

**Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД**

*Допущено Учебно-методическим объединением  
по образованию в области энергетики и электротехники  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности 140604 «Электропривод и автоматика  
промышленных установок и технологических комплексов» направления  
подготовки 140600 – «Электротехника, электромеханика  
и электротехнологии»*

2-е издание

Издательство  
Томского политехнического университета  
2010

УДК 62-83  
ББК 31.291я73  
Д–30

**Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А.**  
Д–30 Электрический привод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ,  
2010. – 232 с.

В пособии изложены основы теории электропривода. Рассмотрены принципы действия разомкнутых и замкнутых систем электроприводов постоянного и переменного тока. Представлена методика и примеры расчета параметров двигателей, статических и динамических характеристик электроприводов.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» направления подготовки 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и может быть рекомендовано для студентов обучающихся по специальности 140211 «Электроснабжение» направления подготовки 140200 – «Электроэнергетика».

УДК 62-83  
ББК31.291я73

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским  
советом Томского политехнического университета

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор Томского  
университета систем управления и радиоэлектроники  
*В.А. Бейнарович*

Кандидат технических наук, доцент Северского  
технологического института национального  
исследовательского ядерного университета «МИФИ»  
*В.Б. Терехин*

© ГОУ ВПО Томский политехнический  
университет, 2008

© Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю.,  
Чернышев И. А., 2008

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2010

## ВВЕДЕНИЕ

Работа и развитие современной промышленности, сельского хозяйства, транспорта невозможна без автоматизированного электропривода.

В настоящее время основная масса эксплуатируемых в производстве регулируемых электроприводов выполнена на электрических двигателях постоянного тока. Однако, несмотря на то, что в большинстве развитых стран мира массовый выпуск регулируемых электроприводов постоянного тока прекращен с начала XXI века, установленные электроприводы постоянного тока еще долгие годы будут применяться в промышленности, так как их замена требует больших капитальных затрат.

На смену регулируемому электроприводу постоянного тока пришел регулируемый электропривод переменного тока, прежде всего на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей. Асинхронные двигатели были и остаются самыми распространенными электрическими машинами, но до недавнего времени они применялись в основном в нерегулируемых электроприводах для вращения механизмов, работающих с постоянной скоростью: вентиляторов, насосов, компрессоров, конвейеров. В последние годы, в связи с появлением новых поколений транзисторов и тиристоров, а также относительно недорогих микропроцессоров высокого быстродействия, выпуск и эксплуатация электроприводов переменного тока на базе асинхронных электродвигателей стала экономически целесообразнее.

Это объясняется также и тем, что технология производства асинхронных двигателей в настоящее время практически полностью автоматизирована. Механическая обработка станин, валов и роторов двигателей производится на автоматических линиях, штамповка листов магнитопровода – на пресс-автоматах. Автоматизирована сборка сердечников статора, механизирована сборка и заливка ротора [13]. Отсутствие щеточно-коллекторного узла значительно сократило эксплуатационные затраты на обслуживание электродвигателей переменного тока.

Таким образом, в настоящем пособии будет уделено внимание, как электроприводам постоянного тока, находящимся в настоящее время в эксплуатации, так и электроприводам переменного тока и наиболее перспективным способам регулирования их скорости.

Авторы поставили задачу обобщить имеющийся материал по электроприводу постоянного и переменного тока, добавив свои разработки и исследования.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.1. Общие положения

Электроприводом называется электромеханическая система, предназначенная для приведения в движение рабочих органов машин и механизмов и управления их технологическим процессом, состоящая из электродвигателя, преобразовательного устройства, устройства управления и передаточного устройства.

Функциональная схема автоматизированного электропривода представлена на рис. 1.1.

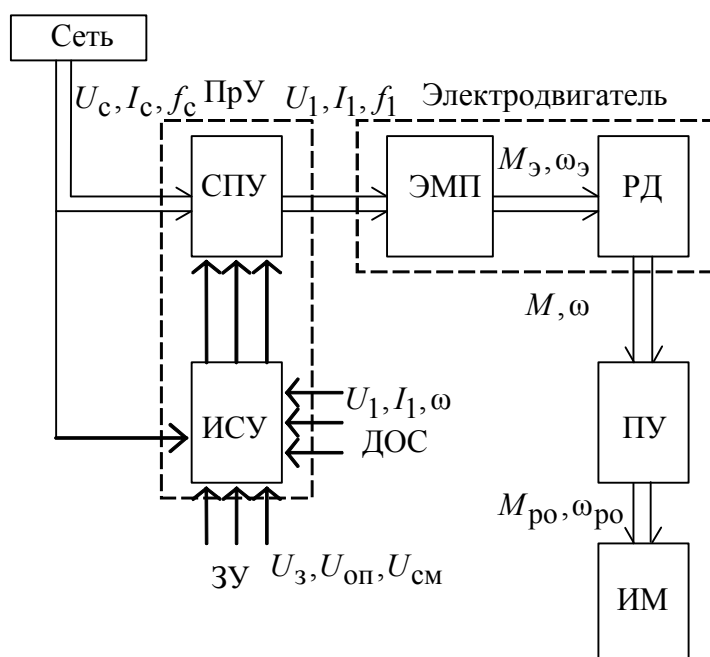


Рис. 1.1. Функциональная схема автоматизированного электропривода

На рис.1.1. приняты следующие обозначения:  
ПрУ – преобразовательное устройство;  
СПУ – силовое преобразовательное устройство;  
ИСУ – информационная система управления;  
ЭМП – электромеханический преобразователь;  
РД – ротор двигателя;  
ПУ – передаточное устройство;  
ИМ – рабочий орган исполнительного механизма;  
ЗУ – задающие устройства;  
ДОС – датчики обратной связи;

$U_c, f_c, I_c$  – напряжение, частота и ток, потребляемый электроприводом из сети;

$U_1, f_1, I_1$  – напряжение, частота и ток обмоток статора двигателя переменного тока;

$M_\vartheta, \omega_\vartheta$  – электромагнитный момент и скорость вращения магнитного поля, созданного обмотками статора;

$M, \omega$  – момент и скорость вращения двигателя;

$M_{po}, \omega_{po}$  – момент и скорость вращения рабочего органа исполнительного механизма;

$U_z, U_{оп}, U_{см}$  – задающие сигналы: задающее напряжение, опорное напряжение, напряжение смещения.

Из определения понятия «Электропривод» и его функциональной схемы следует, что электропривод состоит из четырех основных частей:

- электрического двигателя;
- силового преобразовательного устройства;
- передаточного устройства;
- системы управления.

Вначале рассмотрим коротко составные части электропривода.

*Электрические двигатели* предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. На рис. 1.1. электрический двигатель состоит из двух частей: электромеханического преобразователя энергии ЭМП, преобразующего электрическую энергию в электромагнитную, и ротора двигателя РД, в котором электромагнитная энергия преобразуется в механическую. Двигатель развивает момент  $M$  на валу ротора, который вращается с угловой скоростью  $\omega$ .

По роду потребляемого тока электрические машины делятся:

- на двигатели постоянного тока;
- двигатели переменного тока.

Различают следующие *электродвигатели постоянного тока*:

- независимого возбуждения;
- параллельного возбуждения;
- последовательного возбуждения;
- смешанного возбуждения;
- с возбуждением от постоянных магнитов;
- с полым немагнитным якорем;
- с печатным якорем;
- с полупроводниковым коммутатором;
- магнетогидродинамические электродвигатели и т. д.

*Электроприводы переменного тока* могут быть реализованы на базе следующих электродвигателей:

- асинхронных с короткозамкнутым ротором;
- асинхронных с фазным ротором;
- синхронных с независимым возбуждением;
- синхронных с постоянными магнитами;
- однофазных асинхронных двигателей;
- двойного питания;
- реактивных синхронных;
- синхронных гистерезисных;
- редукторных;
- линейных;
- коллекторных переменного тока;
- электровибрационных;
- емкостных и т. д.

*Силовые преобразовательные устройства (СПУ)* могут быть выполнены на базе следующих устройств:

- электромашинных преобразователей;
- электромагнитных преобразователей;
- полупроводниковых преобразователей.

*Передаточные устройства (ПУ)* предназначены для передачи механической энергии от электродвигателя к исполнительному механизму ИМ и согласования вида и характера движения электродвигателя и рабочего органа исполнительного механизма. Наиболее характерные типы передаточных устройств:

- редукторы;
- цепные передачи;
- ременные передачи;
- планетарные системы;
- кулисные механизмы;
- шарико-винтовая передача;
- электромагнитные муфты скольжения и т. д.

*Системы управления* электропривода представляют собой совокупность управляющих и информационных систем, предназначенных для управления электроприводом с целью обеспечения заданного движения рабочего органа исполнительного механизма. Принципиально системы управления различаются по уровню основных функций, которые они выполняют:

- пуск, реверс, торможение, а также поддержание угловой скорости с невысокой точностью в статике и динамике. Такую функцию выполняют разомкнутые релейно-контакторные системы управления электроприводов постоянного и переменного тока;
- поддержание скорости с высокой точностью в статике, а также формирование требуемых переходных процессов. Такую функцию выполняют системы преобразователь-двигатель с различными обратными связями, например, по скорости, току двигателя, напряжению преобразователя;
- слежение за любыми, произвольно изменяемыми входными воздействиями. Эту функцию выполняют следящие системы;
- обработка заданной программы. Такую функцию выполняют системы программного управления;
- выбор оптимальных режимов работы. Эту функцию выполняют адаптивные системы управления – автоматически изменяющие свою структуру или параметры системы управления с целью, например, выработки оптимальных режимов работы.

Выбор системы управления определяется как технологическим процессом, так и технико-экономическими обоснованиями.

## **1.2. Современный автоматизированный электропривод и тенденции его развития**

Современный автоматизированный электропривод практически полностью отвечает требованиям промышленности, сельского хозяйства и науки по требуемой мощности, диапазону регулирования скорости и плавности ее регулирования.

Пределы мощности используемых машин в электроприводах весьма широки – от десятков тысяч киловатт до долей ватт. Так, например, в прокатных станах Западно-Сибирского металлургического комбината используются электрические машины постоянного тока, а также синхронные двигатели мощностью 30 МВт. Для привода доменных воздуходувок применяются двигатели переменного тока мощностью 50 МВт. В то же время емкостные микродвигатели вращения с диаметром ротора до 100 мкм выполняются мощностью до  $10^{-6}$  Вт и частотой вращения до 50000 об/мин.

В 70-е годы XX века разработаны и выпускаются до настоящего времени в промышленных масштабах станочные электрические приводы постоянного тока с транзисторными и тиристорными преобразовате-

лями с диапазоном регулирования скорости до 1: (10000 ÷ 30000) и более.

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

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

На современной элементной базе получили возможность реализации следующие системы электроприводов:

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

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

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Назовите составные части электропривода.
2. Назовите основные типы электродвигателей.



## 2. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1. Уравнение механического движения

Согласно второму закону Ньютона (1687 г.) преобразованному для тел вращения:

$$M - M_c = M_{\text{дин}}, \quad (2.1)$$

где  $M$  – момент движения, Н·м;  $M_c$  – момент сопротивления, Н·м;  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент, Н·м.

Уравнение (2.1) в электроприводе получило также название «уравнение движения». Согласно уравнению движения, если  $M > M_c$ , то  $M_{\text{дин}} > 0$  и электропривод находится в состоянии ускорения. Если  $M < M_c$ , то  $M_{\text{дин}} < 0$  – электропривод замедляется или тормозится. И, наконец, если  $M = M_c$ , то  $M_{\text{дин}} = 0$  – электропривод находится в состоянии покоя или равномерного установившегося движения.

Таким образом, динамический момент проявляется и действует только в переходных режимах при ускорении и замедлении электропривода. То есть тогда, когда меняется кинетическая энергия электропривода. Выражение для определения динамического момента  $M_{\text{дин}}$  найдем из уравнения, определяющего запас кинетической энергии во вращающемся теле:

$$A = \frac{J \cdot \omega}{2}, \quad (2.2)$$

где  $J = m \cdot r^2$  – момент инерции тела, обладающего массой  $m$ , кг·м<sup>2</sup>;  $r$  – радиус вращающегося тела правильной цилиндрической формы, м.

Мощность, которую вращающиеся массы получают при ускорении электропривода или отдают при торможении:

$$P_{\text{дин}} = \frac{dA}{dt} = J \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}. \quad (2.3.)$$

Тогда динамический момент можно найти из выражения

$$M_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{дин}}}{\omega} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}. \quad (2.4)$$

Уравнение для определения динамического момента состоит из двух составляющих: первое из них определяет изменение динамического момента при изменении угловой скорости  $\omega$  электропривода, второе – при изменении его момента инерции  $J$ .

В электроприводе изменение момента инерции наблюдается в механизмах роботов или манипуляторов, в том случае, когда во время их

вращения вокруг центральной оси меняется вылет руки. Пример, показывающий изменение момента инерции во время вращения, можно наблюдать у фигуристов, выполняющих элемент «вращение». Прижимая руки к телу во время вращения, фигурист уменьшает собственный момент инерции. Так как кинетическая энергия при этом не изменяется, то его скорость вращения резко возрастает. При проектировании электроприводов необходимо помнить, что такие же процессы происходят и в кинематике некоторых типов электроприводов.

В тех случаях, когда момент инерции электропривода  $J$  во времени не изменяется, вторым членом в правой части уравнения (2.4) пренебрегают и динамический момент определяют по выражению

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.5)$$

Таким образом, динамический момент в электроприводе проявляется в большинстве практических случаев только при ускорении или замедлении.

Момент движения в электроприводе обычно обеспечивает электрический двигатель и только в ряде случаев – рабочий орган производственного механизма, а электрическая машина тормозит его, обеспечивая равномерность движения.

Момент движения  $M$  электрической машины является функцией ее скорости  $\omega$ . Зависимость между скоростью  $\omega$  электрической машины и ее моментом  $M = f(\omega)$  называют механической характеристикой. Механические характеристики электрических машин изображают в виде графиков в правой декартовой системе координат (рис. 2.1.).

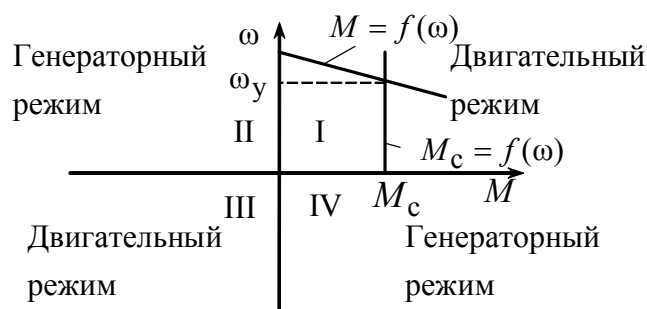


Рис. 2.1. Механические характеристики

Для удобства рассмотрения процессов, происходящих в электроприводе, одно из двух возможных направлений вращения двигателя считают положительным. Как правило, за положительное направление вращения двигателя принимают вращение, совпадающее с направлением вращения часовой стрелки. Принимают момент электродвигателя с

тем же знаком, что и угловая скорость, если их направления совпадают. В системах электропривода основным режимом работы электрической машины является двигательный режим. Двигательный режим работы электрической машины располагают в первом и третьем квадрантах. Генераторные режимы работы электрической машины располагают во втором и четвертом квадрантах.

В установившемся режиме работы момент сопротивления  $M_c$  имеет тормозящий характер и действует навстречу моменту двигателя. Для простоты нахождения установившегося режима работы электропривода принимают за положительное направление момента сопротивления  $M_c$ , противоположное положительному направлению момента двигателя. На рис. 2.1 установившееся значение скорости определено в соответствии с формулой (2.1) при равенстве по абсолютной величине момента движения  $M$  и момента сопротивления  $M_c$ .

## 2.2. Механические характеристики электродвигателей

При рассмотрении работы электропривода, вращающего рабочий орган производственного механизма, необходимо, прежде всего, выявить соответствие механических свойств электродвигателя и производственного механизма. Поэтому для правильного проектирования и экономичной эксплуатации электропривода необходимо изучить и механические характеристики электрических машин, и производственных механизмов.

Механическая характеристика электродвигателя определяет зависимость его скорости  $\omega$  от развиваемого им момента  $M$ . Часто вместо угловой скорости  $\omega$  используют внесистемную физическую величину – частоту вращения  $n$ , так как эти величины пропорциональны друг другу:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}. \quad (2.6)$$

В этом случае механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его частоты вращения  $n$  от развиваемого им момента  $M$ , то есть  $n = f(M)$ .

Степень изменения скорости с изменением момента у различных типов электрических машин неодинакова и различается в зависимости от жесткости механических характеристик (см. рис. 2.2).

Под жесткостью механической характеристики  $k_\beta$  будем понимать отношение приращения момента  $\Delta M$  к приращению скорости двигателя  $\Delta\omega$ :

$$k_\beta = \frac{M_1 - M_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\Delta M}{\Delta\omega}, \quad (2.7)$$

где  $M_1, \omega_1$  – момент и угловая скорость в первой точке механической характеристики;  $M_2, \omega_2$  – момент и угловая скорость во второй точке механической характеристики.

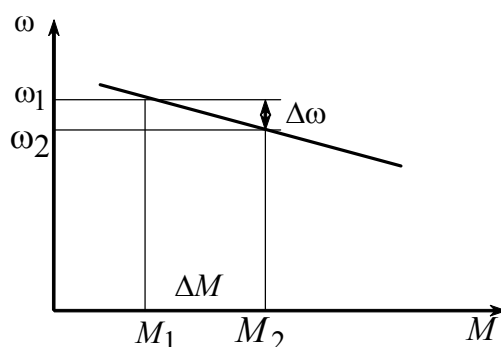


Рис. 2.2. Определение жесткости механической характеристики

Механические характеристики электродвигателей можно разделить на четыре основных типа в зависимости от их жесткости  $k_\beta$ :

- абсолютно жесткая механическая характеристика, при которой скорость с изменением момента остается неизменной. Из (2.7) следует, что если  $\Delta\omega = 0$ , то  $k_\beta = \infty$ . Такой характеристикой обладают синхронные двигатели (зависимость 1 на рис. 2.3);
- жесткая механическая характеристика, отличающаяся незначительным изменением угловой скорости с изменением момента. Жесткой механической характеристикой обладают асинхронные двигатели (кривая 2, рис. 2.3.) и двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения (кривая 3, рис. 2.3);
- мягкая механическая характеристика отличается значительным изменением угловой скорости с изменением момента. Такой характеристикой обладают двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (кривая 4, рис. 2.3) и двигатели постоянного тока смешанного возбуждения (кривая 5, рис. 2.3);
- абсолютно мягкая механическая характеристика, при которой момент двигателя остается неизменным с изменением угловой скорости.

сти. Из выражения (2.7) следует, что если  $\Delta M = 0$ , то  $k_B = 0$ . Абсолютно мягкой механической характеристикой обладают двигатели постоянного тока независимого возбуждения при питании обмотки якоря от источника тока (зависимость 6 на рис. 2.3).

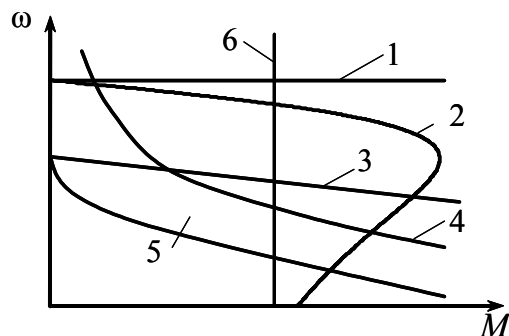


Рис. 2.3. Механические характеристики электродвигателей

При любом типе механической характеристики электродвигателя вращающий момент двигателя определяется нагрузкой на его валу, то есть моментом сопротивления  $M_c$ .

### 2.3. Механические характеристики производственных механизмов

Под механической характеристикой производственного механизма будем понимать зависимость момента сопротивления  $M_c$  механизма от его угловой скорости:  $M_c = f(\omega)$ . При изображении механических характеристик двигателя и производственного механизма в одной системе координат их приводят к одной оси вращения, как правило, к валу двигателя.

Несмотря на большое разнообразие производственных механизмов, различающихся как по потребляемой мощности, так и по принципу действия, их механические характеристики можно разделить на пять основных типов:

- Независящая от угловой скорости механическая характеристика производственного механизма. К таким механизмам относятся те из них, у которых преобладающим моментом является момент от сил трения: механизмы подачи металлорежущих станков, механизмы перемещения подъемных кранов, конвейеры, поршневые насосы. Уравнение механической характеристики

$$M_c = M_{c1} = \text{const}, \quad (2.8)$$

где  $M_{c1}$  – момент сопротивления от сил трения в движущихся частях производственного механизма.

Графически независящая от угловой скорости механическая характеристика производственного механизма приведена на рис. 2.4, зависимость 1.

- Линейно-возрастающая механическая характеристика производственного механизма. Такой характеристикой обладают генераторы постоянного тока, работающие на постоянную нагрузку, обжимные валки прокатных станков, гладильные машины. Уравнение механической характеристики имеет вид

$$M_c = M_{c2} + a \cdot \omega, \quad (2.9)$$

где  $M_{c2}$  – момент сопротивления от сил трения в движущихся частях производственного механизма;  $a$  – коэффициент пропорциональности.

График линейно-возрастающей механической характеристики производственного механизма приведен на рис. 2.4, зависимость 2

- Нелинейно-возрастающая механическая характеристика производственного механизма. Такой характеристикой обладают механизмы с центробежным характером производственного процесса: вентиляторы, центробежные насосы, центрифуги, гребные винты. Уравнение механической характеристики имеет вид

$$M_c = M_{c3} + b \cdot \omega^x, \quad (2.10)$$

где  $M_{c3}$  – момент сопротивления от сил трения в движущихся частях производственного механизма;  $b$  – коэффициент пропорциональности;  $x$  – показатель степени; при  $x = 2$  – движение в газообразной среде, при  $x = 3$  – движение в жидкости.

График нелинейно-возрастающей механической характеристики производственного механизма приведен на рис. 2.4, зависимость 3.

- Нелинейно-спадающая механическая характеристика производственного механизма. Такой характеристикой обладают главные электроприводы обрабатывающих станков: металлообрабатывающих, фанерострогальных и др. В таких станках момент резания меняется обратно пропорционально скорости резания. Например, тонкое сверло – большая скорость вращения патрона, сверло большого диаметра – маленькая скорость вращения патрона. Уравнение механической характеристики имеет вид

$$M_c = M_{c4} + c \cdot \omega^{-1}, \quad (2.11)$$

где  $M_{c4}$  – момент сопротивления от сил трения в движущихся частях производственного механизма;  $c$  – коэффициент пропорциональности.

График нелинейно-спадающей механической характеристики производственного механизма приведен на рис. 2.4, зависимость 4.

- Механическая характеристика производственного механизма с повышенным пусковым моментом. Такой характеристикой обладают миксеры, некоторые механизмы перемешивания жидких сред, например краски и другие. В таких механизмах, после того как в ограниченном пространстве начнет вращаться вся жидкость, момент сопротивления резко падает. В некоторых механизмах большой пусковой момент развивается в начале трогания, например, в электроприводе главного движения трамвая, электропоезда, механизма гайговертов при откручивании гаек. У таких механизмов в начале движения действуют большие межмолекулярные силы притяжения.

График механической характеристики производственного механизма с повышенным пусковым моментом приведен на рис. 2.4, зависимость 5.

Как уже отмечалось, работе электропривода в установившемся режиме соответствует равенство моментов двигателя и момента сопротивления. С целью поддержания наиболее устойчивой скорости электропривода при случайных изменениях момента сопротивления производственного механизма, в первую очередь обусловленного несоосностью и эксцентриситетом сопрягающих валов, необходимо обеспечить пересечение механической характеристики двигателя и механической характеристики механизма, приведенного к валу двигателя под углом, наиболее близким к прямому.

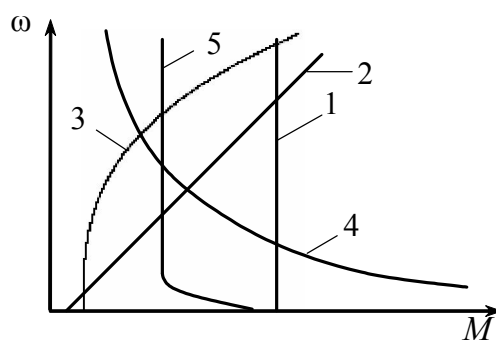


Рис. 2.4. Механические характеристики производственных механизмов

По характеру действия все виды статических моментов можно разделить на:

- реактивные;
- активные.

Реактивными моментами обладают почти все механизмы — то есть те механизмы, у которых момент создается силами трения. Такие мо-

менты всегда препятствуют движению и поэтому меняют свой знак с изменением направления движения. Механические характеристики производственных механизмов с реактивными моментами приведены на рис. 2.5, зависимости  $M_c = f(\omega)$ . Там же показаны механические характеристики двигателя постоянного тока и скорости его установившегося движения.

Небольшая группа механизмов создает активный момент. Механизмы с активным моментом не только препятствуют движению, но при определенных условиях сами создают вращение электропривода. Очевидно, что электрическая машина с целью обеспечения постоянства скорости переходит в тормозной режим.

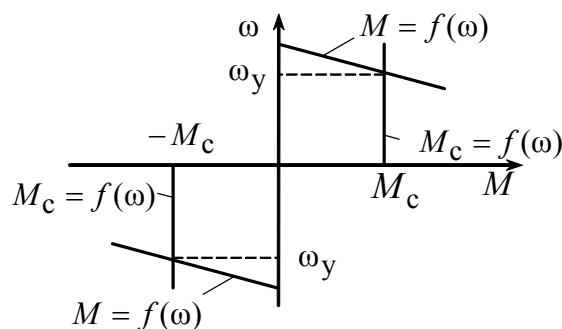


Рис. 2.5. Механические характеристики производственных механизмов с реактивными моментами

Активные моменты сохраняют свой знак при изменении направления вращения. Характерным примером механизма с активным моментом является лебедка или механизм подъема крана. Механические характеристики производственных механизмов с активными моментами приведены на рис. 2.6, зависимость  $M_c = f(\omega)$ . Там же показаны механические характеристики асинхронного двигателя и скорости его установившегося движения.

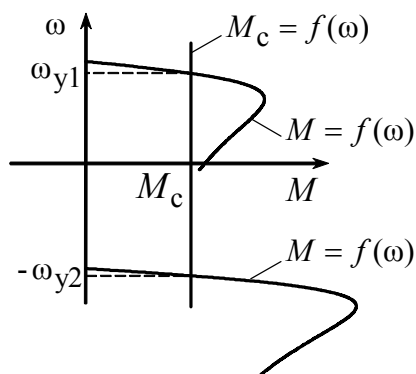


Рис. 2.6. Механическая характеристика производственного механизма с активным моментом



Отметим, что на практике механизмы с активным моментом в чистом виде не существуют, так как в механизмах подъема всегда присутствует трение, а следовательно, и реактивный момент.

## 2.4. Статическая устойчивость механического движения

Установившийся режим работы электропривода вытекает из уравнения движения (2.1) при равенстве момента, развиваемого электрической машиной, и момента сопротивления на ее валу. При этом динамический момент будет равен нулю. В качестве примера определение установившегося значения скорости графически приведено на рис. 2.1. Однако для более сложной механической характеристики асинхронного двигателя могут существовать две точки  $\omega_{y1}$  и  $\omega_{y2}$ , определяющие равенство момента движения  $M$  и момента сопротивления  $M_c$  (рис. 2.7).

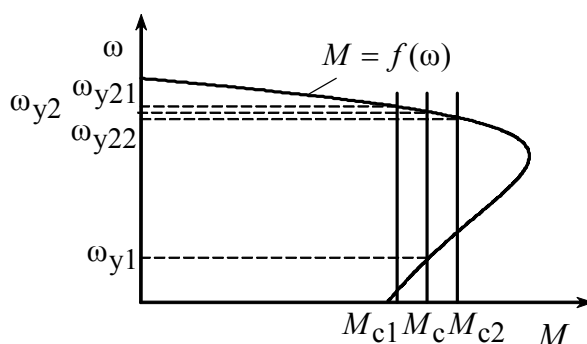


Рис. 2.7. Определение статической устойчивости механического движения

Рассмотрим работу электропривода в точке установившегося вращения  $\omega_{y1}$ . Как уже отмечалось ранее, в электроприводе практически всегда возникают проблемы при соединении электрической машины и нагрузки. Основные трудности возникают из-за несоосности и эксцентриситета вращающихся валов. В этом случае нагрузка на валу двигателя все время изменяется. При ее незначительном увеличении, например, до значения  $M_{c2}$ , в соответствии с уравнением движения  $M - M_{c2} = M_{дин}$ , динамический момент  $M_{дин}$  уменьшится, а это в свою очередь приведет к уменьшению скорости двигателя. В соответствии с механической характеристикой двигателя его момент также уменьшится, динамический момент  $M_{дин}$  уменьшится вновь, что в конечном итоге приведет к полной остановке электропривода.

При уменьшении момента сопротивления на валу двигателя, например до значения  $M_{c1}$ , динамический момент  $M_{дин}$  увеличится, что в соответствии с уравнением движения приведет к увеличению скорости двигателя. Момент двигателя возрастет, возникнет дополнительный ускоряющий динамический момент, который заставит электропривод разогнаться до новой установившейся скорости  $\omega_{y22}$ .

Рассмотрим работу электропривода в точке установившегося вращения  $\omega_{y2}$ . Если по какой-либо причине нагрузка на валу двигателя возрастет, например, до значения  $M_{c2}$ , то в соответствии с уравнением движения  $M - M_{c2} = M_{дин}$  динамический момент  $M_{дин}$  уменьшится, что приведет к торможению электропривода. Новая точка установившейся работы  $\omega_{y22}$  будет определяться равенством момента движения и момента сопротивления на валу двигателя, то есть при  $M = M_{c2}$ .

Аналогично ведет себя электропривод при уменьшении момента сопротивления на валу двигателя – он перейдет в новую точку установившегося вращения  $\omega_{y21}$ .

В общем случае условие статической устойчивости электропривода в окрестностях некоторой точки  $\omega_y$  определяется неравенством:

$$k_{\beta} - k_{\beta c} < 0, \quad (2.12)$$

где  $k_{\beta c} = \frac{dM_c}{d\omega} \approx \frac{\Delta M_c}{\Delta \omega}$  – статическая жесткость механической характеристики производственного механизма, приведенная к валу двигателя.

Статическая устойчивость электропривода при известных аналитических уравнениях механических характеристик электродвигателя и производственного механизма легко определяется по выражению (2.12) путем численного дифференцирования характеристик по скорости  $\omega$ .

## 2.5. Приведение моментов к одной оси вращения

При совершении полезной работы рабочий орган исполнительного механизма ИМ получает механическую энергию от ротора двигателя РД через передаточное устройство ПУ. Кинематическая схема такого механизма приведена на рис. 2.8.

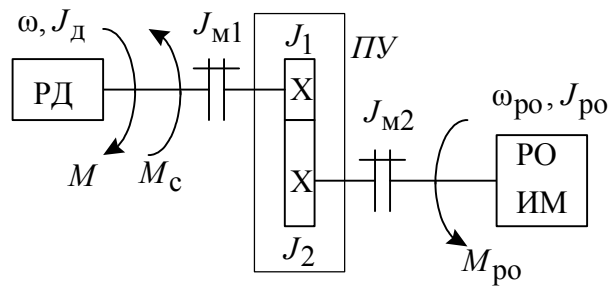


Рис. 2.8. Механическая часть электропривода

На рис. 2.8 приняты следующие обозначения:

РД – ротор двигателя;

ПУ – передаточное устройство;

РОИМ – рабочий орган исполнительного механизма;

$M, \omega$  – момент и скорость вращения двигателя;

$M_c$  – момент сопротивления, приведенный к валу двигателя;

$M_{po}, \omega_{po}$  – момент и скорость вращения рабочего органа исполнительного механизма;

$J_d$  – момент инерции двигателя;

$J_{m1}, J_{m2}$  – моменты инерции соединительных муфт;

$J_1, J_2$  – моменты инерции шестерни и колеса;

$J_{po}$  – момент инерции рабочего органа исполнительного механизма.

Редуктор понижает скорость вращения выходного вала в передаточное число раз

$$i_{\Pi} = \frac{\omega}{\omega_{po}}. \quad (2.13)$$

Принцип приведения момента сопротивления от рабочего органа исполнительного механизма к валу электродвигателя заключается в равенстве мощностей на валу двигателя и на валу рабочего органа.

Механическая мощность рабочего органа исполнительного механизма определяется выражением

$$P_{po} = M_{po} \cdot \omega_{po}. \quad (2.14)$$

Механическая мощность на валу электродвигателя при реактивной нагрузке, с учетом потерь мощности в передаточном устройстве:

$$P_c = M_c \cdot \omega \cdot \eta_{\Pi}, \quad (2.15)$$

где  $\eta_{\Pi}$  – КПД передаточного устройства.

Приравнявая правые части уравнений (2.15) и (2.14), получим

$$M_c \cdot \omega \cdot \eta_{\Pi} = M_{po} \cdot \omega_{po}. \quad (2.16)$$

Решим (2.16) относительно  $M_c$ , с учетом (2.13) найдем выражение для момента сопротивления при реактивной нагрузке исполнительного механизма:

$$M_c = \frac{M_{po}}{i_{\Pi} \cdot \eta_{\Pi}}. \quad (2.17)$$

При активной нагрузке поток мощности направлен от механизма к электродвигателю. Механическая мощность на валу электродвигателя, с учетом потерь мощности в передаточном устройстве, определяется выражением

$$P_c = \frac{M_c \cdot \omega}{\eta_{\Pi}}. \quad (2.18)$$

Приравнивая правые части уравнений (2.18) и (2.14), с учетом (2.13), получим выражение для момента сопротивления, приведенного к валу двигателя при активной нагрузке исполнительного механизма и работе электропривода в четвертом квадранте:

$$M_c = \frac{M_{po} \cdot \eta_{\Pi}}{i_{\Pi}}. \quad (2.19)$$

Анализ уравнений (2.17) и (2.19) показывает, что при учете потерь в кинематике производственного механизма при активной нагрузке момент сопротивления при подъеме и спуске груза будет различным.

## 2.6. Приведение моментов инерции к одной оси вращения

Для упрощения расчета переходных процессов электропривод, обладающий распределенными моментами инерции  $J_d, J_{M1}, J_1, J_2, J_{M2}, J_{po}$  (см. рис. 2.8), сводят к одномассовой системе с эквивалентным моментом инерции  $J_{\Sigma}$ . Эквивалентная одномассовая система электропривода (рис. 2.9), имеющая момент инерции  $J_{\Sigma}$ , вращается со скоростью электродвигателя  $\omega$ .

