin 2\theta_{эл}}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_{1q}} - \frac{1}{X_{1d}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.44)$$

Уравнение угловой характеристики  $M=f(\theta)$  с учетом (3.43) и (3.44) будет иметь следующий вид:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_0} = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E}{\omega_0 \cdot X_{1d}} \cdot \sin \theta_{эл} + \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0} \cdot \left( \frac{1}{X_{1q}} - \frac{1}{X_{1d}} \right) \cdot \sin 2\theta_{эл}. \quad (3.45)$$

Из уравнения (3.45) видно, что электромагнитный момент синхронного двигателя состоит из двух составляющих, первая из которых обусловлена взаимодействием вращающегося поля статора с магнитным полем ротора и является **синхронным моментом  $M_{син}$** , пропорциональным индуцированной ЭДС и  $\sin \theta$ , а вторая представляет собой **реактивный**

момент  $M_p$ , обусловленный явнополюсным исполнением ротора (разностью индуктивных сопротивлений  $X_{1d}$  и  $X_{1q}$ ):

$$M = M_{\text{син}} + M_p; \quad (3.46)$$

$$M_{\text{син}} = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E}{\omega_0 \cdot X_{1d}} \cdot \sin \theta_{\text{эл}} = M_{\text{син.макс}} \cdot \sin \theta_{\text{эл}}; \quad (3.47)$$

$$M_p = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0} \cdot \left( \frac{1}{X_{1q}} - \frac{1}{X_{1d}} \right) \cdot \sin 2\theta_{\text{эл}} = M_{p.\text{макс}} \cdot \sin 2\theta_{\text{эл}}, \quad (3.48)$$

где  $M_{\text{син.макс}} = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E}{\omega_0 \cdot X_{1d}}$  - максимальный синхронный момент;

$M_{p.\text{макс}} = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0} \cdot \left( \frac{1}{X_{1q}} - \frac{1}{X_{1d}} \right)$  - максимальный реактивный момент.

У синхронного двигателя с неявнополюсным ротором магнитное сопротивление одинаково при любом положении ротора (рисунок 3.17а), то есть:

$$X_{1d} = X_{1q} = X_1.$$

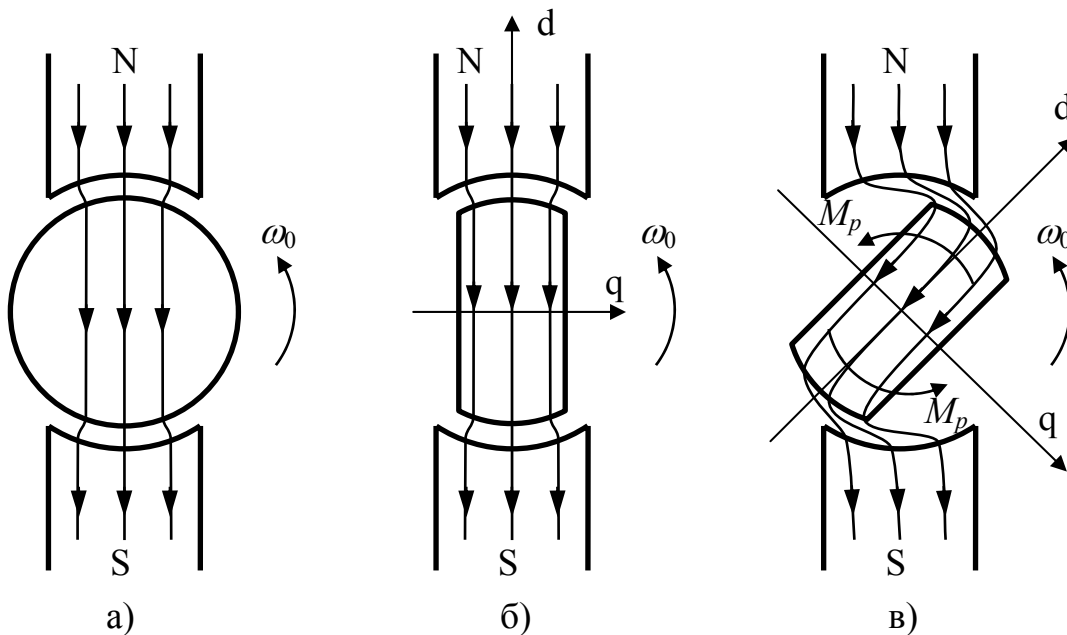


Рисунок 3.17

Поэтому реактивный момент такого двигателя равен нулю, и угловая характеристика описывается выражением:

$$M = M_{\text{син}} = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E}{\omega_0 \cdot X_1} \cdot \sin \theta_{\text{эл}} = M_{\text{син.макс}} \cdot \sin \theta_{\text{эл}}. \quad (3.49)$$

Синхронный двигатель с явнополюсным ротором может развивать реактивный момент и без возбуждения, то есть при отсутствии магнитного поля ротора. Это объясняется тем, что магнитное поле статора стремится удержать вращающийся ротор в таком положении, когда магнитное сопротивление потоку минимально.

Возникновение реактивного момента иллюстрируют рисунки 3.17б,в. На рисунке 3.17б показано положение ротора при его синхронном вращении без нагрузки ( $\theta_{\text{эл}}=0$ ). При приложении нагрузки на вал двигателя ось полюсов ротора начинает отставать от оси поля статора ( $\theta_{\text{эл}} \neq 0$ ). В двигателе в этом случае создается реактивный момент  $M_p$ , стремящийся сохранить минимальным магнитное сопротивление по продольной оси (рисунок 3.17в). Этот момент уравнивает статический момент на валу и имеет максимум при угле  $\theta_{\text{эл}}=\pi/4$ , что и определяет зависимость  $M_p=f(2 \cdot \theta_{\text{эл}})$ .

В промышленных установках малой мощности находят применение так называемые синхронно-реактивные двигатели. Конструкция их ротора такова, что индуктивные сопротивления по поперечной и продольной осям максимально отличаются друг от друга, что обеспечивает увеличение реактивного момента двигателя.

Угловая характеристика синхронного двигателя представлена на рисунке 3.18.

При идеальном холостом ходе ротор вращается с синхронной скоростью, причём ось его магнитного поля совпадает с осью вращающегося магнитного поля статора. Угол  $\theta_{\text{эл}}$  при этом равен нулю. При увеличении нагрузки угол  $\theta_{\text{эл}}$  увеличивается, что приводит к увеличению электромагнитного момента двигателя. Причем при малых  $\theta_{\text{эл}}$  угловая характеристика синхронного двигателя практически линейна. При  $\theta_{\text{эл}} > 45^\circ$  темп нарастания момента быстро снижается, и после достижения максимума  $M_{\text{макс}}$  дальнейшее увеличение нагрузки и угла  $\theta_{\text{эл}}$  влечёт за собой уменьшение момента двигателя. Это приводит к «выпадению» двигателя из синхронизма, что является аварийным режимом. У неявнополюсного синхронного двигателя максимум момента  $M_{\text{макс}}=M_{\text{син.макс}}$ , и момент «выпадения» из синхронизма наступает при  $\theta_{\text{эл}}=90^\circ$ .

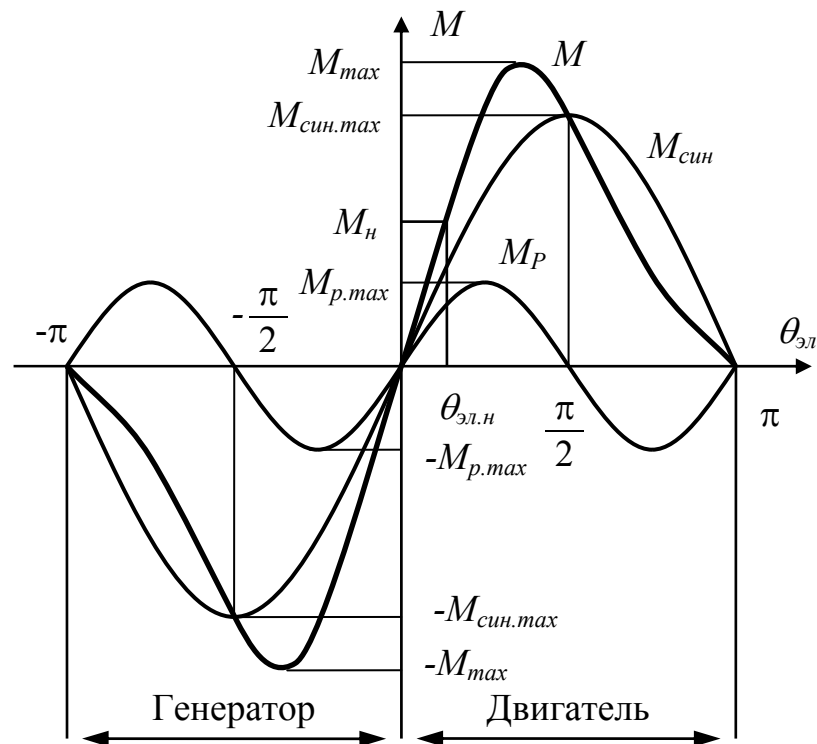


Рисунок 3.18

Номинальный режим работы обычно устанавливается при  $\theta_{эл}=(20-30)^\circ$ , что обеспечивает величину перегрузочной способности двигателя в пределах  $\lambda=M_{max}/M_n=2-3$ . Реактивный момент увеличивает крутизну и линейность рабочего участка угловой характеристики и несколько повышает перегрузочную способность двигателя.

Перегрузочная способность синхронного двигателя менее чувствительна к понижению напряжения сети по сравнению с асинхронным двигателем. Этот вывод можно сделать, анализируя выражение (3.45). Синхронный момент, который намного больше реактивного (пропорционального квадрату напряжения), пропорционален напряжению и ЭДС, определяемой током возбуждения.

### 3.6 Пусковые и тормозные режимы синхронного двигателя

Синхронный двигатель - единственный двигатель, не имеющий пускового момента. При включении обмоток статора в сеть трехфазного переменного тока практически мгновенно возникает вращающееся с синхронной скоростью магнитное поле. Из-за большой скорости вращения поля и своей инерционности ротор не успевает следовать за полем и остается неподвижным. Поэтому синхронные двигатели имеют на роторе, кроме обмотки возбуждения постоянного тока, пусковую обмотку типа бе-

личьей клетки. С помощью этой обмотки двигатель пускается в ход как асинхронный.

Синхронные двигатели выполняются с пусковыми клетками двух типов, что позволяет получать различные пусковые механические характеристики (кривые 1 и 2 на рисунке 3.19).

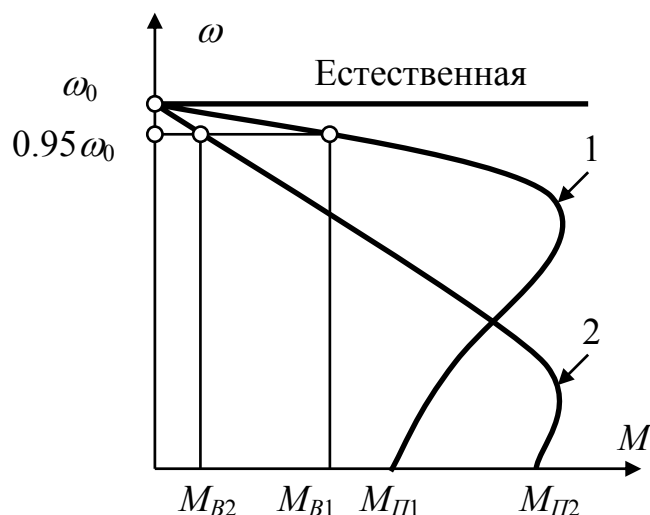


Рисунок 3.19

Характеристика 1 соответствует пуску с пониженным пусковым моментом  $M_{П1}$  и значительным входным моментом  $M_{В1}$ . Под входным моментом понимается момент на пусковой характеристике, развиваемый при скорости  $0.95 \cdot \omega_0$ , называемой **подсинхронной скоростью вращения**. При этой скорости возможно вхождение двигателя в синхронизм после подачи в обмотку возбуждения постоянного тока.

Характеристика 2 соответствует пуску с повышенным пусковым моментом  $M_{П2}$  и пониженным входным  $M_{В2}$ . В этом случае пусковая клетка выполняется с повышенным сопротивлением. Выбор того или иного варианта зависит от вида механической характеристики производственного механизма.

Следует иметь в виду, что пусковые клетки синхронных двигателей рассчитываются на кратковременный режим работы длительностью 20–30 сек. Более длительный пуск может вывести двигатель из строя.

Для ограничения перенапряжений на кольцах (выводах) обмотки возбуждения на период пуска она закорачивается на активное сопротивление, равное (8-10)-кратному значению сопротивления этой обмотки. Меньшая величина этого сопротивления увеличивает ток, наводимый в обмотке возбуждения при пуске, и вызванную этим током дополнитель-

ную составляющую момента, уменьшающую пусковой момент при скорости около  $0.5\omega_0$ .

Синхронный двигатель в принципе может работать во всех трёх тормозных режимах. В режиме рекуперативного торможения он вращается с синхронной скоростью, работая генератором и преобразуя механическую энергию с вала двигателя в электрическую, которая отдается в сеть. Механическая характеристика этого режима является продолжением характеристики двигательного режима в область второго квадранта, как это показано на рисунке 3.15б.

Тормозной режим противовключением осуществляется за счет короткозамкнутой пусковой обмотки и из-за больших бросков тока может быть использован только для маломощных синхронных двигателей.

Для остановки синхронных двигателей обычно применяется динамическое торможение, при котором обмотки статора отключаются от сети и замыкаются на дополнительные сопротивления. Обмотка возбуждения ротора при этом остаётся подключённой к источнику постоянного тока. Трёхфазная обмотка статора, замкнутого на добавочное сопротивление или накоротко, оказывается при этом во вращающемся магнитном поле ротора. Таким образом, режим динамического торможения синхронного двигателя полностью идентичен режиму динамического торможения асинхронного двигателя (при этом статор и ротор как бы меняются местами). Поэтому механические характеристики рассматриваемого двигателя в этом режиме аналогичны характеристикам асинхронного двигателя.

Достаточно часто остановка синхронных двигателей происходит только за счет сил трения и статической нагрузки при отключении обмотки статора от сети (самовыбег).

### 3.7 Динамические свойства синхронного двигателя

Пренебрегая электромагнитной постоянной времени двигателя, момент синхронной машины в динамических процессах можно представить суммой синхронного  $M_{\text{син}\Sigma}$  и асинхронного  $M_{\text{ас}}$  моментов:

$$M = M_{\text{син}\Sigma} + M_{\text{ас}}, \quad (3.50)$$

где  $M_{\text{син}\Sigma}$  - момент синхронного двигателя в статическом режиме, определяемый выражением (3.46) или (3.49);

$M_{\text{ас}}$  – асинхронный момент двигателя, обусловленный пусковой (демпферной) короткозамкнутой обмоткой.

Рабочий участок угловой характеристики  $M_{\text{син}\Sigma} = f(\theta_{\text{эл}})$  (рисунок 3.18) можно с достаточной точностью заменить линейной зависимостью, проходящей через точку номинального режима:

$$M_{\text{син}\Sigma} = \frac{M_n}{\theta_{\text{эл.н}}} \cdot \theta_{\text{эл}} = C_{\text{эм}} \cdot \theta, \quad (3.51)$$

где  $\theta = \frac{\theta_{\text{эл}}}{p_n}$  - пространственный угол между осью магнитного поля

ротора и осью магнитного поля статора;

$p_n$  - число пар полюсов машины;

$C_{\text{эм}}$  - электромагнитная жесткость угловой характеристики:

$$C_{\text{эм}} = \frac{p_n \cdot M_n}{\theta_{\text{эл.н}}} = \frac{M_n}{\theta_n}. \quad (3.52)$$

Продифференцировав (3.51), получим в операторной форме:

$$\frac{dM_{\text{син}\Sigma}}{dt} = C_{\text{эм}} \frac{d\theta}{dt} = C_{\text{эм}} \cdot (\omega_0 - \omega) \Rightarrow M_{\text{син}\Sigma} = \frac{C_{\text{эм}}}{p} (\omega_0 - \omega). \quad (3.53)$$

Выражение (3.53) аналогично выражению (1.34) для момента упругого взаимодействия в двухмассовой механической системе:

$$\frac{dM_{12}}{dt} = C_{12} (\omega_1 - \omega_2).$$

Сравнивая эти выражения, можно сделать вывод о том, что существует аналогия между электромагнитным взаимодействием в синхронном двигателе и механическим взаимодействием в механической пружине. Поэтому по главным динамическим свойствам синхронный двигатель подобен упругой механической системе, которая, как было доказано ранее (п. 1.5), имеет в своём составе консервативное колебательное звено.

Этим объясняется повышенная склонность синхронного двигателя к колебаниям. Для устранения или снижения колебаний служит пусковая (демпферная) короткозамкнутая обмотка, которая при возникновении колебаний скорости обеспечивает асинхронный момент  $M_{\text{ас}}$ , стремящийся устранить рассогласование скоростей вращения магнитного поля и ротора:

$$M_{\text{ас}} = \beta \cdot (\omega_0 - \omega). \quad (3.54)$$

где  $\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\omega_0 \cdot s_k}$  - жесткость пусковой механической характеристики;

ки;

$M_k, s_k$  - критические момент и скольжение пусковой механической характеристики.

С учётом (3.53) и (3.54) уравнение динамической механической характеристики (3.50) синхронного двигателя будет иметь вид:

$$M = \left( \frac{C_{эм}}{p} + \beta \right) \cdot (\omega_0 - \omega). \quad (3.55)$$

Структурная схема электромеханического преобразователя, соответствующая (3.55), представлена на рисунке 3.20а. Уравнение статической механической характеристики  $\omega = \omega_0$  получим, умножив правую и левую часть уравнения (3.55) на  $p$  и подставив  $p=0$ . Правда, это уравнение справедливо лишь в пределах перегрузочной способности двигателя  $M_{max} = \lambda \cdot M_n$ , определяемой угловой характеристикой (рисунок 3.18). При увеличении нагрузки сверх  $M_{max}$  двигатель выпадает из синхронизма. Статическая механическая характеристика приведена на рисунке 3.20б (прямая 1).