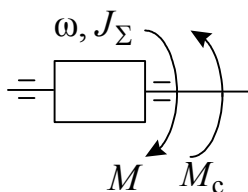


Рис. 2.9. Эквивалентная одномассовая система электропривода

Приведение моментов инерции к одной оси вращения производится на основании принципа сохранения кинетической энергии исходной многомассовой системы с распределенными моментами инерции и одномассовой системы с эквивалентным моментом инерции  $J_{\Sigma}$  :

$$J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} = J_{\text{д}} \frac{\omega^2}{2} + J_{\text{м1}} \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega^2}{2} + J_2 \frac{\omega_{\text{po}}^2}{2} + J_{\text{м2}} \frac{\omega_{\text{po}}^2}{2} + J_{\text{po}} \frac{\omega_{\text{po}}^2}{2}. \quad (2.20)$$

Разделим правую и левую части уравнения (2.20) на  $\frac{\omega^2}{2}$ , получим

$$J_{\Sigma} = J_{\text{д}} + J_{\text{м1}} + J_1 + J_2 \frac{\omega_{\text{po}}^2}{\omega^2} + J_{\text{м2}} \frac{\omega_{\text{po}}^2}{\omega^2} + J_{\text{po}} \frac{\omega_{\text{po}}^2}{\omega^2}$$

или после преобразований, с учетом (2.13):

$$J_{\Sigma} = J_{\text{д}} + J_{\text{м1}} + J_1 + \frac{J_2 + J_{\text{м2}} + J_{\text{po}}}{i_{\text{п}}^2}. \quad (2.21)$$

Во многих практических расчетах моменты инерции муфты  $J_{\text{м1}}$  и шестерни редуктора  $J_1$  учитываются коэффициентом  $k_{\text{пу}} = 1,05 \div 1,3$ , причем большие его значения относятся к электроприводам меньшей мощности. В этом случае

$$J_{\Sigma} = k_{\text{пу}} \cdot J_{\text{д}} + \frac{J_2 + J_{\text{м2}} + J_{\text{po}}}{i_{\text{п}}^2}. \quad (2.22)$$

В многоступенчатых редукторах моментом инерции промежуточных колес и шестерен, как правило, пренебрегают.

### Контрольные вопросы и задания

1. Запишите уравнение движения электропривода. Поясните возможные состояния электропривода на основании уравнения движения.
2. Что такое момент инерции тела вращения?
3. В каких энергетических режимах работает электрическая машина?
4. Что называется механической характеристикой электродвигателя?
5. Дайте определение естественной механической характеристики электродвигателя.
6. Что такое жесткость механической характеристики?
7. Изобразите механические характеристики известных Вам двигателей.

8. Назовите основные типы механических характеристик производственных механизмов.

9. Поясните основные условия статической устойчивости механического движения.

10. С какой целью осуществляется приведение моментов электропривода к одной оси вращения?

11. С какой целью и как осуществляется приведение моментов инерции электропривода к одной оси вращения?

12. В чем отличие расчета приведенного момента сопротивления при реактивной и активной нагрузке?

13. Что такое динамический момент электропривода и когда он проявляется?

14. Как с помощью механической характеристики электродвигателя и производственного механизма определяется установившаяся скорость?

### 3. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 3.1. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Обмотки якоря и возбуждения двигателя постоянного тока независимого возбуждения запитываются от различных источников напряжения, как показано на рис. 3.1.

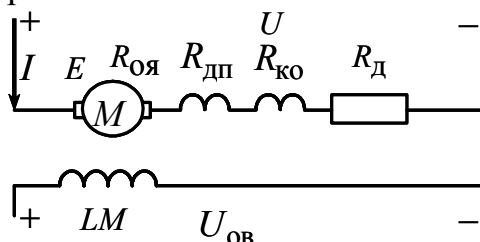


Рис. 3.1. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Приведенная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения содержит дополнительные полюса с активным сопротивлением  $R_{дп}$  и компенсационную обмотку с активным сопротивлением  $R_{ко}$ . Двигатели постоянного тока выполняют с дополнительными полюсами с целью улучшения процессов коммутации. Компенсационная обмотка в машинах постоянного тока обеспечивает компенсацию поперечной составляющей реакции якоря.

Дополнительные обозначения, принятые на рис. 3.1:

$M$  – обмотка якоря двигателя;

$LM$  – обмотка возбуждения;

$U$  – напряжение обмотки якоря, В;

$I$  – ток обмотки якоря, А;

$E$  – ЭДС обмотки якоря, В;

$R_{оя}$  – активное сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{д}$  – добавочное сопротивление цепи обмотки якоря, Ом;

$U_{об}$  – напряжение обмотки возбуждения, В.

Вывод уравнений статических характеристик двигателя постоянного тока проведем с учетом следующих допущений:

- щетки якоря стоят на геометрической нейтрале, поэтому поперечную реакцию якоря не учитываем и считаем поток, созданный обмоткой возбуждения, постоянным;

- потерями в подшипниках, щеточно-коллекторном узле и на вентиляцию пренебрегаем, то есть считаем момент на валу двигателя равным электромагнитному моменту.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для якорной цепи электродвигателя:

$$U = E + I \cdot R_{яц}, \quad (3.1)$$

где  $R_{яц} = R_{дв} + R_{д}$  – полное сопротивление цепи обмотки якоря;  $R_{дв} = R_{оя} + R_{дп} + R_{ко}$  – сопротивление двигателя, равное сумме сопротивлений обмотки якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки.

ЭДС обмотки якоря можно найти в соответствие с уравнением Максвелла:

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (3.2)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения, Вб;  $\omega$  – угловая скорость двигателя, рад/с;  $k = z_p \cdot N / (2 \cdot \pi \cdot a)$  – конструктивный коэффициент двигателя постоянного тока;  $z_p$  – число пар полюсов двигателя;  $N$  – число витков обмотки якоря;  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Подставив (3.2) в (3.1) и решив полученное выражение относительно угловой скорости  $\omega$ , получим уравнение электромеханической характеристики двигателя постоянного тока:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - I \frac{R_{яц}}{k \cdot \Phi}. \quad (3.3)$$

В соответствие с (3.3), *электромеханической характеристикой* двигателя постоянного тока называют зависимость его угловой скорости  $\omega$  от тока якоря двигателя  $I$ .

Электромагнитный момент двигателя находится из уравнения Фарадея:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I. \quad (3.4)$$

Решим это равенство относительно тока якоря двигателя  $I$  и подставим его в (3.3), получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - M \frac{R_{яц}}{(k \cdot \Phi)^2}. \quad (3.5)$$

*Механической характеристикой* двигателя постоянного тока называют зависимость его угловой скорости  $\omega$  от момента двигателя  $M$ .

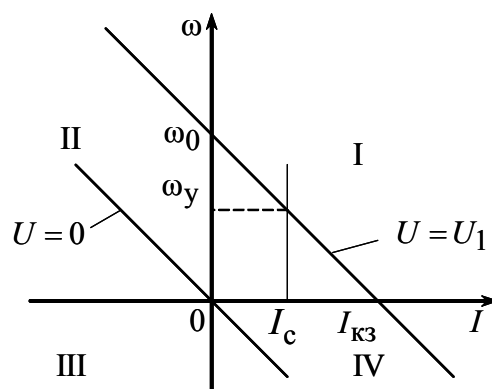
Различают естественную и искусственные механические характеристики двигателя постоянного тока.



*Естественной механической характеристикой* двигателя постоянного тока называют зависимость угловой скорости двигателя  $\omega$  от момента его  $M$ , полученную при номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах напряжения обмоток якоря и возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя. *Все остальные характеристики называют искусственными.* С помощью искусственных характеристик производят регулирование скорости двигателя. Как следует из уравнений (3.3) и (3.5), регулировать скорость двигателя постоянного тока независимого возбуждения можно тремя основными способами:

- изменением добавочного активного сопротивления  $R_d$  в цепи обмотки якоря двигателя;
  - изменением подводимого к обмотке якоря напряжения  $U$ ;
  - изменением потока возбуждения двигателя  $\Phi$ ,
- а также изменением различных комбинаций этих параметров.

Выражения (3.3) и (3.5) при неизменных параметрах  $R$ ,  $U$ ,  $\Phi$  представляют собой уравнения прямой линии. В качестве примера на рис. 3.2. приведены электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, построенные в четырех квадрантах.



*Рис. 3.2. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения*

Как уже отмечалось, в первом квадранте электрическая машина постоянного тока независимого возбуждения работает в двигательном режиме, преобразуя электрическую энергию в механическую. Двигательный режим работы ограничен двумя характерными точками:

1. Первая координата точки определяется при токе якоря, равном нулю, вторая координата получается из уравнения (3.3) при подстановки в него  $I = 0$ . Скорость двигателя, соответствующая нулевому току якоря, называется *скоростью идеального холостого хода*:

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi}. \quad (3.6)$$

В режиме идеального холостого хода двигатель не получает питания по цепи обмотки якоря из питающей сети.

2. Первая координата второй точки соответствует скорости двигателя, равной нулю. При подстановке в (3.3)  $\omega = 0$  получим *ток якоря двигателя короткого замыкания*

$$I_{кз} = \frac{U}{R_{яц}}. \quad (3.7)$$

Мощность двигателя равняется нулю, так как его скорость  $\omega = 0$ , а вся получаемая из сети энергия расходуется на нагрев сопротивлений якорной цепи двигателя  $R_{яц} = R_{дв} + R_{д}$ .

*Генераторный режим работы электрической машины независимого возбуждения параллельно с сетью* или *режим рекуперативного торможения* возникает, если скорость вращения машины превышает скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ . Электрическая машина работает во втором квадранте. При этом ЭДС машины  $E$  становится больше напряжения обмотки якоря  $U$  и в соответствии с выражением (3.1) ток якоря меняет знак, становясь отрицательным:

$$I = \frac{U - E}{R_{яц}}. \quad (3.8)$$

При работе электрической машины генератором параллельно с сетью она получает механическую энергию от рабочего органа исполнительного механизма и преобразует ее в электрическую. Необходимо помнить, что электрическая энергия, возвращаемая в цепь источника напряжения обмотки якоря, должна потребляться параллельно включенной якорю нагрузкой.

При работе электрической машины в четвертом квадранте наступает *режим торможения противовключением* или *генераторный режим работы последовательно с сетью*. В этом генераторном режиме энергия в сеть, питающую обмотку якоря, не отдается. Скорость вращения электрической машины меняется на противоположную двигательному режиму работы, то есть при данной схеме включения – становится отрицательной. Режим работы возникает при преобразовании потенциальной энергии в электрическую (активная нагрузка на валу двигателя)

или при преобразовании кинетической энергии в электрическую (торможение двигателя при смене полярности напряжения на обмотке якоря на противоположную). Во всех случаях ЭДС якоря электрической машины будет иметь тот же знак, что и напряжение обмотки якоря. Ток, протекающий по обмотке якоря, определяется уравнением

$$I = \frac{U - (-E)}{R_{\text{яц}}} = \frac{U + E}{R_{\text{яц}}}. \quad (3.9)$$

Электрическая энергия от протекающего по якорю тока рассеивается на активных сопротивлениях якорной цепи двигателя  $R_{\text{яц}} = R_{\text{дв}} + R_{\text{д}}$ , преобразуясь в тепловую. Энергетически режим торможения противовключением самый неблагоприятный из всех режимов работы электрической машины независимого возбуждения.

На рис. 3.2 приведена электромеханическая характеристика, проходящая через начало координат. Такой режим работы электрической машины возможен при ее отключении от источника напряжения якоря ( $U = 0$ ), а для возможности протекания тока якоря – при замыкании через добавочное сопротивление накоротко. В этом случае режим работы электрической машины постоянного тока независимого возбуждения называется *динамическим торможением*. Схема включения электрической машины в режиме динамического торможения приведена на рис. 3.3.

Уравнение электромеханической характеристики образуется из выражения (3.3) при подстановке в него напряжения якоря  $U = 0$ :

$$\omega = -I \frac{R_{\text{яц}}}{k \cdot \Phi}. \quad (3.10)$$

Ток в якоре электрической машины протекает за счет ЭДС  $E = k \cdot \Phi \cdot \omega$ :

$$I = \frac{E}{R_{\text{яц}}}. \quad (3.11)$$

Режим работы возникает при преобразовании потенциальной энергии в электрическую (активная нагрузка на валу двигателя) или при преобразовании кинетической энергии в электрическую (торможение двигателя при уменьшении напряжения на обмотке якоря до нуля). Электрическая энергия от протекающего по якорю тока также рассеивается на активных сопротивлениях якорной цепи двигателя  $R_{\text{яц}} = R_{\text{дв}} + R_{\text{д}}$ , преобразуясь в тепловую.

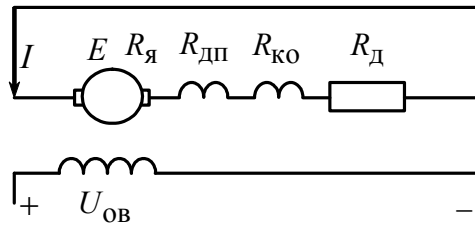


Рис. 3.3. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения в режиме динамического торможения

### 3.2. Статическая и динамическая характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Уравнения (3.3) и (3.5) называют статическими электромеханической и механической характеристиками двигателя постоянного тока, так как они описывают электропривод в статике, то есть значения координат двигателя получаются в установившемся режиме работы.

Как следует из графика электромеханической характеристики, построенной при напряжении якоря  $U = U_1$ , при пуске двигателя из неподвижного состояния ток двигателя будет постепенно уменьшаться от пускового значения  $I_{кз}$  до тех пор, пока он не сравняется со статическим током  $I_c$ , соответствующим моменту сопротивления  $M_c$  на валу двигателя. Установившемуся режиму работы двигателя будет соответствовать скорость  $\omega_y$ .

Статическая электромеханическая характеристика описывает процесс пуска двигателя только при очень медленном изменении скорости, например, при большом моменте инерции электропривода. В действительности процесс изменения скорости при пуске двигателя происходит по другой траектории, называемой *динамической электромеханической характеристикой* двигателя. Примерный вид динамической механической характеристики двигателя при пуске приведен на рис. 3.4, кривая 2.

*Динамической электромеханической характеристикой* электропривода называется зависимость между мгновенными значениями скорости и тока для одного и того же момента времени переходного режима работы электропривода.

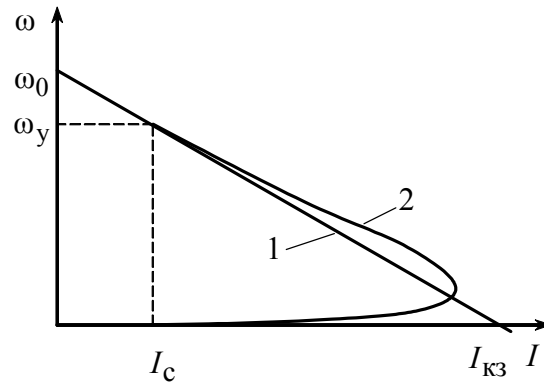


Рис. 3.4. Электромеханическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения: 1 – статическая; 2 – динамическая

График динамической электромеханической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения можно получить из совместного решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{я}} &= E + i \cdot (R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{д}}) + L_{\text{дв}} \frac{di}{dt}; \\
 E &= c \cdot \omega; \\
 M_{\text{дв}} - M_{\text{с}} &= J_{\text{дв}} \frac{d\omega}{dt}; \\
 M_{\text{дв}} &= c \cdot i,
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

где  $i$  – мгновенное значение тока якоря двигателя, А;  $c = k \cdot \Phi_{\text{н}}$  – коэффициент ЭДС и электромагнитного момента при номинальном потоке возбуждения двигателя;  $L_{\text{дв}}$  – индуктивность обмотки якоря двигателя, Гн.

### 3.3. Определение параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения по каталожным данным

В каталогах [1] на двигатели постоянного тока приводятся следующие технические данные:

$P_{\text{дв.н}}$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_{\text{дв.н}}$  – номинальное напряжение обмотки якоря, В;

$I_{\text{дв.н}}$  – номинальный ток обмотки якоря двигателя, А;

$R_{\text{оя}}$  – сопротивление обмотки якоря двигателя при 15° С, Ом;

$R_{\text{дп}}$  – сопротивление дополнительных полюсов двигателя при 15° С, Ом;

$R_{\text{ко}}$  – сопротивление компенсационной обмотки двигателя при  $15^\circ\text{C}$ , Ом;

$L_{\text{дв}}$  – индуктивность обмотки якоря двигателя, Гн;

$\eta_{\text{дв.н}}$  – номинальный коэффициент полезного действия, %;

$n_{\text{дв.н}}$  – номинальная частота вращения, об/мин;

$J_{\text{дв}}$  – момент инерции якоря,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ .

В тех случаях, когда в каталогах необходимые параметры двигателя не приводятся, их можно определить по следующим формулам:

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\eta_{\text{дв.н}} \cdot U_{\text{дв.н}}}. \quad (3.13)$$

Номинальная угловая скорость

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв.н}}}{30}. \quad (3.14)$$

Сопротивления двигателя приводятся в каталогах при температуре  $15^\circ\text{C}$ . В нагретом состоянии при рабочей температуре сопротивление двигателя

$$R_{\text{дв.гор}} = [1 + \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)] \cdot (R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}), \quad (3.15)$$

где  $\alpha = 0,0039 \div 0,0041$  – температурный коэффициент сопротивления меди (обычно принимается  $\alpha = 0,004$ );  $\theta_2$  – рабочая температура обмотки машины;  $\theta_1$  – температура, при которой указываются сопротивления в каталогах.

При температуре  $\theta_2 = 75^\circ\text{C}$  и  $\theta_1 = 15^\circ\text{C}$ , при  $\alpha = 0,004$

$$R_{\text{дв.гор}} = 1,24 \cdot (R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}). \quad (3.16)$$

Если в каталогах сопротивление двигателя не приведено, то его ориентировочно определяют, принимая, что половина всех потерь в двигателе при номинальной нагрузке связана с потерями в меди якоря [2]. Определенное таким образом сопротивление соответствует нагретому двигателю

$$R_{\text{дв.гор}} = (R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}) = 0,5 \cdot (1 - \eta_{\text{дв.н}}/100) \cdot U_{\text{дв.н}} / I_{\text{дв.н}}. \quad (3.17)$$

Индуктивность цепи обмотки якоря двигателя [3]

$$L_{\text{дв}} = k_l \frac{U_{\text{дв.н}}}{2 \cdot p \cdot n_{\text{дв.н}} \cdot I_{\text{дв.н}}}, \quad (3.18)$$

где  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $k_l = 6 - 8$  для быстроходных некомпенсированных машин;  $k_l = 8 - 12$  для нормальных некомпенсированных машин;  $k_l = 5 - 6$  для компенсированных машин.

Коэффициент ЭДС и электромагнитного момента при номинальном потоке возбуждения

$$c = \frac{U_{\text{дв.н}} - I_{\text{дв.н}} \cdot R_{\text{дв.гор}}}{\omega_{\text{н}}} \quad (3.19)$$

Номинальный электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{н}} = c \cdot I_{\text{дв.н}} \quad (3.20)$$

Номинальный момент двигателя на валу

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{1000 \cdot P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{н}}} \quad (3.21)$$

**Пример 3.1.** Для двигателя постоянного тока типа П-11У4, имеющего следующие технические данные, рассчитать и построить статические электромеханическую и механическую характеристики.

Основные параметры двигателя:

- номинальная мощность  $P_{\text{дв.н}} = 0,3$  кВт;
- номинальное напряжение  $U_{\text{дв.н}} = 220$  В;
- номинальный ток двигателя  $I_{\text{дв.н}} = 2,066$  А;
- сопротивление двигателя при  $15^\circ \text{C}$ ,  $R_{\text{дв}} = 14,6$  Ом;
- номинальная частота вращения  $n_{\text{дв.н}} = 1500$  об/мин;
- индуктивность двигателя  $L_{\text{дв}} = 0,248$  Гн;
- момент инерции якоря двигателя  $J_{\text{дв}} = 0,0031$  кг · м<sup>2</sup>;
- допустимый ток двигателя  $I_{\text{доп}} = 4 \cdot I_{\text{дв.н}}$ .

**Решение.** Так как электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения описываются уравнениями прямой, то для их расчета и построения достаточно определить две любые точки. Как правило, координатами этих точек являются: 1) скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  при нулевом токе якоря и электромагнитном моменте; 2) номинальная угловая скорость  $\omega_{\text{н}}$  при номинальном токе  $I_{\text{дв.н}}$  и номинальном электромагнитном моменте  $M_{\text{н}}$ .

Определим дополнительные параметры двигателя:

- Номинальная угловая скорость

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв.н}}}{30} = \frac{3,1415 \cdot 1500}{30} = 157,08 \text{ рад/с.}$$

- Сопротивление якоря двигателя в горячем состоянии

$$R_{\text{дв.гор}} = 1,24 \cdot R_{\text{дв}} = 1,24 \cdot 14,6 = 18,1 \text{ Ом.}$$

- Коэффициент ЭДС (В·с/рад) и электромагнитного момента (Н·м/А) при номинальном потоке возбуждения

$$c = \frac{U_{\text{дв.н}} - I_{\text{дв.н}} \cdot R_{\text{дв.гор}}}{\omega_H} = \frac{220 - 2,066 \cdot 18,1}{157,08} = 1,162.$$

- Угловая скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{дв.н}}}{c} = \frac{220}{1,162} = 189,33 \text{ рад/с.}$$

- Номинальный электромагнитный момент двигателя

$$M_H = c \cdot I_{\text{дв.н}} = 1,162 \cdot 2,066 = 2,4 \text{ Н·м.}$$

- Пусковой ток или ток короткого замыкания

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{дв.н}}}{R_{\text{дв.гор}}} = \frac{220}{18,1} = 12,15 \text{ А.}$$

Рассчитанные статическая естественная электромеханическая и механическая характеристики двигателя приведены на рис. 3.5.

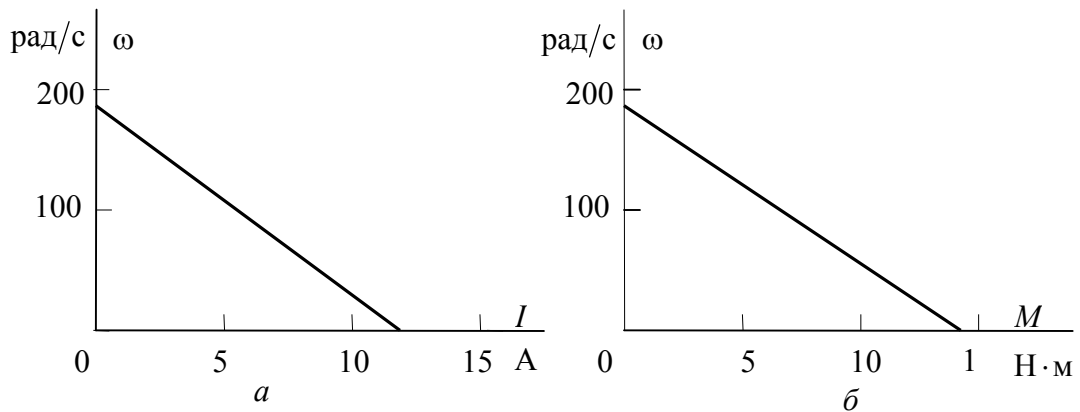


Рис. 3.5. Статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения: а – электромеханические; б – механические

- Допустимый ток двигателя

$$I_{\text{доп}} = 4 \cdot I_{\text{дв.н}} = 4 \cdot 2,066 = 8,264 \text{ А.}$$



**Вывод.** Естественная электромеханическая характеристика двигателя не обеспечивает ограничение пускового тока на допустимом уровне. Как следствие пуска двигателя прямым включением в сеть – неудовлетворительная коммутация на коллекторе и выход коллектора из строя.

**Пример 3.2.** Для двигателя постоянного тока типа П-11У4 рассчитать и построить динамическую механическую характеристику. Основные параметры двигателя приведены в примере 3.1.

Динамическую механическую характеристику построить при моменте сопротивления на валу двигателя  $M_c = 2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

**Решение.** В динамике двигатель постоянного тока независимого возбуждения описывается системой уравнения (3.12):

$$U = E + i \cdot R_{\text{дв.гор}} + L_{\text{дв}} \frac{di}{dt};$$

$$E = c \cdot \omega;$$

$$M - M_c = J_{\text{дв}} \frac{d\omega}{dt};$$

$$M_{\text{дв}} = c \cdot i.$$

При подстановке в систему уравнений численных значений параметров, получим:

$$220 = E + i \cdot 18,1 + 0,248 \frac{di}{dt};$$

$$E = 1,162 \cdot \omega;$$

$$M - 2 = 0,0031 \frac{d\omega}{dt};$$

$$M_{\text{дв}} = 1,162 \cdot i. \tag{3.22}$$

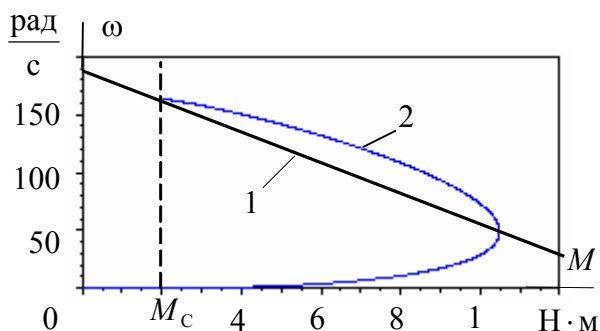
Динамическая механическая характеристика пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения прямым включением в сеть, рассчитанная в программной среде MathCAD, приведена на рис. 3.6.

Анализ графика динамической механической характеристики показывает, что максимальное значение пускового момента составляет

$$M_{\text{пуск.max}} = 10,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Учитывая, что ток якоря двигателя независимого возбуждения пропорционален его моменту, найдем максимальный пусковой динамический ток якоря

$$I_{\text{пуск.мах}} = \frac{M_{\text{пуск.мах}}}{c} = \frac{10,5}{1,162} = 9,036 \text{ А.}$$



*Рис. 3.6. Графики статической 1 и динамической 2 характеристик пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения прямым включением в сеть*

Максимальный пусковой динамический ток превышает предельно допустимый ток якоря двигателя по условиям коммутации  $I_{\text{доп}} = 8,264 \text{ А}$ , однако он существенно меньше тока короткого замыкания  $I_{\text{кз}} = 12,15 \text{ А}$ . Отмеченная особенность уменьшения пускового динамического тока двигателя независимого возбуждения позволяет электрические машины мощностью до 200 Вт пускать прямым включением в сеть без принятия мер токоограничения.

### **3.4. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Общие положения**

Регулированием скорости электродвигателя называется принудительное изменение скорости в зависимости от требований технологического процесса. Основными показателями, характеризующими различные способы регулирования скорости электродвигателя, являются:

- диапазон регулирования скорости;
- плавность регулирования скорости;
- погрешность регулирования скорости;
- направление регулирования скорости;
- допустимая нагрузка двигателя.

Под *диапазоном регулирования скорости* электропривода будем понимать отношение средних скоростей  $\omega_{\max \text{ ср}}$  и  $\omega_{\min \text{ ср}}$  электропривода при заданном диапазоне изменения нагрузки на валу двигателя:

$$D = \frac{\omega_{\max \text{ ср}}}{\omega_{\min \text{ ср}}}. \quad (3.23)$$

*Плавностью регулирования скорости* электропривода называется отношение разности двух соседних значений скорости  $\omega_i$  и  $\omega_{i-1}$  электропривода к ее номинальному значению:

$$\varphi_{\text{пл}} = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{\omega_{\text{н}}}. \quad (3.24)$$

*Погрешностью поддержания скорости* электропривода называется отношение приращения скорости электропривода при изменении нагрузки от нуля до номинальной, к скорости при номинальной нагрузке:

$$\delta = \frac{\omega_0 - \omega_{I_{\text{н}}}}{\omega_{I_{\text{н}}}}, \quad (3.25)$$

где  $\omega_0$  – скорость идеального холостого хода, рад/с;  $\omega_{I_{\text{н}}}$  – скорость при номинальной нагрузке.

*Направление регулирования скорости*, то есть уменьшение или увеличение ее по отношению к номинальной скорости, зависит от способа регулирования скорости.

*Допустимой нагрузкой двигателя* называется наибольшее значение момента, который двигатель способен развивать длительно при работе на регулировочной характеристике. Определяется нагревом двигателя и зависит от способа регулирования скорости.

### **3.5. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения с помощью резисторов в цепи обмотки якоря**

Схема силовых цепей двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании скорости изменением сопротивления в цепи обмотки якоря приведена на рис. 3.7. Схема содержит обмотку якоря двигателя  $M$ , два последовательно включенных добавочных сопротивления  $R_{\text{д1}}$  и  $R_{\text{д2}}$ , которые шунтированы замыкающими контактами  $KM1$  и  $KM2$ . Обмотка возбуждения двигателя  $LM$  питается от отдельного источника напряжения  $U_{\text{ов}}$ .

Регулирование скорости двигателя осуществляется при номинальном потоке возбуждения  $\Phi_H$  и номинальном напряжении обмотки якоря  $U_H$ . Следовательно, электромагнитный момент двигателя пропорционален току якоря и механические и электромеханические характеристики будут совпадать в относительных единицах, поэтому анализ искусственных характеристик будем производить на примере электромеханических характеристик.

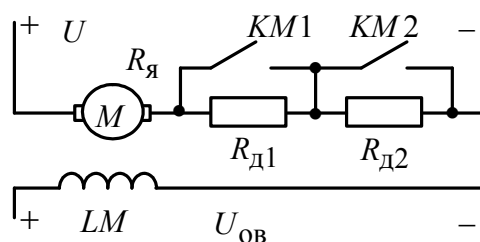


Рис. 3.7. Схема силовых цепей двигателя при регулировании скорости изменением сопротивления в цепи обмотки якоря

Анализ искусственных электромеханических характеристик будем производить относительно базовой естественной характеристики рис. 3.8. Так как уравнение электромеханической характеристики – уравнение прямой, то для ее анализа достаточно знать поведение двух точек. Эти точки могут быть любыми, принадлежащим уравнению (3.3)

$$\omega = \frac{U_H}{k \cdot \Phi_H} - I \frac{R_{дв} + R_д}{k \cdot \Phi_H},$$

однако наиболее просто анализ проводится, если эти две точки лежат на осях координат.

При токе обмотки якоря  $I = 0$  двигатель вращается со скоростью идеального холостого хода  $\omega_0 = \frac{U_H}{k \cdot \Phi_H}$ .

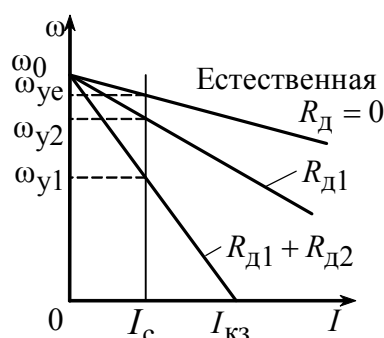


Рис. 3.8. Реостатные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Скорость идеального холостого хода не зависит от добавочного сопротивления якорной цепи и для данного способа регулирования скорости остается постоянной. Следовательно, все искусственные электромеханические характеристики двигателя независимого возбуждения выйдут на оси ординат из одной точки с координатами  $I = 0$ ;  $\omega = \omega_0$ .

При скорости  $\omega = 0$  по обмотке якоря двигателя протекает ток короткого замыкания  $I_{кз} = \frac{U}{R_{дв} + R_d}$ . Ток короткого замыкания обратно

пропорционален сопротивлению цепи обмотки якоря и уменьшается с увеличением этого сопротивления. Этим свойством пользуются для ограничения бросков тока якоря при пусках двигателя независимого возбуждения в релейно-контакторных схемах управления.

Семейство реостатных электромеханических характеристик приведено на рис. 3.8.

Реостатное регулирование скорости, как правило, *ступенчатое* и только с двигателями малой мощности возможно плавное регулирование скорости при включении в цепь якоря двигателя переменного реостата.

Регулирование скорости производится под нагрузкой. Направление регулирования скорости – *вниз* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости  $\omega_{yi}$  под нагрузкой  $I_c$  уменьшаются с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря.

Диапазон регулирования скорости при номинальной нагрузке  $D = 1 : (3 \div 4)$ .

Погрешность регулирования скорости возрастает с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря.

Регулирование скорости сопровождается потерями мощности в добавочных сопротивлениях цепи обмотки якоря.

### **3.6. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения обмотки якоря**

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения обмотки якоря возможно в том случае, когда обмотка якоря питается от отдельного преобразователя П (рис. 3.9). Преобразователь может иметь любую физическую природу, то есть может быть электромашинным, электромагнитным, полупроводниковым.

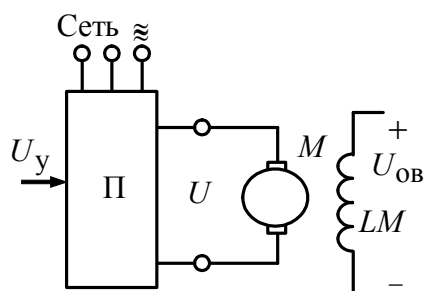


Рис. 3.9. Схема силовых цепей двигателя при регулировании скорости изменением напряжения в цепи обмотки якоря

Обмотка возбуждения  $LM$  двигателя питается от отдельного источника постоянного напряжения  $U_{об}$  и создает номинальный поток  $\Phi_H$ .

Напряжение на выходе преобразователя определяется уравнением

$$U_{\Pi} = E_{\Pi} - I \cdot R_{\Pi}, \quad (3.26)$$

где  $E_{\Pi}$  – ЭДС преобразователя, В;  $R_{\Pi}$  – внутреннее сопротивление преобразователя, Ом.

Так как обмотка якоря двигателя включена непосредственно на выход преобразователя, то напряжение на обмотке якоря равно напряжению на выходе преобразователя:

$$U = U_{\Pi}. \quad (3.27)$$

На основании равенства (3.27) приравняем правые части уравнений (3.26) и (3.1), с учетом (3.2) и того, что добавочное сопротивление в цепи обмотки якоря двигателя отсутствует ( $R_d = 0$ ), получим

$$E_{\Pi} - I \cdot R_{\Pi} = k \cdot \Phi_H \cdot \omega + I \cdot R_{дв}. \quad (3.28)$$

Решив (3.28) относительно  $\omega$ , получим уравнение электро-механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, работающего в системе преобразователь-двигатель (П-Д), управляемого по цепи обмотки якоря изменением напряжения:

$$\omega = \frac{E_{\Pi}}{k \cdot \Phi_H} - I \frac{R_{дв} + R_{\Pi}}{k \cdot \Phi_H}. \quad (3.29)$$

Решив (3.4) относительно тока якоря двигателя  $I$  и подставив его в (3.29), получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, работающего в системе П-Д, управляемого по цепи обмотки якоря изменением напряжения:

$$\omega = \frac{E_{\Pi}}{k \cdot \Phi_H} - M \frac{R_{дв} + R_{\Pi}}{(k \cdot \Phi_H)^2}. \quad (3.30)$$

Анализ уравнений (3.29) и (3.30) показывает, что скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = \frac{E_{\Pi}}{k \cdot \Phi_{\text{H}}}$  изменяется пропорционально ЭДС преобразователя  $E_{\Pi}$ , а жесткость характеристик уменьшается по отношению к естественной характеристике, так как коэффициент  $\frac{R_{\text{дв}} + R_{\Pi}}{k \cdot \Phi_{\text{H}}}$  при аргументе  $I$  увеличивается из-за добавочного сопротивления преобразователя  $R_{\Pi}$ .

Электромеханические и механические характеристики в относительных единицах совпадают. Электромеханические характеристики для данного способа регулирования приведены на рис. 3.10.

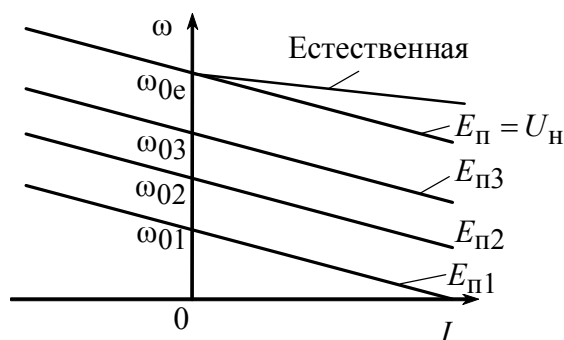


Рис. 3.10. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения, управляемого по цепи обмотки якоря изменением напряжения

Электромеханические характеристики параллельны друг другу, большему ЭДС преобразователя соответствует большая скорость идеального холостого хода  $\omega_{0i}$ .

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения обмотки якоря плавное, коэффициент плавности  $\varphi_{\text{пл}} \rightarrow 1$ .

Диапазон регулирования скорости в замкнутых системах регулирования  $D = 1:10000$  и более.

Направление регулирования скорости – *вниз* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости  $\omega_{yi}$  снижаются с уменьшением напряжения обмотки якоря.

Погрешность регулирования скорости возрастает с уменьшением напряжения обмотки якоря и на нижних регулировочных характеристиках может достигать  $0,3 \div 0,4$  относительных единиц.

Регулирование скорости производится с высоким КПД, достигающим значений  $0,9 \div 0,95$  в электроприводах с транзисторными и тиристорными силовыми преобразователями.

### 3.7. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения производится в мало-мощной цепи обмотки возбуждения, что облегчает и удешевляет аппаратуру управления. Схема силовых цепей электропривода приведена на рис 3.11. Обмотка якоря двигателя  $M$  питается от отдельного источника напряжения  $U$ . Обмотка возбуждения  $LM$  двигателя подключена к полууправляемому выпрямителю, состоящему из диодов  $VD1...VD3$  и тиристора  $VS1$ . Такая схема регулирования напряжения обмотки возбуждения применяется для двигателей мощностью до 100 кВт.

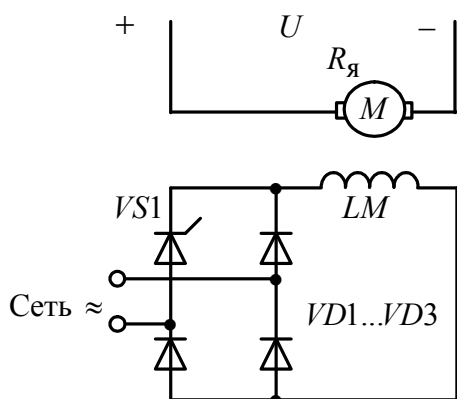


Рис. 3.11. Схема силовых цепей электропривода при регулировании скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения

Регулирование скорости при использовании этого способа осуществляется уменьшением потока возбуждения. Это связано с тем, что увеличение потока возбуждения требует роста напряжения на обмотке возбуждения выше номинального, а это, в свою очередь, может привести к пробое изоляции обмотки. Кроме того, номинальный поток  $\Phi_n$  обмотки возбуждения близок к потоку насыщения магнитной цепи электродвигателя (рис. 3.12, кривая 1) и увеличение тока намагничивания не приводит к существенному росту потока возбуждения.



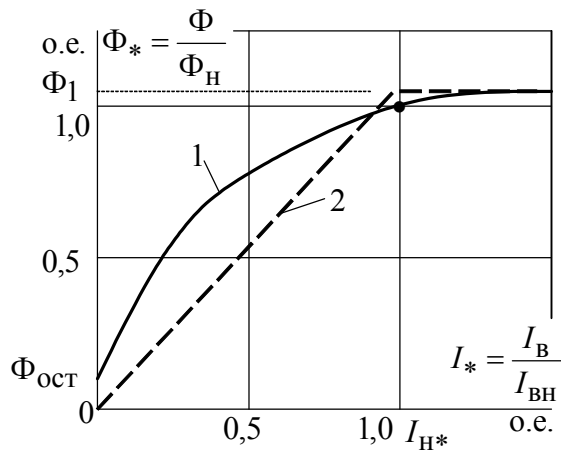


Рис. 3.12. Универсальная кривая намагничивания двигателя постоянного тока

На рис. 3.12 приняты следующие обозначения:

$\Phi_* = \frac{\Phi}{\Phi_H}$  – относительное значение потока возбуждения;

$I_* = \frac{I_B}{I_{BH}}$  – относительное значение тока возбуждения.

Так как при данном способе регулирования поток возбуждения не равен номинальному, то электромеханические и механические характеристики двигателя независимого возбуждения не будут совпадать, даже построенные в безразмерных единицах.

Анализ искусственных электромеханических характеристик проведем относительно базисной естественной электромеханической характеристики по двум характерным точкам. Скорость идеального холостого хода, определяемая по (3.6), обратно пропорциональна потоку возбуждения:

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi} \equiv \frac{1}{\Phi}.$$

Таким образом, с уменьшением потока возбуждения скорость идеального холостого хода будет увеличиваться.

При скорости, равной нулю, остается постоянным ток короткого замыкания:

$$I_{кз} = \frac{U}{R_{дв}}.$$

Следовательно, все электромеханические характеристики на оси абсцисс сходятся в одной точке  $I_{кз}$ . Искусственные электромеханические

ские характеристики при регулировании скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения приведены на рис. 3.13, а.

Механические характеристики имеют те же скорости идеального холостого хода, что и электромеханические. Пусковой момент двигателя, определяемый по выражению

$$M_{\text{п}} = k \cdot \Phi \cdot I_{\text{кз}},$$

будет уменьшаться с уменьшением потока возбуждения.

Искусственные механические характеристики приведены на рис. 3.13, б. Там же отмечены точки установившейся работы при номинальном токе якоря.

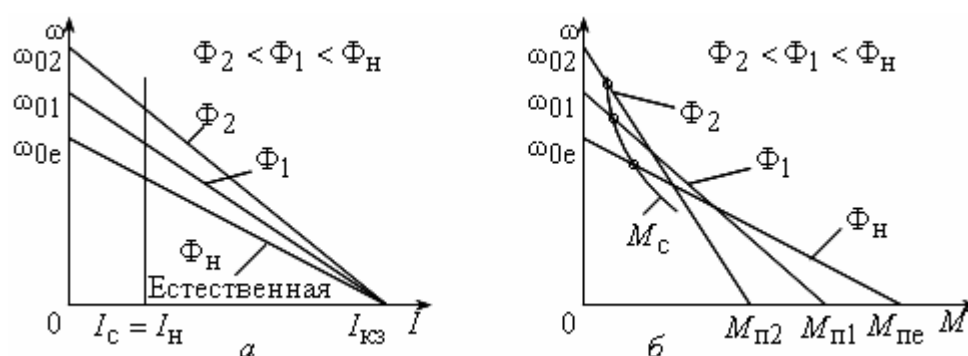


Рис. 3.13. Характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании скорости изменением потока возбуждения: а – электромеханические; б – механические

Способ регулирования применяется для механизмов, работающих с постоянной мощностью.

Регулирование скорости плавное, коэффициент плавности  $\varphi_{\text{пл}} \rightarrow 1$ .

Диапазон регулирования скорости обычно небольшой:  $D = 1,3 \div 1$ . Это связано, прежде всего, с качеством балансировки электрических машин. Для двигателей специального назначения с качественной балансировкой якоря и прецизионными подшипниками диапазон регулирования может быть расширен до значений 10:1, однако увеличение диапазона регулирования сопровождается ухудшением коммутации на коллекторе двигателя.

Направление регулирования скорости – *вверх* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости  $\omega_{yi}$  увеличиваются с уменьшением напряжения на обмотке возбуждения.

Погрешность регулирования скорости, определяемая по формуле (3.25), уменьшается с уменьшением потока возбуждения.

Регулирование скорости производится с высоким КПД, так как потребление энергии при регулировании скорости уменьшается за счет снижения напряжения на обмотке возбуждения.

### 3.8. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

В общем случае схема силовой цепи двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведена на рис. 3.14.

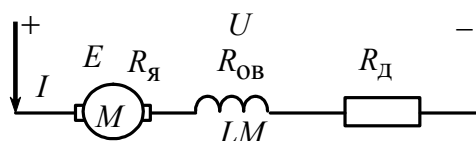


Рис. 3.14. Схема силовой цепи двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Обозначения, принятые на рис. 3.14, те же, что и на рис. 3.1 для двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Уравнение электромеханической характеристики двигателя последовательного возбуждения, так же как и для двигателя независимого возбуждения, определяется выражением (3.3)

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - I \frac{R_{яц}}{k \cdot \Phi},$$

где  $R_{яц} = R_{дв} + R_{ов} + R_{д}$  – сопротивление цепи обмотки якоря, состоящее из сопротивления обмотки якоря, дополнительных полюсов, обмотки возбуждения и добавочного сопротивления цепи обмотки якоря.

При изменении нагрузки на валу двигателя угловая скорость будет изменяться как за счет падения напряжения на сопротивлениях якорной цепи, так и за счет увеличения потока возбуждения  $\Phi$ . У двигателя постоянного тока последовательного возбуждения обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря, поэтому ток обмотки якоря является одновременно и током обмотки возбуждения. Зависимость потока возбуждения от тока возбуждения двигателя представлена универсальной кривой намагничивания на рис. 3.12, зависимость 1. Кривая намагничивания не имеет точного аналитического выражения и в расчетах обычно аппроксимируется отрезками прямых. Как вариант, на рис. 3.12 кривая намагничивания аппроксимирована двумя прямыми отрезками 2:

$$\Phi = k_H \cdot I \quad \text{при } 0 < I < I_H; \quad (3.31)$$

$$\Phi = \Phi_1 \quad \text{при } I > I_H, \quad (3.32)$$

где  $k_H$  – коэффициент пропорциональности между током и потоком кривой намагничивания;  $\Phi_1$  – поток насыщения кривой намагничивания двигателя. Подставим (3.31) в (3.3), получим уравнение электромеханической характеристики двигателя последовательного возбуждения при линейной зависимости потока возбуждения от тока якоря

$$\omega = \frac{U}{k \cdot k_H \cdot I} - \frac{R_{яц}}{k \cdot k_H}. \quad (3.33)$$

Зависимость (3.33) носит гиперболический характер.

При токах якоря двигателя, больших номинального тока и принятом законе аппроксимации, поток двигателя стабилизируется и становится равным  $\Phi_1$ . На этом участке работы электродвигателя его электромеханическая характеристика описывается уравнением

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_1} - I \frac{R_{яц}}{k \cdot \Phi_1}. \quad (3.34)$$

Выражение (3.34) – уравнение прямой линии. Таким образом, при больших нагрузках зависимость между угловой скоростью двигателя и током обмотки якоря линейная.

При принятой аппроксимации график электромеханической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведен на рис. 3.15, а.

Электромагнитный момент двигателя постоянного тока определяется зависимостью (3.4)

$$M = k \cdot \Phi \cdot I.$$

Подставив в (3.4) выражение для потока (3.31) и решив полученное уравнение относительно тока якоря  $I$ , будем иметь

$$I = \sqrt{\frac{M}{k \cdot k_H}}. \quad (3.35)$$

Совместное решение выражений (3.35) и (3.33) позволяет получить уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения при малых нагрузках на валу двигателя:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k \cdot k_H} \cdot \sqrt{M}} - \frac{R_{яц}}{k \cdot k_H}. \quad (3.36)$$

Зависимость (3.36) носит гиперболический характер.

При больших нагрузках, когда поток ограничивается на уровне  $\Phi_1$ , механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения определяется выражением

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_1} - M \frac{R_{яц}}{(k \cdot \Phi_1)^2} . \quad (3.37)$$

При принятой аппроксимации график механической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведен на рис. 3.15, б.

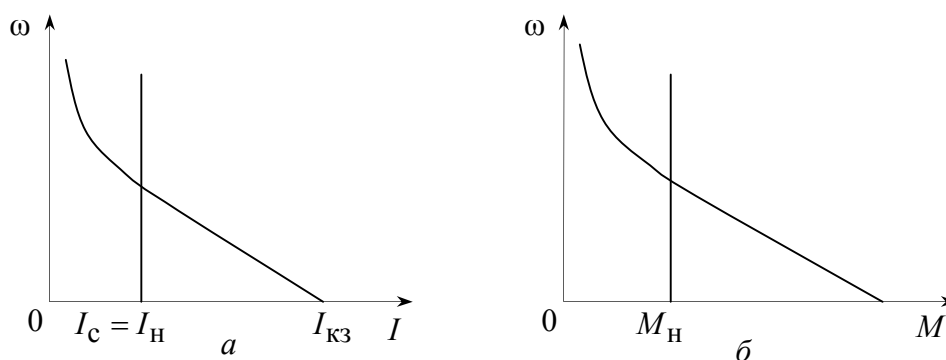


Рис. 3.15. Электромеханическая (а) и механическая (б) характеристики двигателя последовательного возбуждения

Анализ уравнений (3.33) и (3.36) показывает, что электромеханические и механические характеристики, хотя и носят гиперболический характер при малых нагрузках, но не совпадают даже построенные в относительных единицах.

Особенность электромеханической и механической характеристик двигателя последовательного возбуждения является то, что

- они нелинейны при малых нагрузках и становятся практически линейными при нагрузках больших, чем номинальная;
- теоретически они не имеют скорости идеального холостого хода. На практике за счет остаточного потока намагничивания  $\Phi_{ост}$  скорость идеального холостого хода существует и определяется уравнением

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_{ост}} , \quad (3.38)$$

однако она достаточно велика, поэтому двигатели последовательного возбуждения нельзя включать без нагрузки во избежание их разрушения от центробежных сил.

Уравнения (3.33), (3.34) и (3.36), (3.37) не позволяют произвести расчет статических электромеханических и механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, так как отсутствует информация для определения конструктивного коэффициента  $k$  двигателя и коэффициента пропорциональности  $k_H$  между током и потоком кривой намагничивания двигателя.

В большинстве практических случаев для расчета реальных естественных электромеханических и механических характеристик используют универсальные характеристики. Универсальные характеристики двигателей последовательного возбуждения типов МП, ДП и Д мощностью до 10 кВт приведены на рис. 3.16. Они представляют собой зависимость относительных значений скорости  $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_H}$  и момента  $M_* = \frac{M}{M_H}$  от относительного тока обмотки якоря  $I_* = \frac{I}{I_H}$ , где  $\omega_H, M_H, I_H$  – номинальные значения скорости, момента и тока якоря.

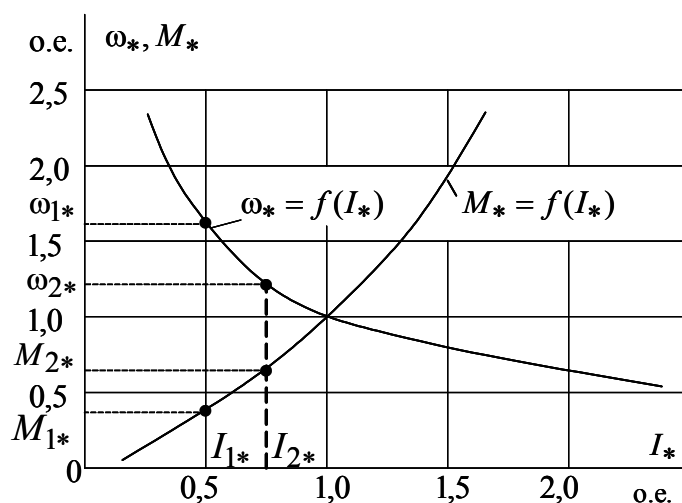


Рис. 3.16. Универсальные характеристики двигателей последовательного возбуждения типов МП, ДП и Д

В каталожных данных двигателей последовательного возбуждения обычно приводятся следующие параметры:

- $P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;
- $n_H$  – номинальная частота вращения, об/мин ;
- $U_H$  – номинальное напряжение обмотки якоря, В;
- $I_H$  – номинальный ток якоря, А;
- $\eta_H$  – номинальный КПД, о.е.

Порядок расчета естественных электромеханической и механической характеристик двигателя последовательного возбуждения следующий:

- определяется номинальная угловая скорость

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30};$$

- определяется номинальный момент на валу двигателя

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H};$$

- задается произвольное относительное значение тока  $I_{1*}$  и откладывается на графике универсальной характеристики двигателя последовательного возбуждения;

- определяются соответствующие току  $I_{1*}$  относительные значения угловой скорости  $\omega_{1*}$  и момента  $M_{1*}$ ;

- пересчитываются относительные значения тока, скорости и момента на абсолютные значения

$$I_1 = I_{1*} \cdot I_H;$$

$$\omega_1 = \omega_{1*} \cdot \omega_H;$$

$$M_1 = M_{1*} \cdot M_H;$$

- строится правая декартова система координат для электромеханических и механических характеристик в абсолютных единицах;

- абсолютные значения тока скорости и момента откладываются в соответствующей системе координат  $\omega = f(I)$  и  $\omega = f(M)$ ;

- аналогичные вычисления производятся и для других значений тока  $I_{2*}, I_{j*}$ ;

- по отложенным точкам строятся естественные электромеханические и механические характеристики двигателя последовательного возбуждения.

### **3.9. Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с помощью резисторов в цепи обмотки якоря**

Схема силовых цепей двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при регулировании скорости изменением сопротивления в цепи обмотки якоря приведена на рис. 3.17. Схема содержит обмотку якоря двигателя  $M$ , обмотку возбуждения  $LM$  и два последо-

вательно включенных добавочных сопротивлений  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ , которые шунтированы замыкающими контактами  $KM1$  и  $KM2$ .

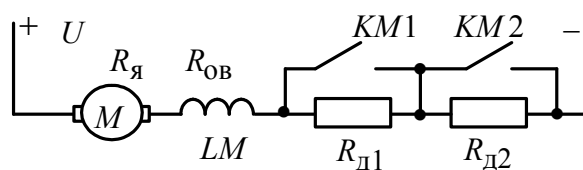


Рис. 3.17. Схема силовых цепей двигателя при регулировании скорости изменением сопротивления в цепи обмотки якоря

Электромеханические характеристики двигателя последовательно-го возбуждения описываются уравнениями (3.33)

$$\omega = \frac{U}{k \cdot k_H \cdot I} - \frac{R_{ящ}}{k \cdot k_H}, \text{ при } 0 < I < I_H,$$

и (3.34)

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_1} - I \frac{R_{ящ}}{k \cdot \Phi_1}, \text{ при } I > I_H.$$

Таким образом, искусственные электромеханические характеристики нелинейны при малых нагрузках ( $0 < I < I_H$ ) и не имеют скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . При больших нагрузках ( $I > I_H$ ) искусственные характеристики аналогичны реостатным характеристикам двигателя независимого возбуждения. То есть линейная их часть сходится на оси ординат в одной точке – фиктивной скорости идеального холостого хода  $\omega_{0ф}$ , которая определяется пересечением продолжения линейной части естественной электромеханической характеристики с осью абсцисс.

При скорости  $\omega = 0$  по обмотке якоря двигателя протекает ток короткого замыкания  $I_{кз} = \frac{U}{R_{дв} + R_{д}}$ . Ток короткого замыкания обратно пропорционален суммарному сопротивлению цепи обмотки якоря и уменьшается с увеличением этого сопротивления. Этим свойством пользуются для ограничения бросков тока якоря при пусках двигателя последовательного возбуждения в релейно-контакторных схемах управления.

Семейство реостатных электромеханических характеристик приведено на рис. 3.18.



Реостатное регулирование скорости бывает, как правило, *ступенчатое* и только с двигателями малой мощности возможно плавное регулирование скорости с включением в цепь якоря двигателя переменного реостата.

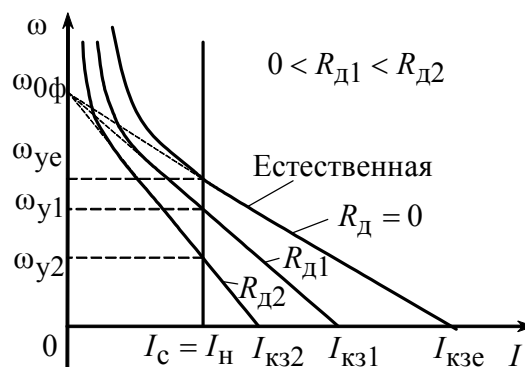


Рис. 3.18. Реостатные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Направление регулирования скорости – *вниз* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости  $\omega_{yi}$  уменьшаются с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря.

Диапазон регулирования скорости при номинальной нагрузке  $D = 1 : (3 \div 4)$ .

Погрешность регулирования скорости возрастает с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря.

Регулирование скорости сопровождается потерями мощности в добавочных сопротивлениях цепи обмотки якоря.

### 3.10. Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения изменением напряжения

Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения изменением напряжения обмотки якоря производится при питании двигателя от отдельного преобразователя П рис. 3.19.

Напряжение на выходе преобразователя регулируется напряжением управления  $U_y$ .

Так как двигатель последовательного возбуждения включен непосредственно на выход преобразователя, то напряжение на двигателе равно напряжению преобразователя.

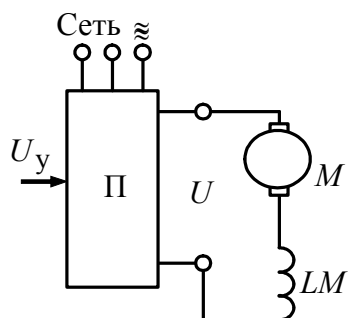


Рис. 3.19. Схема силовых цепей двигателя последовательного возбуждения при регулировании скорости изменением напряжения

Электромеханические характеристики двигателя последовательного возбуждения описываются уравнениями (3.33) и (3.34):

$$\omega = \frac{U}{k \cdot k_H \cdot I} - \frac{R_{яц}}{k \cdot k_H}, \text{ при } 0 < I < I_H,$$

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_1} - I \frac{R_{яц}}{k \cdot \Phi_1}, \text{ при } I > I_H.$$

Таким образом, искусственные электромеханические характеристики нелинейны при малых нагрузках ( $0 < I < I_H$ ) и не имеют скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . При больших нагрузках ( $I > I_H$ ) искусственные характеристики аналогичны искусственным характеристикам двигателя независимого возбуждения при изменении напряжения обмотки якоря. То есть при уменьшении напряжения скорость двигателя снижается, а линейная их часть смещается параллельно линейной части естественной характеристики.

При скорости  $\omega = 0$  по обмотке якоря двигателя протекает ток короткого замыкания  $I_{кз} = \frac{U}{R_{дв} + R_{п}}$ . Ток короткого замыкания двигателя пропорционален напряжению обмотки якоря и уменьшается с уменьшением этого напряжения.

Семейство электромеханических характеристик двигателя последовательного возбуждения при регулировании скорости изменением напряжения приведено на рис. 3.20.

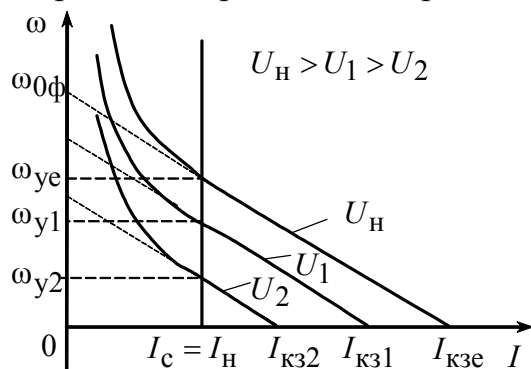


Рис. 3.20. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при регулировании скорости напряжением

Показатели регулирования двигателя последовательного возбуждения близки к показателям двигателя независимого возбуждения, однако диапазон регулирования скорости существенно меньше и редко превышает  $D \leq 1 \div 100$  даже в замкнутых системах автоматического регулирования.

### 3.11. Изменение направления вращения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Стандартная схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведена на рис. 3.21.

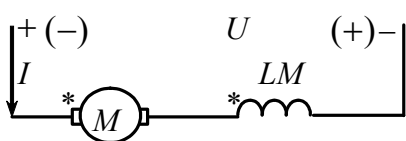


Рис. 3.21. Стандартная схема включения двигателя последовательного возбуждения

Если изменить полярность напряжения на электродвигателе, как показано на рис. 3.21 в скобках, то изменения направления вращения (реверса) двигателя не произойдет. Электромагнитный момент двигателя постоянного тока определяется в соответствии с выражением (3.4)

$$M = k \cdot \Phi \cdot I.$$

При изменении полярности напряжения  $U$  меняются направления как тока якоря двигателя  $I$ , так и тока обмотки возбуждения, последнее приводит к изменению направления потока  $\Phi$ , созданного обмоткой возбуждения  $LM$ . Знак электромагнитного момента остается прежним. Это свойство двигателя последовательного возбуждения позволяет включать его в цепь однофазного переменного тока, направление вращения двигателя при этом будет всегда одного знака. Для изменения направления вращения двигателя последовательного возбуждения необходимо изменить знак его электромагнитного момента. Это возможно, если изменить направление тока только через обмотку якоря  $M$  или только обмотку возбуждения  $LM$  двигателя:

$$-M = k \cdot \Phi \cdot (-I) = k \cdot (-\Phi) \cdot I.$$

На практике во избежание перемагничивания двигателя обычно меняют направление тока, протекающего по обмотке якоря двигателя. Схема включения двигателя при реверсе приведена на рис. 3.22. Звездочками \* на схемах рис. 3.21 и рис. 3.22 обозначены начала обмоток якоря и возбуждения.

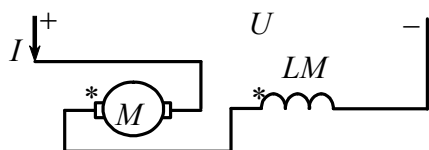


Рис. 3.22. Схема включения двигателя последовательного возбуждения при реверсе

Двигатель последовательного возбуждения успешно применяется в электроинструментах, включаемых в сеть однофазного переменного тока: электродрелях, электрорубанках, электропилах и др.

### 3.12. Переходные процессы в электроприводах с двигателями постоянного тока

Переходным режимом работы электропривода называется режим перехода от одного установившегося состояния к другому. Переходные процессы в электроприводе возникают, например, при пуске двигателя, реверсе, торможении, сбросе или набросе нагрузки, изменении параметров двигателя. В переходных процессах взаимозависимо изменяются скорость двигателя, его ток, момент и ЭДС.

От протекающих по обмоткам двигателя токов в них возникают потери, и обмотки якоря и возбуждения нагреваются. Процесс нагрева двигателя обычно весьма продолжителен, поэтому при исследовании переходных процессов тока и скорости тепловыми переходными процессами обычно пренебрегают, считая активные сопротивления двигателя постоянными.

Электромеханические и электромагнитные переходные процессы в современных электроприводах протекают за соизмеримое время и при исследовании переходных режимов их необходимо учитывать. Тем более что все параметры для расчета таких переходных процессов приводятся в справочных данных по электрическим машинам, а современное программное обеспечение позволяет произвести расчеты без существенных временных затрат. Однако имеется целая группа электроприводов с релейно-контакторным управлением, в которых электромагнитные переходные процессы протекают за очень короткое время и ими так же можно пренебречь.

Электромеханические переходные процессы в электроприводе рассмотрим на примере прямого пуска двигателя постоянного тока, принципиальная схема которого приведена на рис. 3.23.

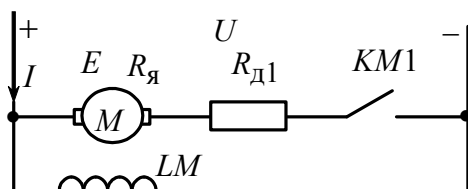


Рис. 3.23. Принципиальная схема прямого пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Пуск двигателя осуществляется при полном потоке, когда переходные процессы в обмотке возбуждения закончатся. При замыкании кон-

такта  $KM1$  в якорной цепи двигателя напряжение на обмотку якоря подается скачком.

При исследовании процессов пуска двигателя примем следующие допущения:

- щетки двигателя стоят на геометрической нейтрале, поэтому реакция якоря отсутствует и, следовательно, поток возбуждения постоянен и равен номинальному ( $\Phi = \Phi_H$ );
- индуктивность цепи обмотки якоря мала и ею можно пренебречь ( $L_{яц} = 0$ );
- тепловые переходные процессы в электроприводе закончились, и сопротивления якорной цепи не изменяются ( $R_{яц} = \text{const}$ );
- двигатель питается от источника напряжения бесконечной мощности и, следовательно, напряжение обмотки якоря постоянно ( $U = \text{const}$ );
- момент сопротивления на валу двигателя неизменен ( $M = \text{const}$ ).

Принятые допущения позволяют изобразить электромеханическую характеристику электродвигателя при его пуске, (см. рис. 3. 24).

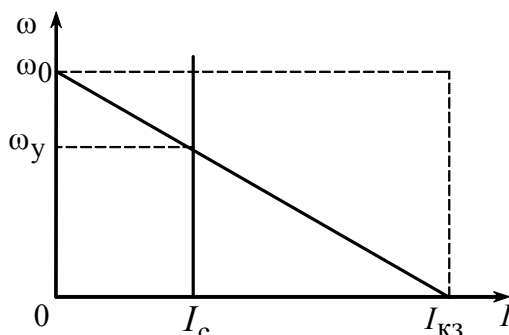


Рис. 3.24. Электромеханическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения

С учетом принятых допущений, в соответствии со вторым законом Кирхгофа для якорной цепи можно записать уравнение

$$U = E + I \cdot R_{яц}, \quad (3.39)$$

где  $R_{яц} = R_{дв} + R_{д}$  — полное сопротивление цепи обмотки якоря двигателя, равное сумме сопротивлений обмотки якоря, дополнительных полюсов, компенсационной обмотки и последовательному добавочному сопротивлению.

ЭДС обмотки якоря определяется в соответствии с уравнением (3.2)

$$E = k \cdot \Phi_H \cdot \omega.$$

Механическую часть электропривода описывает уравнение движения (2.1)

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

Электромагнитный момент двигателя находится в соответствие с выражением (3.4)

$$M = k \cdot \Phi_H \cdot I.$$

В связи с тем, что поток двигателя  $\Phi$  постоянен и равен номинальному, введем ранее принятое обозначение

$$c = k \cdot \Phi_H. \quad (3.40)$$

Избавимся от промежуточных переменных, подставив в (3.39) уравнение (3.2), а в (2.1) – (3.4) с учетом (3.40), получим

$$U = c \cdot \omega + I \cdot R_{яц}, \quad (3.41)$$

$$c \cdot I - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.42)$$

Решим (3.42) относительно тока якоря  $I$  и, подставив полученное выражение в (3.41), будем иметь после преобразований:

$$\frac{J \cdot R_{яц}}{c^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{c} - M_c \frac{R_{яц}}{c^2}. \quad (3.43)$$

Так как  $\frac{M_c}{c} = I_c$ , то выражение (3.43) преобразуется к виду

$$\frac{J \cdot R_{яц}}{c^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{c} - I_c \frac{R_{яц}}{c}. \quad (3.44)$$

Примем следующие обозначения:

$\omega_y = \frac{U}{c} - I_c \frac{R_{яц}}{c}$  – установившееся значение скорости электропривода (см. рис. 3.24);

$$T_M = \frac{J \cdot R_{яц}}{c^2} \quad (3.45)$$

– электромеханическая постоянная времени.

Под *электромеханической постоянной времени*  $T_M$  будем понимать время, в течение которого электропривод, обладающий моментом инерции  $J$ , разгоняется без нагрузки из неподвижного состояния до скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  при неизменном токе якоря, равном току короткого замыкания. В соответствии с определением электромеханической постоянной времени электропривод должен разгоняться по

траектории, отмеченной на статических электромеханических характеристиках пунктиром.

С учетом принятых обозначений дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс пуска двигателя, запишется в следующем виде:

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_y. \quad (3.46)$$

Решение дифференциального уравнения (3.46) может быть записано следующим образом:

$$\omega = A_0 + A_1 \cdot e^{p \cdot t}, \quad (3.47)$$

где  $A_0$  и  $A_1$  – постоянные интегрирования,  $p$  – корень характеристического уравнения выражения (3.46).

Характеристическое уравнение выражения (3.46) имеет следующий вид:

$$T_M p + 1 = 0. \quad (3.48)$$

Из (3.48) можно найти

$$p = -\frac{1}{T_M}. \quad (3.49)$$

Подставив (3.49) в (3.47), получим

$$\omega = A_0 + A_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (3.50)$$

Значения постоянных интегрирования  $A_0$  и  $A_1$  найдем из начальных условий:

Для  $t = \infty$  значение угловой скорости будет равно установившемуся значению  $\omega_y$ . При подстановке  $t = \infty$  в (3.50) получим

$$\omega_y = A_0 + A_1 \cdot e^{-\frac{\infty}{T_M}} = A_0,$$

то есть

$$\omega_y = A_0. \quad (3.51)$$

Для  $t = 0$  начальное значение угловой скорости в общем случае равно  $\omega_{нач}$  (в частном случае  $\omega_{нач} = 0$ ), тогда, подставив в (3.50)  $A_0$  из (3.50), найдем

$$\omega_{нач} = \omega_y + A_1 \cdot e^{-\frac{0}{T_M}} = \omega_y + A_1$$

или

$$A_1 = \omega_{нач} - \omega_y. \quad (3.52)$$

Подставив в (3.50) значения постоянных интегрирования из (3.51) и (3.52), получим в общем случае

$$\omega = \omega_y + (\omega_{\text{нач}} - \omega_y) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (3.53)$$

В частном случае, когда пуск двигателя происходит из неподвижного состояния ( $\omega_{\text{нач}} = 0$ ) без нагрузки, до скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  переходный процесс определяется уравнением

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}). \quad (3.54)$$

График переходного процесса, рассчитанный по (3.53), приведен на рис 3.25.

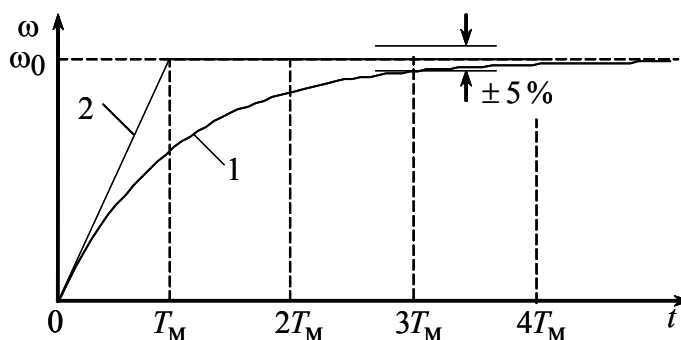


Рис. 3.25. График переходного процесса  $\omega = f(t)$  пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Теоретически переходный процесс, рассчитанный по (3.54), заканчивается за бесконечно большое время, однако в электроприводе переходный процесс считается законченным, когда график переходного процесса входит в 5%-ю зону. В данном случае это происходит при  $t = 3 \cdot T_M$ . Если бы пуск двигателя происходил при неизменном токе якоря, равном току короткого замыкания  $I_{кз}$ , то скорость двигателя изменялась бы в соответствии с ломаной линией 2. Начальный участок ломанной линии 2 является касательной к экспоненциальной кривой 1. Этим свойством пользуются при экспериментальном определении электромеханической постоянной времени  $T_M$ , при снятии осциллограмм переходных процессов пуска двигателя.