В динамических режимах в соответствии с (3.55) механическая характеристика не является абсолютно жесткой. Передаточная функция динамической жесткости, определённая по структурной схеме (рисунок 3.20а), имеет вид:

$$\beta_{дин}(p) = \frac{M(p)}{\omega(p)} = - \left( \frac{C_{эм}}{p} + \beta \right). \quad (3.56)$$

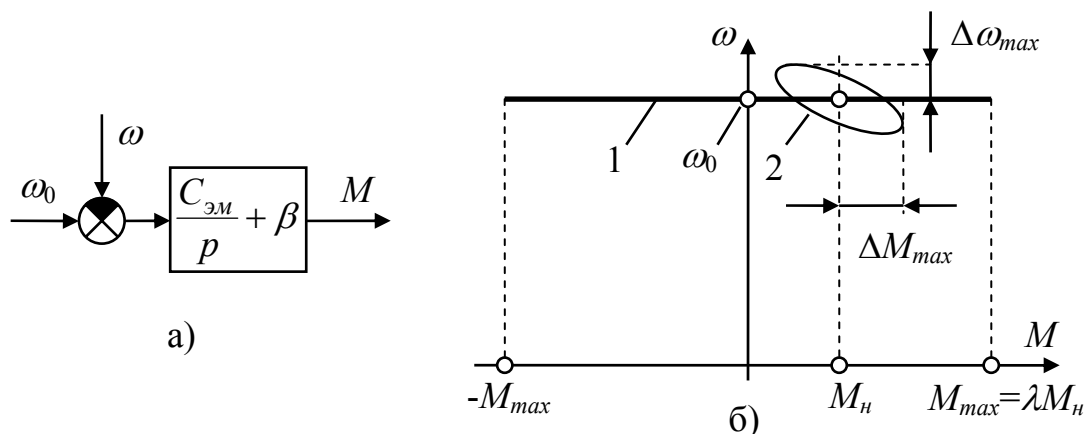


Рисунок 3.20



В установившемся динамическом режиме вынужденных колебаний изменениям момента  $\Delta M_{max}$  и соответствующим изменениям угла  $\theta$  соответствуют колебания скорости  $\Delta \omega_{max}$ , и динамическая механическая характеристика имеет вид эллипса (кривая 2 на рисунке 3.20б).

Всё вышесказанное свидетельствует о том, что динамические механические характеристики, соответствующие даже весьма медленным изменениям момента двигателя, могут значительно отличаться от статических.

### **3.8 Регулирование реактивной мощности синхронного двигателя**

Важным достоинством синхронного двигателя является возможность регулирования потребления реактивной мощности из сети. Пояснить это можно следующим образом. Если пренебречь падением напряжения в обмотке статора от протекания тока намагничивания, то ЭДС статора, возникающая в режиме идеального холостого хода, будет равна напряжению сети. Величина ЭДС статора определяется результирующим магнитным потоком, который складывается из магнитных потоков обмотки статора и обмотки возбуждения. Когда ток возбуждения равен нулю, весь поток создаётся только намагничивающим током статорной обмотки, и синхронный двигатель, также как и работающий без нагрузки асинхронный потребляет из сети реактивный ток, отстающий от напряжения на  $90^0$ .

Если теперь возбудить двигатель, то часть результирующего магнитного потока будет создана током возбуждения ротора, а магнитный поток, создаваемый намагничивающим током статора, уменьшится. Соответственно уменьшится намагничивающий ток и величина реактивной мощности, потребляемой из сети. Увеличение тока возбуждения может привести к тому, что весь результирующий магнитный поток, обеспечивающий равенство ЭДС статора и напряжения сети, будет создаваться током возбуждения ротора, а двигатель не будет потреблять из сети реактивной мощности. Если продолжить увеличение тока возбуждения, магнитный поток обмотки возбуждения станет по величине больше, чем требуется для поддержания равенства ЭДС и напряжения сети. В этом случае ток обмотки статора должен создавать магнитный поток, уменьшающий результирующий поток. Таким образом, при перевозбуждении синхронный двигатель потребляет из сети размагничивающий ток, опережающий по фазе напряжение сети на  $90^0$ , то есть работает генератором реактивной энергии.

Влияние возбуждения двигателя на условия преобразования энергии в синхронном электромеханическом преобразователе можно проанализировать с помощью векторных диаграмм, составленных при постоянных

нагрузке на валу и напряжении сети и разных токах возбуждения (рисунок 3.21).

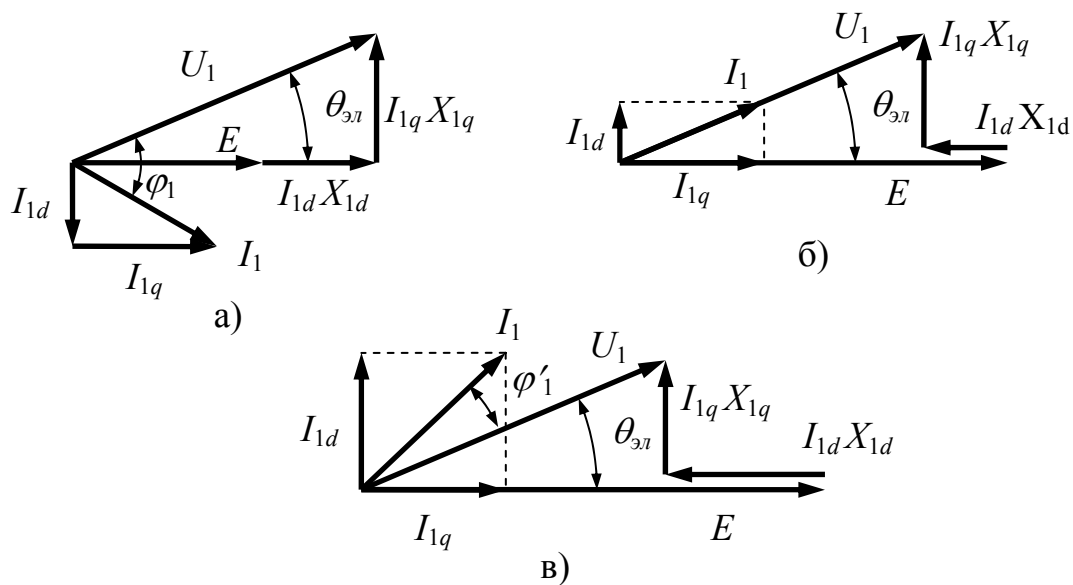


Рисунок 3.21

Выражение (3.42) свидетельствуют о том, что величина и знак тока  $I_{1d}$  при вышепринятых условиях целиком определяются величиной ЭДС  $E$ , которая пропорциональна току возбуждения, а ток  $I_{1q}$  не зависит от тока возбуждения машины.

В том случае, когда синхронный двигатель недовозбуждён (рисунок 3.21а), ЭДС  $E$  меньше  $U_1 \cdot \cos \theta_{эп}$ , и ток  $I_{1d}$  отстает от ЭДС  $E$  на угол  $\pi/2$ . Ток статора в этом случае отстает от напряжения на угол  $\varphi_1$ , и из сети потребляется реактивная мощность. Увеличивая ток возбуждения (ЭДС  $E$ ), можно изменить направление тока  $I_{1d}$  и подобрать такое его значение, при котором ток статора  $I_1$  будет совпадать по направлению с напряжением сети  $U_1$  (рисунок 3.21б). При этом из сети потребляется только активный ток, а двигатель работает с  $\cos \varphi_1 = 1$ . Если двигатель перевозбуждён (ток возбуждения и ЭДС  $E$  больше, чем в предыдущем случае), ток статора  $I_1$  опережает напряжение  $U_1$  на угол  $\varphi'_1$ , и избыток реактивной мощности отдается (генерируется) в сеть (рисунок 3.21в). Синхронный двигатель в этом случае работает с опережающим  $\cos \varphi'_1$  и может частично или полностью компенсировать индуктивную реактивную мощность сети, повышая её  $\cos \varphi$ .

Зависимость полного тока синхронного двигателя от тока возбуждения  $I_1 = f(I_\theta)$  иллюстрируется U-образными характеристиками, приведёнными на рисунке 3.22 для разных значений нагрузки ( $P_1 > P_2 > P_3$ ).

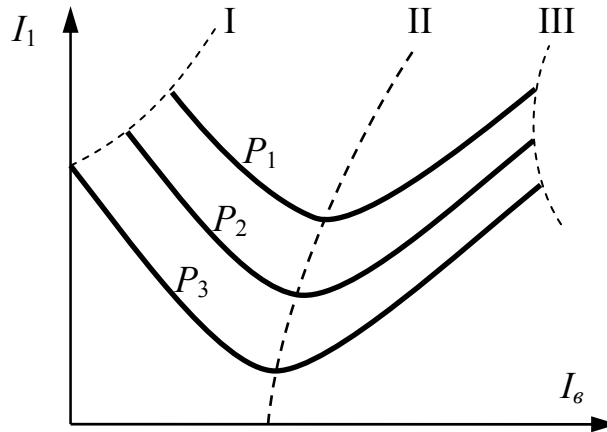


Рисунок 3.22

Кривая II является геометрическим местом минимумов U-образных характеристик и называется регулировочной характеристикой синхронного двигателя  $I_1=f(I_\sigma)$  при  $\cos\varphi_1=1$ . Слева от кривой II двигатель недовозбуждён, и кривая I является границей статической устойчивости двигателя, за которой происходит выпадение из синхронизма (электромагнитного синхронного момента недостаточно для удержания ротора в синхронном режиме). Справа от кривой II двигатель перевозбуждён, и кривая III является верхней границей возбуждения по условиям допустимого нагрева обмотки возбуждения и самораскачивания двигателя (электромагнитного асинхронного момента демпферной обмотки недостаточно для устранения автоколебаний ротора).

При постоянном моменте двигателя увеличение тока возбуждения приводит к уменьшению угла  $\theta$ . Реактивная составляющая тока при этом сначала уменьшается при регулировании тока возбуждения в диапазоне, ограниченном кривыми I и II (режим потребления двигателем реактивной энергии). При  $\cos\varphi_1=1$  двигатель потребляет минимальный ток при данном моменте. При дальнейшем увеличении тока возбуждения реактивная составляющая тока статора увеличивается (режим генерирования реактивной энергии), и полный ток статора увеличивается.

Кроме того, увеличение тока возбуждения и ЭДС статора  $E$ , как это следует из выражения (3.45) и (3.47), приводит к увеличению перегрузочной способности синхронного двигателя. Поэтому в автоматизированных электроприводах с синхронными двигателями для повышения устойчивости работы при набросах нагрузки применяется **форсирование возбуждения** (режим кратковременного увеличения тока возбуждения).

### 3.9 Шаговый режим работы синхронного электромеханического преобразователя

Если одну из обмоток фаз статора синхронного двигателя подключить к источнику постоянного напряжения, то возбуждённый ротор (или ротор в виде постоянного магнита) займёт фиксированное положение. В режиме идеального холостого хода это положение будет соответствовать совпадающим осям магнитных полей статора и ротора. При наличии нагрузки на валу двигателя магнитная ось ротора отклонится от магнитной оси статора. Появляется ошибка позиционирования, зависящая от электромагнитной жесткости угловой характеристики (3.52) и момента нагрузки.

Отключив рассматриваемую обмотку от источника постоянного тока и включив постоянный ток в следующую обмотку статора, мы получим поворот результирующего вектора магнитного поля на угол, равный «шагу»  $\Delta\varphi_{ш}$  двигателя, определяемому числом фаз и числом пар полюсов двигателя:

$$\Delta\varphi_{ш} = \frac{\pi}{m \cdot p_n}. \quad (3.57)$$

При этом возникает синхронизирующий момент, который будет стремиться вновь совместить оси магнитных полей статора и ротора. В результате ротор двигателя повернется на тот же угол  $\Delta\varphi_{ш}$  вслед за вектором результирующего магнитного поля.

Такую работу синхронного двигателя при числе фаз  $m=3$  и числе пар полюсов  $p_n=1$  иллюстрирует рисунок 3.23. На рисунке 3.23а показана схема расположения полюсов статора и ротора, а на рисунке 3.23б – диаграммы токов  $I_{1n}$  в обмотках полюсов статора и положения ротора, соответствующие каждому шагу двигателя.

Таким образом можно задавать дискретные перемещения ротора двигателя, соответствующие определённому числу шагов. Средняя скорость перемещения при этом будет зависеть от частоты переключения импульсов тока, подаваемых в статорные обмотки:

$$\omega_{ср} = \omega_{0ср} = \frac{\Delta\varphi_{ш}}{\Delta t_{ш}} = f_1 \cdot \Delta\varphi_{ш}. \quad (3.58)$$

где  $\Delta t_{ш}$  – длительность одного импульса тока.

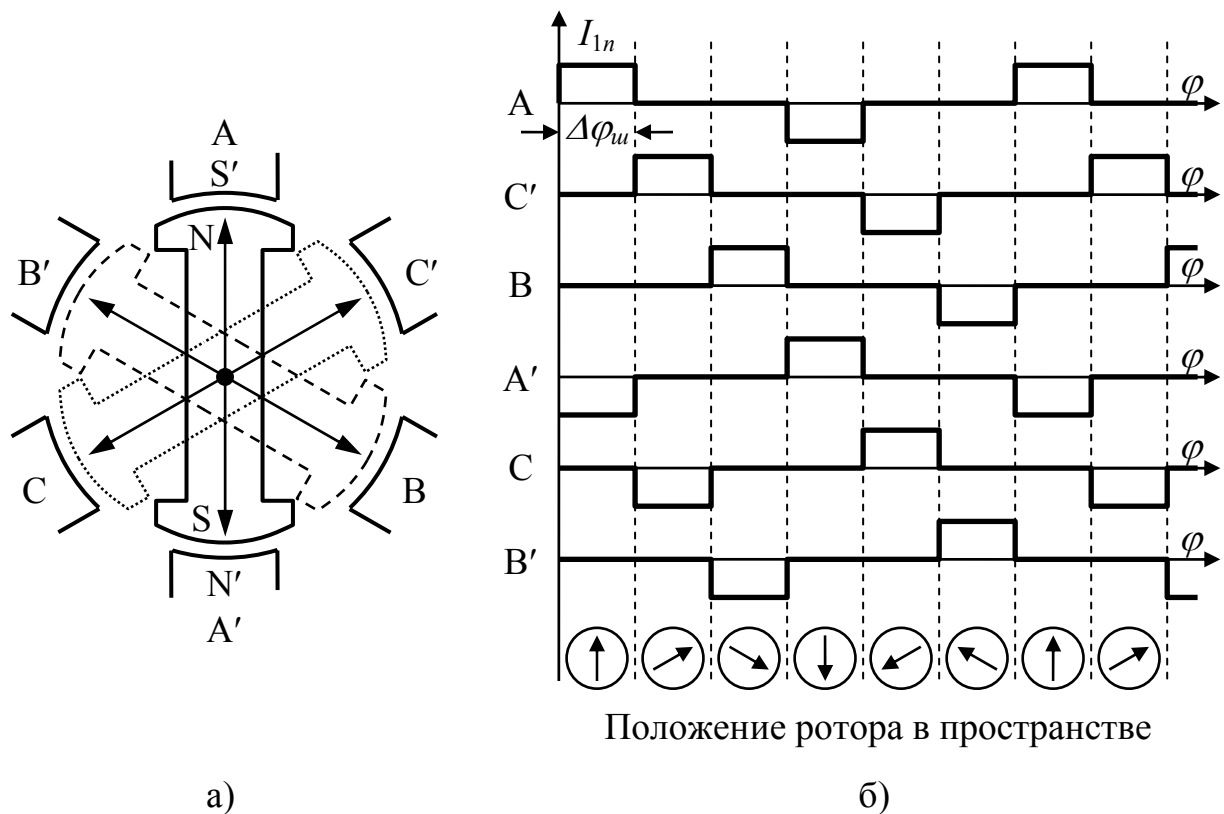


Рисунок 3.23

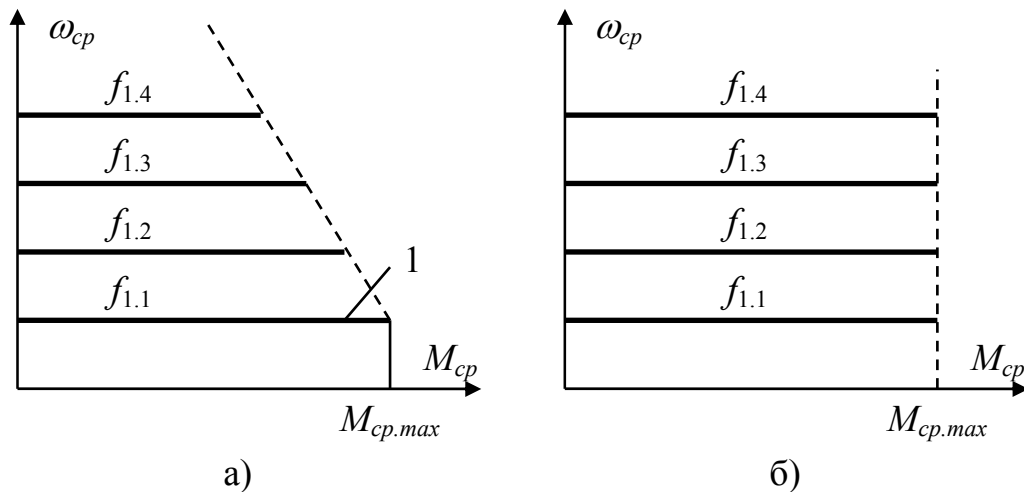


Рисунок 3.24

При  $f_1 = \text{const}$  скорость шагового двигателя  $\omega_{cp}$  также постоянна, и его статическая механическая характеристика подобна характеристике синхронного двигателя при питании от сети трёхфазного переменного тока (прямая 1 на рисунке 3.24а). Отличием является дискретный характер вращения поля статора, в результате чего скорость ротора пульсирует. Размах пульсаций обратно пропорционален частоте импульсов статора.

При питании синхронного двигателя от импульсного источника напряжения с повышением частоты импульсов увеличивается индуктивное сопротивление статорных обмоток, что влечёт за собой уменьшение величины тока  $I_{1П}$  и соответственное уменьшение магнитного потока статора и перегрузочной способности двигателя (рисунок 3.24а). При питании обмоток статора двигателя от импульсного источника тока ток статора по определению формируются по закону  $I_{1П} = \text{const}$ , и поэтому максимальный момент  $M_{ср.маx}$  двигателя остается постоянным (рисунок 3.24б).

Таким образом, в шаговом режиме синхронный двигатель способен обрабатывать перемещения, задаваемые числом электрических импульсов, коммутирующих ток статора в требуемой последовательности. Жесткая связь между числом электрических импульсов и числом шагов перемещения ротора широко используется в практике дискретного электропривода с цифровым управлением.

Для этих целей разработаны и выпускаются электротехнической промышленностью серии специальных синхронных двигателей, называемых шаговыми электродвигателями. Они имеют небольшую (до 4 кВт) мощность и исполняются с различным числом фаз ( $m=3,4,5\dots$ ) и числом пар полюсов ( $p_n > 2$ ). На практике используются более сложные, чем показанные на рисунке 3.23, законы дискретного управления токами фаз статора, которые позволяют получать ряд промежуточных положений вектора магнитного поля статора, то есть дробить шаг на более мелкие дискреты и таким образом увеличивать точность управления движением электропривода.

Конструктивно шаговые двигатели различаются по способу возбуждения (постоянный ток, постоянные магниты, синхронно-реактивные двигатели) и по характеру движения (вращательное, линейное, многокоординатное линейное).