Продифференцируем уравнение (3.41) по времени и решим его относительно  $\frac{d\omega}{dt}$ . Получим



$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{R_{яц}}{c} \frac{dI}{dt}. \quad (3.55)$$

Подставив (3.54) в (3.42) и произведя небольшие преобразования, будем иметь

$$\frac{J \cdot R_{яц}}{c^2} \frac{dI}{dt} + I = I_c \quad (3.56)$$

или с учетом (3.45)

$$T_M \frac{dI}{dt} + I = I_c. \quad (3.57)$$

Решение (3.57) находится в общем случае в виде

$$I = A_0 + A_1 \cdot e^{p \cdot t}, \quad (3.58)$$

где  $p = -\frac{1}{T_M}$ , однако начальные условия  $A_0$  и  $A_1$  определяются для тока якоря  $I$ .

Для  $t = \infty$  значение тока якоря будет равно установившемуся значению  $I_c$ . При подстановке  $t = \infty$  в (3.50) получим

$$I_c = A_0 + A_1 \cdot e^{-\frac{\infty}{T_M}} = A_0, \quad (3.59)$$

то есть  $I_c = A_0$ .

Для  $t = 0$  начальное значение тока якоря равно  $I_{нач}$  и в общем случае определяется по формуле

$$I_{нач} = \frac{U - E}{R_{яц}}, \quad (3.60)$$

в частном случае, когда ЭДС двигателя равна нулю,  $I_{нач} = I_{кз}$ .

Тогда, при подстановке  $t = \infty$  в (3.58) получим

$$I_{нач} = I_y + A_1 \cdot e^{-\frac{0}{T_M}} = I_y + A_1$$

или

$$A_1 = I_{нач} - I_y.$$

Подставив в (3.58) значения постоянных интегрирования  $A_0$  и  $A_1$ ,

$$\text{будем иметь} \quad I = I_y + (I_{нач} - I_y) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (3.61)$$

При пуске двигателя из неподвижного состояния без нагрузки, когда  $I_{\text{нач}} = I_{\text{кз}}$ , а  $I_{\text{у}} = 0$ , переходный процесс тока якоря двигателя описывается уравнением

$$I = I_{\text{кз}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{М}}}}. \quad (3.62)$$

Построенные по (3.62) зависимости приведены на рис. 3.26.

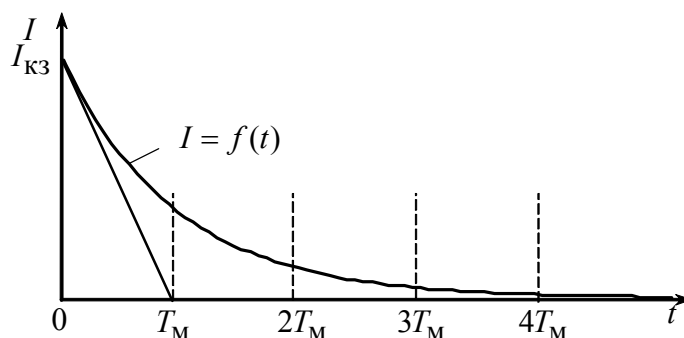


Рис. 3.26. График переходного процесса  $I = f(t)$  при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Переходный процесс тока при принятых допущениях определяется экспоненциальной зависимостью и заканчивается в то же время, что и переходный процесс скорости.

Полученные аналитические уравнения (3.53) и (3.61) позволяют произвести анализ влияния на вид и характер переходных процессов различных параметров электропривода. Так, например, увеличение момента инерции  $J$  электропривода приводит к возрастанию электрохимической постоянной времени  $T_{\text{М}}$  и, следовательно, к затягиванию переходного процесса — он закончится за большее время. Можно показать, что увеличение нагрузки на валу двигателя не влияет на время переходного процесса, однако установившиеся значения скорости и тока будут другими, в соответствии со статическими электрохимическими характеристиками.

Уравнения (3.53) и (3.61) могут использоваться для расчета и анализа переходных процессов пуска, реверса, торможения двигателя, а также при изменении нагрузки на его валу. При расчете по ним необходимо в каждом конкретном случае определить начальные и установившиеся значения координат электропривода  $\omega_{\text{нач}}$ ,  $\omega_{\text{у}}$ ,  $I_{\text{нач}}$ ,  $I_{\text{у}}$ , а также постоянную времени  $T_{\text{М}}$ .

**Пример 3.3.** Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения построить статические электромеханические характеристики реостатного пуска в две ступени пусковых сопротивлений, записать уравнения для расчета переходных процессов скорости и тока для каждого из участков пуска, а также изобразить графики переходных процессов. Основные параметры двигателя приведены в примере 3.1.

Переходные процессы построить при нагрузке на валу двигателя, не равной нулю.

**Решение.** В соответствии с условиями задачи схема силовых цепей двигателя должна иметь вид, приведенный на рис. 3.27.

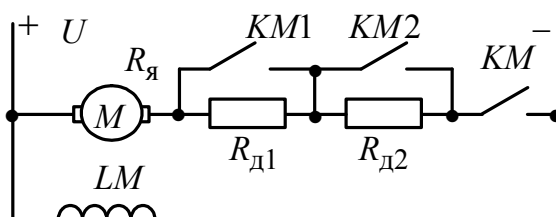


Рис. 3.27. Силовые цепи реостатного пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения

В рассматриваемом электроприводе обмотка возбуждения  $LM$  двигателя включена независимо от его обмотки якоря  $M$ . В процессе пуска двигателя вначале запитывается обмотка возбуждения  $LM$ , затем, когда переходный процесс нарастания тока в обмотке возбуждения закончится и поток двигателя  $\Phi$  станет равным номинальному, замыкается контактор  $KM$ . Обмотка якоря двигателя подключается к источнику постоянного напряжения  $U$  через пусковые сопротивления  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ . По мере разгона двигателя пусковые сопротивления  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$  последовательно выводятся из цепи обмотки якоря путем закорачивания их замыкающими контактами  $KM1$  и  $KM2$ .

Электромеханические характеристики электропривода при пуске двигателя в две ступени пусковых сопротивлений приведены на рис. 3.28.

Порядок построения характеристик следующий:

- строится естественная характеристика 3 (порядок расчета естественной электромеханической характеристики рассмотрен в примере 3.1;

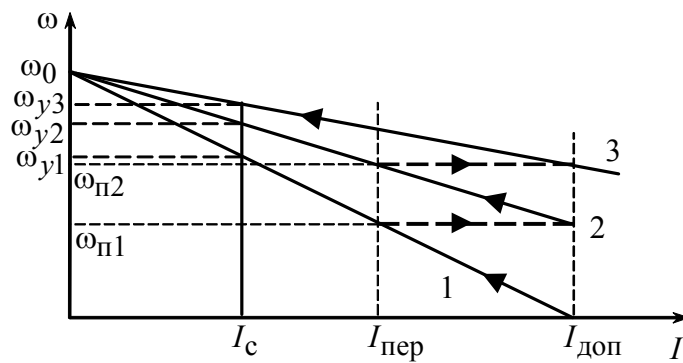


Рис. 3.28. Электромеханические характеристики реостатного пуска двигателя в две ступени

- строится первая пусковая электромеханическая характеристика 1. Характеристика 1 проходит через две точки: скорости идеального холостого хода при токе якоря, равном нулю ( $\omega_0, I = 0$ ), и допустимого тока  $I_{доп}$  при скорости, равной нулю ( $\omega = 0$ ). Значение допустимого тока  $I_{доп}$  обычно определяется из условия удовлетворительной коммутации

$$I_{доп} = \lambda_I \cdot I_H, \quad (3.63)$$

где  $\lambda_I$  – перегрузочная способность двигателя по току;

- определяется ток переключения  $I_{пер}$ , который принимается равным

$$I_{пер} = (1,1 \div 1,2) \cdot I_H; \quad (3.64)$$

- в точке с координатами  $(I_{пер}, \omega_{п1})$  происходит закорачивание первого пускового сопротивления  $R_{д1}$  (закрывается контакт  $KM1$ ) и двигатель переходит на пусковую характеристику 2. Таким образом, характеристика 2 проходит через две точки: скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  при токе якоря, равном нулю ( $I = 0$ ), и допустимого тока  $I_{доп}$  при скорости, равной  $\omega_{п1}$ .

Закорачивание второго пускового сопротивления  $R_{д2}$  также необходимо производить при токе переключения  $I_{пер}$ . Бросок тока при переходе двигателя на естественную характеристику должен быть равен допустимому току  $I_{доп}$ . Если это не происходит, то ток переключения  $I_{пер}$  необходимо поменять, соответственно несколько увеличив или уменьшив его, однако если ток переключения становится меньше

$1,1 \cdot I_H$ , то необходимо увеличить число пусковых сопротивлений. Конечный график пусковых статических характеристик должен выглядеть так, как показано на рис. 3.28, в этом случае при заданном числе пусковых ступеней переходный процесс будет протекать за меньшее время по сравнению с другими вариантами построения электромеханических характеристик.

Пусковые сопротивления при пуске двигателя в две ступени можно определить графоаналитически:

$$R_{п2} = \frac{U_H - c \cdot \omega_{п1}}{I_{доп}} - R_{дв} \quad (3.65)$$

и

$$R_{п1} = \frac{U_H}{I_{доп}} - R_{дв} - R_{п2}, \quad (3.66)$$

где  $\omega_{п1}$  – берется из графика электромеханических характеристик.

Уравнения расчета переходных процессов для первой пусковой характеристики:

скорости 
$$\omega = \omega_{y1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{M1}}} \right), \quad (3.67)$$

тока 
$$I = I_c + (I_{доп} - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M1}}}, \quad (3.68)$$

электромеханической постоянной времени 
$$T_{M1} = \frac{J \cdot (R_{дв} + R_{п1} + R_{п2})}{c^2}.$$

Переходные процессы скорости и тока при пуске двигателя по первой пусковой характеристике стремятся попасть в точку установившейся работы с координатами  $\omega_{y1}$ ,  $I_c$ , однако при достижении скорости  $\omega_{п1}$  происходит закорачивание первого пускового сопротивления  $R_{п1}$  и двигатель переходит на вторую пусковую характеристику – 2.

Уравнения для расчета переходных процессов пуска двигателя по второй пусковой характеристике:

скорости 
$$\omega = \omega_{y2} + (\omega_{п1} - \omega_{y2}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M2}}}, \quad (3.69)$$

тока 
$$I = I_c + (I_{доп} - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M2}}}, \quad (3.70)$$

электромеханической постоянной времени  $T_{M2} = \frac{J \cdot (R_{дв} + R_{п2})}{c^2}$ .

Переходные процессы скорости и тока при пуске двигателя по второй пусковой характеристике стремятся попасть в точку установившейся работы с координатами  $\omega_{y2}$ ,  $I_c$ , однако при достижении скорости  $\omega_{п2}$  происходит закорачивание второго пускового сопротивления  $R_{п2}$  и двигатель переходит на естественную характеристику – 3.

Уравнения для расчета переходных процессов пуска двигателя по естественной характеристике:

скорости  $\omega = \omega_{y3} + (\omega_{п2} - \omega_{y3}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M3}}}$ , (3.71)

тока  $I = I_c + (I_{доп} - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M3}}}$ , (3.72)

электромеханической постоянной времени  $T_{M3} = \frac{J \cdot R_{дв}}{c^2}$ .

По уравнениям (3.67) – (3.72) для численных значений параметров скорости  $\omega_{нач}$ ,  $\omega_y$  и тока  $I_{нач}$ ,  $I_y$  строятся графики переходных процессов  $\omega = f(t)$  и  $I = f(t)$  (рис. 3.29).

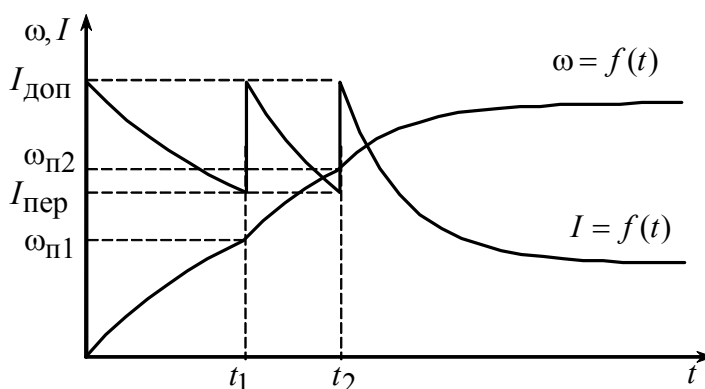


Рис. 3.29. Графики переходных процессов скорости и тока при пуске двигателя постоянного тока в две ступени

Анализ графиков рис. 3.29 показывает, что по мере разгона двигателя при переходе с одной ступени на другую электромеханическая постоянная времени  $T_M$  электропривода уменьшается, а переходные процессы протекают быстрее.

### 3.13. Принципы автоматизации управления в релейно-контакторных электроприводах с двигателями постоянного тока

Автоматизация процесса пуска двигателя значительно облегчает управление электроприводами, предотвращает возможные ошибки при пуске двигателя и ведет к повышению производительности механизмов.

На рис. 3.29 приведены графики переходных процессов скорости и тока при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения в две ступени пусковых сопротивлений.

Анализ этих графиков показывает, что автоматическое выключение пусковых сопротивлений должно производиться в определенные моменты времени ( $t_1$  и  $t_2$ ), при определенных скоростях ( $\omega_{п1}$  и  $\omega_{п2}$ ) и определенном токе  $I_{пер}$ . Очевидно, что управление пуском двигателя может осуществляться по *принципам времени, скорости и тока*.

*Принцип времени* предполагает, что в электрической схеме имеются контролирующие время аппараты, которые в заданные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  формируют сигналы на закорачивание пусковых сопротивлений  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .

*Принципы скорости и тока* предполагают, что электрическая схема электропривода автоматически контролирует соответственно скорость двигателя и его ток и при заданных значениях переменных формирует сигналы на закорачивание пусковых сопротивлений.

Кроме этих трех принципов на практике получили распространение управления по принципу пути, мощности, счета операций и т. д.

В релейно-контакторных электроприводах наиболее распространенными датчиками времени, скорости и тока являются соответствующие реле или контакторы. Так, наиболее распространенным датчиком времени является реле времени, в качестве датчика тока чаще всего используют реле тока, обмотка которого непосредственно включается в якорную цепь двигателя. Датчиком скорости в релейно-контакторных схемах управления электроприводами служит непосредственно сама обмотка якоря двигателя, ЭДС которой при постоянном потоке двигателя пропорциональна скорости вращения ( $E = c \cdot \omega$ ). Контролирующими же ЭДС двигателя аппаратами являются силовые контакторы.

### 3.13.1. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу скорости

Типовая схема пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения по принципу скорости приведена на рис. 3.30.

Схема работает следующим образом. После подачи напряжения на схему силовых цепей двигателя запитывается обмотка возбуждения  $LM$ . Пуск происходит при полном потоке двигателя  $\Phi_n$ .

При нажатии кнопки  $SB1$  получает питание обмотка контактора  $KM$ , он срабатывает и самоблокируется, то есть параллельно кнопке  $SB1$  замыкается вспомогательный контакт  $KM$ . Кроме того, замыкается силовой контакт  $KM$  в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгоняться по первой пусковой характеристике (см. рис. 3.28) с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .

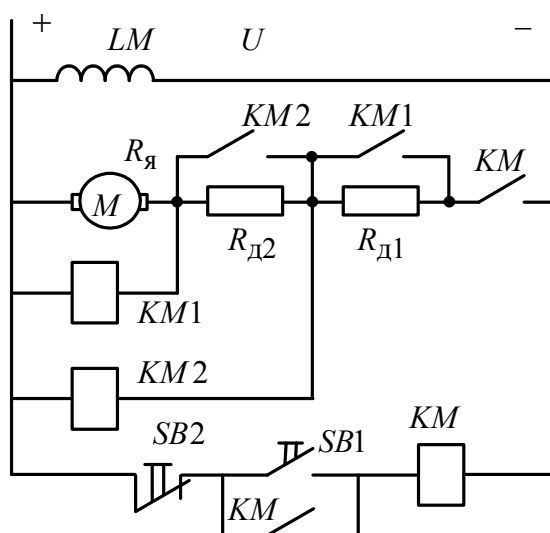


Рис. 3.30. Схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с управлением по принципу скорости

По мере разгона двигателя растет и ЭДС обмотки якоря и соответственно увеличивается напряжение на контакторах  $KM1$  и  $KM2$ . При достижении двигателем скорости  $\omega_{п1}$  значение ЭДС на контакторе  $KM1$  становится достаточным для его срабатывания  $U_{ср,км1} = c \cdot \omega_{п1} + I_{пер} \cdot R_{дв}$  и контактор  $KM1$  притягивает свой якорь. Замыкается контакт  $KM1$ , шунтирующий резистор  $R_{д1}$ , и двигатель переходит на вторую пусковую характеристику – 2. При скорости  $\omega_{п2}$  на-



пряжение на контакторе  $KM2$ , равное  $U_{\text{ср.км2}} = c \cdot \omega_{\text{п2}} + I(R_{\text{дв}} + R_{\text{д1}})$ , становится достаточным для его срабатывания. Контактор  $KM2$  притягивает свой якорь, замыкается контакт  $KM2$ , шунтирующий резистор  $R_{\text{д2}}$ , двигатель переходит на естественную характеристику – 3 и разгоняется по ней до установившейся скорости  $\omega_{\text{у3}}$  определяемой нагрузкой  $I_{\text{с}}$ .

Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку  $SB2$  «Стоп». Контактор  $KM$  потеряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения  $U$ . Торможение электродвигателя происходит *выбегом*, то есть за счет потерь в подшипниках двигателя, в кинематике производственного механизма, на вентиляцию в двигателе.

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  при пуске двигателя приведены на рис. 3.29.

Недостатки данной схемы заключаются в возможном перегорании пусковых резисторов при застревании двигателя на пусковой характеристике с увеличением нагрузки более  $I_{\text{пер}}$ , в неточном срабатывании контакторов при холодном и нагретом состояниях катушек, а также в том, что случайное увеличение напряжения сети во время пуска вызывает увеличение тока якоря.

### 3.13.2. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу времени

Схема пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения по принципу времени приведена на рис. 3.31.

После подачи напряжения на схему силовых цепей запитывается обмотка возбуждения двигателя  $LM$ . Пуск происходит при полном потоке двигателя  $\Phi_{\text{н}}$ . Через размыкающий контакт контактора  $KM$  получает питание обмотка реле времени  $KT1$ . Реле  $KT1$ , включившись, разрывает своим размыкающим контактом  $KT1$  цепи питания контакторов  $KM1$  и  $KM2$ . Схема подготовлена к пуску двигателя.

При нажатии кнопки  $SB1$  получает питание обмотка контактора  $KM$ , он срабатывает, самоблокируется и замыкает свой вспомогательный контакт  $KM$  в цепи питания контакторов  $KM1$  и  $KM2$ , однако они не включаются, так как разорвана цепь их питания размыкающим контактом реле времени  $KT1$ . Замыкается силовой контакт  $KM$  в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгон по первой пусковой характеристике (см. рис. 3.28) с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями  $R_{\text{д1}}$  и  $R_{\text{д2}}$ .

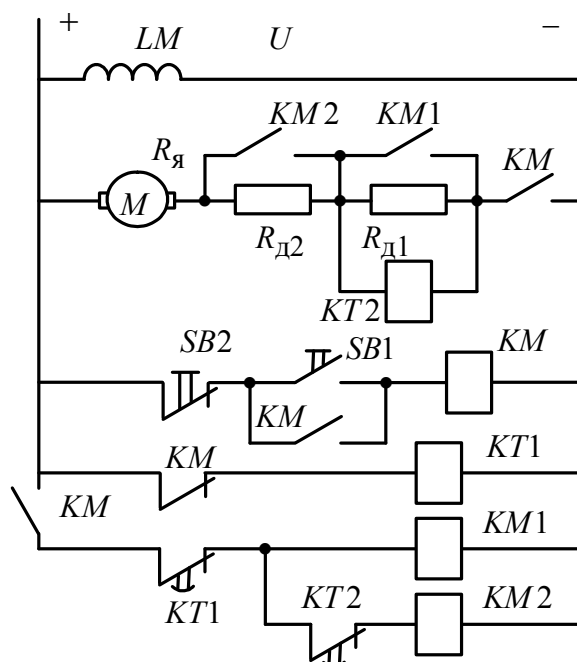


Рис. 3.31. Схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с управлением по принципу времени

От падения напряжения на резисторе  $R_{д1}$  включается реле времени  $KT2$  и размыкает свой размыкающий контакт  $KT2$  в цепи питания контактора  $KM2$ . Кроме того, размыкающий контакт  $KM$  разрывает цепь питания реле времени  $KT1$ , и оно начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по первой пусковой характеристике – (см. рис. 3.29). По истечении времени  $t_1$  размыкающий контакт реле времени  $KT1$  замыкается. Получает питание катушка контактора  $KM1$ , он, включившись, своим замыкающим контактом  $KM1$  шунтирует первое пусковое сопротивление  $R_{д1}$ . Двигатель переходит на вторую пусковую характеристику – 2 (см. рис. 3.28). Теряет питание реле времени  $KT2$  и своим размыкающим контактом  $KT2$  начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по второй пусковой характеристике. По истечении этой выдержки времени, в момент времени  $t_2$  (см. рис. 3.29), размыкающий контакт  $KT2$  замыкается. Получает питание обмотка контактора  $KM2$ , замыкается контакт  $KM2$ , шунтирующий резистор  $R_{д2}$ , двигатель переходит на естественную характеристику – 3 и разгоняется по ней до установившейся скорости  $\omega_{у3}$ , определяемой нагрузкой  $I_c$ .

Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку  $SB2$  «Стоп». Контактор  $KM$  потеряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения  $U$ . Торможение электродвигателя происходит *выбегом*.

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  при пуске двигателя в функции времени приведены на рис. 3.29.

Достоинством схемы управления, осуществляющей пуск двигателя в функции времени, является отсутствие опасности застревания двигателя на пусковых характеристиках. Простота и надежность в работе, также как и возможность применения однотипных реле времени, привели к широкому применению электроприводов, управляемых в функции времени.

### 3.13.3. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу тока

Схема пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения по принципу тока приведена на рис. 3.32. Схема работает следующим образом. После подачи напряжения на схему силовых цепей запитывается обмотка возбуждения двигателя  $LM$ . Пуск происходит при полном потоке двигателя  $\Phi_H$ . Схема подготовлена к пуску двигателя.

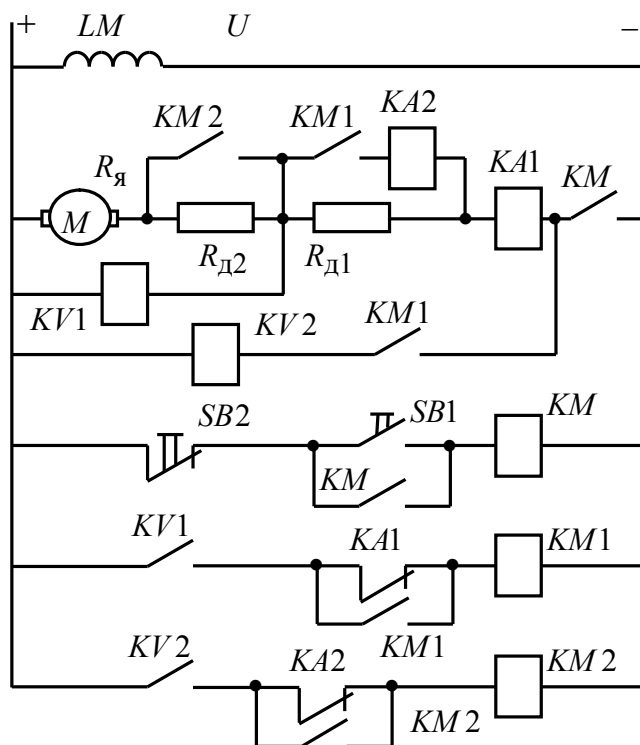


Рис. 3.32. Схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с управлением по принципу тока

При нажатии кнопки  $SB1$  получает питание обмотка контактора  $KM$ , он срабатывает, самоблокируется и замыкает силовой контакт  $KM$

в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгон по первой пусковой характеристике (см. рис. 3.28) с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .

От броска пускового тока включается токовое реле  $KA1$ , которое размыкает свой размыкающий контакт  $KA1$ . С некоторой задержкой включается вспомогательное реле напряжения  $KV1$ . Реле  $KV1$  замыкает свой контакт  $KV1$  в цепи контактора  $KM1$ , подготавливая его к включению. По мере разгона двигателя его ток уменьшается и, как только он достигнет значения  $I_{пер}$ , токовое реле  $KA1$  отпускает свой якорь. Замыкается размыкающий контакт  $KA1$  и контактор  $KM1$  получает питание, он, включившись, замыкает свой силовой контакт в силовой якорной цепи двигателя, шунтируя первое пусковое сопротивление  $R_{д1}$  и самоблокируется. Двигатель переходит на вторую пусковую характеристику.

Вновь происходит бросок тока якоря до значения  $I_{доп}$  (см. рис. 3.28). Токовые реле  $KA1$  и  $KA2$  включаются и размыкают свои размыкающие контакты. Повторное включение токового реле  $KA1$  не вызовет выключения контактора  $KM1$ , так как он получает питание через свой замыкающий контакт  $KM1$ . Включается вспомогательное реле  $KV2$ , подготавливая цепь питания контактора  $KM2$ .

По мере разгона двигателя по характеристике 2 его ток уменьшается и, как только он достигнет значения  $I_{пер}$ , токовое реле  $KA2$  отпускает свой якорь. Получает питание контактор  $KM2$ , который замыкает свой силовой контакт в силовой якорной цепи двигателя, шунтируя второе пусковое сопротивление  $R_{д2}$ , и самоблокируется. Двигатель переходит на естественную характеристику и разгоняется по ней до установившейся скорости  $\omega_{у3}$ , определяемой нагрузкой  $I_c$ .

Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку  $SB2$  «Стоп». Контактор  $KM$  потеряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения  $U$ . Торможение электродвигателя происходит *выбегом*. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  при пуске двигателя в функции времени приведены на рис. 3.29.

Схемы, основанные на принципе управления в функции тока, имеют один существенный недостаток. Если по какой-либо причине нагрузка на валу двигателя возрастет и ток якоря станет больше  $I_{пер}$ , то пусковые резисторы окажутся не выключенными, возможно их перегорание. Кроме того, обладая теми же свойствами, что и схема пуска дви-

гателя в функции скорости, схема пуска двигателя в функции тока несколько сложнее за счет вспомогательных реле напряжения и тока.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Изобразите схему включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
2. Назовите основные законы, положенные в основу вывода уравнения механической характеристики двигателя постоянного тока.
3. Назовите основные способы регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
4. Что называется искусственной электромеханической характеристикой двигателя постоянного тока независимого возбуждения?
5. Назовите основные точки, по которым производится анализ искусственных характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
6. Назовите основные способы электрического торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
7. Что такое динамическая механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения и как она строится?
8. При какой температуре приводятся в каталогах параметры двигателя постоянного тока независимого возбуждения?
9. Почему необходимо пересчитать сопротивления двигателя постоянного тока на рабочую температуру?
10. Какими показателями оценивается регулирование скорости?
11. С какой целью регулируют скорость вращения двигателя?
12. Поясните суть и перечислите показатели реостатного регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
13. Поясните суть и перечислите показатели регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения обмотки якоря.
14. В каких случаях необходимо регулировать скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения?
15. Изобразите основную схему включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
16. Назовите основные способы регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
17. Как осуществить реверс двигателя постоянного тока последовательного возбуждения?
18. Что такое переходный процесс в электроприводе?

19. Дайте определение электромеханической постоянной времени двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

20. Какие допущения принимаются при исследовании процессов пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения?

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

22. Назовите принципы автоматизации управления в релейно-контакторных электроприводах.

23. Поясните по принципиальной схеме рис. 3.31 последовательность работы электропривода при пуске по принципу скорости.

24. Поясните по принципиальной схеме рис. 3.32 последовательность работы электропривода при пуске по принципу времени.

## 4. СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 4.1. Общие положения

Для регулирования скорости двигателя постоянного тока по цепи обмотки якоря изменением напряжения используются регулируемые преобразователи различной физической природы:

- электромашинные, выполняемые по системе генератор-двигатель;
- полупроводниковые с тиристорными преобразователями переменного напряжения в регулируемое постоянное, выполняемые по системе тиристорный преобразователь-двигатель (ТП-Д);
- полупроводниковые с транзисторными регуляторами напряжения, выполняемые по системе широтно-импульсный преобразователь-двигатель (ШИП-Д).

### 4.2. Система генератор-двигатель

Система Г-Д постоянного тока устарела и морально, и технически, не используется в новых разработках с 80-х годов XX века, однако продолжает эксплуатироваться в установках большой мощности, например, в электроприводах клетей прокатных станов и экскаваторах.

Схема силовых цепей системы Г-Д приведена на рис. 4.1.

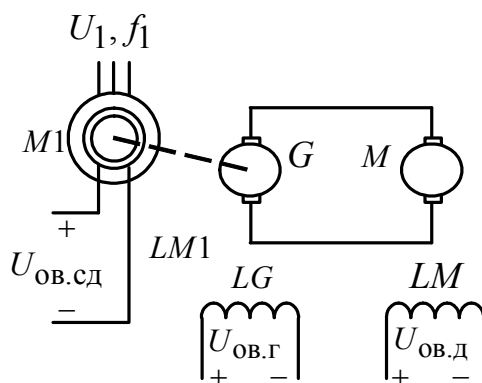


Рис. 4.1. Схема силовых цепей системы генератор-двигатель

В системе Г-Д двигатель  $M$  получает питание по цепи обмотки якоря от отдельного генератора  $G$ . Генератор  $G$  вращается синхронным  $M1$  или асинхронным двигателем. В случае применения синхронного двигателя в качестве приводного двигателя (гонника) он, как пра-

вило, работает с опережающим  $\cos\varphi$ , что позволяет компенсировать реактивную мощность предприятия.

Управление процессами пуска, реверса и торможения в системе Г-Д перенесено из силовой якорной цепи в маломощные цепи обмоток возбуждения электрических машин. Регулируя напряжение, подводимое к обмотке возбуждения генератора  $LG$ , можно изменять его ЭДС:

$$E_{\Gamma} = k_{\Gamma} \cdot \Phi_{\Gamma} \cdot \omega_{\Gamma}, \quad (4.1)$$

где  $k_{\Gamma}$  – конструктивный коэффициент генератора постоянного тока.

Из (4.1) следует, что при постоянной скорости вращения генератора  $G$  его ЭДС будет определяться потоком возбуждения  $\Phi_{\Gamma}$ , который регулируется путем изменения напряжения  $U_{\text{ов.Г}}$ , подводимого к обмотке возбуждения генератора.

Уравнения электромеханической и механической характеристик электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения, работающего в системе Г-Д, определяются выражениями (3.29) и (3.30):

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - I \frac{R_{\text{дв}} + R_{\Gamma}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}},$$

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - M \frac{R_{\text{дв}} + R_{\Gamma}}{(k \cdot \Phi_{\text{д}})^2}.$$

Анализ уравнения (3.29), описывающего электромеханические характеристики электропривода, показывает, что характеристики системы Г-Д при изменении потока возбуждения генератора  $\Phi_{\Gamma}$  или его ЭДС  $E_{\Gamma}$  представляют взаимно параллельные прямые линии, жесткость которых остается постоянной и определяется суммарным сопротивлением обмоток якоря генератора и двигателя. Эти характеристики располагаются в так называемой первой зоне I регулирования скорости при переменном напряжении обмотки возбуждения генератора. При изменении полярности напряжения обмотки возбуждения генератора, как следует из (4.1), меняется полярность его ЭДС и как следствие – направление вращения электродвигателя  $M$ . Семейство электромеханических характеристик системы Г-Д приведено на рис. 4.2.

Электромеханические и механические характеристики электропривода, выполненного по системе Г-Д, располагаются в четырех квадрантах. При переходе электродвигателя в режим рекуперативного торможения, то есть при угловой скорости, большей скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ , генератор  $G$  начинает работать электродвигателем, вращая гонник  $M1$ , который в свою очередь становится генератором, работающим параллельно с сетью.



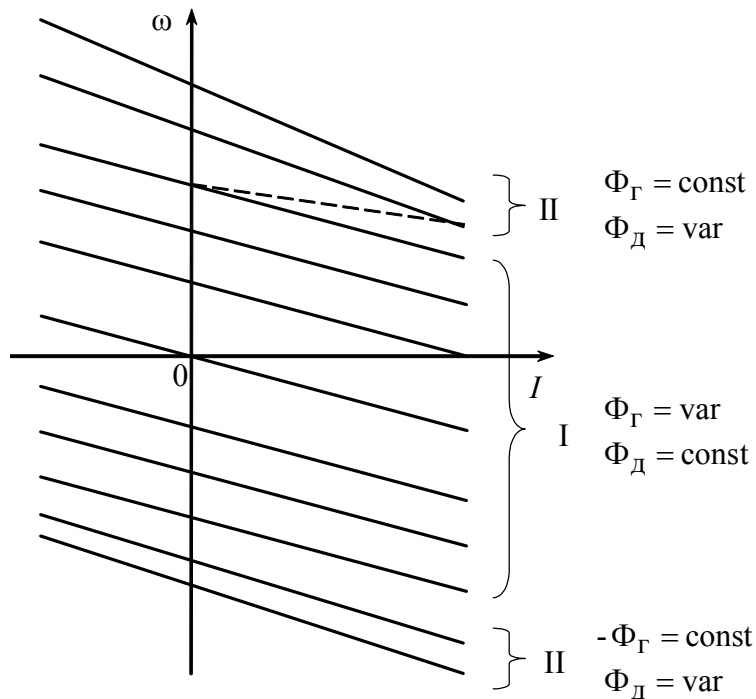


Рис. 4.2. Семейство электромеханических характеристик системы генератор-двигатель

Система Г-Д может работать и во второй зоне II регулирования скорости. Электромеханические характеристики при работе электропривода во второй зоне с переменным потоком возбуждения двигателя  $M$  ( $\Phi_{\text{д}} = \text{var}$ ,  $\Phi_{\text{Г}} = \text{const}$ ) приведены на рис. 4.2 как для положительного, так и для отрицательного направления вращения двигателя. На рис. 4.2 показана пунктиром естественная электромеханическая характеристика двигателя.

В отличие от релейно-контакторных схем управления двигателями постоянного тока в системе Г-Д отсутствуют громоздкие пусковые реостаты, а также потери энергии в них при пусках, реверсах, торможения, а также при регулировании скорости. Диапазон регулирования скорости обычно не превышает  $1 \div 30$ .

Основной недостаток систем Г-Д – два вращающихся агрегата в преобразователе. Общая мощность электрических машин превышает в три раза мощность исполнительного двигателя.

### 4.3. Электроприводы с полупроводниковыми преобразователями

Вследствие отмеченных недостатков преобразователей энергии с вращающимися агрегатами на всех этапах развития электропривода много внимания уделялось замене электромашинных преобразователей

энергии статическими вентильными преобразователями. В 60-х годах XX столетия получила распространение система управляемый ртутный выпрямитель-двигатель (УРВ-Д). Однако большие недостатки системы УРВ-Д (значительное падение напряжения в дуге, большие габариты, сложность и небезопасность эксплуатации приборов с большим содержанием ртути) не позволили этой системе сколько-нибудь эффективно заменить электромашинные преобразователи.

Задача построения статических преобразователей электрической энергии получила успешное решение только при создании мощных полупроводниковых приборов – тиристоров и транзисторов.

Мощные полупроводниковые приборы, используемые в силовых преобразовательных устройствах, работают только в ключевых режимах, для которых существуют два устойчивых состояния:

- открытое состояние – максимальная электрическая проводимость;
- закрытое состояние – минимальная электропроводность.

Вольтамперные характеристики наиболее распространенных полупроводниковых приборов транзисторов и тиристоров приведены на рис. 4.3.

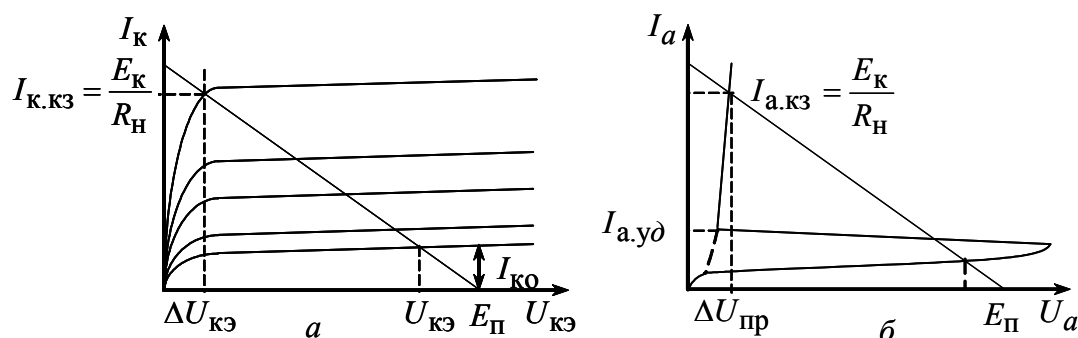


Рис. 4.3. Вольтамперные характеристики (а) транзисторов и (б) тиристоров, работающих в ключевом режиме

При работе в ключевом режиме потери активной мощности  $P = U \cdot I$  в полупроводниковых приборах малы, так как один из сомножителей этого произведения (ток  $I$  или напряжение  $U$ ) имеет минимально возможное значение. Это обеспечивает высокий КПД преобразователей электрической энергии.

В процессе переключения из закрытого состояния полупроводникового прибора в открытое и наоборот напряжение и ток изменяются по линии нагрузки постоянного тока. Произведение тока и напряжения значительно возрастают. Поэтому важно, чтобы эти переключения про-

текали за минимально возможное время. Это условие удалось реализовать в настоящее время в двух типах полупроводниковых приборов с внутренней положительной обратной связью, ускоряющей процессы переключения полупроводников – IGBT-транзисторах или биполярных транзисторах с изолированным затвором и тиристорах.

### 4.3.1. Система тиристорный преобразователь-двигатель

В автоматизированных электроприводах с широким диапазоном регулирования скорости система ТП-Д постоянного тока является в настоящее время преобладающей. На рис. 4.4 приведены схемы электропривода с тиристорными преобразователями, собранными по трехфазной нулевой схеме выпрямления.

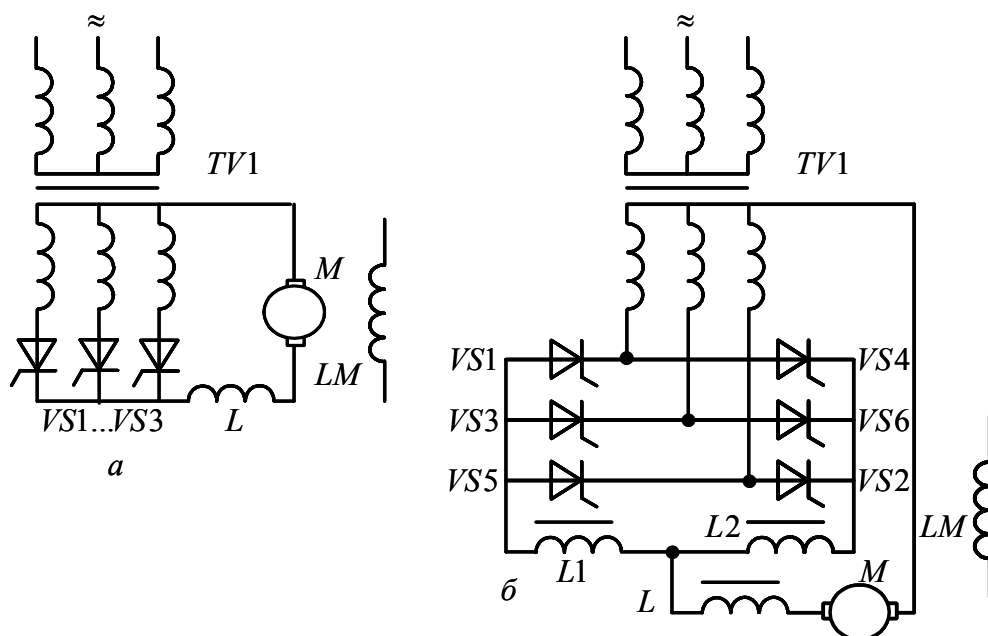


Рис. 4.4. Схемы электроприводов с тиристорными преобразователями:  
 а – трехфазный нулевой нереверсивный преобразователь;  
 б – трехфазный нулевой реверсивный преобразователь

Применяемые в преобразователях тиристоры – полууправляемые полупроводниковые приборы. Они включаются по цепи управляемого электрода положительным импульсом управления, а выключаются тогда, когда анодный ток тиристора  $I_a$  спадает ниже тока удержания  $I_{a.уд}$  (см. рис. 4.3, б).

Управляющие импульсы подаются на тиристоры поочередно в моменты времени, зависящие от напряжения управления тиристорным

преобразователем. Изменяя напряжение управления, можно менять угол  $\alpha$  открытия тиристоров и, следовательно, регулировать действующее выпрямленное напряжение на нагрузке. Диаграммы напряжений на выходе нереверсивного нулевого тиристорного преобразователя приведены на рис. 4.5.

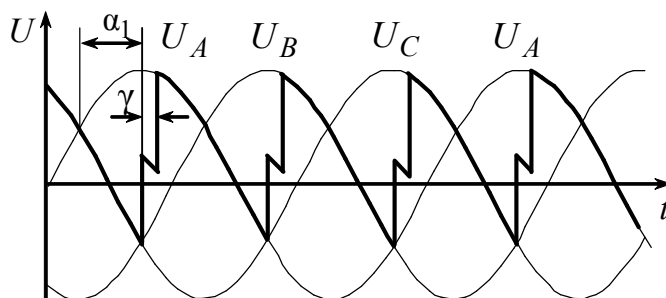


Рис. 4.5. Диаграммы напряжений на выходе нулевого тиристорного преобразователя в выпрямительном режиме

Тиристорный преобразователь работает в выпрямительном режиме при угле управления  $0 < \alpha < 90$  эл. град. В пределах угла перекрытия  $\gamma$  два тиристора нулевой схемы выпрямления будут открыты одновременно и подключены к одной нагрузке – якорю двигателя. Мгновенное значение выпрямленного напряжения при этом снижается на полуразность мгновенных значений фазных напряжений. Как следует из рис. 4.5 тиристоры открыты и при отрицательных фазных напряжениях вторичной обмотки трансформатора  $TV1$ . Это возможно только в том случае, когда в цепи выпрямленного тока большая индуктивность и ток в цепи обмотки якоря поддерживается за счет ЭДС самоиндукции. При малой индуктивности якорной цепи двигателя тиристоры при отрицательных напряжениях на вторичной обмотке трансформатора  $TV1$  закрываются, а ток в якорной цепи прерывается. Для уменьшения зоны прерывистого тока в якорную цепь электродвигателя включают дополнительную индуктивность  $L$ .

При активной нагрузке на валу двигателя тиристорный преобразователь может перейти в инверторный режим работы. Перевод преобразователя из выпрямительного режима работы в инверторный происходит при увеличении угла управления  $\alpha$  свыше  $90$  эл. град. В инверторном режиме работы преобразователя с трехфазной нулевой схемой выпрямления электрическая машина постоянного тока становится генератором, а тиристоры открываются при отрицательных значениях напряжения вторичной обмотки трансформатора  $TV1$ . При работе тиристор-

ного преобразователя, как в выпрямительном, так и в инверторном режимах, ток через тиристоры протекает только в одном направлении.

Диаграммы напряжений на выходе нереверсивного нулевого тиристорного преобразователя при его работе в инверторном режиме приведены на рис. 4.6.

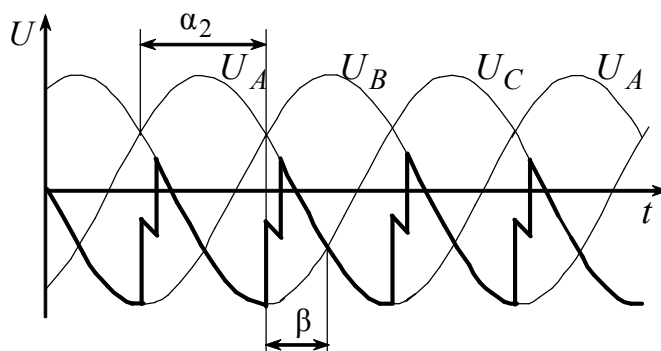


Рис. 4.6. Диаграммы напряжений на выходе нереверсивного нулевого тиристорного преобразователя при его работе в инверторном режиме

Среднее напряжение тиристорного преобразователя в режиме непрерывного тока может быть найдено из уравнения

$$U_{\text{ТП}} = E_{\text{ТП}0} \cdot \cos \alpha - I \cdot R_{\text{П}}, \quad (4.2)$$

где  $E_{\text{ТП}0}$  – ЭДС тиристорного преобразователя, зависящая от схемы выпрямления;  $R_{\text{П}}$  – эквивалентное активное сопротивление тиристорного преобразователя

Электромеханическая и механическая характеристики электропривода ТП-Д, в режиме непрерывного тока определяются выражениями:

$$\omega = \frac{E_{\text{ТП}} \cdot \cos \alpha}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - I \frac{R_{\text{ДВ}} + R_{\text{П}}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}}, \quad (4.3)$$

$$\omega = \frac{E_{\text{ТП}} \cdot \cos \alpha}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - M \frac{R_{\text{ДВ}} + R_{\text{П}}}{(k \cdot \Phi_{\text{д}})^2}. \quad (4.4)$$

Электромеханические характеристики нереверсивного электропривода, выполненного по схеме ТП-Д, приведены на рис. 4.7.

Характеристики расположены в первом и четвертом квадрантах правой декартовой системы координат, когда ток через двигатель протекает только в одном направлении. В четвертом квадранте электропривод работает за счет спускающегося груза при активной нагрузке на валу электродвигателя и инверторном режиме работы тиристорного преобразователя.

Пунктирной линией на рис. 4.7 ограничена зона прерывистого тока. В зоне прерывистого тока тиристорный преобразователь как бы обладает

дополнительным внутренним сопротивлением, которое в значительной степени уменьшает жесткость электромеханических характеристик.

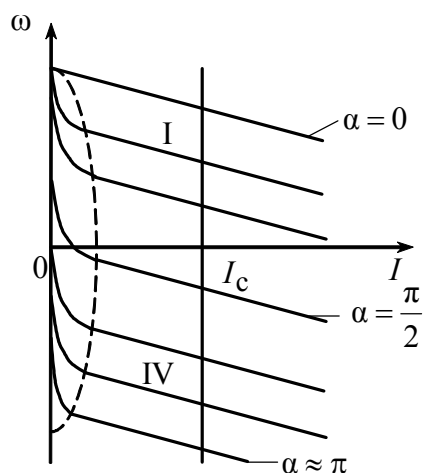


Рис. 4.7. Электромеханические характеристики неперсисвного электропривода, выполненного по схеме тиристорный преобразователь-двигатель

Для того чтобы выполнить тиристорный электропривод реверсивным, работающим в четырех квадрантах, необходимо использовать две группы тиристоров, включив их встречно-параллельно. Схема реверсивного электропривода с нулевым тиристорным преобразователем напряжения приведена на рис. 4.4, б. Группы тиристоров работают в совместном согласованном режиме, причем тиристоры  $VS1, VS3, VS5$  образуют одну группу, работающую в выпрямительном режиме, а тиристоры  $VS2, VS4, VS6$  – другую группу, работающую в противоположном режиме, инверторном, причем

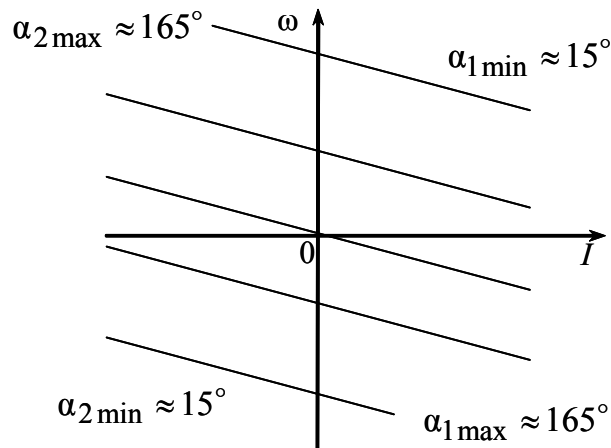
$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi, \quad (4.5)$$

где  $\alpha_1$  – угол управления группы тиристоров, работающих в выпрямительном режиме;  $\alpha_2$  – угол управления группы тиристоров, работающих в инверторном режиме.

Для другого направления вращения режимы работ групп тиристоров меняются, но условие (4.5) продолжает выполняться.

Мгновенные значения ЭДС выпрямительной и инверторной групп не равны между собой. Для уменьшения уравнивающих токов, протекающих между группами тиристоров, в электропривод введены реакторы  $L1$  и  $L2$ .

Электромеханические характеристики реверсивного электропривода ТП-Д с совместным согласованным управлением группами тиристоров приведены на рис. 4.8.



*Рис. 4.8. Электромеханические характеристики реверсивного электропривода тиристорный преобразователь-двигатель с совместным согласованным управлением группами тиристоров*

На практике применяются и другие схемы тиристорных преобразователей, например, с бестрансформаторной мостовой схемой выпрямления (см. рис 4.9). В этом случае тиристорные преобразователи получают питание через воздушные реакторы  $L1..L3$ . Сетевые реакторы  $L1..L3$  уменьшают возможные искажения в питающей сети, создаваемые тиристорными преобразователями, и ограничивают скорость нарастания тока через открывающиеся тиристоры (эффект  $dI/dt$ ), а также ограничивают ток короткого замыкания в преобразователе на время срабатывания механических автоматов (на схеме не показаны).

Нереверсивный вариант схемы, содержащий только одну группу тиристоров  $VS1..VS6$ , приведен на рис. 4.9, а. Реверсивный вариант схемы с двумя мостовыми тиристорными преобразователями  $VS1..VS6$  и  $VS7..VS12$ , включенными встречно-параллельно, приведен на рис. 4.9, б. В данной схеме работает всегда только одна группа тиристоров, например  $VS1..VS6$ , другая группа –  $VS7..VS12$  закрыта или наоборот. При подаче отпирающих импульсов на обе группы тиристоров произойдет короткое замыкание. Такое управление группами тиристоров называется раздельным управлением. Выбор для работы той или иной группы тиристоров зависит от необходимого направления вращения двигателя. За переключением групп тиристоров следит логическое переключающее устройство, которое разрешает включение последующей группы только после выключения предыдущей, по истечении некоторого времени, связанного с полным закрытием тиристоров в группе, выходящей из работы.

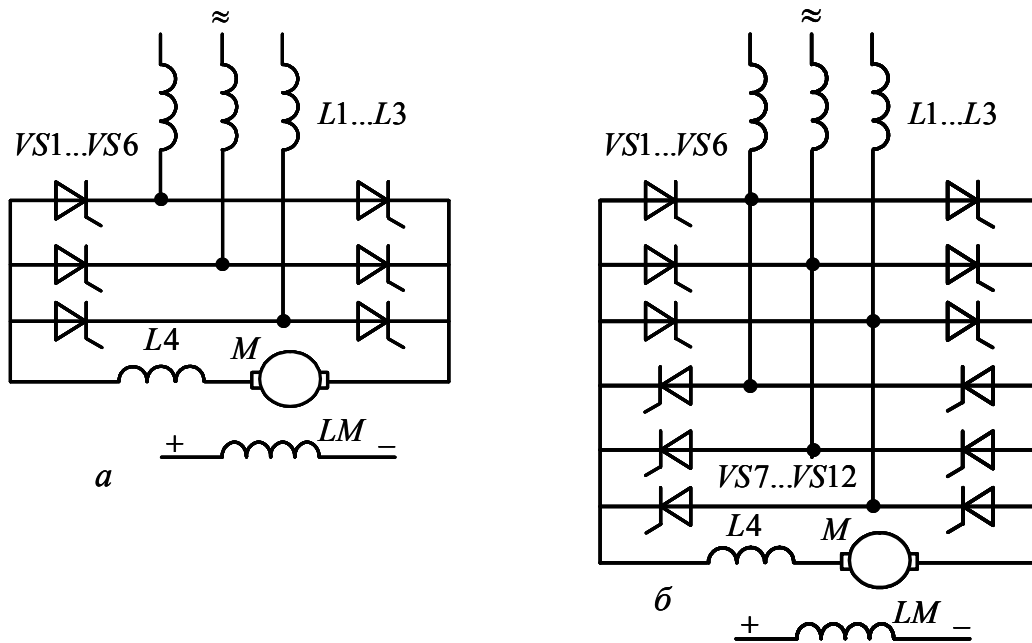


Рис. 4.9. Схемы электроприводов с тиристорными преобразователями:  
 а – трехфазный мостовой нереверсивный преобразователь;  
 б – трехфазный мостовой реверсивный преобразователь

Электромеханические характеристики нереверсивного электропривода с мостовым выпрямителем аналогичны характеристикам, приведенным на рис. 4.7, однако в случае применения мостового преобразователя зона прерывистых токов уменьшается.

Электромеханические характеристики реверсивного электропривода с мостовым выпрямителем и отдельным управлением группами тиристоров приведены на рис. 4.10.

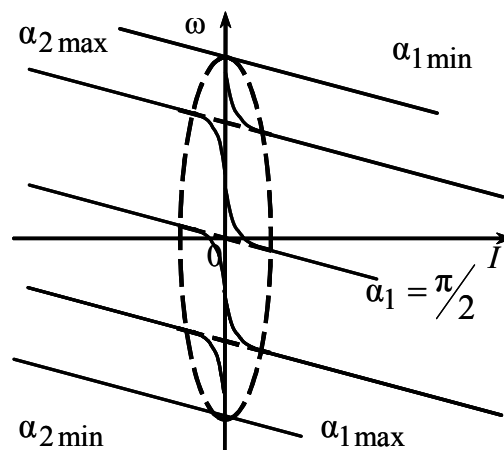


Рис. 4.10. Электромеханические характеристики реверсивного электропривода с мостовым выпрямителем и отдельным управлением группами тиристоров



Системы тиристорный преобразователь-двигатель позволили:

- расширить диапазон регулирования скорости в замкнутых системах до  $D = 1:10000$ ;
- обеспечить плавное регулирование скорости  $\varphi_{\text{пл}} \rightarrow 1$ ;
- получить необходимую жесткость механических характеристик  $k_{\beta} \rightarrow \infty$ ;
- обеспечить высокий КПД  $\rightarrow 0,95$ .

Одним из основных недостатков электроприводов с тиристорными преобразователями является низкий коэффициент мощности. Можно приближенно считать, что

$$\cos \varphi \approx \cos \alpha .$$

Таким образом, если электропривод будет продолжительное время работать с низкими скоростями, то он будет работать и с низким коэффициентом мощности.

Мощные тиристорные преобразователи вносят искажения в форму напряжения питающей сети.

Несмотря на отмеченные недостатки, системы ТП-Д получили наибольшее распространение в конце XX века среди автоматизированных электроприводов с большим диапазоном регулирования скорости. В настоящее время они преобладают в промышленных установках.

#### **4.3.2. Электроприводы постоянного тока с транзисторными преобразователями**

Наиболее эффективные способы регулирования скорости двигателя постоянного тока связаны с изменением напряжения его обмотки якоря. При питании обмотки якоря от источника постоянного напряжения транзисторные преобразователи, в связи с их полной управляемостью, получили наибольшее распространение. Современную элементную базу в преобразователях постоянного напряжения в регулируемое постоянное составляют в настоящее время силовые транзисторы:

- MOSFET (униполярный транзистор с индуцированным каналом);
- IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором).

Такие транзисторы выпускаются на токи до 1000 А, напряжения до 1500 В и способны работать в ключевом режиме на частотах до 30 кГц. Кроме того, для работы в цепях с индуктивностями транзисторы снабжены антипараллельными высокочастотными диодами.

Схема электропривода постоянного тока с транзисторным импульсным регулированием напряжения обмотки якоря приведена на рис. 4.11.

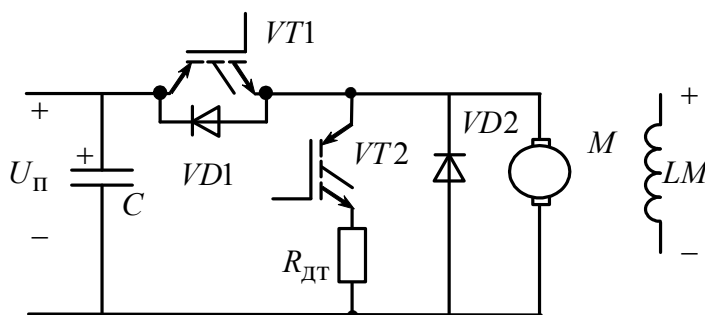


Рис. 4.11. Схемы электропривода постоянного тока с транзисторным преобразователем

В этой схеме обмотка якоря двигателя  $M$  периодически подключается транзисторным ключом  $VT1$  к источнику постоянного напряжения  $U_{\text{п}}$ , которое, как правило, получается выпрямлением переменного напряжения питающей сети с помощью неуправляемого выпрямителя. Электролитический конденсатор  $C$  большой емкости сглаживает пульсации выпрямленного напряжения  $U_{\text{п}}$ .

При открытом транзисторе  $VT1$  ток по цепи обмотки якоря двигателя  $M$  протекает от источника постоянного напряжения  $U_{\text{п}}$ . При закрытом транзисторе  $VT1$  ток в цепи обмотки якоря двигателя мгновенно измениться не может, а поддерживается за счет ЭДС самоиндукции, замыкаясь через диод  $VD2$  (см. рис. 4.12). При высокой частоте переключения транзистора  $VT1$  колебания тока в якорной цепи невелики. Современные транзисторы способны работать без допустимого перегрева при частотах  $5 \div 20$  кГц и более.

В подавляющем типе электроприводов для управления транзистором  $VT1$  используется широтно-импульсный способ модуляции. В связи с этим транзисторный ключ  $VT1$  со схемой управления получил название широтно-импульсный преобразователь (ШИП). При широтно-импульсном управлении период  $T$  следования импульсов напряжения на обмотку якоря двигателя остается постоянной, изменяется только длительность импульса  $t_{\text{и}}$ . Как показано на рис. 4.12, среднее напряжение  $U_{\text{ср}}$ , прикладываемое к обмотке якоря, зависит от длительности импульса  $t_{\text{и}}$  и определяется выражением

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{п}} \cdot \gamma, \quad (4.6)$$

где  $U_{\Pi}$  – постоянное напряжение;  $\gamma$  – относительная продолжительность включения транзисторного ключа  $VT1$ .

Относительная продолжительность включения транзисторного ключа  $VT1$  может изменяться в пределах  $0 < \gamma < 0,95$ .

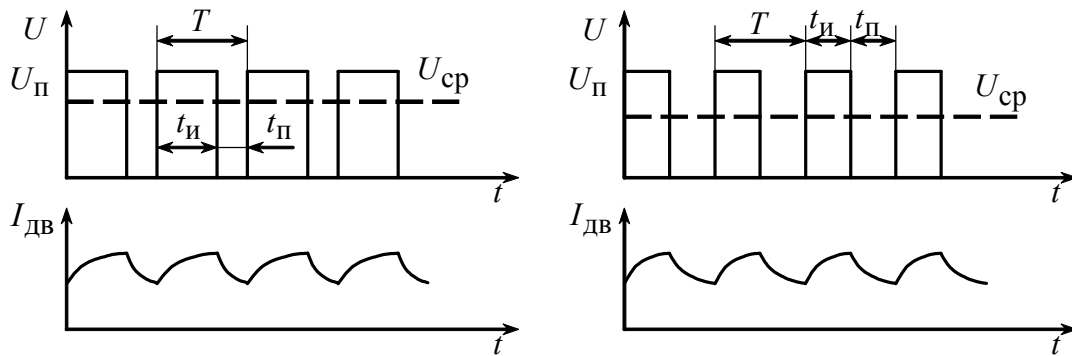


Рис. 4.12. Диаграммы напряжений и токов двигателя при широтно-импульсной модуляции

Электромеханическая и механическая характеристики электропривода с транзисторным широтно-импульсным преобразователем в режиме непрерывного тока описываются уравнениями:

$$\omega = \frac{U_{\Pi} \cdot \gamma}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - I \frac{R_{\text{дв}} + R_{\Pi}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}}, \quad (4.7)$$

$$\omega = \frac{U_{\Pi} \cdot \gamma}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - M \frac{R_{\text{дв}} + R_{\Pi}}{(k \cdot \Phi_{\text{д}})^2}. \quad (4.8)$$

Электромеханические характеристики неререверсивного электропривода, выполненного по схеме ШИП-Д, приведены на рис. 4.13.

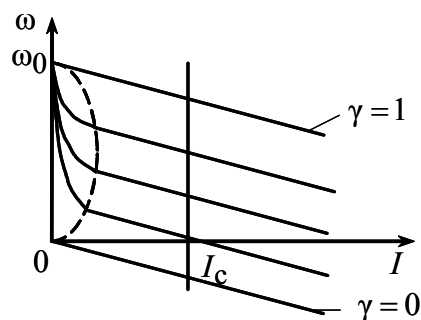


Рис. 4.13. Электромеханические характеристики неререверсивного электропривода, выполненного по схеме транзисторный широтно-импульсный преобразователь-двигатель

При малых нагрузках в электроприводе ШИП-Д наступает режим прерывистого тока. Зона прерывистого тока обозначена на рис. 4.13 пунктирной линией. В связи с тем, что частота переключений транзисторного ключа  $VT1$  может значительно превышать частоту следования импульсов в электроприводе с тиристорными преобразователями, то зона прерывистого тока здесь может быть существенно меньше, также уменьшается и амплитуда пульсаций якорного тока.

Как следует из рис. 4.13, в режиме прерывистого тока все электро-механические характеристики сходятся в одной точке – скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ , которая в данном электроприводе определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{U_{\Pi}}{c}. \quad (4.9)$$

В электроприводе ШИП-Д с неуправляемым выпрямителем на входе становится невозможным режим рекуперативного торможения, поэтому во многих электроприводах применяется динамическое торможение, для обеспечения которого в схему вводится дополнительный транзисторный ключ  $VT2$  и сопротивление динамического торможения  $R_{\text{дт}}$ , однако схема управления при этом существенно усложняется.

В настоящее время в своем большинстве эксплуатируемые в производстве регулируемые электроприводы – это электроприводы постоянного тока. К сожалению, XX век – век регулируемых электроприводов постоянного тока закончился. Их разработка и серийный выпуск прекращается в большинстве развитых стран мира. Будущее регулируемых электроприводов связано с двигателями переменного тока.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Назовите типы преобразовательных устройств, применяемые в электроприводах постоянного тока.
2. Каковы преимущества и недостатки системы генератор-двигатель?
3. Почему силовые полупроводники в преобразовательных устройствах работают в ключевом режиме?
4. Опишите функциональную схему и принцип действия управляемого тиристорного преобразователя.
5. Каким образом регулируется напряжение якоря двигателя в системе тиристорный преобразователь-двигатель?

## 5. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 5.1. Асинхронный двигатель

Асинхронные двигатели созданы в Германии русским электротехником Доливо-Добровольским М. О. в 1888 – 1889 годах. Получили наибольшее распространение в промышленности благодаря ряду существенных преимуществ по сравнению с другими двигателями. Асинхронный двигатель прост и надежен в эксплуатации, так как не имеет коллектора, на его изготовление требуется меньше цветных металлов, он имеет меньшие массу, габариты и стоимость по сравнению с двигателями той же мощности переменного или постоянного тока, наконец, он выпускается серийно в широком диапазоне мощностей.

#### 5.1.1. Схема включения, электромеханические и механические характеристики асинхронных двигателей

Наиболее распространенными типами нерегулируемых электроприводов являются электроприводы с короткозамкнутыми асинхронными двигателями. Для нерегулируемых электроприводов характерен пуск электродвигателя прямым включением в сеть с помощью контактной аппаратуры без промежуточных преобразователей электрической энергии.

Стандартная схема силовых цепей включения короткозамкнутого асинхронного двигателя с помощью контактов пускателя приведена на рис. 5.1.

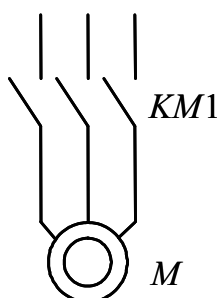


Рис. 5.1. Схема включения короткозамкнутого асинхронного двигателя с использованием контактного пускателя

Для расчета характеристик асинхронного двигателя, как правило, пользуются его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и

удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения (см. рис. 5.2).

На рис. 5.2 приняты следующие обозначения:

$U_{1j}$  – фазное напряжение обмотки статора;

$R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

$I_1$  – ток обмотки статора;

$E_1$  – ЭДС обмотки статора;

$R_2'$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$X_{2\sigma}'$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора;

$I_2'$  – ток обмотки ротора, приведенный к обмотке статора;

$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$  – скольжение;

$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / z_p$  – синхронная угловая скорость;

$\omega$  – угловая скорость асинхронного двигателя;

$z_p$  – число пар полюсов;

$f_1$  – значение частоты напряжения переменного тока, подводимого к обмотке статора;

$E_m$  – ЭДС от главного магнитного потока машины;

$E_2'$  – ЭДС обмотки ротора, приведенная к обмотке статора.

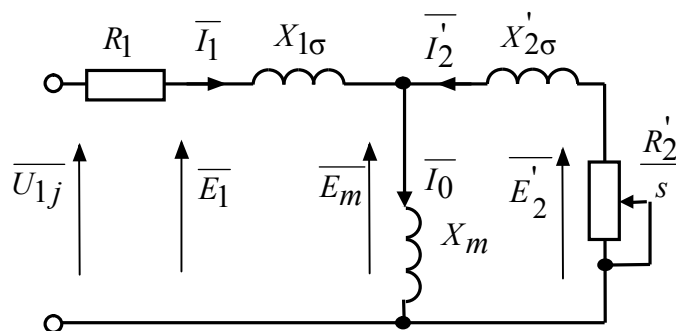


Рис. 5.2. Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1j} - \bar{E}_m - j \cdot X_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 &= 0; \\ \bar{E}_m + j \cdot X_{2\sigma}' \cdot \bar{I}_2' + R_2' \cdot \bar{I}_2' / s &= 0; \\ \bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 &= 0. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющая системе уравнений (5.1), изображена на рис. 5.3.

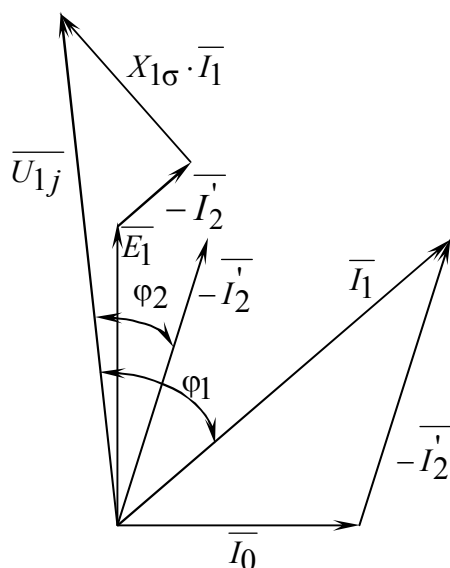


Рис. 5.3. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Ток ротора  $I_2'$ , приведенный к обмотке статора асинхронного двигателя, определяется зависимостью, получаемой непосредственно из схемы замещения асинхронного двигателя:

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}}, \quad (5.2)$$

где  $X_{\text{кн}} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Уравнение  $I_2' = f(s)$  называется электромеханической характеристикой асинхронного двигателя.

Для короткозамкнутого асинхронного двигателя представляет интерес другая электромеханическая характеристика  $I_1 = f(s)$ , отражающая зависимость тока статора  $I_1$  от скольжения  $s$ . Ток статора  $I_1$  определяется путем сложения вектора тока намагничивания  $\overline{I_0}$  и вектора тока ротора  $\overline{I_2'}$  (рис. 5.3)

$$\overline{I_1} = \overline{I_0} + \overline{I_2'}. \quad (5.3)$$

Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя  $I_0$  реактивным, ток статора  $I_1$  через приведенный ток ротора  $I_2'$  можно найти по формуле [5]

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}, \quad (5.4)$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}}. \quad (5.5)$$

Основной выходной координатой силового привода является электромагнитный момент, значение которого для асинхронного двигателя может быть найдено из уравнения потерь

$$M \cdot \omega_0 \cdot s = m_1 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2', \quad (5.6)$$

где  $m_1$  – число фаз статора.

Подставив в (5.6) выражение тока  $I_2'$  из (5.2) и решив полученное уравнение относительно момента  $M$ , будем иметь

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + R_2' \cdot s^{-1} \right)^2 + \left( X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \right)^2 \right]}. \quad (5.7)$$

Анализ уравнения (5.7) показывает, что механическая характеристика асинхронного двигателя имеет критический момент и критическое скольжение, которые находятся при условии  $dM/ds = 0$ .

Тогда критический момент

$$M_{\text{к}} = \frac{m_1 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)}, \quad (5.8)$$

критическое скольжение

$$s_{\text{к}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}}. \quad (5.9)$$

Знак «+» означает, что критический момент и скольжение относятся к двигательному режиму, знак «-» – к генераторному режиму рекуперативного торможения.

Уравнение механической характеристики асинхронного двигателя (5.7) можно преобразовать к более удобному для пользования выражению – формуле Клосса:



$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} (1 + a \cdot s_{\text{к}})}{\frac{s_{\text{к}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{к}}} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{к}}}, \quad (5.10)$$

где  $a = R_1 / R_2$  – коэффициент.

Двигатели средней и большой мощности имеют малое активное сопротивление  $R_1$ , в этом случае коэффициентом  $a$  можно пренебречь, а выражение (1.9) преобразуется в упрощенную формулу Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{к}}}{\frac{s_{\text{к}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{к}}}}. \quad (5.11)$$

Задаваясь скольжением  $s$  можно по (5.10) и (5.2) построить, соответственно, механические и электромеханические характеристики асинхронного двигателя, которые представлены на рис. 5.4.