### 3.10 Выводы по главе

1. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя имеет нелинейный характер с двумя экстремумами моментов – в двигательном и генераторном режимах. Рабочий участок характеристики расположен в диапазоне скольжений  $[-s_k \leq s \leq s_k]$  и имеет отрицательную жесткость  $\beta < 0$ . На границах участка (при критических скольжениях) жесткость уменьшается до нуля  $\beta = 0$ .

2. В области скольжений по модулю больших, чем критические значения ( $|s| > |s_k|$ ), характеристика нелинейная и имеет положительную жесткость  $\beta > 0$ . Режим работы двигателя на этом участке чаще всего неустойчивый и для двигателя с фазным ротором практически не используется. Для

асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором данный участок используется в основном в режимах пуска, торможения и реверса, или в замкнутом по скорости вращения электроприводе с регулятором трехфазного напряжения.

3. Искусственные характеристики асинхронных двигателей можно получить двумя принципиально различными способами: путем изменения скольжения в широких пределах, когда синхронная скорость двигателя остается постоянной, и путем изменения синхронной скорости двигателя. Наиболее эффективным является частотное управление двигателями по двум каналам одновременно: каналу регулирования частоты и каналу регулирования напряжения (тока). В этом случае можно добиться жестких механических характеристик, постоянства максимального момента и минимума потерь.

4. Особенностью асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является заметное проявление эффекта вытеснения тока на поверхность проводников беличьей клетки, приводящего к увеличению активного сопротивления ротора  $R'_2$  в области больших скольжений. Поэтому при построении механических характеристик таких двигателей применение формулы Клосса (даже уточненной) приводит к значительным погрешностям. С другой стороны, увеличение  $R'_2$  приводит к увеличению пускового момента, и поэтому данный эффект используется в двигателях с глубоким пазом ротора и двойной беличьей клеткой.

5. Область применения асинхронных двигателей достаточно широкая – от нерегулируемых приводов вентиляторов, насосов, конвейеров до электроприводов станков с большим диапазоном регулирования скорости. В настоящее время в связи с быстрым развитием полупроводниковой техники и созданием надежных преобразователей частоты двигатели с короткозамкнутым ротором вытесняют двигатели с фазным ротором, а также двигатели постоянного тока.

6. При питании асинхронного двигателя от источника напряжения его динамические свойства аналогичны динамическим свойствам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Но электромагнитная постоянная времени асинхронного двигателя меньше, что обеспечивает более высокое быстродействие электроприводов переменного тока.

7. При питании асинхронного двигателя от источника тока магнитный поток изменяется в широких пределах, что приводит к замедлению переходных процессов. При построении статических и динамических характеристик двигателя в этом случае необходимо учитывать насыщение магнитной цепи. Динамическое торможение является частным случаем питания от источника тока, когда частота тока статора равна нулю.

8. Синхронный двигатель имеет абсолютно жесткую статическую механическую характеристику.

9. Электромагнитный момент явнополюсного синхронного двигателя состоит из двух составляющих, первая из которых обусловлена взаимодействием вращающегося поля статора с магнитным полем ротора (синхронный момент), а вторая представляет собой реактивный момент, обусловленный явнополюсным исполнением ротора. Наличие реактивного момента увеличивает перегрузочную способность явнополюсного двигателя, а также позволяет создавать синхронно-реактивные двигатели без обмоток возбуждения и постоянных магнитов на роторе. Неявнополюсный синхронный двигатель реактивного момента не имеет.

10. Перегрузочная способность синхронного двигателя менее чувствительна к понижению напряжения сети по сравнению с асинхронным двигателем. Но при превышении моментом нагрузки максимального момента двигателя происходит «выпадение из синхронизма», что приводит к значительным броскам токов статора и ротора и переходу двигателя в аварийный режим.

11. Динамические характеристики синхронного двигателя подобны характеристикам упругой двухмассовой механической системы, следствием чего является склонность синхронного двигателя к автоколебаниям. Для демпфирования этих колебаний служит дополнительная короткозамкнутая обмотка ротора, которая обеспечивает асинхронный демпфирующий момент. Эта же обмотка используется для пуска двигателя до подсинхронной скорости при отсутствии питания обмотки возбуждения.

12. В динамических режимах механическая характеристика синхронного двигателя не является абсолютно жесткой, а имеет вид эллипса с центром, соответствующим точке статического режима.

13. В отличие от асинхронного двигателя синхронный может как потреблять реактивную энергию из сети, так и генерировать её. При увеличении тока возбуждения потребляемая из сети реактивная энергия может быть уменьшена до нуля, и при дальнейшем росте тока возбуждения (перевозбуждении) синхронный двигатель начнет генерировать реактивную энергию в сеть, повышая ее  $\cos\varphi$ . Кроме того, при увеличении тока возбуждения повышается перегрузочная способность двигателя.

14. Обычная область применения синхронных двигателей – высоковольтные установки большой мощности, не требующие регулирования скорости вращения, например насосные и компрессорные установки, а также синхронные компенсаторы.

15. Частным случаем синхронных двигателей являются шаговые двигатели небольшой мощности. Вращение двигателя осуществляется последовательным переключением обмоток статора, питающихся от импульсного источника напряжения или тока. Специальные алгоритмы



управления позволяют дробить шаг поворота ротора, увеличивая при этом точность позиционирования.

### **3.11 Литература, рекомендуемая для изучения**

1. **Ключев, В.И.** Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – с. 187-242.

2. **Чиликин, М.Г.** Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – с. 141-169.

3. **Чиликин, М.Г.** Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – с. 83-127.

4. **Андреев, В.П.** Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – 2-е изд., перераб. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1963. – с. 113-165.

5. **Голован, А.Т.** Основы электропривода / А.Т. Голован. – М.: Энергия, 1959. – с. 78-104, 114-117.

6. **Чиликин, М.Г.** Общий курс электропривода: учеб. для вузов / М.Г. Чиликин., А.С. Сандлер. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – с. 74-93.

7. **Вешеневский, С.Н.** Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – с. 181-337.

8. **Кувшинов, А.А.** Теория электропривода. Учебное пособие по курсовому проектированию / А.А. Кувшинов, В.М. Вакулюк, В.Б. Фатеев. – Оренбург, 2007. - с. 27-65.

9. **Кувшинов, А.А.** Теория электропривода. Методические указания к расчетно-графической работе / А.А. Кувшинов, С.Р. Подлесная. – Оренбург, 2007. – с. 31-48.

## **4 Расчет мощности и выбор электродвигателей**

### **4.1 Общие положения**

В инженерной деятельности задача правильного определения требуемой мощности электропривода и выбора двигателей, обладающих достаточной мощностью и перегрузочной способностью, имеет исключительно важное практическое значение.

Выбор двигателя недостаточной мощности может привести к снижению производительности механизма, к нарушению его нормальной работы, к выходу из строя двигателя. Применение же двигателя повышенной мощности приводит к неоправданному удорожанию электропривода, снижению КПД, а в электроприводах переменного тока еще и к ухудшению коэффициента мощности. Поэтому от правильности выбора двигателей по мощности существенно зависит производительность, надежность и экономичность приводимых в движение механизмов.

Кроме определения необходимой мощности, нужно еще правильно выбрать двигатель по роду тока (постоянного или переменного), по степени его защиты (защищенный, закрытый, взрывоопасный), по способу охлаждения (самовентилируемый, с естественным охлаждением, с принудительной вентиляцией) и по климатическому исполнению (для умеренного, тропического, холодного климата и т.п.). Это можно сделать, зная назначение электропривода и условия, в которых ему придется работать.

Если иметь в виду наличие огромного числа механизмов, оснащенных электроприводами, то значение правильного расчета мощности электродвигателей и их выбора по исполнению очень велико.

### **4.2 Потери энергии в установившихся режимах работы электропривода**

Энергию, необходимую для совершения полезной работы рабочим органом механизма, электропривод получает из электрической сети или от автономного источника электрической энергии. Прохождение энергии от сети к рабочему органу сопровождается потерями энергии во всех элементах электропривода, как электрических, так и механических. Необходимость определения этих потерь и их анализа обусловлена тем, что только исчерпывающие сведения о потерях энергии могут служить основой поиска путей энергосбережения в электроприводах. Кроме того, потери энергии непосредственно в электродвигателях определяют их нагрев при эксплуатации, и, следовательно, их требуемую мощность.

Суммарная мощность потерь в электроприводе в общем случае равна:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{дв}\Sigma} + \Delta P_{\text{мех}\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех.дв}} + \sum_{j=1}^k \Delta P_{\text{мех.}j}, \quad (4.1)$$

где  $\Delta P_{\text{дв}\Sigma}$  - мощность потерь энергии в двигателе и его электрических цепях;

$\Delta P_{\text{мех}\Sigma}$  - мощность потерь в механизме;

$I_i, R_i$  - ток и сопротивление  $i$ -го элемента в силовой цепи двигателя;

$\Delta P_{\text{ст}}$  - потери в стали двигателя;

$\Delta P_{\text{мех.дв}}$  - механические потери в двигателе;

$\Delta P_{\text{мех.}j}$  - мощность потерь в  $j$ -м механическом элементе.

Проанализируем потери для трех показанных на рисунке 3.1 типов двигателей.

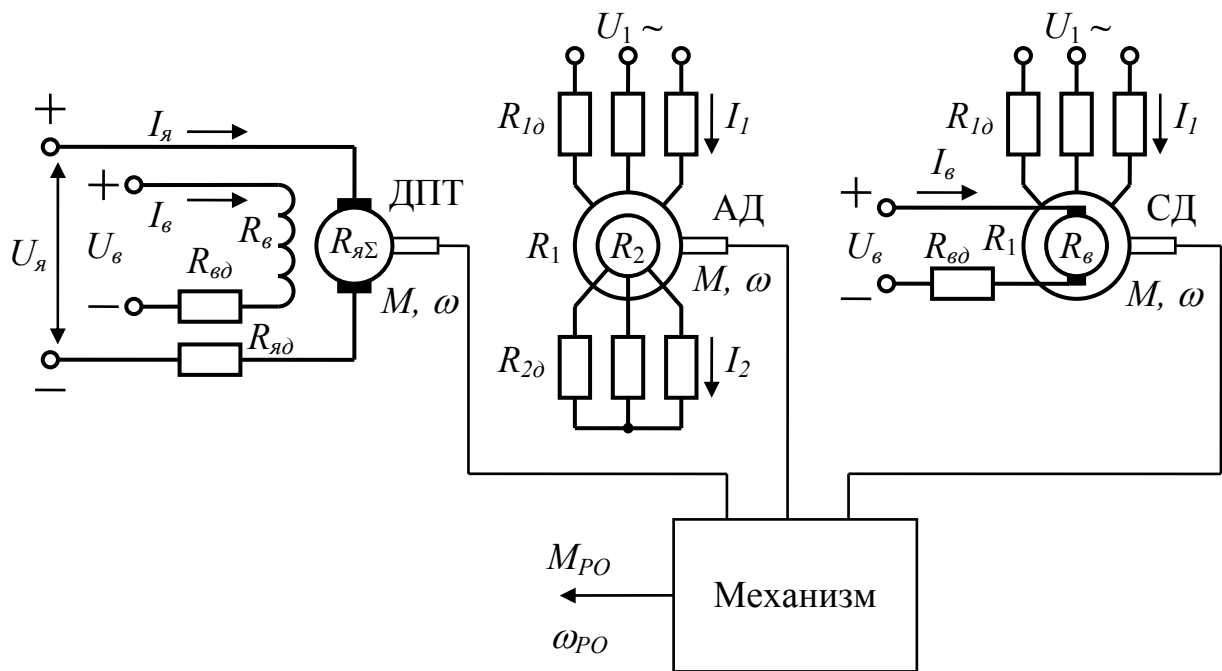


Рисунок 4.1

Потери в электрических машинах делятся на **постоянные**  $\Delta P_c$  и **переменные**  $\Delta P_v$ :

$$\Delta P_{\text{дв}\Sigma} = \Delta P_c + \Delta P_v. \quad (4.2)$$

**Переменные потери** двигателя обусловлены протеканием токов по сопротивлениям его силовой цепи и зависят от нагрузки двигателя. Остальные потери в принципе могут изменяться при работе двигателя, но они либо полностью не зависят от нагрузки, либо эта зависимость неявно выражена. Поэтому эти потери можно отнести к постоянным потерям.

Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением постоянные потери равны:

$$\Delta P_c = \Delta P_\delta + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех.дв}, \quad (4.3)$$

где  $\Delta P_\delta$  - мощность потерь от возбуждения:

$$\Delta P_\delta = I_\delta^2 (R_\delta + R_{\delta\delta}), \quad (4.4)$$

$R_\delta, R_{\delta\delta}$  – сопротивление обмотки возбуждения двигателя и добавочное сопротивление в цепи возбуждения.

В установившихся режимах работы, когда магнитный поток  $\Phi$  постоянен, потери в стали имеют место только во вращающемся якоре, частота перемагничивания которого пропорциональна угловой скорости двигателя. Таким образом, величина потерь в стали двигателя постоянного тока определяется выражением, известным из курса «Электрические машины»:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст.н} \left( \frac{\Phi}{\Phi_n} \right)^2 \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^{1,3}, \quad (4.5)$$

где  $\Delta P_{ст.н}, \Phi_n, \omega_n$  - номинальные значения потерь энергии в стали, магнитного потока и скорости двигателя;

$\Phi, \omega$  - реальные значения магнитного потока и скорости двигателя.

Момент механических потерь двигателя  $\Delta M_{мех.дв}$  содержит составляющие сухого трения в подшипниках и вентиляторного момента (рисунок 4.2). Если принять его постоянным, равным среднему значению  $\Delta M_{мех.дв.ср}$ , то величина механических потерь в двигателе будет равна:

$$\Delta P_{мех.дв} = \Delta P_{мех.дв.н} \frac{\omega}{\omega_n}. \quad (4.6)$$

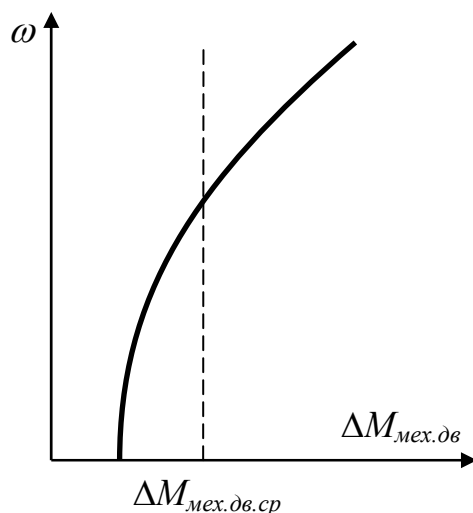


Рисунок 4.2

Переменные потери двигателя определяются потерями в якорной цепи:

$$\Delta P_v = I_{я}^2 \cdot (R_{я\Sigma} + R_{я\partial}). \quad (4.7)$$

Просуммировав (4.4)-(4.7) в соответствии с (4.2), получим полные потери в двигателе и его электрических цепях. При расчетах мощности двигателя учитываются только те потери, которые приводят к нагреву двигателя (**греющие потери**)  $\Delta P_{\text{дв.гр}}$ . Поэтому для определения этих потерь в выражениях (4.4) и (4.7) необходимо принять  $R_{\text{сд}}=R_{\text{я\partial}}=0$ .

Для двигателя со смешанным возбуждением в выражение (4.4) следует подставлять ток независимой обмотки возбуждения. Потери энергии в последовательной обмотке возбуждения этого двигателя и **двигателя с последовательным возбуждением** учтены в потерях в якорной цепи, так как  $R_{я\Sigma}$  включает в себя сопротивление последовательной обмотки возбуждения  $R_{\text{в}}$ . При расчетах потерь в стали этих двигателей необходимо учитывать, что их магнитный поток определяется током якоря  $\Phi(I_{я})$ .

Постоянные потери **асинхронного двигателя** включают в себя те же составляющие, что и для двигателя постоянного тока (4.3). Только потери энергии на возбуждение здесь происходят в той же обмотке статора, в которой происходят переменные потери, и называются они потерями холостого хода или потерями в контуре намагничивания:

$$\Delta P_{\text{хх}} = 3 \cdot I_{10.н}^2 \left( \frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu.н}} \right)^2 \cdot (R_1 + R_{1\partial}), \quad (4.8)$$

где  $I_{10.н}$  – номинальный ток холостого хода двигателя;  
 $\Phi_{\mu.н}$ ,  $\Phi_{\mu}$  – номинальный и реальный потоки намагничивания;  
 $\left(\frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu.н}}\right)^2$  – коэффициент пересчета тока холостого хода двигателя.

Частота перемагничивания стали статора равна частоте питающего напряжения  $f_1$ , а стали ротора – пропорциональна скольжению  $s$  и равна  $s \cdot f_1$ . Так как объемы стали статора и ротора примерно равны, можно принять, что при  $s=1$  номинальные потери в статоре и роторе одинаковы, т.е.  $\Delta P_{1ст.н} = \Delta P_{2ст.н}$ . Тогда потери в стали для асинхронного двигателя определяются выражением:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{1ст.н} \left(\frac{\Phi_{\mu}}{\Phi_{\mu.н}}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right)^{1,3} \cdot (1 + s^{1,3}), \quad (4.9)$$

где  $f_{1н} = 50$  Гц – номинальная частота питающей сети.

Так как потери от тока холостого хода уже условно учтены в постоянных потерях, можно принять  $I_1 = I_2$ , и тогда переменные потери определяются из выражения:

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= 3 \cdot I_1^2 \cdot (R_1 + R_{1\partial}) + 3 \cdot I_2^2 \cdot (R_2' + R_{2\partial}') = \\ &= 3 \cdot I_2^2 (R_2' + R_{2\partial}') \cdot \left(1 + \frac{R_1 + R_{1\partial}}{R_2' + R_{2\partial}'}\right) = M \cdot \omega_0 \cdot s \cdot \left(1 + \frac{R_1 + R_{1\partial}}{R_2' + R_{2\partial}'}\right). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Полные потери  $\Delta P_{Ад}$  в двигателе получим суммированием (4.6), (4.8)-(4.10). Для определения греющих потерь  $\Delta P_{Ад.гр}$  необходимо в выражениях (4.8)-(4.10) принять  $R_{1\partial} = R_{2\partial}' = 0$ .

Для **синхронного двигателя** постоянные потери определяются выражениями (4.3)-(4.6) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, а переменные потери – выражением (4.10) в части, касающейся обмотки статора:

$$\Delta P_v = 3I_1^2 (R_1 + R_{1\partial}). \quad (4.11)$$

Греющие потери  $\Delta P_{СД.гр}$  получим, как и для других двигателей, приняв  $R_{\partial\partial} = R_{1\partial} = 0$ .

**Следует иметь в виду, что на практике расчеты потерь энергии даже в таком упрощенном виде выполнять очень трудно в связи с отсутствием всех данных и характеристик.**

Полные потери мощности в двигателе и его цепях позволяют рассчитать КПД двигателя:

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_B}{P_1} = \frac{M\omega}{M\omega + \Delta P_{\text{дв}\Sigma}}, \quad (4.12)$$

где  $P_B$  – мощность на валу двигателя.

Если принять, что электромагнитный момент пропорционален току силовой цепи, добавочные сопротивления отсутствуют, а  $\omega = \omega_n$ , то зависимость КПД от коэффициента загрузки двигателя  $x = M/M_n$  можно представить следующим образом:

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_n \cdot x}{P_n \cdot x + \Delta P_c + \Delta P_{v.n} \cdot x^2}. \quad (4.13)$$

Зависимость  $\eta_{\text{дв}} = f(x)$  нелинейная и имеет максимум при  $x_{\text{opt}} = \sqrt{\Delta P_c / \Delta P_{v.n}}$ . В этом случае максимальное значение КПД равно:

$$\eta_{\text{двmax}} = \frac{P_n}{P_n + 2 \cdot \sqrt{\Delta P_c \cdot \Delta P_{v.n}}}. \quad (4.14)$$

При  $\Delta P_c = \Delta P_{v.n}$  максимум КПД соответствует номинальной нагрузке двигателя. Но обычно постоянные потери меньше переменных и, следовательно,  $x_{\text{opt}} < 1$ , чем обеспечивается сохранение высокого КПД в достаточно широком диапазоне изменения нагрузки (рисунок 4.3а). Следует иметь в виду, что реальная нагрузка на двигатель практически всегда меньше, чем номинальная. В этом случае работа с более высоким по сравнению с номинальным КПД энергетически выгодна.

КПД механической части электропривода, включающей в себя механические передачи и сам механизм, также нелинейно зависит от коэффициента загрузки. Но в отличие от КПД двигателя, КПД механической части с увеличением  $x$  монотонно возрастает (рисунок 4.3б).

Общий КПД электропривода равен:

$$\eta_{\text{эп}} = \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{мех}}. \quad (4.15)$$

Таким образом, рассмотренные зависимости КПД от загрузки электропривода показывают, что **значительный запас по мощности при выборе двигателя и недоиспользование его в эксплуатации ухудшает энергетические показатели как самого двигателя, так и механизма.**

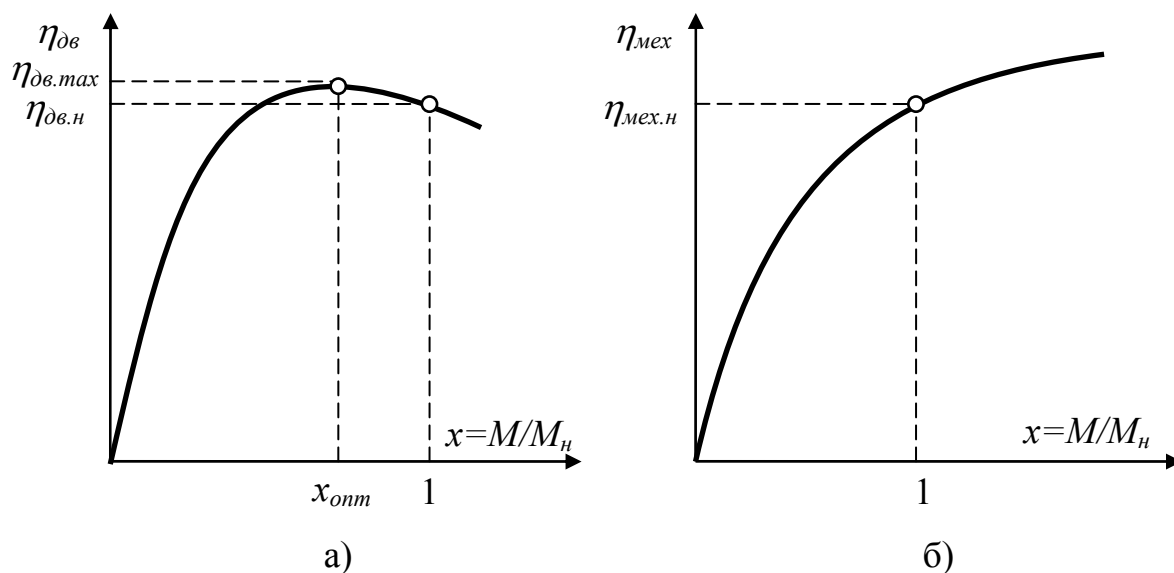


Рисунок 4.3

### 4.3 Потери энергии в переходных режимах работы электропривода

Технологические процессы многих производственных механизмов имеют циклический характер, когда в процессе работы происходит множество пусков, реверсов и торможений электропривода. В этих переходных процессах ток и момент двигателя увеличиваются до предельных значений, что вызывает значительный рост мощности переменных потерь и увеличение суммарных потерь энергии за цикл работы. Зачастую эти потери являются определяющими для нагрева двигателя. Для количественного учета влияния переходных процессов электропривода на нагрев двигателя необходимо рассчитать переходные процессы и получить зависимости  $M(t)$ ,  $i(t)$ ,  $\Phi(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $f_1(t)$  и т.д.

При наличии этих зависимостей расчет мощности потерь в двигателе и его цепях может быть произведен по формулам предыдущего параграфа. Далее определяется энергия потерь в двигателе и его цепях за время переходного процесса  $t_{nn}$ :

$$\Delta A_{\Sigma nn} = \int_0^{t_{nn}} \Delta P_{\partial \partial \Sigma}(t) dt . \quad (4.16)$$



Энергия греющих потерь равна:

$$\Delta A_{зр.пн} = \int_0^{t_{пн}} \Delta P_{\text{дв.зр}}(t) dt. \quad (4.17)$$

Так как по сравнению с переменными постоянные потери в переходных процессах малы, то их можно при расчете переходных процессов либо не учитывать, либо, считая их постоянными, добавлять энергию постоянных потерь за время переходного процесса к энергии переменных потерь.

**Энергия переменных потерь, выделившаяся за время переходного процесса в якорной цепи двигателя постоянного тока с независимым возбуждением или роторной цепи асинхронного двигателя, может быть определена более удобным путем.**

#### **4.3.1 Переменные потери энергии в электроприводах с нерегулируемой скоростью идеального холостого хода**

При питании двигателей постоянного тока и переменного тока от электрических сетей и автономных источников питания с постоянными частотой и величиной напряжения скорость идеального холостого хода двигателей  $\omega_0$  остается в переходных процессах постоянной.

Для **двигателя постоянного тока** мощность потерь в якорной цепи, выделяющаяся в переходном процессе (индуктивностью якоря пренебрегаем):

$$\Delta P_{яц} = I_{я}^2 \cdot R_{я\Sigma} = U_{я} \cdot I_{я} - E \cdot I_{я} = K\Phi \cdot I_{я} (\omega_0 - \omega) = M \cdot \omega_0 \cdot s, \quad (4.18)$$

где  $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  - относительный перепад скорости.

Для **асинхронного двигателя** мощность потерь в роторной цепи, выделяющаяся в переходном процессе в соответствии с (3.3):

$$\Delta P_2 = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'_{\Sigma} = M \cdot \omega_0 \cdot s, \quad (4.19)$$

где  $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  - скольжение двигателя.

Следовательно, энергия потерь для этих двигателей будет равна:

$$\Delta A_{яч.нн} = \Delta A_{2нн} = \Delta A_{эл.нн} = \int_0^{t_{нн}} M(t) \cdot \omega_0 \cdot s(t) \cdot dt. \quad (4.20)$$

При  $M_c=0$  имеем:

$$M(t) = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt};$$

$$\omega = \omega_0(1-s);$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{ds}{dt};$$

$$M(t) = -J_{\Sigma} \omega_0 \frac{ds}{dt}.$$

Пусть в начальный момент переходного процесса скольжение двигателя  $s_{(t=0)}=s_{нач}$ , а в конце переходного процесса  $s_{(t=t_{нн})}=s_{кон}$ . Тогда, подставив значение  $M(t)$  в (4.20), получим:

$$\begin{aligned} \Delta A_{эл.нн} &= \int_0^{t_{нн}} \left( -J_{\Sigma} \omega_0 \frac{ds}{dt} \right) \cdot \omega_0 \cdot s(t) \cdot dt = - \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2 \cdot s \cdot ds = - \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} s^2 \Big|_{s_{нач}}^{s_{кон}} = \\ &= - \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} (s_{кон}^2 - s_{нач}^2) = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} (s_{нач}^2 - s_{кон}^2). \end{aligned} \quad (4.21)$$

Таким образом, энергия, выделяющаяся в силовой цепи двигателя за время переходного процесса без нагрузки ( $M_c=0$ ), определяется относительным перепадом скорости (скольжения) и величиной кинетической энергии  $J_{\Sigma} \omega_0^2/2$ , которую в установившемся режиме ( $\omega=\omega_0$ ) имеют движущиеся массы электропривода.

**При пуске**  $s_{нач}=1$ ,  $s_{кон}=0$  величина потерь составит:

$$\Delta A_{эл.н} = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} = W_{к}.$$

**При торможении противовключением**  $s_{нач}=2$ ,  $s_{кон}=1$ :

$$\Delta A_{эл.тн} = 3 \cdot \Delta A_{эл.н} = 3 \cdot W_{к}.$$

**При реверсе**  $s_{нач}=2$ ,  $s_{кон}=0$ :

$$\Delta A_{эл.рев} = \Delta A_{эл.тп} + \Delta A_{эл.п} = 4 \cdot W_{к.}$$

При динамическом торможении  $s_{нач} = 1$ ,  $s_{кон} = 0$ ,

$$\Delta A_{эл.от} = \Delta A_{эл.п} = W_{к.}$$

Следует учесть, что в общем случае полученные значения потерь в переходных режимах являются суммарными  $\Delta A_{\Sigma пп}$ , и только часть из них идет на нагрев двигателя. Но если в электроприводе отсутствуют добавочные сопротивления (например, электропривод на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором), то все потери будут греющими.

#### 4.3.2 Потери энергии в электроприводах со ступенчатым регулированием скорости идеального холостого хода

В соответствии с (4.21) величина момента двигателя и характер его изменения не влияют на величину потерь энергии в переходных процессах  $\Delta A_{эл.пп}$  при  $M_c = 0$ . Однако, потери энергии можно уменьшить дроблением переходного процесса на участки, то есть введением промежуточных значений  $\omega_0$ .

Так для двухскоростного асинхронного двигателя на первом участке пуска до скорости  $0,5\omega_0$  ( $s_{нач} = 1$ ,  $s_{кон} = 0$ ):

$$\Delta A_{2П(1)} = \frac{J_{\Sigma} \cdot (0,5 \cdot \omega_0)^2}{2} = 0,25 \cdot W_{к.}$$

На втором участке пуска после переключения числа пар полюсов скорость идеального холостого хода становится равной  $\omega_0$ . При этом  $s_{нач} = 0,5$ ,  $s_{кон} = 0$  и

$$\Delta A_{2П(2)} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2}{2} (0,5^2 - 0) = 0,25 \cdot W_{к.}$$

Тогда общие потери при таком пуске равны:

$$\Delta A_{2П} = \Delta A_{2П(1)} + \Delta A_{2П(2)} = 0,5 \cdot W_{к.}$$

Таким образом, потери энергии при двухступенчатом пуске в два раза меньше, чем при прямом (одноступенчатом) пуске. Время пуска при этом определяется величиной момента двигателя  $M_1$  и при его постоянстве будет равно времени одноступенчатого пуска.

Аналогичным расчетом для четырехскоростного двигателя можно показать, что при пуске вхолостую и дроблении переходного процесса на 4 ступени потери энергии уменьшаются в 4 раза.

Пусть скорость идеального холостого хода при пуске увеличивается ступенчато от 0 до  $\omega_{0n}$  на шаг  $\Delta\omega_{0i}$ . Тогда потери на  $i$ -й ступени равны:

$$\Delta A_{эл.мн.i} = J_{\Sigma} \frac{\Delta\omega_{0i}^2}{2} .$$

При  $n$  – ступенчатом пуске суммарные потери определяются следующим выражением:

$$\Delta A_{эл.мн\Sigma} = \sum_{i=1}^n J_{\Sigma} \frac{\Delta\omega_{0i}^2}{2} = \frac{J_{\Sigma}}{2} \sum_{i=1}^n \Delta\omega_{0i}^2 .$$

Если изменения скоростей  $\Delta\omega_{0i}$  равны на всех ступенях, то  $\Delta\omega_{0i} = \omega_{0n}/n$  и потери энергии будут равны:

$$\Delta A_{эл.мн\Sigma} = \frac{J_{\Sigma}}{2} n \left( \frac{\omega_{0n}^2}{n^2} \right) = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0n}^2}{2n} = \frac{W_{к}}{n} ,$$

где  $\omega_{0n}$  – номинальная скорость холостого хода двигателя, соответствующая последней ступени.

Все вышесказанное в полной мере относится и к двигателям постоянного тока при пуске ступенчатым изменением напряжения на якоре двигателя (например, пуск многодвигательного электропривода переключением с последовательного соединения якорей на параллельное).

### 4.3.3 Потери энергии в электроприводах с плавным изменением скорости идеального холостого хода

Еще более эффективным путем снижения потерь энергии в переходных процессах является непрерывное изменение скорости идеального холостого хода электропривода, то есть регулирование напряжения на якоре двигателя постоянного тока или частоты тока статора асинхронного двигателя.

Рассмотрим пуск двигателя вхолостую под действием момента  $M=M_1=const$  до скорости  $\omega_{0n}$ , при которой момент двигателя  $M$  уменьшает-

ся до нуля. При этом формируется линейный закон изменения скорости идеального холостого хода  $\omega_0(t)$ :

$$\begin{cases} \omega_0(t) = \omega_{0нач} + \varepsilon_0 \cdot t & \text{при } t < t_{n1}; \\ \omega_0(t) = \omega_{0н} = const & \text{при } t \geq t_{n1}, \end{cases} \quad (4.22)$$

где  $\varepsilon_0 = \frac{M_1}{J_\Sigma}$  - угловое ускорение,

$t_{n1} = \frac{\omega_{0н}}{\varepsilon_0} = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_{0н}}{M_1}$  - время пуска.

Работа двигателя с постоянным моментом  $M=M_1$  обеспечивает при пуске постоянный перепад между скоростью идеального холостого хода  $\omega_0(t)$  и скоростью вращения двигателя  $\omega(t)$ , равный  $\omega_{0нач}$  (рисунок 4.4а).

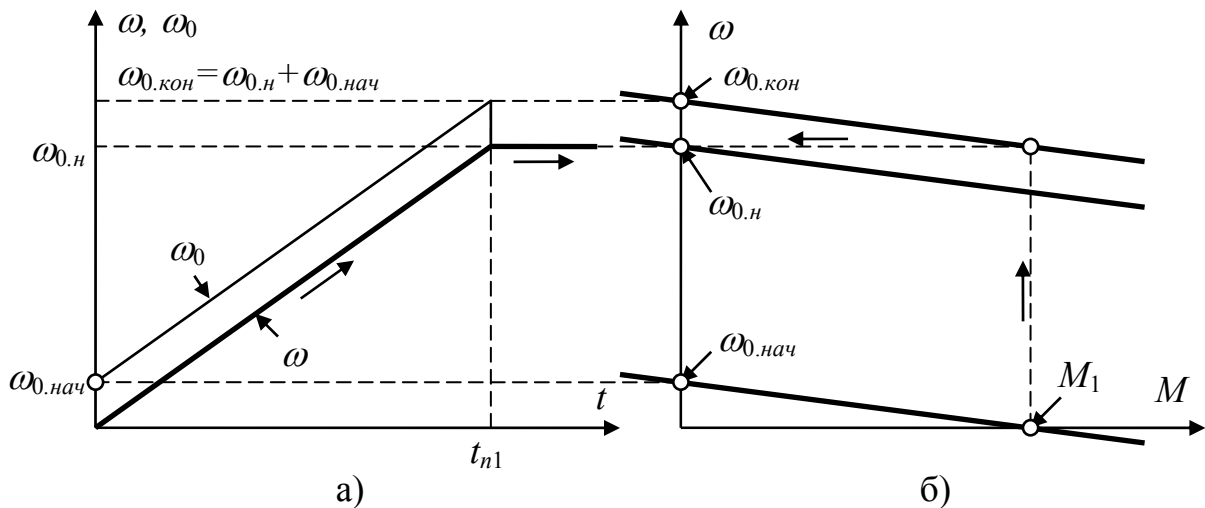


Рисунок 4.4

Скорость  $\omega_{0нач}$  определяется величиной момента  $M_1$  и модулем жесткости естественной характеристики  $\beta_e$  (рисунок 4.4б):

$$\omega_{0нач} = \frac{M_1}{\beta_e}.$$

В соответствии с выражениями (4.20) и (4.22) потери при таком пуске будут равны:

$$\begin{aligned} \Delta A_{яд.n} = \Delta A_{2n} &= \int_0^{t_{n1}} M_1 \cdot \omega_0(t) \cdot s(t) dt = \int_0^{t_{n1}} M_1 \cdot \omega_0(t) \cdot \frac{\omega_0(t) - \omega(t)}{\omega_0(t)} dt = \\ &= \int_0^{t_{n1}} M_1 \omega_{0нач} dt = M_1 \omega_{0нач} t_{n1} = M_1 \omega_{0нач} \frac{J_\Sigma \omega_{0н}}{M_1} = \frac{J_\Sigma \omega_{0н}^2}{2} \cdot \left( \frac{2\omega_{0нач}}{\omega_{0н}} \right). \end{aligned} \quad (4.23)$$

Снижение потерь энергии по сравнению с прямым пуском происходит в отношении  $\left( \frac{2\omega_{0нач}}{\omega_{0н}} \right)$ , которое в зависимости от мощности и типа двигателя равно  $0.1 \div 0.2$  (то есть в  $(5 \div 10)$  раз).

#### 4.3.4 Полные потери энергии в электроприводе с учетом статической нагрузки

Определение потерь энергии в переходных процессах с учетом нагрузки весьма затруднительно из-за громоздкости расчетных соотношений. Поэтому с достаточной для инженерных расчетов точностью можно допустить, что переходные процессы в двигателе под нагрузкой отличаются от переходных процессов вхолостую только длительностью протекания.

Тогда потери энергии при пуске и торможении под нагрузкой можно определить так:

$$\Delta A_n = \Delta A_{n0} \frac{t_n}{t_{n0}}; \quad \Delta A_m = \Delta A_{m0} \frac{t_m}{t_{m0}},$$

где  $t_{n0} = t_{m0} = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_0}{M_1}$  - время пуска и торможения вхолостую,

$$t_n = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_0}{M_1 - M_c} \text{ - время пуска при } M_c \neq 0;$$

$$t_m = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_0}{|-M_1 - M_c|} \text{ - время торможения при } M_c \neq 0.$$

Здесь скорость двигателя при работе под нагрузкой  $\omega_c$  принята равной  $\omega_0$ .