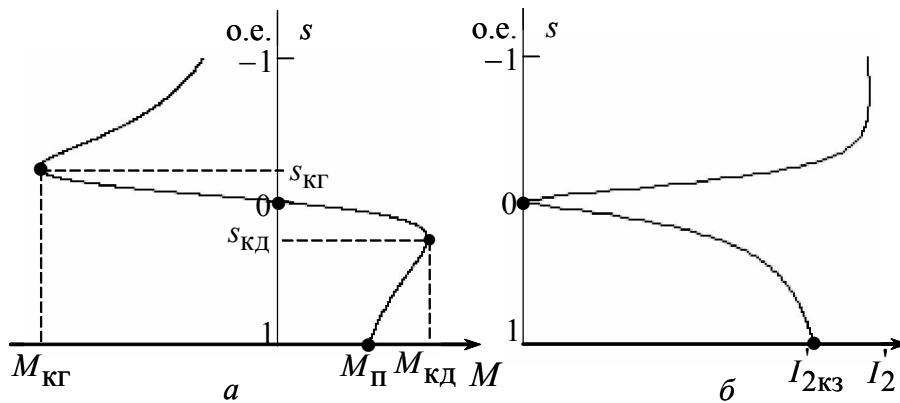


Рис. 5.4. Статические характеристики асинхронного двигателя:  
а – механическая; б – электромеханическая

При скольжениях  $0 < s < 1$  асинхронная машина работает в двигательном режиме, при  $s < 0$  – в генераторном режиме параллельно с сетью (рекуперативное торможение), при  $s > 1$  – в генераторном режиме последовательно с сетью или в режиме торможения противовключением.

Механические характеристики, приведенные на рис 5.4, а имеют в двигательном режиме три характерные точки:

- 1)  $s = 0$ ;  $M = 0$ , при этом скорость двигателя равна синхронной  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / z_p$ ;
- 2)  $s = s_{\text{к}}$ ;  $M = M_{\text{кД}}$ , что соответствует точке с критическим скольжением  $s_{\text{к}}$  и критическим моментом двигательного режима;

3)  $s = 1$ , при этом скорость двигателя будет равна нулю, а момент равен пусковому  $M = M_{\text{п}}$ .

Электромеханические характеристики, приведенные на рис 5.4, б, имеют две характерные точки в двигательном режиме:

1)  $s = 0$ ;  $I_2' = 0$ , при этом скорость двигателя равна синхронной  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / z_P$ ;

2)  $s = 1$ , при этом скорость двигателя будет равна нулю, а ток ротора – току короткого замыкания ( $I_2' = I_{2\text{кз}}'$ ).

Механические и электромеханические характеристики асинхронного двигателя не совпадают даже построенные в безразмерных единицах.

Различают естественную и искусственные механические характеристики асинхронного двигателя.

Под естественной механической характеристикой асинхронного двигателя будем понимать зависимость момента двигателя  $M$  от его скольжения  $s$  при номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах питающей сети ( $U_{1\text{н}}$ ,  $f_{1\text{н}}$ ) и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя. Все остальные характеристики называются искусственными. С помощью искусственных характеристик асинхронного двигателя регулируют его скорость в соответствии с требованиями технологического процесса.

Как следует из уравнения механической характеристики асинхронного двигателя (5.7), регулировать его скорость можно, изменяя один или несколько параметров:

$U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора двигателя;

$R_{1\text{доб}}$  – добавочное активное сопротивление статора;

$X_{1\text{доб}}$  – добавочное индуктивное сопротивление статора;

$R_{2\text{доб}}'$  – добавочное активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора;

$X_{2\text{доб}}'$  – добавочное индуктивное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора;

$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / z_P$  – синхронную угловую скорость изменением числа пар полюсов  $z_P$  или частоты  $f_1$  напряжения переменного тока, подводимого к обмотке статора.

Из всего многообразия искусственных механических характеристик асинхронного двигателя практический интерес в настоящее время могут представлять только следующие способы регулирования:

- регулирование скорости изменением добавочного активного сопротивления в цепи обмотки ротора асинхронного двигателя с фазным ротором;
- регулирование скорости изменением фазного напряжения короткозамкнутого асинхронного двигателя;
- частотное регулирование скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя.

Статические механические и электромеханические характеристики асинхронных двигателей благоприятны для пусков двигателей прямым включением в сеть. Поскольку пуск двигателя происходит достаточно быстро, то кратковременная перегрузка по току даже в 6 – 8 раз не опасна для него ни с точки зрения больших ударных динамических моментов, ни с точки зрения больших пусковых токов, которые много меньше пусковых токов естественной характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения той же мощности. Ограничения на прямой пуск асинхронных двигателей накладываются не самим двигателем, а питающей сетью.

Если сеть имеет ограниченную мощность или большое внутреннее сопротивление, то пусковые токи двигателя будут вызывать в этой сети большие падения напряжения. Естественно, что это скажется на режимах работы других потребителей энергии. По правилам Ростехнадзора напрямую можно запускать асинхронные двигатели, если их мощность

$$P_{\text{дв}} \leq 0,25 \cdot Q_{\text{сети}}, \quad (5.12)$$

где  $Q_{\text{сети}}$  – мощность питающего трансформатора подстанции в том случае, если от сети не питается осветительная аппаратура.

При питании осветительной аппаратуры от общей сети асинхронный двигатель можно пускать прямым включением в сеть, когда

$$P_{\text{дв}} \leq 0,05 \cdot Q_{\text{сети}}. \quad (5.13)$$

Если условия (5.12) и (5.13) не выполняются, то способы токоограничения вытекают из уравнения тока короткого замыкания асинхронного двигателя.

### 5.1.2. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным

В наиболее полных справочниках [4] по асинхронным двигателям приведены следующие физические величины, необходимые для определения параметров его схемы замещения:

$P_{\text{н}}$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_{1\text{н}}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$\eta_H$  – коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка), %;

$\cos \varphi_H$  – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка), о.е.;

$R_1'$  – активное сопротивление обмотки статора, о. е.;

$X_{1\sigma}'$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, о. е.;

$R_2''$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, о. е.;

$X_{2\sigma}''$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, о. е.;

$X_m'$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление), о. е.

В этом случае нахождение параметров схемы замещения асинхронного двигателя не представляет сколько-нибудь заметных трудностей и выполняется в следующей последовательности.

Определяется номинальный ток статора двигателя

$$I_{1H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H}. \quad (5.14)$$

Вычисляется базисное сопротивление

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}}. \quad (5.15)$$

Находятся параметры схемы замещения двигателя в физических величинах:

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = R_1' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (5.16)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_{1\sigma} = X_{1\sigma}' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (5.17)$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R_2' = R_2'' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (5.18)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma}'' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (5.19)$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_m = X_m' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (5.20)$$

Найденные параметры схемы замещения позволяют рассчитать статические характеристики асинхронного двигателя, например, по формуле Клосса, то есть без учета насыщения зубцов от полей рассеяния и вытеснения тока в стержнях беличьей клетки.

**Пример 5.1.** Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6У3 определить параметры Т-образной схемы замещения. Двигатель имеет следующие технические данные [4]:

- номинальная мощность двигателя  $P_H = 4 \text{ кВт}$ ;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1H} = 220 \text{ В}$ ;
- коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка)  $\eta_H = 82,0 \%$ ;
- коэффициент мощности в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка)  $\cos \varphi_H = 0,81 \text{ о.е.}$ ;
- активное сопротивление обмотки статора  $R_1' = 0,077 \text{ о.е.}$ ;
- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $X_{1\sigma}' = 0,073 \text{ о.е.}$ ;
- активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора  $R_2'' = 0,062 \text{ о.е.}$ ;
- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора  $X_{2\sigma}'' = 0,11 \text{ о.е.}$ ;
- индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление)  $X_m' = 2,0 \text{ о.е.}$ ,

**Решение.** Номинальный ток статора двигателя

$$I_{1H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,82} = 9,125 \text{ А.}$$

Базисное сопротивление

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}} = \frac{220}{9,125} = 24,1 \text{ о.е.}$$

Параметры схемы замещения двигателя в физических величинах:

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = R_1' \cdot Z_{\sigma} = 0,077 \cdot 24,1 = 1,856 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_{1\sigma} = X_{1\sigma}' \cdot Z_{\sigma} = 0,073 \cdot 24,1 = 1,759 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R_2' = R_2'' \cdot Z_6 = 0,062 \cdot 24,1 = 1,494 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma}'' \cdot Z_6 = 0,11 \cdot 24,1 = 2,651 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_m = X_m' \cdot Z_6 = 2,0 \cdot 24,1 = 48,2 \text{ Ом.}$$

### 5.1.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным

Как правило, в каталогах [1] на асинхронные двигатели приводятся следующие технические данные:

$P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_{1H}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$n_H$  – номинальная частота вращения, об/мин (или  $s_H$  – номинальное скольжение, о. е.);

$\eta_H$  – коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка), %;

$\cos \varphi_H$  – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности, о. е.;

$I_H/I_{1H} = k_i$  – кратность пускового тока, о. е.;

$M_H/M_H = k_m$  – кратность пускового момента, о. е.

Эти данные позволяют определить параметры схемы замещения при следующих основных допущениях:

- магнитные и механические потери в двигателе составляют  $0,02 P_H$ ;

- активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т. е. эффекты вытеснения не учитываются.

Определяется ток холостого хода асинхронного двигателя [2]:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}}, \quad (5.21)$$

где  $I_{1H}$  – номинальный ток статора двигателя, А;  $s_H = (n_0 - n_H)/n_0$  – номинальное скольжение, о. е.;  $n_0$  – синхронная частота вращения, об/мин;  $U_{1H}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} \quad (5.22)$$

ток статора двигателя при частичной нагрузке, А;  $\cos \varphi_{p_*}$  – коэффициент мощности при частичной нагрузке, о. е.;  $\eta_{p_*}$  – КПД при частичной нагрузке, о. е.;  $p_* = P/P_H$  – коэффициент загрузки двигателя, о. е.;  $P$  – мощность двигателя при частичной нагрузке, кВт.

Коэффициенты мощности и КПД при частичной нагрузке в технической литературе приводятся редко, а для целого ряда серий электрических машин такие данные в справочной литературе отсутствуют. Эти параметры можно определить, руководствуясь следующими соображениями:

- современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10 ÷ 15% меньше номинальной [1]. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке  $p_* = 0,75$  практически равны между собой, т. е.

$$\eta_H \approx \eta_{0,75};$$

- коэффициент мощности при той же нагрузке  $p_* = 0,75$  сильно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведенной на рис. 5.5.

Из формулы Клосса определим выражение для расчета критического скольжения

$$s_k = s_H \frac{k_{\max} + \sqrt{(k_{\max})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)}, \quad (5.23)$$

где  $\beta = R_1 / (C_1 \cdot R_2')$ ; (5.24)

$$C_1 = 1 + (I_0 / (2 \cdot k_i \cdot I_{1H})). \quad (5.25)$$

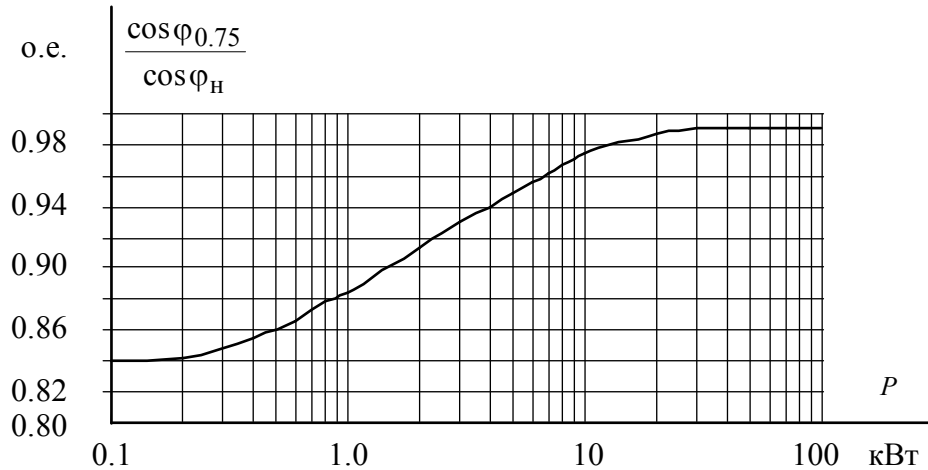


Рис. 5.5. Зависимость  $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$  от мощности асинхронного двигателя

Значение коэффициента  $\beta$  согласно источнику [3] находится в диапазоне  $0,6 \div 2,5$ .

Определим коэффициент [2]

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H) / (2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H). \quad (5.26)$$

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = A_1 / (\beta + 1/s_K) C_1, \text{ Ом.} \quad (5.27)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно найти по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta, \text{ Ом.} \quad (5.28)$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{KH}$ :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_K^2) - \beta^2}. \quad (5.29)$$

Очевидно, что при отрицательном подкоренном выражении (5.29) первоначально принятое значение  $\beta$  необходимо изменить.

Тогда индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2'. \quad (5.30)$$

Для того чтобы выделить из индуктивного сопротивления короткого замыкания  $X_{KH}$  сопротивления рассеяния фаз статора  $X_{1\sigma H}$  и ротора  $X_{2\sigma H}'$ , воспользуемся соотношениями [4], которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано по уравнению



$$X'_{2\sigma\text{H}} = 0,58 \cdot X_{\text{KH}} / C_1, \text{ Ом.} \quad (5.31)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1\sigma\text{H}} = 0,42 \cdot X_{\text{KH}}, \text{ Ом.} \quad (5.32)$$

Согласно векторной диаграмме (см. рис. 5.3), ЭДС ветви намагничивания  $E_m$ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$E_{m\text{H}} = \sqrt{(U_{1\text{H}} \cdot \cos \varphi_{1\text{H}} - R_1 \cdot I_{1\text{H}})^2 + (U_{1\text{H}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1\text{H}}} + X_{1\sigma\text{H}} \cdot I_{1\text{H}})^2}, \quad (5.33)$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_{m\text{H}} = E_{m\text{H}} / I_0. \quad (5.34)$$

Приведенная методика дает удовлетворительное схождение расчетных механических характеристик и механических характеристик, построенных по трем паспортным точкам на рабочем участке механической характеристике, то есть при изменении скольжения  $s$  от 0 до  $s_k$ .

**Пример 5.2.** Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6УЗ определить параметры Т-образной схемы замещения. Двигатель имеет следующие технические данные [1]:

- номинальная мощность  $P_{\text{H}} = 4$  кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1\text{H}} = 220$  В;
- синхронная частота вращения  $n_0 = 1000$  об/мин;
- номинальное скольжение  $s_{\text{H}} = 0,051$  о. е.;
- коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка)  $\eta_{\text{H}} = 82$  %;
- коэффициент мощности в режиме номинальной мощности  $\cos \varphi_{\text{H}} = 0,81$  о. е.;
- кратность пускового тока  $I_{\text{п}} / I_{1\text{H}} = k_i = 6$  о. е.;
- кратность пускового момента  $M_{\text{п}} / M_{\text{H}} = k_{\text{п}} = 2$  о. е.;
- кратность максимального момента  $M_{\text{max}} / M_{\text{H}} = k_{\text{max}} = 2,2$  о. е.;
- кратность минимального момента  $M_{\text{min}} / M_{\text{H}} = k_{\text{min}} = 1,6$  о. е.,

**Решение.** Ток холостого хода асинхронного двигателя

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1\text{H}} (1 - s_{\text{H}}) / (1 - p_* s_{\text{H}})]^2}{1 - [p_* (1 - s_{\text{H}}) / (1 - p_* s_{\text{H}})]^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{7,29^2 - [0,75 \cdot 9,125 \cdot (1 - 0,051) / (1 - 0,75 \cdot 0,051)]^2}{1 - [0,75(1 - 0,051) / (1 - 0,75 \cdot 0,051)]^2}} = 4,046 \text{ А},$$

где  $I_{1H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,82} = 9,125 \text{ А}$  – номинальный ток статора двигателя;  $m_1 = 3$  – число фаз асинхронного двигателя;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,76 \cdot 0,82} = 7,29 \text{ А} – \text{ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке;  $\cos \varphi_{p_*} = 0,94 \cdot \cos \varphi_H = 0,94 \cdot 0,81 = 0,76$  о. е. – коэффициент мощности при частичной нагрузке (см. рис. 1.6);  $\eta_{p_*} = \eta_H = 0,82$  о. е. – КПД при частичной нагрузке;  $p_* = P/P_H = 0,75$  о. е. – коэффициент загрузки двигателя.

Критическое скольжение

$$s_K = s_H \frac{k_{\max} + \sqrt{(k_{\max})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,051 \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \cdot 0,051 \cdot 1,3(2,2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,051 \cdot 1,3(2,2 - 1)} = 0,2547.$$

Значение коэффициента  $\beta$ , согласно [3], находится в диапазоне  $0,6 \div 2,5$ . Принимаем  $\beta = 1,3$ .

Определим коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{4,046}{2 \cdot 6 \cdot 9,125} = 1,037;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 (1 - 0,051)}{2 \cdot 1,037 \cdot 2,2 \cdot 4000} = 7,55.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_K) \cdot C_1} = \frac{7,55}{(1,3 + 1/0,2435) \cdot 1,037} = 1,393 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,037 \cdot 1,393 \cdot 1,3 = 1,878 \text{ Ом}.$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{KH}$ :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_K^2) - \beta^2} = \sqrt{(1/0,2547^2) - 1,3^2} = 3,704.$$

Тогда

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 3,704 \cdot 1,037 \cdot 1,393 = 5,352 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано по уравнению

$$X_{2\sigma\text{н}}' = 0,58 \cdot X_{\text{кн}} / C_1 = 0,58 \cdot 5,352 / 1,037 = 2,994 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1\sigma\text{н}} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 5,352 = 2,248 \text{ Ом.}$$

ЭДС ветви намагничивания  $E_m$ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$E_m = \sqrt{(U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi_{1\text{н}} - R_1 \cdot I_{1\text{н}})^2 + (U_{1\text{н}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1\text{н}}} + X_{1\sigma\text{н}} \cdot I_{1\text{н}})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,81 - 1,878 \cdot 9,125)^2 + (220 \sqrt{1 - 0,81^2} + 2,248 \cdot 9,125)^2} = 219,77 \\ \text{В,}$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_{m\text{н}} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{219,77}{4,046} = 54,47 \text{ Ом.}$$

В табл. 5.1 приведены параметры схемы замещения асинхронного двигателя, рассчитанные по каталожным данным (строка 1), заложенные в проектные расчеты этого двигателя [4] (строка 2), а также погрешность  $\delta$  % определения каждого из параметров (строка 3).

Таблица 5.1

Параметр	$R_1$	$X_{1\sigma}$	$R_2'$	$X_{2\sigma}'$	$X_m$
Расчет	1,878	2,248	1,393	2,994	54,47
Проект	1,856	1,759	1,494	2,651	48,2
Погрешность, %	1,17	21,7	8,0	11,4	11,2

Как следует из анализа результатов, приведенных в табл. 5.1, сходимость расчетных параметров схемы замещения и проектных данных завода-изготовителя в основном находится в инженерных допусках.

**Пример 5.3.** Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6УЗ рассчитать и построить естественные механическую и электромеханическую статические характеристики.

Основные параметры асинхронного двигателя и его схемы замещения:

- номинальная мощность двигателя  $P_{\text{н}} = 4$  кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1\text{н}} = 220$  В;

- номинальное скольжение  $s_H = 0,051$  о. е.;
- номинальный ток обмотки статора  $I_{1H} = 9,125$  А;
- активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1 = 1,878$  Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора  $X_{1\sigma} = 2,248$  Ом;
- активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора  $R_2' = 1,393$  Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, приведенное к обмотке статора  $X_{2\sigma}' = 2,994$  Ом;
- кратность пускового тока  $I_{п}/I_{1H} = k_i = 6$  о. е.;
- кратность максимального момента  $M_{\max}/M_H = k_{\max} = 2,2$  о. е.
- кратность минимального момента  $M_{\min}/M_H = k_{\min} = 1,6$  о. е.

**Решение.** Определим синхронную угловую скорость двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,1415 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Расчет естественной механической характеристики асинхронного двигателя произведем в соответствии с выражением (5.7)

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + R_2' \cdot s^{-1})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,393}{104,7 \cdot s \cdot [(1,878 + 1,393/s)^2 + (2,248 + 2,994)^2]}.$$

Механическая характеристика, рассчитанная по (5.7) в математической системе MathCAD, приведена на рис. 5.6.

Определим дополнительные параметры двигателя.

- Момент критический двигательного режима

$$M_{\text{кд}} = \frac{m \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 \left( 1,878 + \sqrt{1,878^2 + 5,242^2} \right)} = 93,216 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

- Критическое скольжение

$$s_{\text{к}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \pm \frac{1,393}{\sqrt{1,878^2 + 5,242^2}} = \pm 0,2456 \text{ о.е.}$$

- Номинальная скорость двигателя

$$\omega_n = \omega_0(1 - s_n) = 104,7(1 - 0,051) = 99,36 \text{ рад/с.}$$

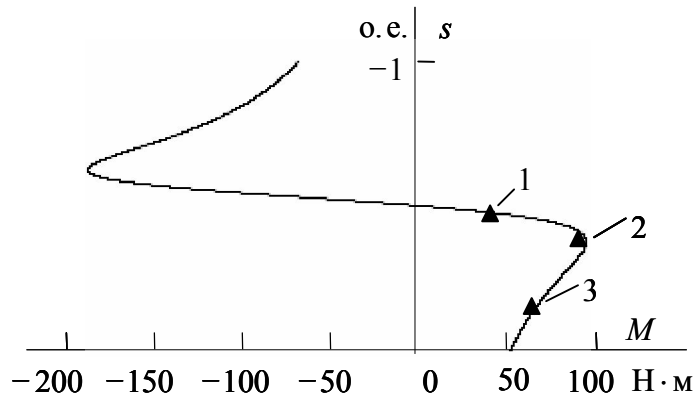


Рис. 5.6. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя: 1 – момент номинальный, 2 – момент максимальный, 3 – момент минимальный

- Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{4000}{99,36} = 40,25 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

- Максимальный момент двигателя

$$M_{\max} = k_{\max} \cdot M_n = 2,2 \cdot 40,25 = 88,55 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

- Минимальный момент двигателя

$$M_{\min} = k_{\min} \cdot M_n = 1,6 \cdot 40,25 = 64,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Найденные координаты точек с номинальным, максимальным и минимальным моментом нанесены на рассчитанный график (см. рис. 5.6) естественной механической характеристики асинхронного двигателя в виде треугольников.

**Вывод.** Анализ расчетов показывает, что контрольные точки, найденные в соответствии с каталожными данными двигателя, хорошо совпадают с рассчитанным графиком механической характеристики асинхронного двигателя, поэтому методику определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя по его каталожным данным можно считать приемлемой.

Определим зависимость тока ротора  $I_2'$ , приведенного к обмотке статора, от скольжения  $s$ :

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{s}\right)^2 + 5,242^2}}.$$

График электромеханической характеристики  $I_2' = f(s)$ , рассчитанный по формуле (5.2) в математической системе MathCAD, приведен на рис. 5.7.

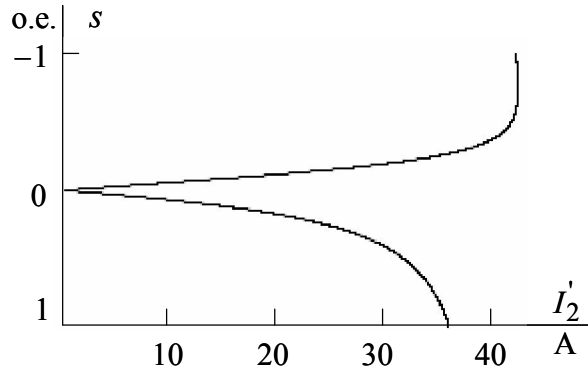


Рис. 5.7. График электромеханической характеристики  $I_2' = f(s)$

Электромеханическую характеристику  $I_1 = f(s)$  рассчитаем по выражению (5.4) с учетом тока  $I_2'$ , найденного по уравнению (5.2), тогда

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2} = \sqrt{4,046^2 + I_2'^2 + 2 \cdot 4,046 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2},$$

где 
$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{КН}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{КН}}^2}} = \frac{5,242}{\sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{s}\right)^2 + 5,242^2}}.$$

Электромеханическая характеристика  $I_1 = f(s)$  приведена на рис. 5.8.

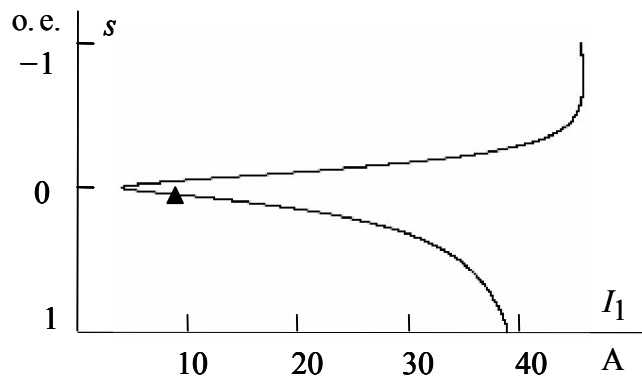


Рис. 5.8. График естественной электромеханической характеристики  $I_1 = f(s)$  асинхронного двигателя:  $\blacktriangle$  – точка с номинальными параметрами двигателя

Определим номинальный ток статора асинхронного двигателя  $I_{1н}$  при номинальном скольжении  $s_H = 0,051$  в соответствии с электромеханической характеристикой.

Номинальный ток ротора двигателя при номинальном скольжении

$$I'_{2н} = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + X_{кн}^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{0,051}\right)^2 + 5,242^2}} = 7,42 \text{ А}$$

Синус угла между вектором фазного напряжения  $\overline{U_{1j}}$  и сопряженным вектором тока ротора  $-\overline{I'_2}$  (см. рис. 5.3)

$$\sin \varphi_{2н} = \frac{x_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + x_{кн}^2}} = \frac{5,17}{\sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{0,051}\right)^2 + 5,242^2}} = 0,00595$$

Номинальный ток статора двигателя

$$I_{1н} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_{2н}} =$$

$$= \sqrt{4,046^2 + 7,42^2 + 2 \cdot 4,046 \cdot 7,42 \cdot 0,00595} = 9,056 \text{ А.}$$

**Вывод.** Значение номинального тока статора асинхронного двигателя, определенное по его электромеханической характеристике, практически совпадает со значением, рассчитанным по каталожным данным:  $I_{1н} = 9,125 \text{ А}$  (см. пример 5.1). Это подтверждает правильность методики определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя по его каталожным данным.

#### 5.1.4. Динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя

*Динамической механической характеристикой* асинхронного двигателя называется зависимость между мгновенными значениями скорости (скольжения) и момента электрической машины для одного и того же момента времени переходного режима работы.

График динамической механической характеристики асинхронного двигателя можно получить из совместного решения системы дифференциальных уравнений электрического равновесия в статорной и ротор-

ной цепях двигателя и одного из уравнения его электромагнитного момента, которые приведены без их вывода:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_{1a}}{dt} &= U_{1a} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1a} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2a} \right); \\
 \frac{d\psi_{1b}}{dt} &= U_{1b} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1b} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2b} \right); \\
 \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\frac{R'_2}{X'_2 \cdot \sigma} \left( \psi_{2a} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1a} \right) - \omega \cdot \psi_{2b}; \\
 \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\frac{R'_2}{X'_2 \cdot \sigma} \left( \psi_{2b} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1b} \right) + \omega \cdot \psi_{2a}; \\
 M &= \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_1} (\psi_{1b} \cdot i_{2a} - \psi_{1a} \cdot i_{2b}).
 \end{aligned} \tag{5.35}$$

В системе уравнений (5.35) приняты следующие обозначения:

$U_{1a}$  – составляющая вектора напряжения обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $a$  неподвижной системы координат;

$U_{1b}$  – составляющая вектора напряжения обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $b$  неподвижной системы координат;

$X_1 = X_{1\sigma} + X_m$  – эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки статора, равное индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора и индуктивному сопротивлению от главного поля;

$X'_2 = X'_{2\sigma} + X_m$  – эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, равное индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки ротора и индуктивному сопротивлению от главного поля;

$X_m$  – индуктивное сопротивление от главного поля (контура намагничивания), создаваемое суммарным действием токов статора;

$\psi_{1a}$  – составляющая вектора потокосцепления обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $a$  неподвижной системы координат;

$\psi_{1b}$  – составляющая вектора потокосцепления обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $b$  неподвижной системы координат;

$\psi_{2a}$  – составляющая вектора потокосцепления обмотки ротора, ориентированная вдоль оси  $a$  неподвижной системы координат;

$\psi_{2b}$  – составляющая вектора потокосцепления обмотки ротора, ориентированная вдоль оси  $b$  неподвижной системы координат;



$i_{2a}$  – составляющая вектора тока обмотки ротора, ориентированная вдоль оси  $a$  неподвижной системы координат;

$i_{2b}$  – составляющая вектора тока обмотки ротора, ориентированная вдоль оси  $b$  неподвижной системы координат.

Электромеханические процессы в асинхронном электроприводе описываются уравнением движения. Для случая  $J_{\Sigma} = \text{const}$

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (5.36)$$

где  $M_c$  – приведенный к валу двигателя момент сопротивления нагрузки;  $J_{\Sigma}$  – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции электропривода.

Анализ динамических процессов преобразования энергии в асинхронном двигателе представляет собой сложную задачу в связи с существенной нелинейностью уравнений, описывающих асинхронный двигатель, обусловленной произведением переменных. Поэтому исследование динамических характеристик асинхронного двигателя целесообразно вести с применением средств вычислительной техники.

Совместное решение системы уравнений (5.62) и (5.63) в программной среде MathCAD позволяет рассчитать графики переходных процессов скорости  $\omega$  и момента  $M$  при численных значениях параметров схемы замещения асинхронного двигателя, определенных в примере 5.3.

Так как динамическую механическую характеристику асинхронного двигателя можно получить только по результатам расчетов переходных процессов, то вначале приведем графики переходных процессов скорости (рис. 5.9) и момента (рис. 5.10) при пуске асинхронного двигателя прямым включением в сеть.

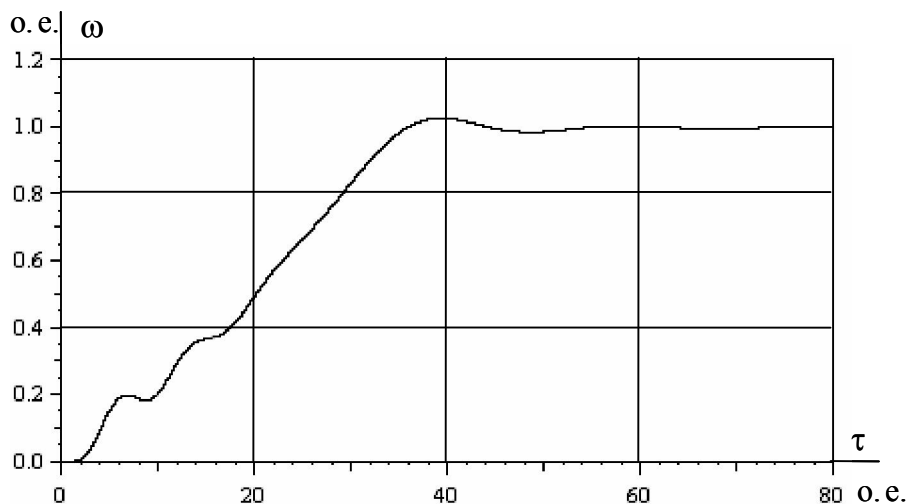


Рис. 5.9. Переходный процесс скорости при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя прямым включением в сеть при моделировании в неподвижной системе координат

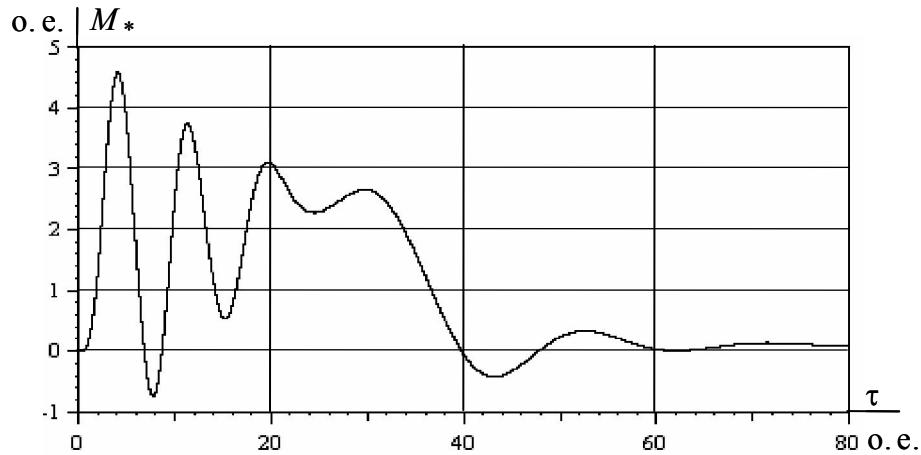


Рис. 5.10. Переходный процесс электромагнитного момента при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя прямым включением в сеть при моделировании в неподвижной системе координат

Графики  $\omega = f(\tau)$  и  $M = f(\tau)$  переходных процессов позволяют построить динамическую механическую характеристику асинхронного двигателя (рис. 5.11, кривая 1) при пуске прямым включением в сеть. Для сравнения на этом же рисунке приведена статическая механическая характеристика – 2, рассчитанная по выражению (5.7) для тех же параметров схемы замещения асинхронного двигателя.

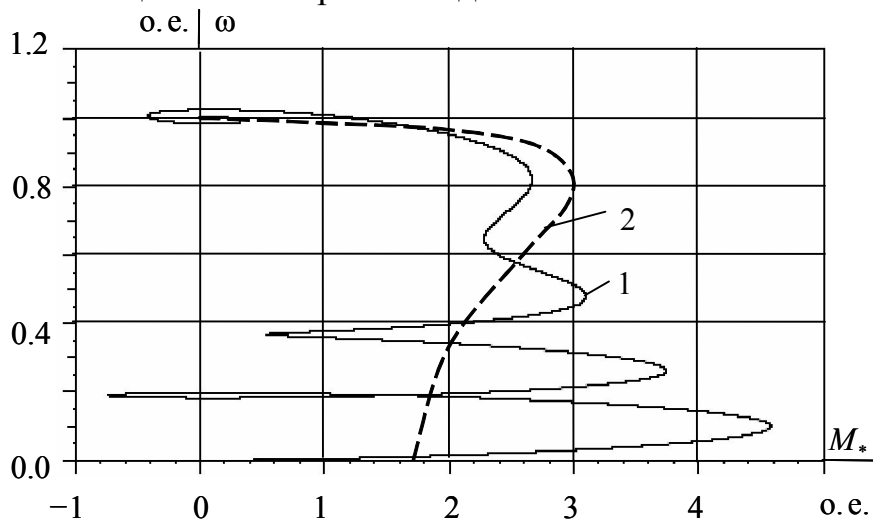


Рис. 5.11. Механические характеристики короткозамкнутого асинхронного двигателя: 1 – динамическая; 2 – статическая

Анализ динамической механической характеристики асинхронного двигателя показывает, что максимальные ударные моменты при пуске превышают номинальный момент  $M_H$  статической механической характеристики более чем в 4,5 раза и могут достичь недопустимо боль-

ших по механической прочности значений. Ударные моменты при пуске, и особенно при реверсе асинхронного двигателя, приводят к выходу из строя кинематики производственных механизмов и самого асинхронного двигателя.