Полные потери энергии за время переходного процесса  $t_{mn}$  двигателя постоянного тока с независимым возбуждением включают в себя еще и постоянные и механические потери:

$$\Delta A_{nn\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2}{2} (s_{нач}^2 - s_{кон}^2) \cdot \frac{t_{nn}}{t_{nn0}} + (\Delta P_c + \Delta P_{мех}) \cdot t_{nn}, \quad (4.24)$$

где  $t_{nn0}$  – время переходного процесса вхолостую.

При определении полных потерь за время переходного процесса в асинхронном двигателе нужно учитывать, что потери в статорной цепи двигателя относятся к переменным потерям. Тогда с учетом (4.10) и (4.21):

$$\Delta A_{nn\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2}{2} \cdot (s_{нач}^2 - s_{кон}^2) \cdot \left(1 + \frac{R_{1\Sigma}}{R'_{2\Sigma}}\right) \frac{t_{nn}}{t_{nn0}} + (\Delta P_c + \Delta P_{мех}) \cdot t_{nn}. \quad (4.25)$$

Для определения греющих потерь двигателя необходимо из полных потерь вычесть потери во внешних сопротивлениях электрических цепей.

#### 4.4 Нагревание и охлаждение двигателей

Потери энергии в двигателе вызывают его нагрев. Допустимый нагрев двигателя определяется нагревостойкостью применяемых в двигателе изоляционных материалов. Чем больше их нагревостойкость, тем меньше размеры двигателя при равной мощности (или больше мощность при равных размерах). Габариты и мощность двигателя зависят также от способа его охлаждения.

Изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, в зависимости от допустимой температуры нагрева делятся на классы (А, Е, В, F, Н, С). Минимальная допустимая температура нагрева 105°С, максимальная - более 180°С.

Соблюдение температурного режима обеспечивает срок службы изоляции двигателей 15-20 лет. Превышение допустимых температур ведет к разрушению изоляции и к значительному сокращению срока ее службы.

Допустимые температуры нагрева изоляции нормируются при температуре окружающей среды 40°С и при высоте над уровнем моря до 1000 м. Естественно, что изменения параметров окружающей среды вызовут и изменения величины допустимой нагрузки двигателя. Поэтому для электрических двигателей нормируется не допустимая температура нагрева, а допустимое превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

При включении двигателя и протекании по нему тока начинается нагрев тех частей двигателя, в которых выделяются потери (обмотки, коллектор, магнитопровод). Увеличение их температуры благодаря явлению

теплопроводности вызывает передачу тепла другим частям двигателя – начинается процесс нагревания сложного неоднородного тела.

Как только температура двигателя превысит температуру окружающей среды, начинается процесс теплоотдачи, интенсивность которого увеличивается пропорционально разности температур двигателя и окружающей среды. Процесс нагревания заканчивается (двигатель достигает установившейся температуры), когда количество тепла, выделяющееся в двигателе, станет равным количеству тепла, отдаваемого в окружающую среду.

При выключении двигателя процесс тепловыделения прекращается, а теплоотдача в окружающую среду продолжается – идет процесс охлаждения. Этот процесс закончится при равенстве температуры двигателя и окружающей среды.

Исследовать тепловые процессы с учетом всех факторов, влияющих на них, весьма сложно и осуществимо только с помощью современной вычислительной техники. Поэтому в инженерной практике используется упрощенная **тепловая модель двигателя, которая основана на следующих допущениях:**

- 1) двигатель представляет собой однородное тело, обладающее бесконечно большой теплопроводностью;
- 2) теплоотдача пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды;
- 3) температура окружающей среды постоянна;
- 4) теплоемкость двигателя, мощность потерь и теплоотдача не зависят от температуры двигателя.

При этих допущениях уравнение теплового баланса двигателя имеет вид:

$$\Delta P_{\text{ов.зр}} dt = B \cdot \tau \cdot dt + C \cdot d\tau, \quad (4.26)$$

где  $B$  – коэффициент теплоотдачи;

$C$  – теплоемкость двигателя;

$\tau = t_{\text{ов}}^0 - t_{\text{ос}}^0$  – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

В этом уравнении левая часть – количество энергии, выделяющееся в двигателе за время  $dt$ ; первое слагаемое правой части – количество тепла, отдаваемое за то же время в окружающую среду; второе слагаемое правой части – часть тепла, поглощенная массой двигателя за то же время и вызвавшая увеличение температуры двигателя на  $d\tau$ .



Разделив (4.26) на  $Bdt$ , получим дифференциальное уравнение нагревания двигателя:

$$T_n \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{уст}, \quad (4.27)$$

где  $T_n = \frac{C}{B}$  - постоянная времени нагрева;

$\tau_{уст} = \frac{\Delta P_{\text{дв.зр}}}{B}$  - установившееся превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

Решение уравнения (4.27) имеет вид:

$$\tau = \tau_{уст} + (\tau_{нач} - \tau_{уст}) \cdot e^{-\frac{t}{T_n}}, \quad (4.28)$$

где  $\tau_{нач}$  - начальное значение превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды.

При  $\tau_{нач}=0$  (двигатель имеет температуру окружающей среды) уравнение (4.28) примет вид:

$$\tau = \tau_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right). \quad (4.29)$$

На рисунке 4.5а представлены зависимости  $\tau=f(t)$  и  $t^0=f(t)$  при нагревании двигателя для случая  $\tau_{нач}=0$ . Общее время переходного процесса нагревания составляет  $(3 \div 4)T_n$ . Значение  $T_n$  в зависимости от мощности двигателя лежит в пределах от десятков минут до нескольких часов.

При выключении двигателя в процессе его охлаждения превышение температуры изменяется по закону:

$$\tau = \tau_{уст} \cdot e^{-\frac{t}{T_{охл}}}, \quad (4.30)$$

Длительность процесса охлаждения  $[(3 \div 4)T_{охл}]$  определяется величиной постоянной времени охлаждения, которая зависит от способа вентиляции двигателя. При независимой вентиляции  $T_{охл}=T_n$ , и время охлаждения двигателя такое же, как и время нагревания. Для двигателей с самовентиляцией, у которых в выключенном состоянии вентилятор не вращается,  $T_{охл} > T_n$ , и время охлаждения существенно возрастает (рисунок 4.5б).

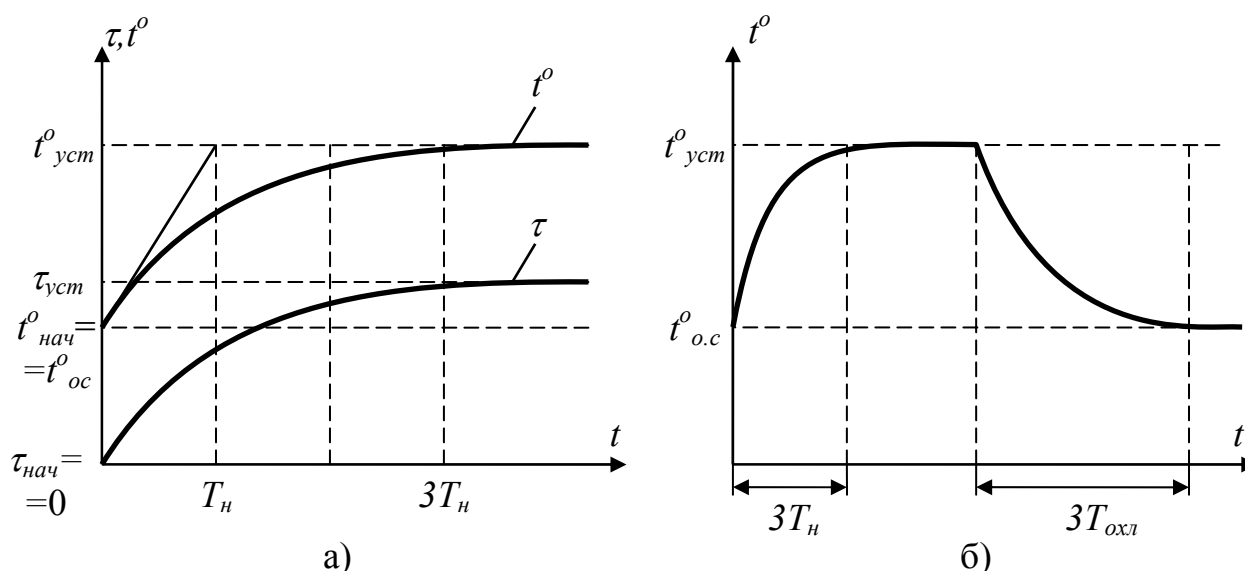


Рисунок 4.5

Рассмотренные тепловые процессы соответствуют случаю  $\Delta P_{\text{дв.зп}} = \text{const}$ , то есть продолжительной работе двигателя с постоянной нагрузкой на валу и постоянной скоростью. Но наряду с такими электроприводами существует широкий класс электроприводов, работающих с переменной нагрузкой с частыми пусками, торможениями и реверсами. В этом случае тепловыделение в двигателе изменяется во времени  $\Delta P_{\text{дв.зп}} = f(t)$ .

Определение этой зависимости производится на основе так называемой нагрузочной диаграммы электропривода.

#### 4.5 Нагрузочные диаграммы электроприводов

Потери энергии, выделяющиеся в двигателе при работе, определяются его нагрузкой, которая зависит как от статических моментов, так и от динамических, обусловленных изменениями скорости электропривода.

Различают два вида нагрузочных диаграмм. **Нагрузочной диаграммой исполнительного механизма** является зависимость момента статического (силы сопротивления) от времени  $M_c = f(t)$  ( $F_c = f(t)$ ), дополненная заданной тахограммой установившихся рабочих скоростей механизма  $\omega_3(t)$  ( $v_3(t)$ ). **Нагрузочная диаграмма двигателя**  $M = f(t)$  - это зависимость момента двигателя от времени, дополненная зависимостью текущей скорости двигателя от времени  $\omega(t)$ .

Расчет нагрузочной диаграммы двигателя может быть произведен с помощью основного уравнения движения:

$$M(t) = M_c(t) + J_{\Sigma} \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (4.31)$$

В начале проектирования, когда двигатель еще не выбран,  $J_{\Sigma}$  и  $\omega(t)$  не известны, и основой предварительного выбора двигателей и расчета их нагрузочных диаграмм являются нагрузочные диаграммы исполнительных механизмов  $M_c(t)$ , рассчитываемые по техническому заданию на проектирование.

Все многообразие производственных механизмов с точки зрения **режимов работы электроприводов** можно разделить на две группы: **механизмы непрерывного и механизмы циклического действия**. Для электроприводов этих механизмов характерны вполне определенные зависимости  $M_c(t)$  и  $\omega_s(t)$  и, соответственно, определенные типовые нагрузочные диаграммы двигателей  $M(t)$ .

#### 4.5.1 Нагрузочные диаграммы механизмов непрерывного действия

Различают два вида механизмов непрерывного действия: **механизмы непрерывного действия с постоянной нагрузкой  $M_c = \text{const}$**  и **механизмы непрерывного действия с переменной нагрузкой  $M_c = f(t)$** .

Примером механизма с постоянной нагрузкой является вентилятор, работающий обычно длительное время. Так как его нагрузка постоянна, а регулирование скорости обычно не предусматривается, нагрузочная диаграмма двигателя не отличается от нагрузочной диаграммы вентилятора:  $M = M_c = \text{const}$ ;  $\omega = \omega_c = \text{const}$  (рисунок 4.6а).

Примером механизма с переменной нагрузкой может служить эскалатор метрополитена (аэропорта, магазина и т.п.). В связи с изменениями во времени статической нагрузки скорость электропривода будет изменяться, и возникающие при этом динамические нагрузки будут оказывать влияние на нагрузочную диаграмму двигателя в соответствии с (4.31).

Для анализа степени влияния динамических нагрузок механизмов непрерывного действия на нагрузочные диаграммы двигателей рассмотрим работу электропривода механизма, имеющего нагрузочную диаграмму, показанную штриховой линией 1 на рисунках 4.6б,г. Цикл работы состоит из четырех участков  $t_1 \div t_4$  с соответствующими нагрузками  $M_{c1} \div M_{c4}$  и с заданной скоростью  $\omega_s = \omega_{c,cp} = \text{const}$ . Естественная механическая характеристика двигателя приведена на рисунке 4.6в. Вследствие конечной жесткости механической характеристики изменения нагрузки приводят к изменениям установившейся скорости электропривода, причем время этих переходных процессов определяется в случае  $T_s \approx 0$  величиной электромеханической постоянной времени  $T_m = J_{\Sigma} / \beta$ . Таким образом, основное влияние на характер нагрузочной диаграммы двигателя (сплошная линия 2 на ри-

сунках 4.6б,г) оказывает соотношение длительности участков нагрузочной диаграммы механизма  $t_i$  и электромеханической постоянной времени  $T_m$ .

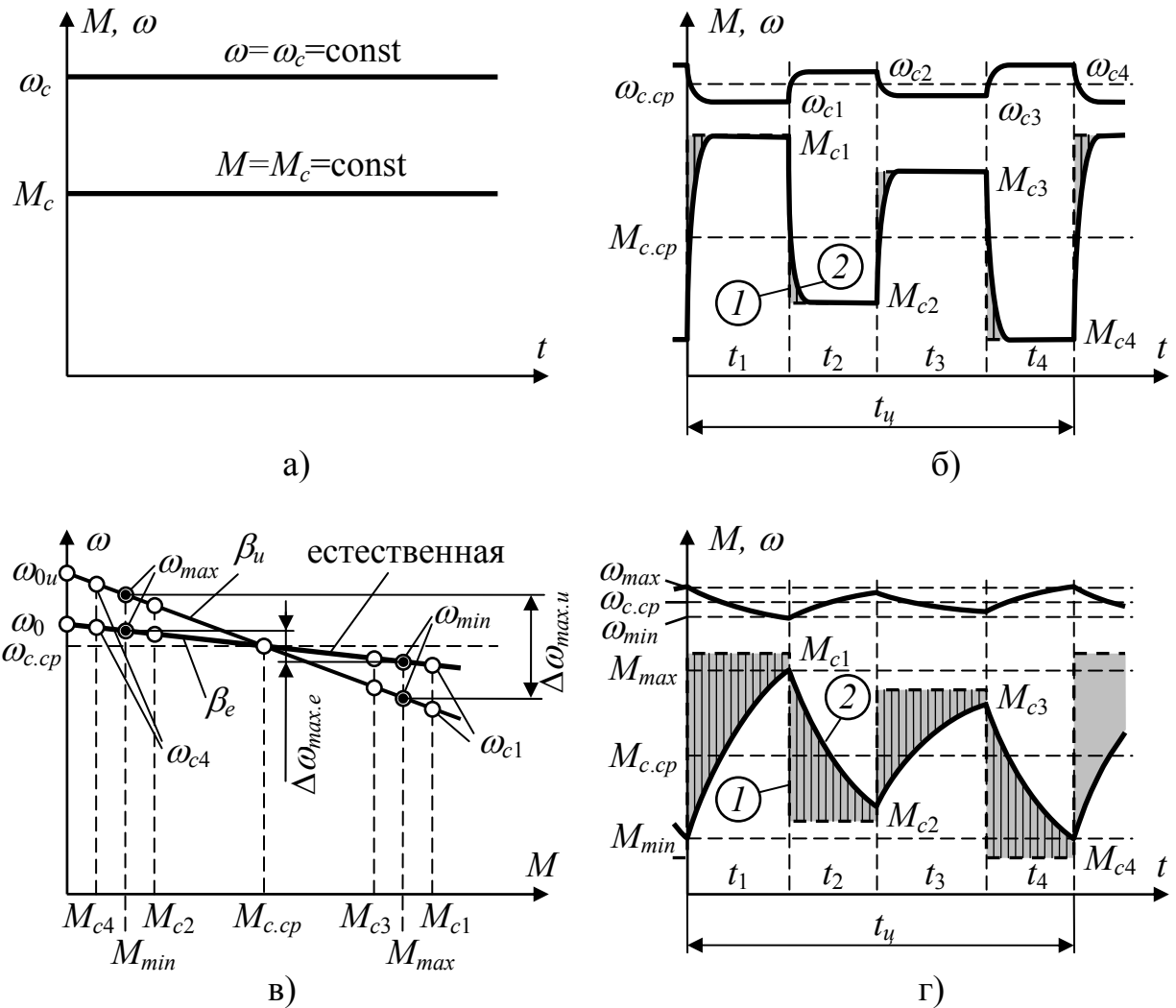


Рисунок 4.6

Случай, когда  $t_{i,min} > (3 \div 4)T_m$ , представлен на рисунке 4.6б. Его характерной особенностью является достижение установившейся скорости  $\omega_{c,i}$  на каждом участке в соответствии с механической характеристикой рисунка 4.6в. При этом динамические нагрузки, показанные на рисунке 4.6б вертикальной штриховкой, незначительно влияют на вид нагрузочной диаграммы двигателя и на его нагрев, совершенно не влияя на перегрузочную способность, так как  $M_{max} = M_{c,max}$ .

Качественно другой характер имеет нагрузочная диаграмма двигателя в случае, если  $t_{i,max} < (3 \div 4)T_m$ , то есть длительность переходных процессов изменения скорости больше длительности участка нагрузочной диаграммы механизма. Вследствие этого, на каждом участке момент на валу

двигателя и его скорость вращения не достигают установившегося значения.

Таким образом, при увеличении нагрузки скорость вращения двигателя будет плавно уменьшаться, а момент плавно увеличиваться, но не до статических значений. Нагрузка двигателя колеблется между значениями, меньшими максимальных статических, и большими минимальных статических (то есть двигатель загружается в меньшей степени по сравнению с предыдущим случаем). Это происходит потому, что при уменьшении скорости высвобождается кинетическая энергия инерционных масс, разгружая тем самым двигатель. И наоборот, при уменьшении нагрузки кинетическая энергия за счет увеличения скорости запасается, дополнительно загружая двигатель (момент на валу больше чем статический (рисунок 4.6г)). В результате резкопеременная нагрузка на валу двигателя сглаживается.

Если увеличение  $T_m$  произошло за счет увеличения  $J_{\Sigma}$  при той же жесткости механической характеристики  $\beta_e$ , в нагрузочной диаграмме уменьшается как размах колебаний момента, так и размах колебаний скорости, и в пределе при  $J \rightarrow \infty$  момент двигателя  $M \rightarrow M_{c,cp} = \text{const}$ , а скорость его вращения  $\omega \rightarrow \omega_{c,cp} = \text{const}$ . Сглаживание нагрузочной диаграммы двигателя  $M(t)$  приводит к снижению переменных потерь, пропорциональных квадрату момента (тока), а так как  $M_{max} < M_{c,max}$ , снижаются и требования к перегрузочной способности двигателя.

Этот эффект используется в электроприводах механизмов, работающих с ударной нагрузкой (прессы, кузнечные молоты, ножницы для резки металла, некоторые прокатные станы и т.п.). В таких электроприводах для увеличения момента инерции на промежуточный быстроходный вал кинематической передачи устанавливается маховик, и поэтому такие электроприводы называются **маховиковыми**. За счет искусственно увеличенных инерционных масс достигается выравнивание нагрузки электропривода и уменьшение установленной мощности двигателя.