Моделирование в программной среде MathCAD позволяет достаточно просто провести исследования динамических механических характеристик асинхронного двигателя. Установлено, что динамическая характеристика определяется не только параметрами схемы замещения асинхронного двигателя, но и параметрами электропривода, такими, как эквивалентный момент инерции  $J_{\Sigma}$ , момент сопротивления  $M_c$  на валу двигателя. Следовательно, асинхронный двигатель при данных параметрах питающей сети и схемы замещения обладает одной статической и множеством динамических механических характеристик.

Как следует из анализа динамических характеристик рис. 5.9 – 5.10, переходный процесс пуска короткозамкнутого асинхронного двигателя может иметь колебательный характер не только на начальном, но и на конечном участке, причем скорость двигателя превышает синхронную  $\omega_0$ . На практике колебания угловой скорости и момента двигателя на конечном участке переходного процесса наблюдаются не всегда. Кроме того, имеется большое число производственных механизмов, для которых такие колебания необходимо исключить. Характерный пример – механизмы лебедок и перемещения подъемных кранов. Для таких механизмов выпускаются асинхронные двигатели с мягкими механическими характеристиками или с повышенным скольжением. Установлено, чем мягче рабочий участок механической характеристики асинхронного двигателя и чем больше эквивалентный момент инерции электропривода, тем меньше амплитуда колебаний при выходе на установившуюся скорость и тем быстрее они затухают.

Исследования динамических механических характеристик имеют теоретическое и практическое значение, поскольку, как было показано в разделе 5.1.1, учет только статических механических характеристик может привести к не совсем корректным выводам и к искажению характера динамических нагрузок при пусках асинхронных двигателей. Исследования показывают, что максимальные значения динамического момента могут превышать номинальный момент двигателя при пуске прямым включением в сеть в 2 – 5 раз и в 4 – 10 раз при реверсировании двигателя, что необходимо учитывать при разработке и изготовлении электроприводов.

### 5.1.5. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением добавочного активного сопротивления в цепи обмотки ротора

Способ регулирования применяется для электроприводов подъемных кранов, причем как для механизмов перемещения, так и подъема. Обычно в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором вводят секционированный резистор, ступени которого переключаются регулировочными контактами. Схема силовых цепей асинхронного электропривода с добавочными активными сопротивлениями в цепи обмотки ротора приведена на рис. 5.12.

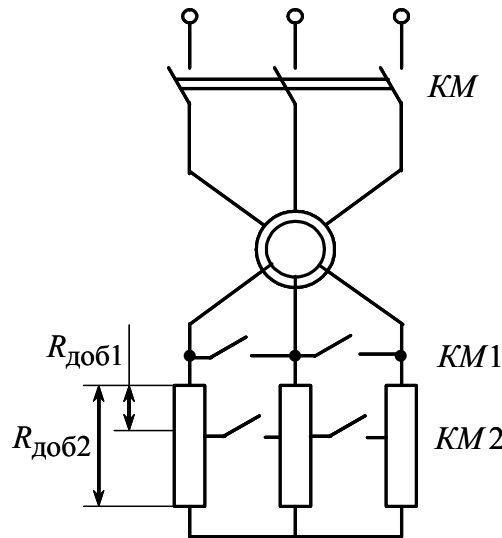


Рис. 5.12. Схема силовых цепей асинхронного электропривода с добавочными активными сопротивлениями в цепи обмотки ротора

Анализ искусственных механических характеристик асинхронного электропривода проведем относительно базовой – естественной характеристики по трем характерным точкам:

1)  $s = 0$ ;  $M = 0$ , при этом скорость двигателя равна синхронной  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / z_p$ , следовательно, все искусственные характеристики будут выходить из одной точки  $\omega_0$ .

2) Второй точке соответствуют две координаты – момент критический двигательного режима работы, который от добавочного сопротивления цепи обмотки ротора не зависит,

$$M_{\text{к}} = \frac{m_1 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)} = \text{const}$$

и критическое скольжение

$$s_k = \pm \frac{R_2' + R_{2\text{доб}}'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} \equiv R_2' + R_{2\text{доб}}',$$

которое пропорционально активному сопротивлению цепи обмотки ротора. Следовательно, увеличение добавочного сопротивления цепи обмотки ротора  $R_{2\text{доб}}'$  будет приводить к росту критического скольжения  $s_k$ .

3.  $s = 1$ , при этом скорость двигателя будет равна нулю, а момент равен пусковому  $M = M_{\text{п}}$ . Пусковой момент асинхронного двигателя найдем из упрощенной формулы Клосса (5.11), при  $s = 1$  получим

$$M_{\text{п}} = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} \cdot s_{\text{к}}}{1 + s_{\text{к}}}. \quad (5.37)$$

Анализ (5.37) показывает, что при малых значениях  $s_k$  пусковой момент асинхронного двигателя увеличивается с ростом добавочного сопротивления цепи обмотки ротора  $R_{2\text{доб}}'$ , введение большого сопротивления  $R_{2\text{доб}}'$  будет приводить к уменьшению пускового момента  $M_{\text{п}}$ . Семейство реостатных механических характеристик асинхронного электродвигателя с фазным ротором приведено на рис. 5.13.

Реостатное регулирование скорости, как правило, *ступенчатое* и производится под нагрузкой. Направление регулирования – *вниз* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости  $\omega_{yi}$  под нагрузкой  $M_c$  уменьшаются с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки ротора.

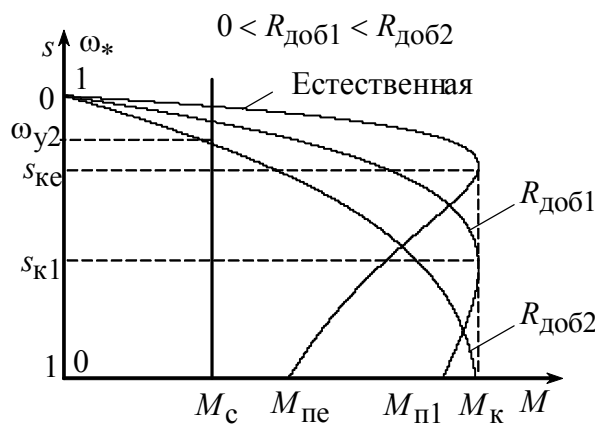


Рис. 5.13. Семейство реостатных механических характеристик асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Нестабильная работа на малых скоростях ограничивает диапазон регулирования скорости при номинальной нагрузке до  $D = 1 : (3 \div 4)$ .

Погрешность регулирования скорости возрастает с увеличением добавочного сопротивления ротора.

Регулирование скорости сопровождается потерями мощности в добавочных сопротивлениях ротора.

### 5.1.6. Асинхронный электропривод с фазовым регулированием угловой скорости

Одной из эффективных возможностей повышения надежности и экономичности работы электроприводов с асинхронными двигателями является использование тиристорных регуляторов напряжения. Схема силовых цепей нереверсивного тиристорного регулятора напряжения приведена на рис. 5.14.

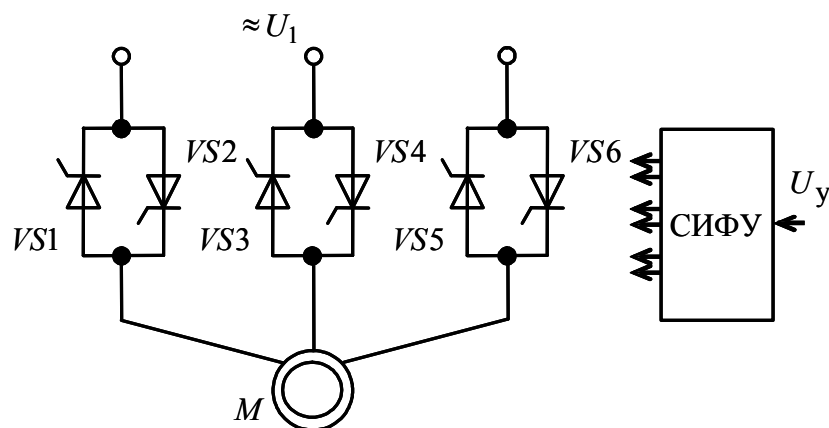


Рис. 5.14. Схема силовых цепей нереверсивного тиристорного регулятора напряжения

Схема состоит из трех пар встречно-параллельно включенных тиристоров  $VS1 - VS6$ , управляемых от системы импульсно-фазового управления (СИФУ) входным сигналом  $U_y$ . Изменяя напряжение управления, можно плавно менять действующее значение напряжения на обмотках статора двигателя.

Добавление в схему рис. 5.14 еще двух пар тиристоров позволяет получить реверсивную схему рис 5.15, обеспечивающую возможность вращения двигателя в двух направлениях. В тиристорных регуляторах напряжения небольшой мощности вместо пары тиристоров используются симметричные тиристоры – симисторы, а также тиристорные модули различного типа, в том числе оптронные.

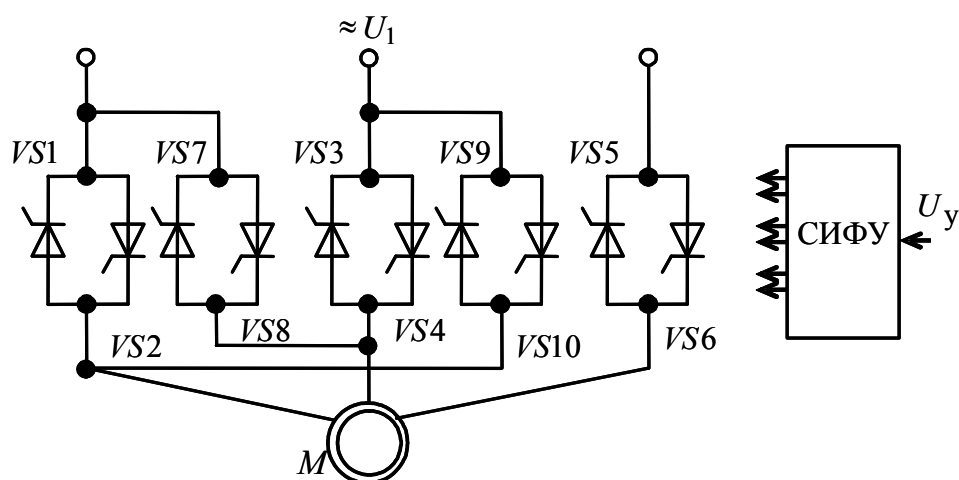


Рис. 5.15. Схема силовых цепей реверсивного тиристорного регулятора напряжения

Механическая характеристика асинхронного двигателя при регулировании скорости изменением напряжения определяется выражением (5.10)

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{к}} (1 + a \cdot s_{\text{к}})}{\frac{s_{\text{к}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{к}}} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{к}}},$$

где  $s_{\text{к}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}}$  – критическое скольжение,

$$M_{\text{к}} = \frac{m \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)} \text{ – критический момент.}$$

При снижении фазного напряжения  $U_{1j}$  синхронная скорость  $\omega_0$  и критическое скольжение  $s_{\text{к}}$  двигателя остаются постоянными, а критический момент двигателя  $M_{\text{к}}$  уменьшается пропорционально квадрату фазного напряжения. Соответственно снижается жесткость рабочей части механической характеристики. При постоянной нагрузке  $M_{\text{с}}$  регулирование скорости возможно в диапазоне от  $\omega_0$  до  $\omega_0(1 - s_{\text{ке}})$ . Механические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменении напряжения обмотки статора приведены на рис. 5.16.

При снижении питающего напряжения на 30 % критический момент асинхронного двигателя уменьшается примерно в два раза, и при значительном статическом моменте двигатель может остановиться и оказаться под пусковым током. Указанные случаи имеют место в слабых электрических сетях (северные районы, сельские местности). Следовательно, в системе управления электроприводом необходима времятоковая защита, предотвращающая нахождение двигателя под недопустимым током длительное время.

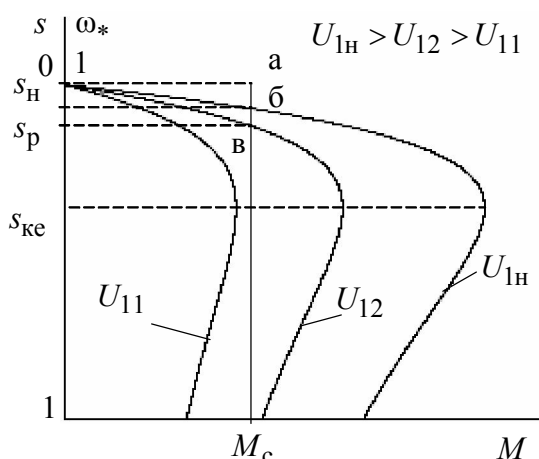


Рис. 5.16. Механические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при регулировании напряжения на статоре

В то же время преднамеренное снижение напряжения, подаваемого на статорные обмотки, часто используется для регулирования скорости асинхронного двигателя и для обеспечения плавности пуска.

Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения напряжения обмотки статора сопряжено с возможностью перегрева его ротора и может производиться лишь при определенных условиях:

- при малом диапазоне снижения скорости относительно номинальной;
- при снижении относительно номинального момента сопротивления на валу двигателя;
- при использовании двигателя с повышенным скольжением.

Предположим, что момент сопротивления на валу двигателя остается постоянным и равным номинальному ( $M_c = M_H$ ). При снижении напряжения до  $U_{12}$  двигатель будет работать со скольжением  $s_p$  и скоростью  $\omega_p = \omega_0(1 - s_p)$ . Мощность  $\Delta P_{M2}$ , выделяемая в виде потерь в обмотке ротора двигателя, будет равна

$$\Delta P_{M2} = M_c \cdot \omega_0 \cdot s_p = 3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2'$$



и пропорциональна площади прямоугольника  $0ab_s_p$ .

Номинальная мощность скольжения, на рассеяние которой рассчитана конструкция двигателя, пропорциональна площади  $0ab_s_n$ , она примерно в два раза меньше потерь в роторе двигателя, работающего в точке «в». Естественно, что при работе в указанном режиме ротор двигателя будет перегреваться. Поэтому регулирование скорости асинхронного двигателя изменением напряжения статора возможно в том случае, когда момент сопротивления  $M_c$  при снижении скорости существенно меньше номинального момента. Свойством снижения момента сопротивления с уменьшением скорости обладают вентиляторные нагрузки

$$M_c = M_0 + a \cdot \omega^x, \quad (5.38)$$

где  $M_0$  – момент от сил трения, Н·м;  $a$  – коэффициент, Н·м·с/рад;  $x=2$  – для вентиляторов;  $x=3$  – для центробежных насосов.

Механические характеристики для случая вентиляторной нагрузки приведены на рис. 5.17.

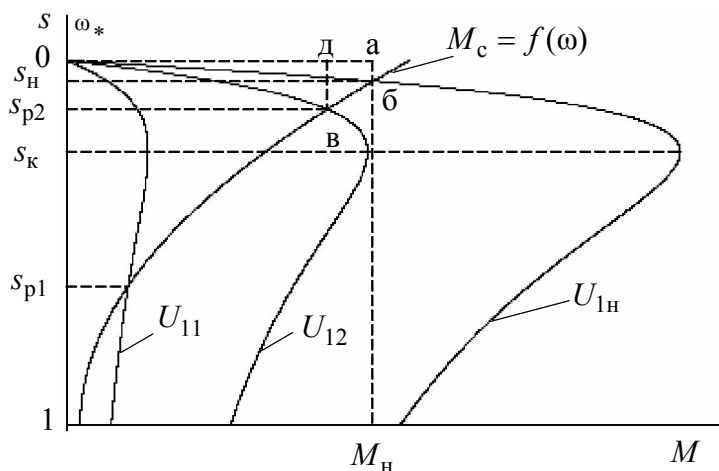


Рис. 5.17. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании напряжения статора и вентиляторном моменте нагрузки

Поскольку со снижением скорости от  $\omega_n$  до  $\omega_0(1-s_p)$  момент сопротивления  $M_c$  уменьшается примерно в квадрат раз от величины снижения скорости, то мощность потерь в обмотке ротора  $\Delta P_{m2}$  со снижением скорости растет в меньшей степени, чем при постоянной нагрузке.

Скорости, соответствующие установившимся режимам работы электропривода, можно определить графически по точкам пересечения механических характеристик асинхронного двигателя  $M = f(\omega)$  и механической характеристики вентилятора  $M_c = f(\omega)$ . Точки, соответствующие установившимся значениям скорости или скольжения  $s_n, s_{p1}, s_{p2}$ , могут соответствовать устойчивому или неустойчивому равновесию.

Возникает вопрос об устойчивости работы электропривода с вентиляторной нагрузкой при скольжении  $s_{p1}$ .

Критерием устойчивости работы электропривода является выполнение неравенства

$$k_\beta - k_{\beta c} < 0, \quad (5.39)$$

где  $k_\beta = \frac{dM}{d\omega}$  – жесткость механической характеристики двигателя в точке установившегося режима;  $k_{\beta c} = \frac{dM_c}{d\omega}$  – жесткость механической характеристики механизма (вентилятора) в точке установившегося режима.

Жесткость механической характеристики вентилятора нетрудно найти аналитически из уравнения (5.38):

$$k_{\beta c} = \frac{dM_c}{d\omega} = \frac{d(M_0 + a \cdot \omega^2)}{d\omega} = 2 \cdot a \cdot \omega. \quad (5.40)$$

Как следует из (5.40), жесткость вентилятора  $k_{\beta c}$  линейно увеличивается с ростом его скорости и во всем диапазоне регулирования скорости положительна.

Для определения жесткости механической характеристики двигателя преобразуем (5.7), подставив в него значение скольжения  $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ , получим

$$M = \frac{m_c \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{(\omega_0 - \omega) \cdot \left[ \left( R_1 + R_2' \cdot \left( \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right)^{-1} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2 \right]}. \quad (5.41)$$

Тогда

$$k_\beta = \frac{dM}{d\omega} =$$

$$= d \left( \frac{m_c \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\left( \omega_0 - \omega \right) \cdot \left[ \left( R_1 + R_2' \cdot \left( \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right)^{-1} \right)^2 + \left( X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \right)^2 \right]} \right) / d\omega. \quad (5.42)$$

При известных параметрах вентилятора и двигателя значения  $k_{\beta c}$  и  $k_{\beta}$  достаточно просто определяются путем численного дифференцирования выражений (5.40) и (5.42) в математической системе MathCAD. Результаты расчетов  $k_{\beta c}$  и  $k_{\beta}$ , а также их разность  $k_{\beta} - k_{\beta c}$ , найденные для напряжения статора  $U_{11}$ , представлены на рис. 5.18.

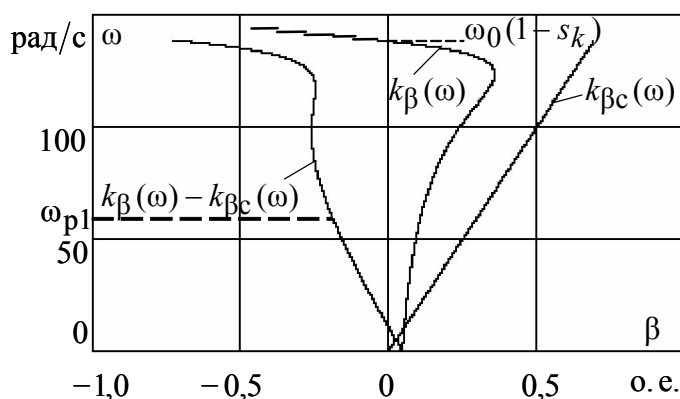


Рис. 5.18. Зависимости жесткости асинхронного двигателя  $k_{\beta}$  и вентилятора  $k_{\beta c}$  от скорости

Анализ графических зависимостей рис. 5.18 показывает, что условие (5.39) выполняется в окрестностях скорости  $\omega_{p1} = \omega_0(1 - s_{p1})$ . Поэтому вращение вентилятора при скольжении  $s_{p1}$  будет устойчивым. Устойчивое вращение вентиляторов со скольжениями, большими  $s_k$ , при регулировании их скорости изменением напряжения подтверждается практическими исследованиями для различных типов вентиляторов.

**Вывод.** Особенность механической характеристики вентилятора позволяет ему работать на участке механической характеристики асинхронного двигателя со скольжениями, большими  $s_k$ , что практически недостижимо для других видов нагрузок. Однако работа с большими скольжениями вызывает и большие потери в роторе асинхронного двигателя.

Полные электромагнитные потери в асинхронном двигателе

$$\Delta P_{\text{эм}} = \Delta P_{\text{м1}} + \Delta P_{\text{м2}} + \Delta P_{\text{с1}}, \quad (5.43)$$

где  $\Delta P_{\text{м1}}$  – потери в меди статора, Вт;  $\Delta P_{\text{м2}}$  – потери в обмотке ротора, Вт;  $\Delta P_{\text{с1}}$  – потери в стали статора, Вт.

При работе на естественной характеристике эти потери определяются выражениями [11]:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{м1}} &= \left[ \frac{I_0}{I_{1\text{н}}} + \left( 1 - \frac{I_0}{I_{1\text{н}}} \right) \mu_{\text{с}}^2 \right] \cdot \Delta P_{\text{м1н}}; \\ \Delta P_{\text{м2}} &= \mu_{\text{с}}^2 \cdot \Delta P_{\text{м2н}}; \\ \Delta P_{\text{с1}} &= \left[ B + (1 - B) \mu_{\text{с}}^2 \right] \cdot \Delta P_{\text{с1н}}, \end{aligned} \quad (5.44)$$

где  $\Delta P_{\text{м1н}} = 3 \cdot I_{1\text{н}}^2 \cdot R_1$  – номинальные потери в меди статора, Вт;

$\Delta P_{\text{м2н}} = 3 \cdot (I'_{2\text{н}})^2 \cdot R'_2$  – номинальные потери в обмотке ротора, Вт;

$\Delta P_{\text{с1н}} = \Delta P_{\text{н}} - \left( \Delta P_{\text{м1н}} + 1,5 \cdot 10^{-2} P_{\text{н}} + 10^{-2} \frac{P_{\text{н}} \cdot s_{\text{н}}}{1 - s_{\text{н}}} \right)$  – номинальные

потери в стали статора, Вт;  $\Delta P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot (1 - \eta_{\text{н}})}{\eta_{\text{н}}}$  – суммарные потери в

двигателе, Вт;  $\mu_{\text{с}} = \frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{н}}}$  – относительное значение момента статической

нагрузки, о. е.;  $B$  – конструктивный коэффициент, зависящий от серии асинхронного двигателя, о. е.  $B = 0,96 - 0,98$  – для серии асинхронных двигателей 4А;  $B = 0,94 - 0,97$  – для краново-металлургической серии.

При работе на регулировочной характеристике, реализуемой за счет снижения напряжения обмотки статора, полные электромагнитные потери в асинхронном двигателе определяются в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{м1}} &= 1,1 \cdot \mu_{\text{с}}^2 \left[ \frac{I_0 \cdot s_{\text{н}}}{I_{1\text{н}} \cdot s} + \left( 1 - \frac{I_0}{I_{1\text{н}}} \right) \frac{s_{\text{н}}}{s} \right] \cdot \Delta P_{\text{м1н}}; \\ \Delta P_{\text{м2}} &= 1,1 \cdot \mu_{\text{с}}^2 \left( \frac{s}{s_{\text{н}}} \right) \cdot \Delta P_{\text{м2н}}; \\ \Delta P_{\text{с1}} &= \mu_{\text{с}}^2 \cdot \left[ B \frac{s_{\text{н}}}{s} + (1 - B) \frac{s}{s_{\text{н}}} \right] \cdot \Delta P_{\text{с1н}}. \end{aligned} \quad (5.45)$$

Анализ выражений (5.45) показывает, что при работе на характеристике с пониженным напряжением увеличиваются потери в обмотке ро-

тора  $\Delta P_{M2}$ , но уменьшаются потери в меди статора  $\Delta P_{M1}$  и в стали статора  $\Delta P_{cl}$ , но их соотношение таково, что общие электромагнитные потери  $\Delta P_{эм}$  при работе на характеристике с пониженным напряжением оказываются меньше, чем при работе на естественной характеристике.

По литературным источникам [11], при регулировании скорости изменением напряжения для вентиляторной нагрузки удастся снизить энергопотребление в 1,5 – 2 раза. Экономия электроэнергии будет тем больше, чем меньше момент двигателя, по сравнению с номинальным, и чем больше работает двигатель с недогрузкой.

**Пример 5.4.** Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6У3 рассчитать и построить механические и электромеханические статические характеристики для следующих напряжений обмотки статора:  $U_{11} = 0,7 \cdot U_{1н}$ ;  $U_{12} = 0,8 \cdot U_{1н}$ ;  $U_{1н}$ .

Основные параметры асинхронного двигателя и его схемы замещения:

- номинальная мощность двигателя  $P_H = 4$  кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1н} = 220$  В;
- номинальное скольжение  $s_H = 0,051$  о.е.;
- номинальный ток обмотки статора  $I_{1н} = 9,125$  А;
- активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1 = 1,878$  Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора  $X_{1\sigma} = 2,248$  Ом;
- активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора  $R_2' = 1,393$  Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, приведенное к обмотке статора  $X_{2\sigma}' = 2,994$  Ом;
- синхронная частота вращения  $n_0 = 1000$  об/мин;
- кратность пускового тока  $I_{п}/I_{1н} = k_i = 6$  о.е.;
- кратность максимального момента  $M_{max}/M_H = k_{max} = 2,2$  о.е.

**Решение.** Расчет механических характеристик асинхронного двигателя произведем в соответствии с выражением (5.7):

$$M = \frac{m_c \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + R_2' \cdot s^{-1})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2]} =$$

$$= \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot 1,393}{104,7 \cdot s \cdot [(1,878 + 1,393/s)^2 + (2,248 + 2,994)^2]}$$

Механические характеристики, рассчитанные для различных напряжений обмотки статора, приведены на рис. 5.19.

Электромеханическая характеристика  $I_2' = f(s)$  определяется зависимостью

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{s}\right)^2 + 5,242^2}}$$

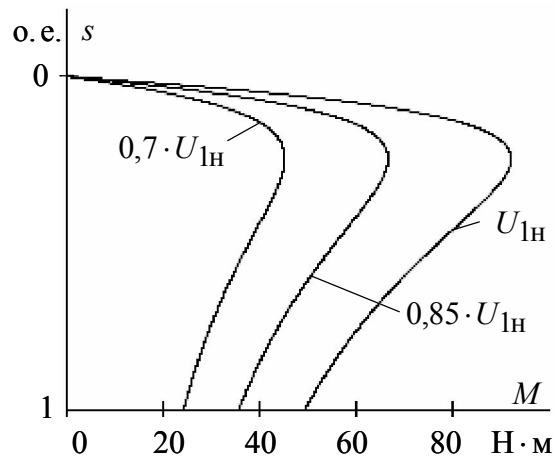


Рис. 5.19. Статические механические характеристики асинхронного двигателя типа 4А112МВ6У3 для различных напряжений обмотки статора

Электромеханические характеристики  $I_2' = f(s)$  для различных напряжений обмотки статора приведены на рис. 5.20.

Статические электромеханические характеристики  $I_1 = f(s)$  можно определить по выражению

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2},$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}}$$

Так как регулирование скорости асинхронного двигателя производится изменением напряжения обмотки статора, то ток холостого хода

$I_0$  является функцией напряжения обмотки статора и его можно найти в соответствии со схемой замещения (см. рис. 5.2) по уравнению:

$$I_0 = \frac{U_{1j}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_m)^2}} \quad (5.46)$$

или после подстановки численных значений параметров

$$I_0 = \frac{U_{1j}}{\sqrt{1,878^2 + (2,248 + 54,47)^2}}.$$

Графики электромеханических характеристик  $I_2' = f(s)$  и  $I_1 = f(s)$  для различных напряжений обмотки статора приведены на рис. 5.20.

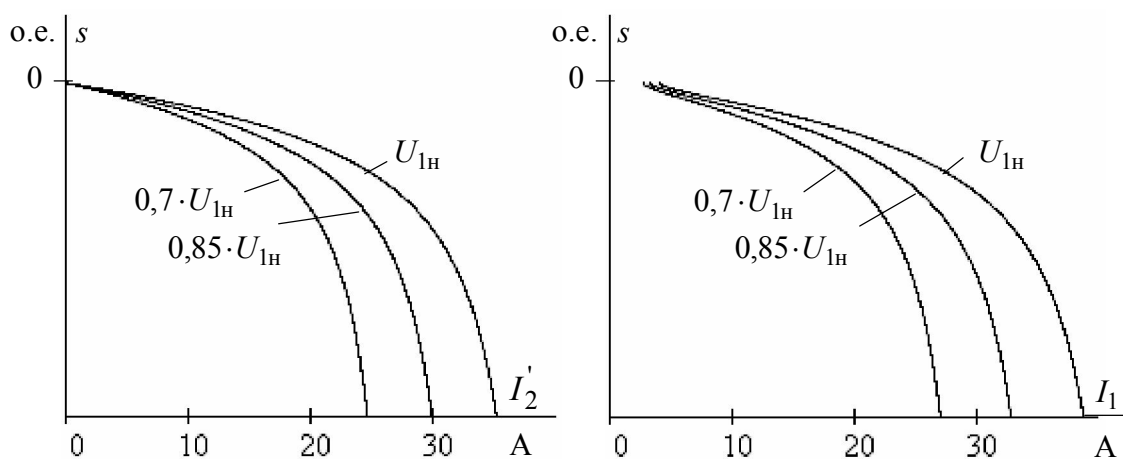


Рис. 5.20. Электромеханические характеристики короткозамкнутого асинхронного двигателя для различных напряжений обмотки статора

**Вывод.** При изменении напряжения статора критический и пусковой момент асинхронного двигателя уменьшаются пропорционально квадрату фазного напряжения. Одновременно пропорционально напряжению уменьшается ток короткого замыкания. Этим свойством пользуются для ограничения бросков тока при пусках асинхронных двигателей. Регулирование скорости происходит за счет изменения жесткости характеристик. На практике для некоторых типов вентиляторов удается получить диапазон регулирования скорости  $D=1:10$  за счет работы двигателя на участках механической характеристики со скольжениями, большими  $s_k$ .

### 5.1.7. Тиристорные пусковые устройства в электроприводах с асинхронными двигателями

Одна из эффективных возможностей повышения надежности и экономичности работы электроприводов с асинхронными двигателями связана с использованием в их структурах тиристорных пусковых устройств, называемых также мягкими пускателями [12]. Тиристорное пусковое устройство (ТПУ) представляет собой специализированный регулятор напряжения переменного тока с фазовым управлением (см. рис. 5.14 или рис. 5.15), предназначенный для регулирования напряжения на статоре асинхронного двигателя при неизменной его частоте. Отличаясь простотой схемы, незначительными массой и габаритами, эти устройства позволяют:

- ограничить ток и момент на валу двигателя при пусках, реверсах и торможениях;
- уменьшить электрические, механические и тепловые нагрузки на элементы самого электропривода, кинематических схем технологического оборудования и систем электроснабжения и тем самым увеличить их срок службы;
- существенно снизить падения напряжения в питающей сети при пусках мощных двигателей.

Функциональная схема асинхронного электропривода с тиристорным пусковым устройством и задатчиком интенсивности на входе приведена на рис. 5.21.

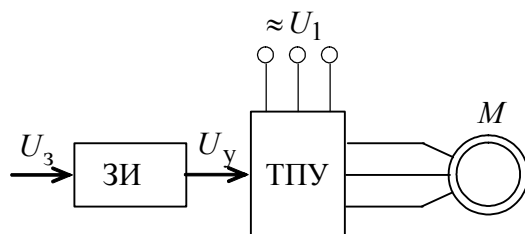


Рис. 5.21. Функциональная схема асинхронного электропривода с тиристорным пусковым устройством

Тиристорные пусковые устройства в настоящее время широко применяют практически во всех отраслях промышленности, строительстве, жилищно-коммунальном хозяйстве.

Задатчик интенсивности (ЗИ), установленный на вход тиристорного пускового устройства, формирует темп роста напряжения на обмотках статора асинхронного двигателя  $M$ . Как правило, выходное напряжение задатчика интенсивности – линейно-нарастающее, но может быть сформирован и более сложный закон изменения напряжения управле-



ния (рис. 5.22), определяющий не только ускорение электропривода, но и его рывок.

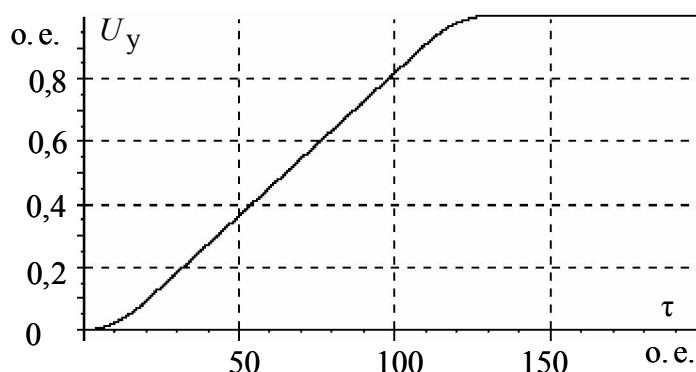


Рис. 5.22. Выходное напряжение задатчика интенсивности с S-образной характеристикой

Ускорение  $d\omega/dt$  при пуске и торможении двигателя определяется темпом изменения сигнала  $U_y$  задатчика интенсивности, причем они связаны между собой зависимостью

$$\frac{dU_y}{dt} \approx \left( \frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{зад}}. \quad (5.47)$$

Значение ускорения  $(d\omega/dt)_{\text{зад}}$  обычно выбирается таким образом, чтобы при известном характере нагрузки от скорости  $M_c = f(\omega)$  и заданном моменте инерции  $J_\Sigma$  электропривода момент двигателя  $M_{\text{дв}}$ , определяемый из уравнения

$$M_{\text{дв}} = J_\Sigma \left( \frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{зад}} + M_c \leq M_{\text{дв. доп}}, \quad (5.48)$$

не превысил допустимого значения  $M_{\text{дв. доп}}$ .

Тиристорное пусковое устройство является дискретным элементом. После включения очередного тиристора изменить напряжение на обмотках двигателя возможно только по истечении некоторого времени, когда система импульсно-фазового управления сформирует импульс на открытие следующего тиристора. Таким образом, тиристорное пусковое устройство представляет собой нелинейное динамическое звено с запаздыванием.

Исследования на имитационной модели показали, что представление тиристорного пускового устройства звеном с запаздыванием или апериодическим звеном первого порядка дает один и тот же результат. Графики переходных процессов скорости и момента, полученные в ре-

зультате моделирования, приведены на рис. 5.23, а динамическая механическая характеристика – на рис. 5.24.