При увеличении  $T_m$  за счет уменьшения жесткости механической характеристики (от  $\beta_e$  до  $\beta_u$  на рисунке 4.6в), сглаживание нагрузочной диаграммы двигателя  $M(t)$ , будет аналогичным предыдущему случаю. Но амплитуда колебаний скорости (неравномерность хода) на мягкой характеристике будет в несколько раз больше, чем на жесткой, так как получить нужную кинетическую энергию в этом случае можно только за счет увеличения  $\Delta\omega_{max}$  (рисунок 4.6в). Однако такая неравномерность вращения может не удовлетворять требованиям к электроприводу.

## 4.5.2 Нагрузочные диаграммы механизмов циклического действия

Механизмы циклического действия характеризуются наличием в рабочем цикле одного или нескольких пусков, реверсов, торможений. При этом в техническом задании на проектирование электропривода должны присутствовать исходные данные для расчета зависимости  $\omega_3(t)$ . Это могут быть заданные перемещения на участках работы  $\varphi_{zi}$ ,  $S_{zi}$ , допустимое или требуемое ускорение  $\varepsilon_3$ ,  $a_3$ , рабочая скорость  $\omega_p$ ,  $v_p$ , время цикла  $t_u$  или число циклов в час  $N_u$ . Здесь же должны быть данные, необходимые для расчета статических нагрузок. По этим данным строятся зависимости  $M_c(t)$  и  $\omega_3(t)$ . Затем с использованием (4.31) рассчитывается и строится нагрузочная диаграмма двигателя  $M(t)$ .

На рисунке 4.7 построены вышеперечисленные зависимости для механизма, цикл работы которого состоит из участка движения от места загрузки к месту выгрузки и участка обратного движения.

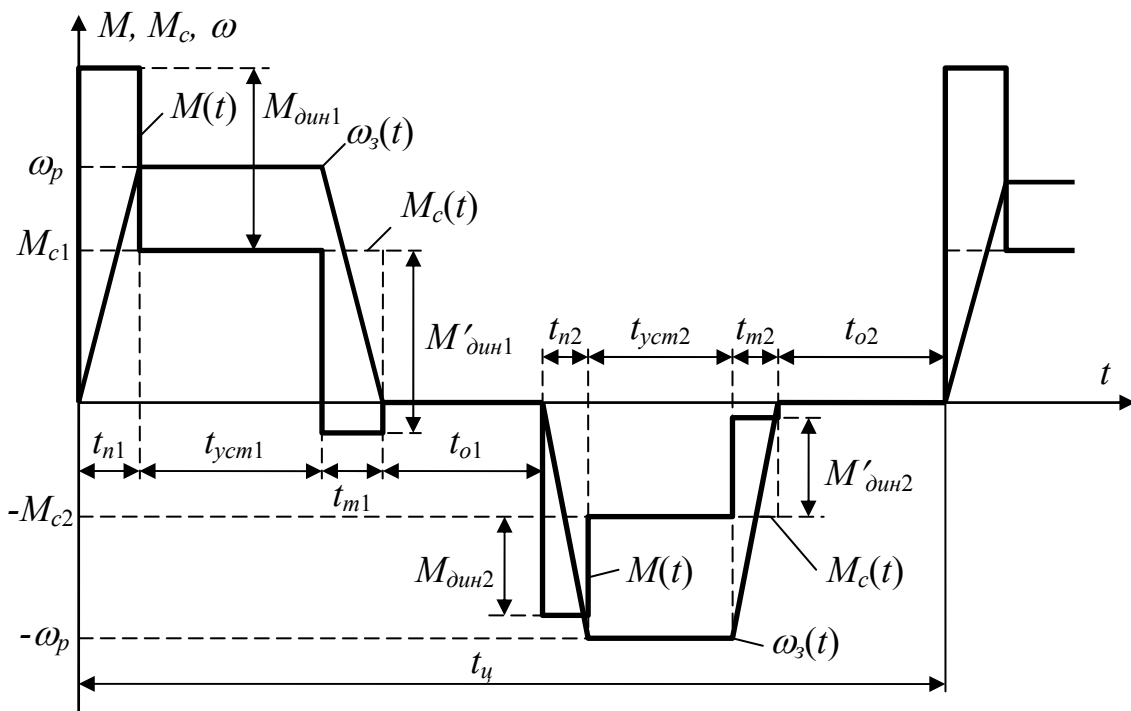


Рисунок 4.7

Необходимо отметить, что точный расчет нагрузочной диаграммы двигателя  $M(t)$  невозможен до того, как будет выбран двигатель, так как отсутствуют его параметры  $J_{дв}$ ,  $\omega_n$ ,  $\beta_e$ . Поэтому двигатель предварительно выбирается по нагрузочной диаграмме механизма с ориентировочным учетом влияния динамических нагрузок на его требуемую мощность. Для механизмов непрерывного действия необходимо учитывать возможное выравнивание нагрузочной диаграммы и соответствующее

уменьшение потерь в двигателе. Для механизмов циклического действия динамические нагрузки увеличивают потери в двигателе, и зачастую эти нагрузки преобладают над статическими. Поэтому выбор двигателя в таких случаях по зависимости  $M_c(t)$  без учета динамических нагрузок недопустим.

**Следовательно, в сложных случаях выбор двигателя осуществляется в три этапа:**

- 1) по нагрузочной диаграмме механизма с грубой оценкой влияния динамических нагрузок предварительно выбирается двигатель;
- 2) рассчитывается нагрузочная диаграмма выбранного двигателя, и он проверяется по нагреву и по перегрузке;
- 3) если двигатель перегружен или в значительной степени недогружен, выбирается новый двигатель, который снова проверяется по нагреву и перегрузке.

#### 4.6 Номинальные режимы работы двигателя

Многообразные условия работы производственных механизмов обуславливают различные режимы работы электроприводов. Поэтому в электромашиностроении номинальные режимы электрических двигателей классифицируются на восемь режимов с условными обозначениями от S1 до S8.

**S1 - продолжительный номинальный режим работы.** Соответствует режиму, при котором двигатель работает с номинальной нагрузкой столько времени, что превышения температуры всех его частей достигают установившихся значений, которые должны быть равны допустимым (рисунок 4.8). Условию  $\tau_{ycm} = \tau_{don}$  соответствуют каталожные данные двигателя  $P_n, U_n, I_n, n_n$ .

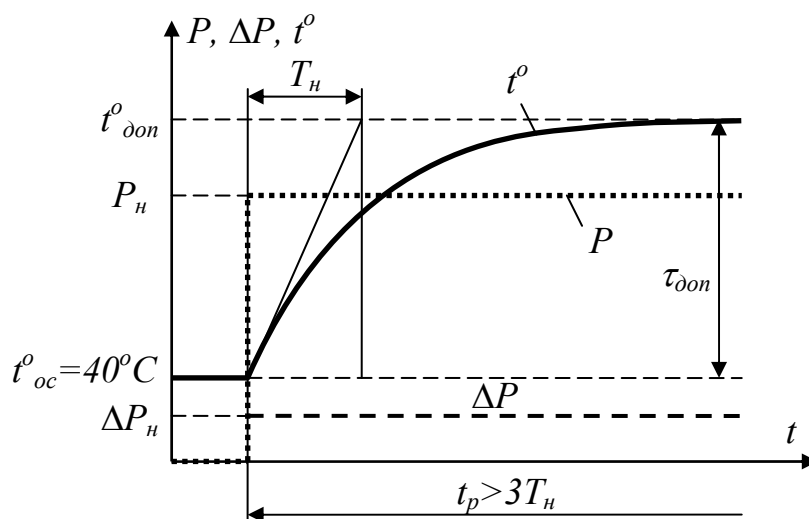


Рисунок 4.8

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

**S2 - кратковременный номинальный режим работы.** Режим, при котором периоды номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя, причем за время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время отключения успевает охладиться до температуры окружающей среды (рисунок 4.9). Вследствие этого начальное превышение температуры при каждом включении равно нулю, а достигаемое в конце работы превышение температуры двигателя согласно (4.29) равно:

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{доп}} = \tau_{\text{уст}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{p.n}}{T_n}} \right). \quad (4.32)$$

Это значение определяется величиной нагрузки, временем работы  $t_{p.n}$  и постоянной времени нагрева  $T_n$ . Таким образом, номинальная мощность двигателя кратковременного режима S2 соответствует определенному номинальному времени работы  $t_{p.n}$ , значения которого стандартизованы величинами 15, 30, 60 и 90 мин.

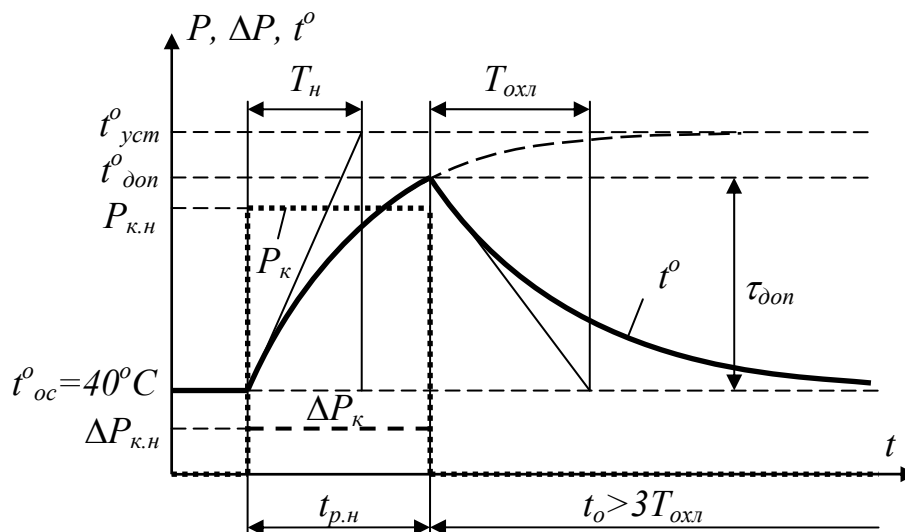


Рисунок 4.9

**Если фактическое время работы двигателя с номинальной нагрузкой больше стандартного, то двигатель будет нагреваться до температуры, большей допустимой, и во избежание этого нагрузка должна быть снижена. Таким образом, нельзя использовать двигатель режима S2 с номинальной нагрузкой в длительном режиме, так как установив-**



шаяся температура двигателя  $t_{уст}^{\circ}$  будет больше допустимой  $t_{дон}^{\circ}$  (рисунок 4.9). В случае, если фактическое время работы будет меньше номинального, двигатель можно в соответствующей степени перегрузить.

Двигатели кратковременного режима широко используются на электрическом транспорте (двери, разгрузочные механизмы) и для различных кратковременно работающих вспомогательных механизмов в промышленности.

### S3 - повторно-кратковременный номинальный режим работы.

Режим, при котором периоды работы с номинальной нагрузкой чередуются с периодами отключения двигателя, причем за время работы двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы не успевает охладиться до температуры окружающей среды (рисунок 4.10).

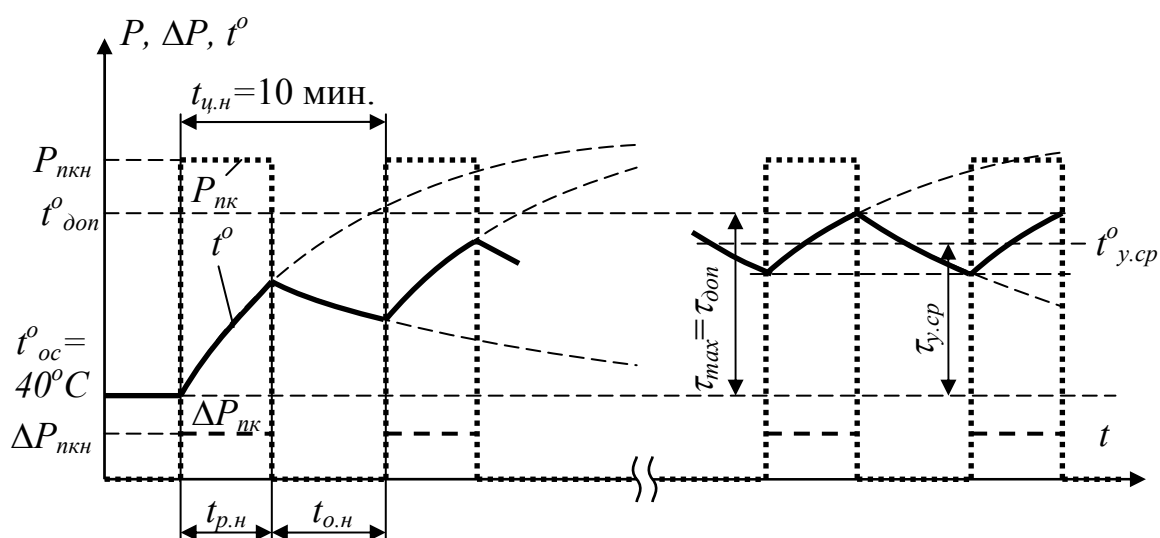


Рисунок 4.10

По прошествии определенного числа циклов после включения температура двигателя, повышаясь, достигнет квазиустановившегося значения, и будет колебаться вокруг среднего значения  $t_{у.ср}^{\circ}$ . Максимальное превышение температуры  $\tau_{max}$  не должно превышать допустимого значения  $\tau_{дон}$ . Для наиболее полного использования двигателя по нагреву колебания температуры вокруг среднего установившегося значения должны быть минимальными. Это может быть достигнуто при выполнении условия  $t_p \ll T_n$  и  $t_o \ll T_{охл}$ . **Поэтому наибольшее время цикла режима S3 регламентировано и составляет 10 минут.** Главной характеристикой повторно-кратковременного режима является относительная продолжительность включения двигателя, %:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_o} \cdot 100 = \frac{t_p}{t_{ц}} \cdot 100. \quad (4.33)$$

Номинальные значения  $PB_n$  нормируются величинами 15, 25, 40, 60 и 100%. Номинальные данные двигателя режима S3, указанные в каталоге и на щитке двигателя, соответствуют конкретному указанному в каталоге и на щитке значению  $PB_n$ .

Использовать двигатели длительного режима S1 для работы в повторно-кратковременном режиме S3 даже с  $PB$ , близкими к 100%, не рекомендуется, так как для полного использования по температуре в режиме S3 двигатель необходимо перегружать, тем самым, уменьшая его реальную перегрузочную способность. Специальные двигатели режима S3 даже с  $PB=100\%$  также не рекомендуется применять для работы в продолжительном режиме S1, так как его перегрузочная способность при работе в режиме S1 будет избыточна, а его массогабаритные и ценовые показатели будут гораздо выше, чем у двигателя режима S1.

Рассмотренные режимы S1, S2, S3 являются основными, и для этих режимов электротехнической промышленностью выпускаются электрические двигатели. Разработанные в теории электропривода инженерные методы проверки двигателей по нагреву позволяют осуществлять выбор двигателей на основе этих трех режимов для всех практических случаев.

В целях облегчения выбора двигателей для конкретных осложненных обстоятельств действующий ГОСТ расширил номенклатуру номинальных режимов до восьми.

**S4 - повторно-кратковременный номинальный режим с частыми пусками.** Данный режим характеризуется значительным влиянием пусковых динамических процессов на нагрев двигателя. Это может происходить при достаточно большом суммарном времени пусков за цикл работы.

**S5 - повторно-кратковременный номинальный режим с частыми реверсами.** В цикле работы электропривода присутствуют как тяжелые, длительные по времени пусковые режимы, так и участки с электрическим торможением.

**S6 - перемежающийся номинальный режим работы.** Этот режим характеризуется чередованием периодов работы двигателя с номинальной нагрузкой с периодами работы вхолостую, причем за время работы с нагрузкой двигатель не успевает нагреться до установившейся максимальной температуры, а за время работы вхолостую не успевает охладиться до установившейся минимальной температуры холостого хода. Характеристикой режима S6 является относительная продолжительность нагрузки, %:

$$ПН = \frac{t_n}{t_n + t_{xx}} 100 = \frac{t_n}{t_u} 100, \quad (4.34)$$

где  $t_n$  и  $t_{xx}$  – времена работы соответственно с номинальной нагрузкой и холостую.

Продолжительность цикла не должна превышать 10 мин. Номинальные значения ПН нормируются величинами 15, 25, 40, 60 и 100%.

**S7 - перемежающийся номинальный режим работы с частыми реверсами.** Этот режим отличается от повторно-кратковременного S5 тем, что в цикле работы отсутствуют периоды отключения двигателя.

**S8 - перемежающийся номинальный режим работы с двумя и более скоростями в цикле работы.** Это тяжелый режим работы, в котором отсутствуют периоды отключения двигателя и одновременно изменяется его скорость вращения (соответственно есть пусковые и тормозные режимы). Этот режим характерен для приводов подач металлорежущих станков с автоматизированным рабочим циклом при изготовлении сложных изделий.

Таким образом, номинальные режимы S4÷S8 дополняют конкретную информацию об интенсивных повторно-кратковременных режимах и о продолжительных режимах с переменной циклической нагрузкой.

## 4.7 Расчет мощности двигателя при продолжительном режиме работы

### 4.7.1 Постоянная нагрузка (режим S1)

Механизмов, работающих продолжительно с неизменной нагрузкой, достаточно много. Это насосы, компрессоры, вентиляторы, конвейеры и т.п. Для большинства таких механизмов мощность двигателя может быть определена по выражениям, приводимым в технической литературе.

Так, мощность двигателя для центробежного насоса определяется по формуле:

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta_{нас} \cdot \eta_{пер}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (4.35)$$

где  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/с;

$\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – расчетная высота подъема жидкости (напор), м;

$\eta_{нас}$  и  $\eta_{пер}$  – КПД насоса и КПД передачи;

$g=9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести.

Мощность двигателя для вентилятора определяется по выражению:

$$P = \frac{Q \cdot p}{\eta_{\text{вент}} \cdot \eta_{\text{пер}}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (4.36)$$

где  $Q$  – производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;  
 $p$  – давление на выходе вентилятора, Па;  
 $\eta_{\text{вент}}$  – КПД вентилятора.

При выборе двигателя на указанную или несколько большую мощность обеспечивается полное его использование по нагреву.

Так как такие механизмы пускаются редко, пусковые потери практически не сказываются на нагреве двигателя. В случае повышенного пускового момента механизма необходимо проверить выбранный двигатель на достаточность его пускового момента (особенно асинхронный короткозамкнутый двигатель).

#### 4.7.2 Переменная нагрузка (режимы S6, S7, S8)

Как уже указывалось выше, при переменной нагрузке по нагрузочной диаграмме механизма осуществляется предварительный выбор двигателя. Затем необходимо построить нагрузочную диаграмму выбранного двигателя (рисунок 4.11) и провести его проверку по нагреву. Эта проверка заключается в том, чтобы наибольшее превышение температуры двигателя за цикл работы  $\tau_{\text{max}}$  не превышало допустимого значения  $\tau_{\text{дон}}$  ( $\tau_{\text{max}} \leq \tau_{\text{дон}}$ ):

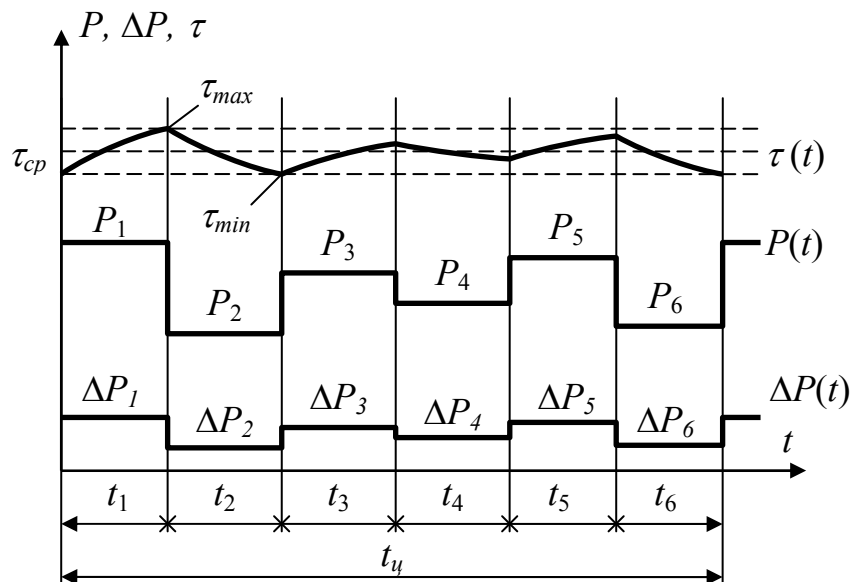


Рисунок 4.11

Чтобы таким образом проверить двигатель, необходимо построить кривую его нагрева, что на практике сделать почти невозможно. Поэтому в инженерных расчетах пользуются более простыми методами.

Самым точным из них является **метод средних потерь**, суть которого заключается в том, что если средние потери двигателя за цикл работы не превышают номинальные потери  $\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n$ , то среднее превышение температуры двигателя не превышает его допустимое значение  $\tau_{cp} \leq \tau_{дон} = \tau_n$ .

Если средние потери за цикл будут больше номинальных ( $\Delta P_{cp} > \Delta P_n$ ), то двигатель будет перегреваться, а если меньше ( $\Delta P_{cp} < \Delta P_n$ ) - двигатель будет недоиспользоваться по нагреву. В обоих случаях необходимо выбрать новый двигатель, определить его средние потери и проверить на нагрев.

Действительное максимальное превышение температуры отличается от среднего (рисунок 4.11), но при малом времени цикла  $t_u \ll T_n$  и достаточно большом общем времени работы  $N \cdot t_u > 4T_n$ , где  $N$  – число циклов, это расхождение незначительно. Таким образом, **только при соблюдении этих условий можно пользоваться методом средних потерь**.

Средние потери двигателя за цикл определяются по выражению:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_{ymi} \cdot t_i}, \quad (4.37)$$

где  $\Delta P_i$  - мощность потерь на  $i$ -м интервале;

$t_i$  - продолжительность  $i$ -го интервала;

$m$  - число интервалов в цикле;

$\beta_{ymi}$  - коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$ -м интервале из-за уменьшения скорости вращения.

Если двигатель с независимой вентиляцией, то  $\beta_{ym.i} = 1$ . Для двигателя с самовентиляцией зависимость коэффициента ухудшения теплоотдачи от угловой скорости можно считать линейной:

$$\beta_{ym} = \beta_{ym0} + (1 - \beta_{ym0}) \cdot \frac{\omega}{\omega_n}, \quad (4.38)$$

где  $\beta_{ym0}$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре (роторе).

Величина  $\beta_{ym0}$  определяется исполнением двигателя /9/.

*Недостатком метода средних потерь* является то, что для определения мощности потерь на участках работы необходимо иметь зависимости КПД от нагрузки двигателей при разных угловых скоростях, которые зачастую в справочной литературе отсутствуют. Поэтому во многих случаях без существенного уменьшения точности расчетов можно пользоваться

полученными на основе метода средних потерь **методами эквивалентных величин** (тока, момента, мощности).

Представим выражение (4.37) в виде:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^m (\Delta P_{c.i} + I_i^2 R_i) t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_{ym.i} t_i} = \Delta P_{c.cp} + \frac{\sum_{i=1}^m I_i^2 R_i t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_{ym.i} t_i}, \quad (4.39)$$

где  $\Delta P_{c.i}$  – постоянные потери на  $i$ -м участке работы;  
 $\Delta P_{c.cp}$  – средние за цикл работы постоянные потери;  
 $I_i^2 R_i$  - переменные потери на  $i$ -м участке работы.

Номинальные потери двигателя:

$$\Delta P_n = \Delta P_{c.n} + I_n^2 R. \quad (4.40)$$

С учетом (4.39) и (4.40) получаем следующее условие для проверки двигателя по нагреву:

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_{c.cp} + \frac{\sum_{i=1}^m I_i^2 R_i t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_{ym.i} t_i} \leq \Delta P_n = \Delta P_{c.n} + I_n^2 R. \quad (4.41)$$

Если допустить, что сопротивление и постоянные потери не меняются  $R_i=R=const$ ,  $\Delta P_{c.i}=\Delta P_{c.cp}=\Delta P_{c.n}=const$ , то проверка двигателя по нагреву может быть проведена **методом эквивалентного тока**.

Эквивалентный ток  $I_{эkv}$  – это такой постоянный по величине ток, который вызывает в двигателе такие же потери, что и фактический, изменяющийся во времени ток.

Таким образом, средние потери в двигателе будут равны:

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_{c.n} + I_{эkv}^2 R. \quad (4.42)$$

Подставив (4.42) в (4.41) и сократив  $P_{c.n}$  и  $R$ , получим условие полного использования двигателя по нагреву:

$$I_{эkv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m I_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_{ym.i} t_i}} \leq I_n. \quad (4.43)$$

**Этот метод применим, когда применим метод средних потерь, и когда сопротивления обмоток двигателя можно считать постоянными** (постоянные потери постоянны по определению). Сопротивления обмоток значительно изменяются только у асинхронного короткозамкнутого двигателя вследствие явления вытеснения тока на поверхность стержней беличьей клетки, и в этом случае необходимо применять метод средних потерь.

В тех случаях, когда магнитный поток двигателя можно считать постоянным, а момент двигателя пропорциональным току нагрузки, проверку двигателя удобнее проводить **методом эквивалентного момента**:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_{\text{ym.i}} t_i}} \leq M_n. \quad (4.44)$$

Проверка двигателя осуществляется непосредственно по нагрузочной диаграмме двигателя  $M(t)$ .

**Этот метод применим, когда применим метод эквивалентного тока, и когда момент двигателя пропорционален току нагрузки.**

Методом эквивалентного момента можно пользоваться на начальном этапе проектирования для предварительного расчета мощности двигателя по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма  $M_c(t)$ . Когда влияние переходных процессов на нагрев двигателя существенно, ориентировочно с помощью эмпирических коэффициентов или оценки ожидаемого момента инерции двигателя вносятся поправки в эту нагрузочную диаграмму. Далее определяют по ней  $M_{\text{экв}}$  и требуемую номинальную мощность двигателя:

$$P_{\text{треб}} = M_{\text{экв}} \cdot \omega_{\text{мех}} \leq P_n.$$

Выбранный таким образом двигатель проверяется по нагреву по уточненной нагрузочной диаграмме  $M(t)$ .

В тех случаях, когда при изменении нагрузки двигателя его скорость изменяется незначительно ( $\omega \approx \omega_n$ ), и ток пропорционален развиваемому двигателем моменту, можно применять еще один метод оценки нагрева двигателя – **метод эквивалентной мощности**:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m P_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}} \leq P_{\text{н}}. \quad (4.45)$$

Так как метод применим при  $\omega = \omega_{\text{н}} = \text{const}$ , коэффициент ухудшения теплоотдачи в этом случае  $\beta_{\text{ym}} = 1$ .

**Метод эквивалентной мощности применим в тех случаях, когда в течение рабочего цикла двигатель работает на жесткой естественной характеристике.** Проверка двигателя осуществляется по нагрузочной диаграмме двигателя, представленной в виде графика  $P(t)$ .

В связи с тем, что большинство электроприводов с переменной нагрузкой работает с изменяющейся во времени скоростью (пуск, торможение, реверс, рабочая скорость и скорость холостого хода), возможности метода эквивалентной мощности при проверке двигателя по нагреву ограничены. Однако, этот метод может быть достаточно широко использован для **предварительного выбора двигателя по нагрузочной диаграмме механизма  $P_c(t)$ .**

В заключении следует заметить, что **при выборе двигателя необходимо проверять его не только по нагреву одним из перечисленных выше методов, но и по условию допустимой максимальной нагрузки:**

$$\left| \begin{array}{l} I_{\text{макс}} \leq I_{\text{макс.доп}} ; \\ M_{\text{макс}} \leq M_{\text{макс.доп}} ; \\ P_{\text{макс}} \leq P_{\text{макс.доп}} , \end{array} \right. \quad (4.46)$$

где  $I_{\text{макс}}$ ,  $M_{\text{макс}}$ ,  $P_{\text{макс}}$  – максимальные значения тока, момента и мощности из нагрузочных диаграмм двигателя  $I(t)$ ,  $M(t)$ ,  $P(t)$ , рассчитанных с учетом динамических процессов пуска, торможения, реверса;

$I_{\text{макс.доп}}$ ,  $M_{\text{макс.доп}}$ ,  $P_{\text{макс.доп}}$  – максимально допустимые для выбранного двигателя значения тока, момента и мощности, взятые из каталожных данных.

## 4.8 Расчет мощности двигателя при кратковременном режиме работы S2

Нагрузочная диаграмма двигателя, работающего в кратковременном режиме, приведена на рисунке 4.9.

Если для работы в этом режиме выбирать двигатель длительного режима, то, как было сказано в п. 4.6, для его полного использования по



нагреву необходимо выбирать двигатель с номинальной мощностью, меньшей мощности  $P_{кн}$  (рисунок 4.9), требующейся в кратковременном режиме. При этом степень перегрузки двигателя определяется коэффициентом термической перегрузки:

$$p_T = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{н}}, \quad (4.47)$$

где  $\Delta P_{н}$  и  $\Delta P_{\kappa}$  – номинальные потери двигателя режима S1 и потери при его работе в режиме S2.

Зависимость величины этого коэффициента от относительного времени работы в режиме S2 представлена на рисунке 4.12а. Там же представлена кривая коэффициента механической перегрузки  $p_M$ , который определяется соотношением:

$$p_M = \frac{P_{\kappa.T}}{P_{н}}, \quad (4.48)$$

где  $P_{н}$  и  $P_{\kappa.T}$  – номинальная мощность двигателя в длительном режиме и допустимая по условиям нагрева мощность в кратковременном режиме.

Коэффициент  $p_M$  ограничивается допустимой перегрузочной способностью двигателя того или иного типа длительного режима S1 ( $P_{\kappa.T} \leq \lambda P_{н}$ ).

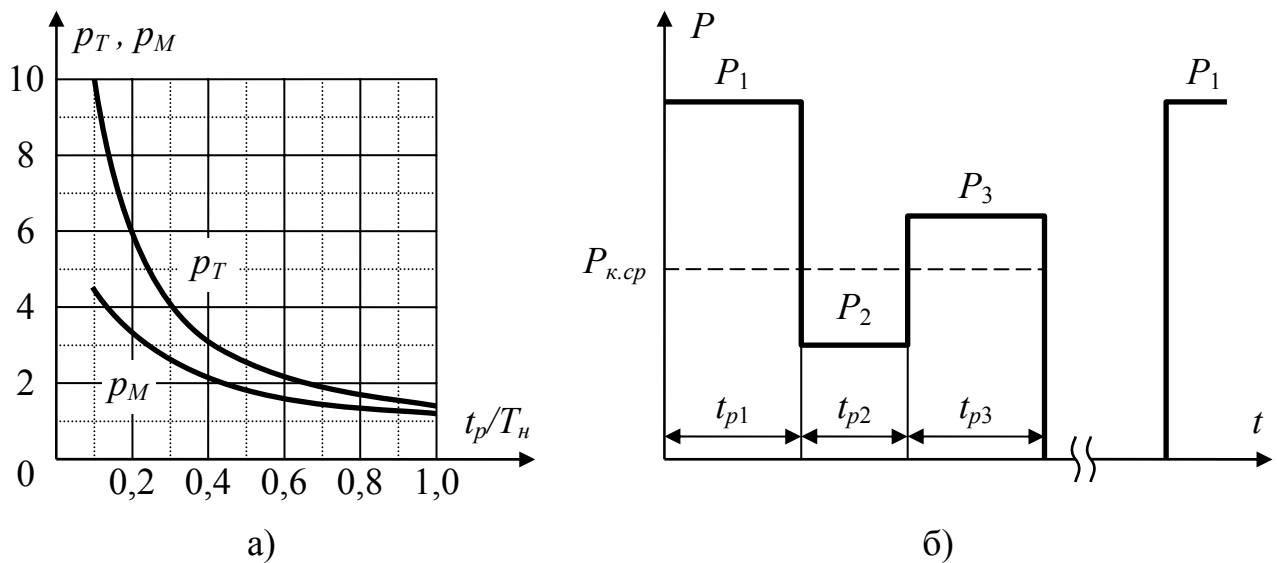


Рисунок 4.12

Из анализа кривых рисунка 4.12а видно, что уже при относительном времени работы  $t_p/T_n=0,35$  коэффициент механической перегрузки  $p_M$  становится равным 2.5, что для большинства типов двигателей режима S1 является предельным. Таким образом, учитывая небольшую длительность работы в режиме S2, двигатели продолжительного режима, используемые для кратковременного режима работы, в большинстве случаев выбираются по величине перегрузочной способности и недоиспользуются по нагреву.

Поэтому для механизмов с кратковременным режимом работы желательно применение **двигателей специального назначения, отличающихся повышенной перегрузочной способностью.**

Если фактическое время работы механизма совпадает с номинальным (15, 30, 60, 90 мин), двигатель выбирается с этой номинальной длительностью работы с соблюдением условия  $P_{к.н} \geq P_k$  (рисунок 4.9).

**Когда фактическое время работы двигателя режима S2 не совпадает с номинальным, необходимо пересчитать реальный график нагрузки на ближайший номинальный, исходя из следующих соображений.**

Превышение температуры двигателя с номинальным временем работы и номинальной нагрузкой в соответствии с (4.32) равно:

$$\tau_{\text{дон}} = \tau_{\text{уст.н}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{p.н}}{T_n}} \right) = \frac{\Delta P_{к.н}}{B} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{p.н}}{T_n}} \right), \quad (4.49)$$

где  $\Delta P_{к.н}$  и  $\tau_{\text{уст.н}}$  – греющие потери и установившееся превышение температуры двигателя режима S2, работающего в номинальном режиме;

$B$  – коэффициент теплоотдачи двигателя;

$t_{p.н}$  – номинальное время работы двигателя.

При отличных от номинальных значениях нагрузки и времени работы эта же температура будет равна:

$$\tau_{\text{дон}} = \tau_{\text{уст.ф}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{p.ф}}{T_n}} \right) = \frac{\Delta P_{к.ф}}{B} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{p.ф}}{T_n}} \right), \quad (4.50)$$

где  $\Delta P_{к.ф}$  и  $\tau_{\text{уст.ф}}$  – греющие потери и установившееся превышение температуры двигателя режима S2, работающего в фактическом (отличном от номинального) режиме;

$t_{p.ф}$  – фактическое время работы двигателя.

В обоих случаях превышение температуры должно быть одинаково и равно допустимому значению. Тогда коэффициент термической перегрузки из (4.49) и (4.50) определяется как:

$$P_T = \frac{\Delta P_{к.ф}}{\Delta P_{к.н}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{р.н}}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_{р.ф}}{T_n}}}. \quad (4.51)$$

С другой стороны коэффициент термической перегрузки, определенный через постоянные и переменные потери двигателя в номинальном и фактическом режимах, будет равен:

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{\Delta P_{к.ф}}{\Delta P_{к.н}} = \frac{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{в.ф}}{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{в.н}} = \frac{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{в.н} \cdot \left(\frac{P_{к.ф}}{P_{к.н}}\right)^2}{\Delta P_{с.н} + \Delta P_{в.н}} = \\ &= \frac{\frac{\Delta P_{с.н}}{\Delta P_{в.н}} + \left(\frac{P_{к.ф}}{P_{к.н}}\right)^2}{\frac{\Delta P_{с.н}}{\Delta P_{в.н}} + 1} = \frac{a + \left(\frac{P_{к.ф}}{P_{к.н}}\right)^2}{a + 1}, \end{aligned} \quad (4.52)$$

где  $a = \frac{\Delta P_{с.н}}{\Delta P_{в.н}}$  - отношение постоянных потерь к переменным в но-

минальном режиме работы;

$P_{к.н}$  и  $P_{к.ф}$  - номинальная мощность двигателя режима S2 и мощность двигателя, работающего в фактическом (отличном от номинального) режиме работы.

Приравняв (4.51) и (4.52) с учетом того, что двигатели в номинальном режиме имеют примерно равные постоянные и переменные потери ( $a=1$ ), получим выражение для определения допустимой нагрузки для двигателя режима S2, работающего в течении времени  $t_{р.ф}$ , отличного от номинального  $t_{р.н}$ :

$$P_{к.ф} = P_{к.н} \cdot D, \quad (4.53)$$

$$\text{где } D = \sqrt{2 \frac{1 - e^{-\frac{t_{p.n}}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_{p.ф}}{T_n}}} - 1}.$$

В случае, когда известна фактическая нагрузочная диаграмма двигателя, его мощность  $P_{к.треб.н}$  при номинальном времени работы  $t_{p.н}$  можно рассчитать по выражению:

$$P_{к.треб.н} = \frac{P_{к.ф}}{D}. \quad (4.54)$$

При выборе двигателя необходимо выполнить условие  $P_{к.н} \geq P_{к.треб.н}$  при  $t_{p.н}$ .

В случае, если график работы двигателя будет многоступенчатым (рисунок 4.12б), его необходимо привести к эквивалентному одноступенчатому, используя выражение (4.45):

$$P_{к.ф} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{p1} + P_2^2 t_{p2} + P_3^2 t_{p3}}{\beta_{ym1} t_{p1} + \beta_{ym2} t_{p2} + \beta_{ym3} t_{p3}}}. \quad (4.55)$$

Если фактическое время работы  $t_{p.ф}$  меньше номинального  $t_{p.н}$ , в соответствии с (4.53) двигатель должен быть перегружен ( $P_{к.ф} > P_{к.н}$ ), и тогда его необходимо проверить на допустимую максимальную нагрузку.

Нагрузочные диаграммы двигателя могут быть построены в виде  $I=f(t)$  или  $M=f(t)$ . В этом случае в выражениях (4.53) и (4.55) значения мощностей должны быть заменены на токи или моменты.

#### 4.9 Расчет мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы S3, S4, S5

Стандартная нагрузочная диаграмма повторно-кратковременного режима S3 приведена на рисунке 4.10.

Выбор двигателя из серий, предназначенных для повторно-кратковременных режимов, при совпадении фактической продолжительности включения  $ПВ_{ф}$  с одной из номинальных  $ПВ_n$  (15, 25, 40, 60, 100%) не вызывает затруднений, так как необходимо только соблюдение условия  $P_{нк.н} \geq P_{нк.ф}$ . Если график нагрузки повторно-кратковременного режима будет многоступенчатым, его необходимо привести к эквивалентному одно-

ступенчатому, воспользовавшись одним из выражений метода эквивалентных величин (4.43), (4.44), (4.45).

В случае если  $PВ_{\phi} \neq PВ_{н}$ , рекомендуется выбирать двигатель с ближайшей номинальной продолжительностью включения, приведя фактическую нагрузочную диаграмму к эквивалентной номинальной (стандартной). Пересчет нагрузочной диаграммы проводится в соответствии с методом средних потерь. Согласно методу средняя температура двигателя при работе по фактическому графику нагрузки не будет превышать допустимую в том случае, если средние потери за цикл работы с мощностью  $P_{нк.ф}$  при  $PВ_{\phi}$  не будут превышать потери мощности за тот же цикл с мощностью  $P_{нк.н}$  при  $PВ_{н}$ :

$$\Delta P_{нк.ф} \cdot PВ_{\phi} \leq \Delta P_{нк.н} \cdot PВ_{н}. \quad (4.56)$$

Отсюда условие выбора двигателя:

$$\Delta P_{нк.н} \geq \Delta P_{нк.ф} \frac{PВ_{\phi}}{PВ_{н}}. \quad (4.57)$$

Выражение (4.57) позволяет проверить по нагреву предварительно выбранный двигатель с номинальными значениями  $P_{нк.н}$  и  $PВ_{н}$ , ближайшими к фактическим значениям  $P_{нк.ф}$  и  $PВ_{\phi}$ .

Более удобные выражения для проверки выбранного двигателя можно получить, выразив потери в выражении (4.56) через постоянные и переменные номинальные и фактические потери по аналогии с выражением (4.52):

$$\left[ \Delta P_{с.н} + \Delta P_{v.н} \cdot \left( \frac{I_{нк.ф}}{I_{нк.н}} \right)^2 \right] \cdot PВ_{\phi} \leq (\Delta P_{с.н} + \Delta P_{v.н}) \cdot PВ_{н};$$

$$\left[ a + \left( \frac{I_{нк.ф}}{I_{нк.н}} \right)^2 \right] \cdot PВ_{\phi} \leq (a + 1) \cdot PВ_{н};$$

$$I_{нк.н} \geq I_{нк.ф} \cdot \sqrt{\frac{PВ_{\phi}}{a \cdot (PВ_{н} - PВ_{\phi}) + PВ_{н}}}. \quad (4.58)$$

Для двигателей, работающих с постоянным магнитным потоком, легко получить аналогичное соотношение между моментами, а при работе

этих двигателей при малоизменяющейся скорости – аналогичное соотношение между мощностями.

$$M_{нк.н} \geq M_{нк.ф} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\phi}}{a \cdot (ПВ_{н} - ПВ_{\phi}) + ПВ_{н}}}; \quad (4.59)$$

$$P_{нк.н} \geq P_{нк.ф} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\phi}}{a \cdot (ПВ_{н} - ПВ_{\phi}) + ПВ_{н}}}. \quad (4.60)$$

Если принять,  $a=1$ , и  $(2 \cdot ПВ_{н} - ПВ_{\phi}) \approx ПВ_{н}$ , получим удобные выражения для проверки предварительно выбранных двигателей по нагреву:

$$I_{нк.н} \geq I_{нк.ф} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\phi}}{ПВ_{н}}}; \quad (4.61)$$

$$M_{нк.н} \geq M_{нк.ф} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\phi}}{ПВ_{н}}}; \quad (4.62)$$

$$P_{нк.н} \geq P_{нк.ф} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\phi}}{ПВ_{н}}}. \quad (4.63)$$

Последние два выражения можно использовать для определения необходимой мощности двигателя при его предварительном выборе по нагрузочной диаграмме исполнительного механизма.

#### 4.10 Допустимая частота включений асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Переходные процессы пуска и торможения этого двигателя обычно протекают при значительных величинах скольжения ( $s > s_k$  и  $s > 1$ ) и, соответственно, частоты тока роторной обмотки (беличьей клетки). При таких частотах явление вытеснения тока на поверхность стержней беличьей клетки, особенно для двигателей с глубоким пазом и двойной беличьей клеткой, проявляется в полной мере. В связи с этим в переходных процессах пуска, торможения и реверса двигателей происходит значительное изменение активного сопротивления роторной обмотки, что исключает возможность применения методов эквивалентных величин для проверки по нагреву рассматриваемых двигателей. **Поэтому такие двигатели можно проверить по нагреву только методом средних потерь.**

Для двигателей длительного режима S1, когда пуски, реверсы и торможения крайне редки, влияние на нагрев потерь в переходных процессах может не учитываться. Поэтому здесь рассмотрим повторно-кратковременный режим работы.

Двигатели режима работы S3 рассчитаны на рабочий цикл длительностью  $t_{\text{ц}}=10$  мин. с одним включением в цикле и шестью включениями в час. Это спокойный режим, характерный для некоторых кранов, но в большинстве случаев требуемая производительность гораздо выше, и частота включений в час может достигать нескольких сотен. В таких режимах работы влияние потерь энергии в переходных процессах на нагрев двигателя возрастает настолько, что становится определяющим. Поэтому для короткозамкнутых асинхронных двигателей, работающих в интенсивных повторно-кратковременных режимах S4 и S5, вводится понятие допустимой частоты включений двигателя в час:

$$N = \frac{3600}{t_{\text{ц}}}. \quad (4.64)$$

Анализ влияния параметров двигателя на величину  $N$  проведем с помощью метода средних потерь. Для повторно-кратковременного режима с одним включением и торможением противовключением в цикле пусковые и тормозные потери энергии определяются в соответствии с (4.25).

Для пуска  $s_{\text{нач}}=1, s_{\text{кон}}=0$ :

$$\Delta A_n = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) \cdot \frac{t_n}{t_{\text{но}}} + \Delta P_c \cdot t_n. \quad (4.65)$$

Для торможения противовключением  $s_{\text{нач}}=2, s_{\text{кон}}=1$ :

$$\Delta A_m = 3 \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) \cdot \frac{t_m}{t_{\text{мо}}} + \Delta P_c \cdot t_m. \quad (4.66)$$

Сопротивление  $R'_2$  в связи с эффектом вытеснения тока является функцией скольжения, поэтому в целях упрощения в эти выражения подставляется усредненное за время переходного процесса значение  $R'_2$ .

В соответствии с методом средних потерь запишем:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta A_n + \Delta P_{\text{ycm}} t_{\text{ycm}} + \Delta A_m}{\beta_{\text{ym.n}} t_n + t_{\text{ycm}} + \beta_{\text{ym.m}} t_m + \beta_{\text{ym.o}} t_o} \leq \Delta P_n, \quad (4.67)$$

где  $t_{ycm} = \frac{ПВ}{100} \cdot t_u - t_n - t_m$  - время установившегося движения механизма;

$\Delta P_{ycm}$  - потери в установившемся режиме работы;

$\beta_{ym.n} = \beta_{ym.m} = \frac{1 + \beta_{ym.o}}{2}$  - усредненный за время переходного процесса коэффициент ухудшения теплоотдачи при пуске и торможении.

Знаменатель выражения (4.67) представляет собой эквивалентное по теплоотдаче время цикла:

$$t_{u.экв} = \frac{1 + \beta_{ym.o}}{2} \cdot (t_n + t_m) + t_{ycm} + \beta_{ym.o} t_o = \beta_{ym.cp} t_u, \quad (4.68)$$

где  $\beta_{ym.cp} = \frac{t_{u.экв}}{t_u}$  - усредненный за время цикла коэффициент ухудшения теплоотдачи.

Теперь с учетом (4.68) выражение (4.67) запишется в виде:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta A_n + \Delta P_{ycm} \cdot \left( \frac{ПВ}{100} t_u - t_n - t_m \right) + \Delta A_m}{\beta_{ym.cp} t_u} \leq \Delta P_n, \quad (4.69)$$

где  $\Delta P_n$  - номинальная мощность потерь в двигателе режима S3 при  $ПВ_n = 100\%$ .

Если в каталоге для двигателя режима S3 приводятся данные только для  $ПВ_n < 100\%$ , то номинальные потери  $\Delta P_n$ , определяемые по выражению (4.40), будут иметь место только в течение времени работы двигателя в цикле  $t_{ycm} = \frac{ПВ}{100} \cdot t_u - t_n - t_m$ . В этом случае в выражение (4.69) взамен  $\Delta P_n$  необходимо подставить средние номинальные за цикл работы потери  $\Delta P_{cp.n}$ . Эти потери определяются в соответствии с выражением (4.69) при номинальной нагрузке  $P_n$  и номинальной продолжительности включения  $ПВ_n$  выбранного двигателя при той же длительности цикла. Таким образом, в общем случае для двигателей режима S3 в выражении (4.69)  $\Delta P_n = \Delta P_{cp.n}$ . Подставив (4.64) в (4.69), получим выражение:

$$\Delta A_n + \Delta A_m - \Delta P_{ycm} \cdot (t_n + t_m) = \frac{3600}{N} \cdot \left( \Delta P_{cp} \cdot \beta_{ym.cp} - \Delta P_{ycm} \frac{ПВ}{100} \right). \quad (4.70)$$



Теперь при условии  $\Delta P_{cp} = \Delta P_{cp.n}$  из (4.70) определим допустимое число включений в час  $N_{доп}$ :

$$N_{доп} = \frac{3600 \cdot \left( \Delta P_{cp.n} \cdot \beta_{ym.cp} - \Delta P_{уст} \frac{ПВ}{100} \right)}{\Delta A_n + \Delta A_m - \Delta P_{уст} \cdot (t_n + t_m)}. \quad (4.71)$$

Мощность потерь в пусковых и тормозных режимах асинхронного короткозамкнутого асинхронного двигателя намного превышает мощность потерь в установившихся режимах, и поэтому в практических расчетах третьим слагаемым в знаменателе выражения (4.71) можно пренебречь (это слагаемое по величине составляет 3-5% от первых двух).

Кроме того, если в установившемся режиме двигатель работает с номинальной или близкой к номинальной нагрузкой ( $\Delta P_{уст} = \Delta P_{cp.n}$ ), выражение (4.71) упрощается еще больше и принимает вид:

$$N_{доп} = 3600 \frac{\Delta P_{cp.n} \cdot \left( \beta_{ym.cp} - \frac{ПВ}{100} \right)}{\Delta A_n + \Delta A_m}. \quad (4.72)$$

Влияние параметров асинхронного двигателя на допустимое число включений в час исследуем при условии, что при изменении  $N$ , продолжительность включения остается постоянной. Тогда

$$ПВ = \frac{t_n + t_{уст} + t_m}{t_u} \cdot 100 = ПВ_n. \quad (4.73)$$

При этом время установившейся работы будет равно:

$$t_{уст} = t_u - t_o - t_n - t_m = \frac{3600}{N} \cdot \frac{ПВ_n}{100} - t_n - t_m. \quad (4.74)$$

Следовательно, при увеличении  $N$  время  $t_{уст}$  будет уменьшаться и станет равным нулю тогда, когда

$$N_{max} = \frac{36 \cdot ПВ_n}{t_n + t_m}. \quad (4.75)$$

В этом случае зависимость  $\omega(t) = \omega_s(t)$  на рисунке 4.7 принимает вид треугольника, средняя скорость электропривода снижается почти в два

раза, а нагрев двигателя полностью определяется потерями энергии в переходных процессах [(4.65) и (4.66)]. Этот режим, как правило, недостижим, так как  $N_{don} < N_{max}$ , но даже при наличии участка установившегося движения влияние потерь  $\Delta P_{ycm} \cdot t_{ycm}$  на нагрев двигателя невелико.

Из выражения (4.71) с учетом вышесказанного следует, что увеличения допустимой частоты включений можно достичь или уменьшением потерь энергии в переходных процессах пуска и торможения ( $\Delta A_n + \Delta A_m$ ), или увеличением  $\beta_{ym.cp}$  до  $\beta_{ym.cp} = 1$  (применением независимой вентиляции двигателя).

Потери энергии в переходных процессах можно уменьшить применением двигателей с повышенным скольжением, глубоким пазом или двойной беличьей клеткой, у которых усредненное за время переходного процесса отношение  $R_1/R'_2$  меньше, чем у обычных двигателей. Также потери можно уменьшить, а  $N_{don}$  увеличить, используя вместо торможения противовключением режим динамического или механического торможения.

Но наиболее радикальное снижение потерь в переходных процессах достигается при использовании ступенчатого пуска и торможения в многоскоростных асинхронных двигателях, а также плавного пуска и торможения при частотном управлении электроприводом.

#### 4.11 Выводы по главе

1. При расчете необходимой мощности двигателя и его выборе должны быть учтены все ограничения, накладываемые на процессы электромеханического преобразования энергии по условиям нагрева, коммутации тока в коллекторных машинах, по максимальному моменту двигателей. Параметры выбираемого двигателя не должны выходить за рамки этих ограничений.

2. Полные потери мощности в двигателе, определяющие его нагрев, характеризуются КПД двигателя, величина которого зависит от нагрузки. Характер этой зависимости позволяет сделать вывод о том, что значительный запас по мощности при выборе двигателя и недоиспользование его в эксплуатации ухудшают энергетические показатели электропривода.

3. Потери энергии, выделяющиеся в переходных процессах в силовой цепи работающего вхолостую двигателя, мощность потерь в котором пропорциональна относительному перепаду скорости (скольжению), определяются запасом кинетической энергии движущихся масс электропривода и не зависят от момента двигателя и характера его изменения.

4. Потери энергии в переходных процессах можно снизить только уменьшением мощности скольжения, то есть регулированием скорости

идеального холостого хода двигателя во время протекания переходного процесса.

5. Все производственные механизмы с точки зрения режимов работы электропривода делятся на механизмы непрерывного и циклического действия. Для этих групп механизмов характерны вполне определенные типовые нагрузочные диаграммы, которые при определенном наборе данных легко рассчитываются.

6. Для более полного использования двигателей по нагреву и по перегрузочной способности действующим ГОСТом предусматривается восемь номинальных режимов работы электродвигателей, которые имеют условные обозначения S1-S8.

7. Поскольку нагрузочная диаграмма двигателя до его выбора построена быть не может, выбор двигателя осуществляется в три этапа:

1) по рассчитанной нагрузочной диаграмме исполнительного механизма с приблизительной оценкой влияния динамических нагрузок предварительно выбирается двигатель;

2) для выбранного двигателя рассчитывается его нагрузочная диаграмма, и двигатель проверяется по нагреву;

3) если двигатель перегружен или значительно недогружен, выбирается новый двигатель (с учетом степени перегрузки или недогрузки) и снова проверяется по нагреву.

8. Наиболее достоверные результаты при проверке выбранного двигателя по нагреву дает трудоемкий и требующий знания многих исходных данных метод средних потерь. В большинстве случаев без значительного уменьшения точности для проверки двигателя по нагреву может быть использован более простой метод эквивалентных величин (тока, момента, мощности).

9. Для асинхронных короткозамкнутых двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, из-за явления вытеснения тока на поверхность проводников проверка по нагреву осуществляется методом средних потерь путем определения допустимого числа включений в час.

#### **4.12 Литература, рекомендуемая для изучения**

1. **Ключев, В.И.** Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – с. 337-395.

2. **Чиликин, М.Г.** Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – с. 557-606.

3. **Чиликин, М.Г.** Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – с. 500-558.
4. **Андреев, В.П.** Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – 2-е изд., перераб. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1963. – с. 431-482.
5. **Голован, А.Т.** Основы электропривода / А.Т. Голован. – М.: Энергия, 1959. – с. 266-306.
6. **Чиликин, М.Г.** Общий курс электропривода: учеб. для вузов / М.Г. Чиликин., А.С. Сандлер. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – с. 325-387.
7. **Кувшинов, А.А.** Теория электропривода. Учебное пособие по курсовому проектированию / А.А. Кувшинов, В.М. Вакулюк, В.Б. Фатеев. – Оренбург, 2007. - с. 75-123.
8. Электротехнический справочник : В 4-х т. / Под ред. В.Г Герасимова, А.Ф. Дьякова, Н.Ф. Ильинского. - 8-е изд., испр. и доп. - М. : Изд-во МЭИ, 2002. Т.4. : Использование электрической энергии. - с. 38-42.

## Список использованных источников

1. **Ключев, В.И.** Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
2. **Чиликин, М.Г.** Теория автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.: ил.
3. **Чиликин, М.Г.** Основы автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
4. **Андреев, В.П.** Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин. – 2-е изд., перераб. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
5. **Голован, А.Т.** Основы электропривода / А.Т. Голован. – М.: Энергия, 1959. – 344 с.
6. **Чиликин, М.Г.** Общий курс электропривода: учеб. для вузов / М.Г. Чиликин., А.С. Сандлер. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 567 с.
7. **Вешеневский, С.Н.** Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
8. **Ильинский, Н.Ф.** Общий курс электропривода: учеб. для вузов / Н.Ф. Ильинский, В.Ф. Козаченко. - М. : Энергоатомиздат, 1992. - 544 с. : ил.
9. **Кувшинов, А.А.** Теория электропривода. Учебное пособие по курсовому проектированию / А.А. Кувшинов, В.М. Вакулук, В.Б. Фатеев. – Оренбург, 2007. - 124 с.
10. **Кувшинов, А.А.** Теория электропривода. Методические указания к расчетно-графической работе / А.А. Кувшинов, С.Р. Подлесная. – Оренбург, 2007. – 49 с.
11. Электротехнический справочник : В 4-х т. / Под ред. В.Г. Герасимова, А.Ф. Дьякова, Н.Ф. Ильинского. - 8-е изд., испр. и доп. - М. : Изд-во МЭИ, 2002. - ISBN 5-7046-0099-9. Т.4. : Использование электрической энергии. - 696с. - ISBN 5-7046-0751-9.
12. Электротехнический справочник : В 4-х т. / Под ред. В.Г. Герасимова, А.Ф. Дьякова. - 9-е изд., стер. - М. : Изд-во МЭИ, 2003. - ISBN 5-7046-00984-8. Т.2. : Электротехнические изделия и устройства. - 518 с. : ил. - ISBN 5-7046-00984-8