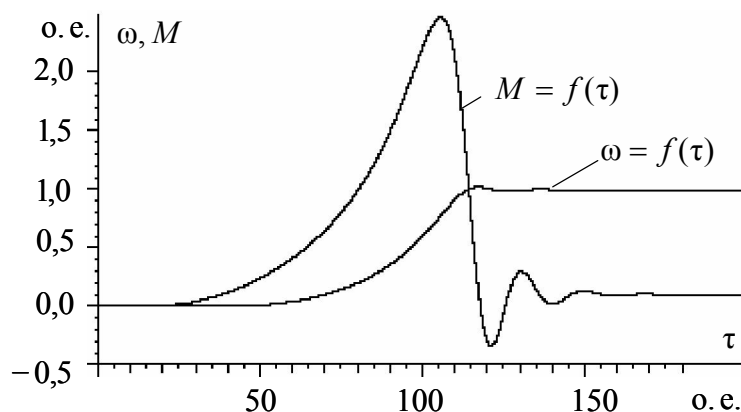


Рис. 5.23. Графики переходных процессов скорости и момента при пуске асинхронного двигателя через тиристорное пусковое устройство

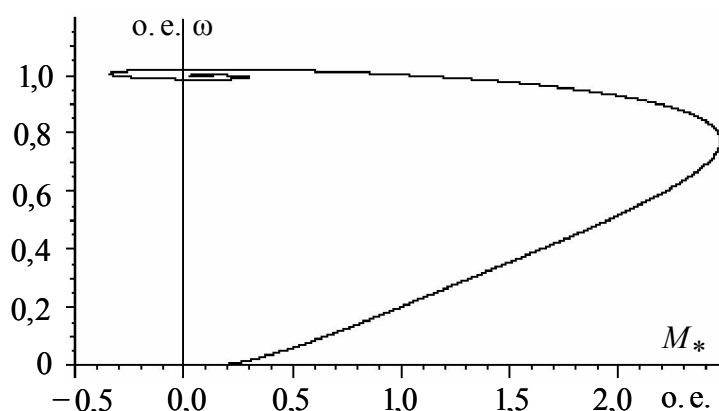


Рис. 5.24. Динамическая механическая характеристика пуска асинхронного двигателя через тиристорное пусковое устройство

**Выводы.** Сравнительный анализ графиков переходных процессов скорости и момента, а также динамических механических характеристик при пуске двигателя прямым включением в сеть (см. рис. 5.9. – 5.11) и через тиристорное пусковое устройство показывает, что в результате формирования соответствующего закона изменения напряжения управления  $U_y$  можно:

- устранить броски динамического момента двигателя на начальном участке пуска;
- уменьшить максимальное перерегулирование скорости и момента в конце пуска, на рабочем участке механической характеристики.

### 5.1.8 Системы частотного регулирования угловой скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя

Наиболее эффективные способы регулирования скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя связаны с изменением скорости вращения электромагнитного поля статора

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{z_p}. \quad (5.49)$$

Из (5.49) следуют два основных способа регулирования скорости вращения электромагнитного поля:

- изменением числа пар полюсов  $z_p$ ;
- изменением частоты  $f_1$  напряжения статора двигателя.

Способ регулирования скорости асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов позволяет получить несколько фиксированных значений рабочих скоростей. Так, например, асинхронные двигатели серии 4А–6А выпускаются двух-, трех- и четырехскоростные. Применяются для крановых электроприводов. Как правило, плавное регулирование скорости для таких электрических машин не применяется, то есть многоскоростные асинхронные двигатели не используются для систем регулируемого электропривода [6].

Способы частотного регулирования скорости электроприводов переменного тока с короткозамкнутыми асинхронными двигателями находят все большее применение в различных отраслях техники. Преобразование переменного напряжения питающей сети в переменное напряжение с регулируемой частотой, напряжением и током осуществляют преобразователи частоты. В настоящее время преобразователи частоты выполняются на базе силовых полупроводниковых ключей. Быстрый рост преобразователей частоты стал возможен с появлением биполярных транзисторов с изолированным затвором, рассчитанных на токи до нескольких тысяч ампер, напряжения до нескольких киловольт и частоту коммутации 20 кГц и выше.

По типу связи с питающей сетью преобразователи частоты на полупроводниковых элементах делятся на два больших класса:

- преобразователи частоты с непосредственной связью;
- преобразователи частоты со звеном постоянного тока.

Преобразователи частоты со звеном постоянного тока, в свою очередь, подразделяются на:

- автономные инверторы тока (АИТ);
- автономные инверторы напряжения (АИН).

В своей структуре автономные инверторы содержат выпрямитель, силовой фильтр и инвертор, преобразующий постоянное напряжение (ток) в переменное напряжение (ток) заданной частоты.

### 5.1.9. Преобразователи частоты с непосредственной связью

Основой силовой схемы преобразователя частоты с непосредственной связью является реверсивный тиристорный преобразователь. Многофазный выход преобразователя частоты с непосредственной связью достигается использованием нескольких реверсивных преобразователей с однофазным выходом (рис. 5.25).

Выходное однофазное напряжение низкой частоты  $f_{1j}$  обеспечивается циклическим изменением углов открытия тиристорov. Коммутация тока тиристорами каждой группы непосредственного преобразователя частоты одного направления осуществляется напряжением сети (см. рис. 5.26).

Большинство непосредственных преобразователей частоты предусматривает совместное согласованное управление реверсивными группами тиристорov. В этом случае для ограничения уравнивающих токов служат ограничивающие реакторы  $L1...L6$ , что увеличивает массу и габаритные размеры преобразователя, а также снижает его энергетические показатели.

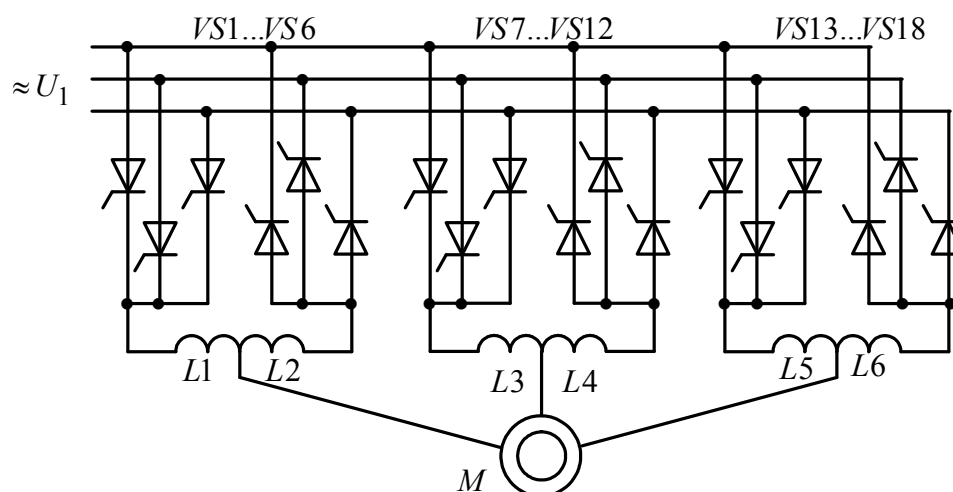


Рис. 5.25. Система непосредственный преобразователь частоты – асинхронный двигатель

На диаграммах напряжения (см. рис. 5.26) управление происходит при переменном угле управления  $\alpha$ . Закон изменения управляющего напряжения  $U_{упр}$  в непосредственном преобразователе частоты опреде-

ляется специальным задатчиком. В рассмотренном случае управляющее напряжение изменяется по синусоидальному закону. В некоторых случаях применяют управляющее напряжение прямоугольной формы.

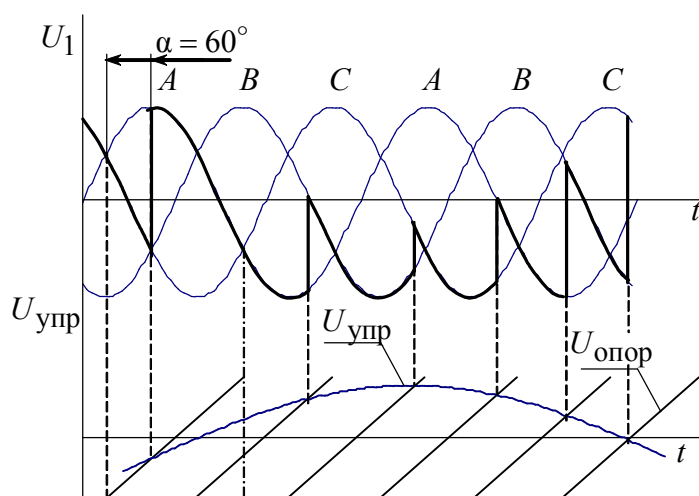


Рис. 5.26. Выходное однофазное напряжение непосредственного преобразователя частоты

Трехфазная система управляющих напряжений прямоугольной формы, сдвинутая для каждой из фаз на 120 эл. град., приведена на рис. 5. 27.

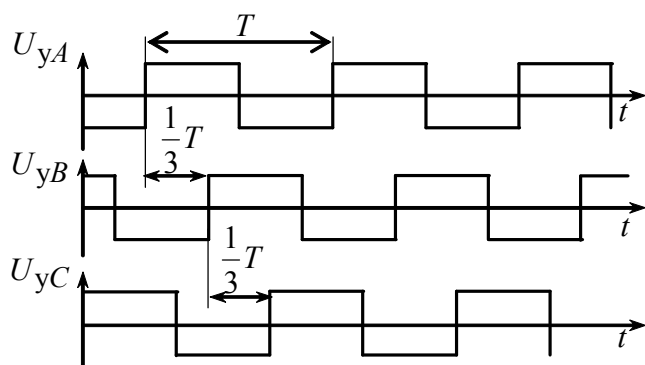


Рис. 5. 27. Трехфазная система управляющих напряжений прямоугольной формы

Если каждый из управляемых выпрямителей непосредственного преобразователя частоты охватить глубокими отрицательными обратными связями по току, то преобразователь приобретает свойства источника тока. Таким образом, непосредственные преобразователи частоты могут работать в режиме источника напряжения, либо в режиме источника тока.

Достоинством непосредственных преобразователей частоты являются:

- однократное преобразование энергии, что определяет высокий КПД преобразователя;

- возможность прохождения реактивной мощности как от сети к нагрузке, так и обратно.

Недостатки:

- сложность устройств управления. Большое число тиристоров требует большого числа систем импульсно-фазового управления;
- коэффициент мощности преобразователя существенно меньше единицы ( $\cos \varphi \approx 0,15$ );
- существенно искажается форма напряжения питающей сети;
- трудности получения частот, близких к частоте питающей сети. Для нулевой схемы максимальная частота выходного напряжения обычно ограничивается  $f_{1\max} = 16$  Гц. Переход к мостовой схеме расширяет рабочий диапазон до  $f_{1\max} = 25$  Гц.

Поэтому асинхронные электроприводы с непосредственными преобразователями частоты применяются для безредукторных электроприводов средней и большой мощности.

### 5.1.10. Автономные инверторы тока

Схема силовых цепей трехфазного мостового инвертора тока приведена на рис. 5. 28.

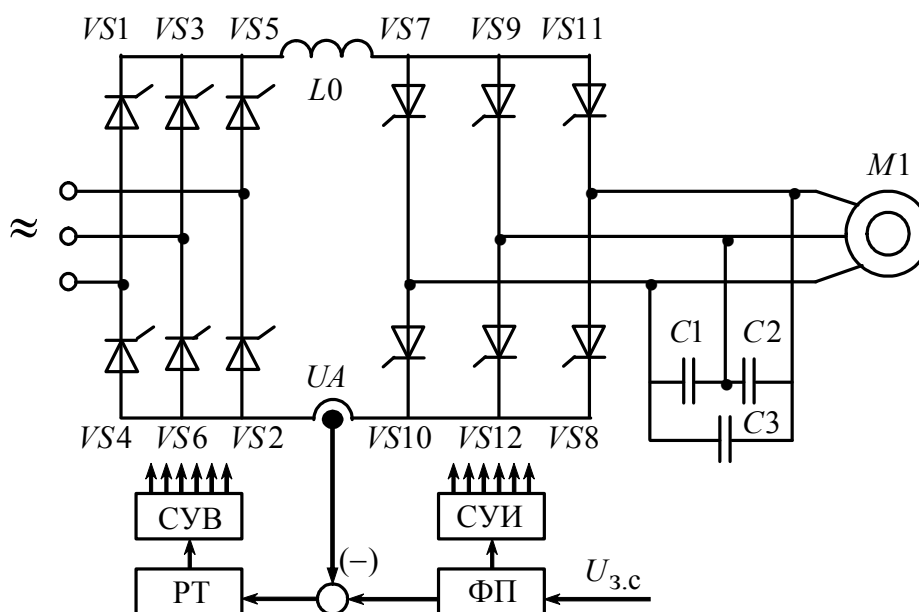


Рис. 5.28. Схема силовых цепей трехфазного мостового инвертора тока

Условные обозначения, принятые на рис. 5.28:

СУВ – схема управления выпрямителем;

РТ – регулятор тока;  
 СУИ – схема управления инвертором;  
 ФП – функциональный преобразователь.

Двухступенчатые преобразовательные устройства выполняются на основе выпрямителя трехфазного переменного напряжения сети и автономного инвертора, преобразующего выпрямленное напряжение в переменное трехфазное с регулируемой частотой и амплитудой. Несмотря на двукратное преобразование энергии и обусловленное при этом некоторое снижение КПД, преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока получили наибольшее распространение в регулируемом электроприводе.

В автономном инверторе тока управляемый выпрямитель, выполненный на тиристорах  $VS1...VS6$ , работает в режиме регулятора тока, а инвертор на тиристорах  $VS7...VS12$  формирует требуемую частоту выходного тока. Фильтр с индуктивностью  $L0$  обеспечивает сглаживание пульсаций выпрямленного тока

Тиристоры инвертора тока  $VS7...VS12$ , включенные по трехфазной мостовой схеме, пропускают ток в течение 120 эл. град. Переключение производится с периодичностью  $60^\circ$  в последовательности, соответствующей нумерации тиристоров. Диаграммы токов для каждой из фаз инвертора приведены на рис. 5.29.

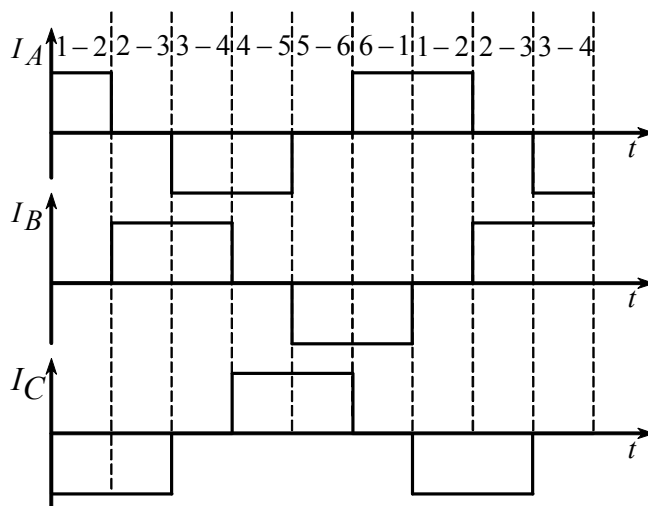


Рис. 5.29. Диаграммы токов для каждой из фаз инвертора

Коммутация тока и компенсация реактивной мощности осуществляется конденсаторами  $C1...C3$  на стороне переменного тока. При активно-индуктивной нагрузке на выходе инвертора и на тиристорах  $VS7...VS12$  в моменты коммутации могут возникнуть значительные перенапряжения, обусловленные действием ЭДС самоиндукции нагрузки.

Их ограничение достигается установкой соответствующих емкостей. При снижении частоты и при постоянном моменте на валу двигателя емкость конденсаторов возрастает обратно пропорционально квадрату частоты.

При переходе двигателя, питаемого от автономного инвертора тока, в генераторный режим изменяется направление противЭДС инвертора, который переходит в режим работы выпрямителем, что могло бы вызвать увеличение тока в звене постоянного тока. Однако за счет сильной отрицательной обратной связи по току, которой охвачен выпрямитель, ток в звене постоянного тока сохраняется на прежнем уровне, а выпрямитель переводится в режим инвертора, ведомого сетью. Вследствие чего происходит рекуперация энергии в питающую сеть без изменения направления тока в звене постоянного тока.

Таким образом, в автономных инверторах тока легко реализуются тормозные режимы двигателя с рекуперацией энергии в сеть, что делает предпочтительным его применение в реверсивных электроприводах.

Более совершенной схемой этого класса является схема автономного инвертора тока с отсекающими диодами рис. 5.30.

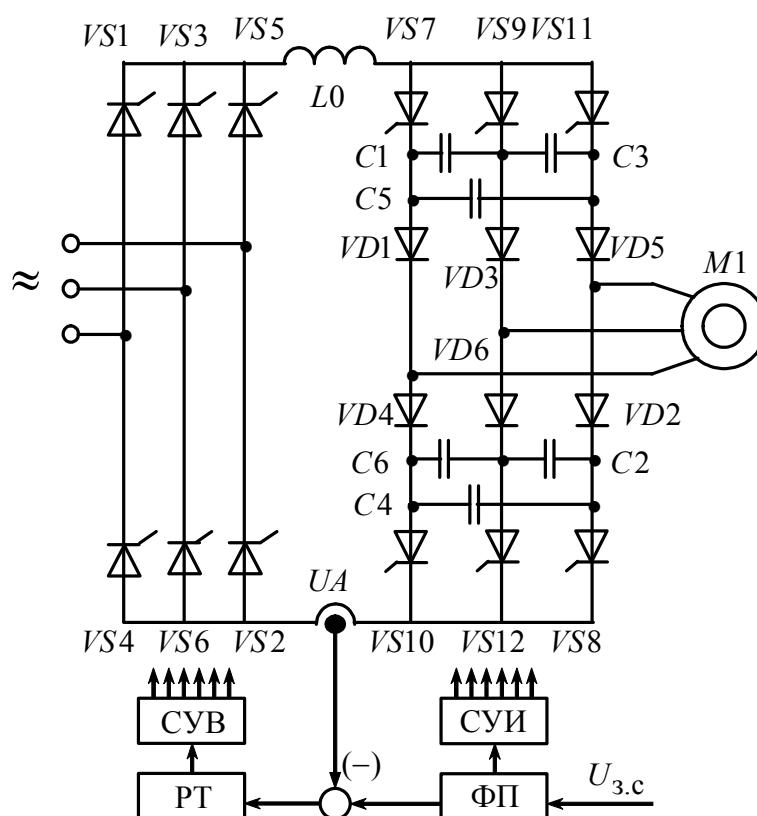


Рис. 5.30. Схема силовых цепей автономного инвертора тока с отсекающими диодами



В схеме автономного инвертора тока (рис. 5.30) конденсаторы  $C1...C6$  отделены от нагрузки с помощью диодов  $VD1...VD6$ , благодаря чему конденсаторы участвуют в работе инвертора лишь в сравнительно короткое время коммутации, а в остальное время ток через них не протекает. Это позволяет существенно уменьшить емкость конденсаторов.

Основные достоинства преобразователей частоты с автономными инверторами тока:

- возможность рекуперации энергии в сеть;
- близкое к синусоидальному выходное напряжение;
- безаварийность режима короткого замыкания в нагрузке.

Недостатки:

- ограничение выходной частоты на уровне  $100 \div 125$  Гц;
- коммутационные перенапряжения на тиристорах, что заставляет усложнять силовую схему;
- невозможность работы на групповую нагрузку;
- существенные вес и габариты индуктивного фильтра.

### 5.1.11. Автономные инверторы напряжения

Если от преобразователя частоты необходимо питать электродвигательный электропривод, то преобразователь должен быть построен по схеме инвертора напряжения с отсекающими диодами и диодами реактивного тока рис. 5.31.

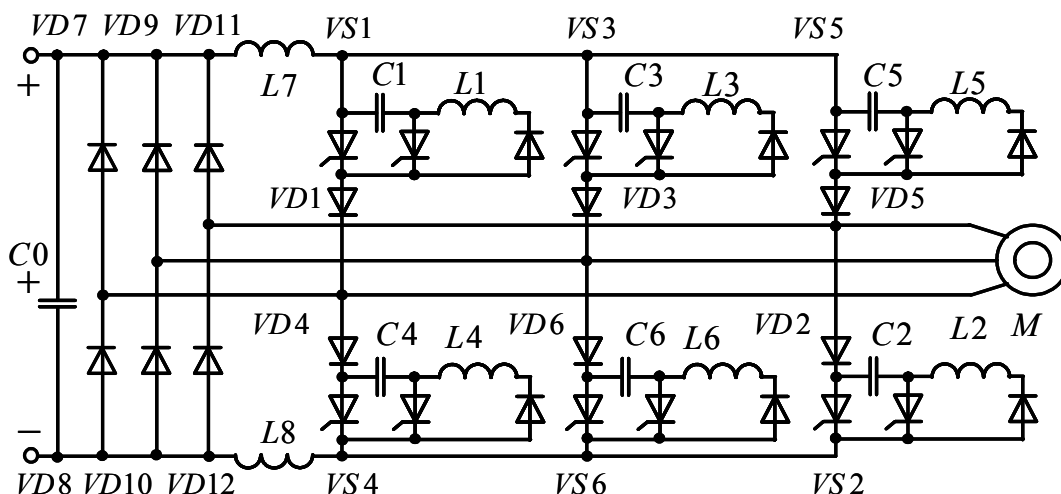


Рис. 5.31. Схема асинхронного электропривода с автономным инвертором напряжения

Преобразователь переменного напряжения в постоянное на рис. 5.31 не показан. Выпрямленное напряжение фильтруется с помощью емкостного фильтра, выполненного на конденсаторе  $C_0$ .

Отсекающие диоды  $VD1...VD6$  отсекают конденсаторы  $C1...C6$  от асинхронного двигателя  $M$ , что ограничивает работу конденсаторов кратковременным интервалом коммутации и обеспечивает сохранение зарядов на них до наступления следующей коммутации.

Энергия, запасенная в индуктивностях нагрузки, снова возвращается в источник постоянного тока через диоды обратного хода  $VD7...VD12$ . Очередность работы вентилях:  $VS1 - VS2$ ;  $VD7 - VD12$ ;  $VS2 - VS3$ ;  $VD12 - VD9$ ;  $VS3 - VS4$ ;  $VD9 - VD8$ ;  $VS4 - VS5$ ;  $VD8 - VD11$ .

В схеме возможно выключение любого рабочего тиристора в заданный момент времени независимо от состояния других тиристоров, что дает возможность регулировать действующее значение напряжения на нагрузке изменением длительности открытого состояния рабочего тиристора. Такое построение автономного инвертора позволяет использовать для получения постоянного напряжения неуправляемый выпрямитель. Принцип синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) показан на рис. 5.32.

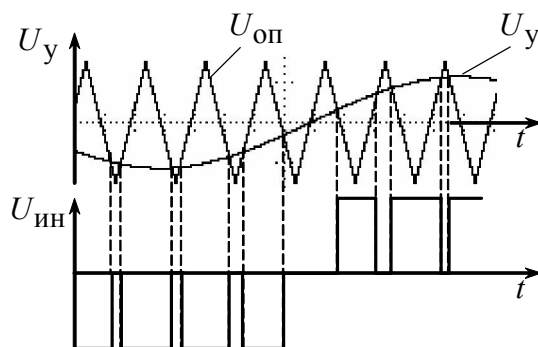


Рис. 5.32. Принцип синусоидальной широтно-импульсной модуляции

При ШИМ схема управления определяет моменты коммутации полупроводниковых приборов при равенстве опорного  $U_{оп}$  треугольного напряжения и управляющего  $U_y$  синусоидального.

Для электроприводов небольшой мощности в последние годы в качестве ключей нашли применение силовые транзисторы типа IGBT и MOSFET. Асинхронный электропривод с автономным инвертором напряжения, выполненным на IGBT-транзисторах, приведен на рис. 5.33.

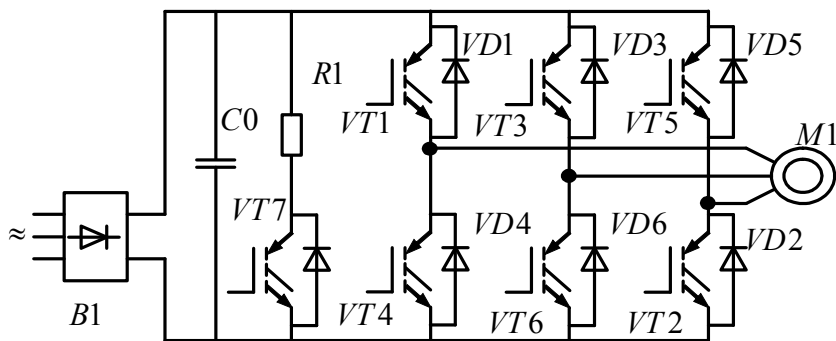


Рис. 5.33. Асинхронный электропривод с автономным инвертором напряжения, выполненным на IGBT-транзисторах

Индуктивный характер нагрузки учитывается подключением параллельно транзисторным ключам  $VT1...VT6$  диодов  $VD1...VD6$ , обеспечивающих непрерывность цепи протекания тока в обмотках статора при отключении их от источника питания и возврат запасенной электромагнитной энергии в конденсатор  $C0$  фильтра.

Так как IGBT-транзисторы могут переключаться при значительно больших частотах, чем тиристорные ключи, то и форма тока, протекающего через обмотки двигателя, становится значительно ближе к синусоидальной. Очевидно, что чем выше несущая частота ШИМ, тем меньше амплитуда колебаний тока в обмотках статора двигателя. На рис. 5.34 приведены осциллограммы токов статора асинхронного двигателя при низкой и высокой несущей частоте опорного напряжения ШИМ модулятора.

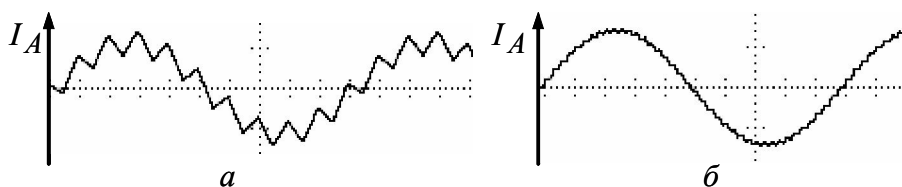


Рис. 5.34. Осциллограммы токов статора асинхронного двигателя при низкой (а) и высокой (б) несущей частоте опорного напряжения ШИМ модулятора

Однако чрезмерное увеличение несущей частоты может привести к перегреву двигателя и ключей инвертора. Чем выше частота коммутации ключей, тем выше потери энергии в них.

В электроприводах, имеющих в цикле работы участки рекуперации энергии, запасенной во вращающихся частях электропривода, или высокую интенсивность тормозных режимов, для эффективного торможе-

ния приходится предусматривать специальный узел сброса энергии, состоящий из дополнительного ключа  $VT7$  и резистора  $R1$ . Ключ  $VT7$  открывается при превышении напряжения на емкости  $C0$  сверх допустимого значения, вследствие чего обеспечивается «сброс» энергии в резистор  $R1$ , рассеивающий эту энергию.

В структурах электроприводов с автономными инверторами напряжения, охваченными отрицательной обратной связью по току, инвертор приобретает свойства источника тока.

В электроприводах с автономными инверторами напряжения возможен режим векторного управления, что позволяет использовать их для процессов с повышенными требованиями к динамике и пусковому моменту. Кроме того, эти преобразователи совместно с асинхронными двигателями во многих случаях позволяют заменить более дорогой электропривод постоянного тока.

### 5.1.12. Асинхронный электропривод с частотным регулированием угловой скорости

Изменение частоты питающего напряжения асинхронного двигателя влияет как на его синхронную скорость  $\omega_0$ , так и на его реактивные сопротивления, которые меняются пропорционально изменению частоты:

$$X_{1\sigma j} = X_{1\sigma H} \cdot f_{1j} / f_{1H}; \quad X'_{2\sigma j} = X'_{2\sigma H} \cdot f_{1j} / f_{1H}; \quad X_m = X_{mH} \cdot f_{1j} / f_{1H}, \quad (5.50)$$

где  $f_{1H}$  – номинальное значение частоты напряжения статора асинхронного двигателя;  $X_{1\sigma H}, X'_{2\sigma H}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора при номинальной частоте питающей сети  $f_{1H}$ .

Если одновременно с частотой  $f_{1j}$  изменять и переменное напряжение  $U_{1j}$  обмоток статора асинхронного двигателя, то появляется возможность реализовать в системах преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ-АД) различные законы регулирования скорости. Для сравнительной оценки этих законов регулирования воспользуемся уравнением баланса мощностей. Мощность на валу двигателя

$$P_2 = P - \Delta P_2 = \omega \cdot (1 - s) \cdot M, \quad (5.51)$$

где  $P$  – электромагнитная мощность, передаваемая от статора к ротору;  $\Delta P_2$  – мощность потерь в роторе.

Из (5.51) следует, что при любом способе регулирования скорости асинхронного двигателя важно согласовать регулировочные механические характеристики двигателя с его нагрузкой.

По характеру зависимости момента механизма от его скорости –  $M_c = f(\omega)$  можно выделить следующие механические характеристики производственных механизмов:

- не зависящая от угловой скорости механическая характеристика

$$M_c = \text{const}; P_c = k \cdot \omega; \quad (5.52)$$

- нелинейно-спадающая механическая характеристика или работа с постоянной мощностью

$$M_c = k \cdot \omega^{-1}; P_c = \text{const}; \quad (5.53)$$

- нелинейно-возрастающая механическая характеристика или вентиляторная нагрузка

$$M_c = k \cdot \omega^2; P_c = k \cdot \omega^3. \quad (5.54)$$

В частотно-регулируемых электроприводах переменного тока зависимости (5.52)–(5.54) можно сформировать и для электромагнитных моментов двигателей. Например, при постоянном моменте нагрузки ( $M_c = \text{const}$ ) управление напряжением и частотой тока статора асинхронного двигателя должно осуществляться по закону

$$U_{1j} / f_{1j} = \text{const}. \quad (5.55)$$

При нелинейно-спадающей нагрузке  $M_c = k \cdot \omega^{-1}$  –закон управления напряжением и частотой принимает вид

$$U_{1j}^2 / f_{1j} = \text{const}. \quad (5.56)$$

Наконец, при «вентиляторной» нагрузке  $M_c = k \cdot \omega^2$  напряжение и частота должны изменяться в соответствии с зависимостью

$$U_{1j} / f_{1j}^2 = \text{const}. \quad (5.57)$$

Законы управления (5.55)–(5.57), связывающие напряжение, частоту и характер нагрузки, описываются формулой М. П. Костенко:

$$U_{1j} = U_{1н} \frac{f_{1j}}{f_{1н}} \sqrt{M_c / M_н}, \quad (5.58)$$

где  $U_{1н}$  – номинальное напряжение питающей сети, В;  $U_{1j}$  – напряжение на выходе преобразователя частоты;  $M_c$  – статический момент на валу асинхронного двигателя при данной частоте  $f_{1j}$ .

Из (5.53) следует, что, например, для привода, работающего с постоянной мощностью, увеличение скорости в четыре раза приводит к

уменьшению статического момента  $M_c$  также в четыре раза. При этом потери в стали и на намагничивание уменьшаются, а перегрузочная способность двигателя остается примерно постоянной:

$$\frac{M_c}{M_k} = \text{const}, \quad (5.59)$$

где  $M_k$  – критический момент двигателя, Н·м.

Таким образом, для того, чтобы наиболее эффективно реализовать принципы частотного управления асинхронным двигателем, необходимо в соответствии с видом нагрузки на валу двигателя управлять напряжением, подводимым к статору, взаимосвязано с изменением частоты тока статора. Перечисленные режимы управления достаточны для большинства механизмов. Однако закон управления (5.58) справедлив только в первом аналитическом приближении, когда активным сопротивлением статора  $R_1$  можно пренебречь. В действительности, при малых значениях частоты ( $f_1 \leq 0,5 \cdot f_{1H}$ ) падение напряжения на сопротивлении  $R_1$  существенно снижает величину напряжения, прикладываемого к контуру намагничивания, и критический момент асинхронного двигателя уменьшается. При более точном анализе, учитывающем падение напряжения на сопротивлении  $R_1$ , механические характеристики принимают вид, показанный на рис. 5.35. Так, например, при законе управления  $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$ , предполагающем постоянство критического момента, наблюдается его снижение при уменьшении частоты  $f_{1j}$ .

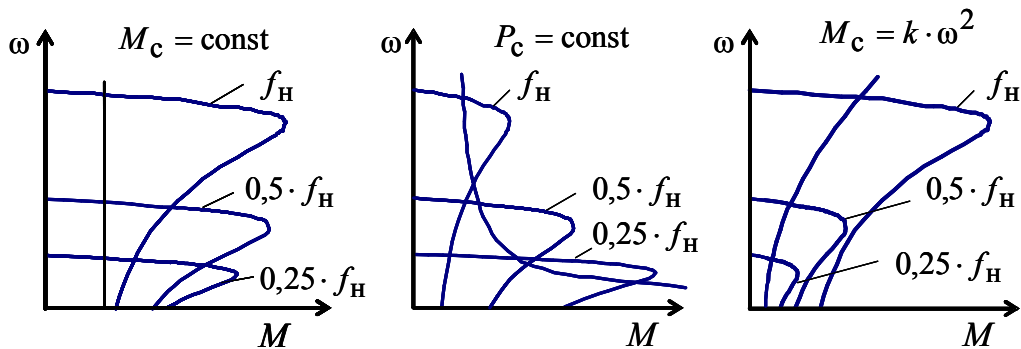


Рис. 5.35. Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов преобразователь частоты – асинхронный двигатель

Функциональная схема электропривода, выполненного по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель, реализующая различные законы управления класса  $U_{1j}/f_{1j}$ , приведена на рис. 5.36.

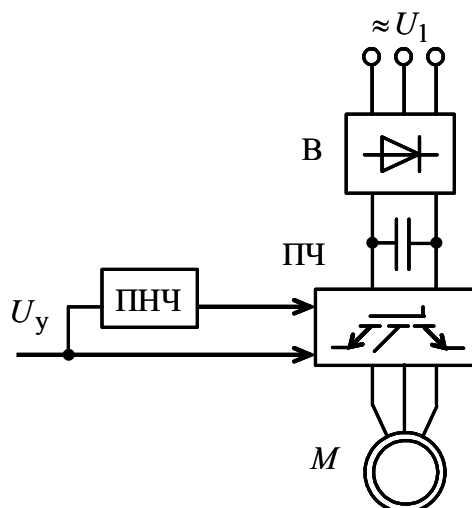


Рис. 5.36. Функциональная схема скалярного частотного управления скоростью асинхронного двигателя

В этой схеме сигнал управления  $U_y$  определяет модуль напряжения статора. Преобразователь напряжение – частота (ПН–Ч) обеспечивает изменение относительной частоты  $\alpha = f_{1*} = f_{1j}/f_{1н}$  в функции от напряжения управления  $U_y$  по одному из установленных законов регулирования (5.55) – (5.57) класса  $U_{1j}/f_{1j}$ .

При частотном регулировании скорости асинхронного двигателя необходимо учитывать, что реактивные сопротивления двигателя зависят от частоты питающего напряжения. При снижении частоты  $f_{1j}$  активное сопротивление  $R_1$  становится соизмеримым с реактивными сопротивлениями машины, поэтому расчет электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя производится в соответствии с уравнениями, приведенными в [6].

Электромеханическая характеристика, определяющая зависимость приведенного тока ротора от скольжения,

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu н} \cdot f_{1*}}\right)^2}}, \quad (5.60)$$

где  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;  $f_{1*} = f_{1j}/f_{1н}$  – относительное значение частоты питающего напряжения.

Электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$ , построенные по (5.60) для трех законов регулирования класса  $U_{1j}/f_{1j}$ , приведены на рис. 5.37, где  $\omega = \omega_0(1 - s)$ .

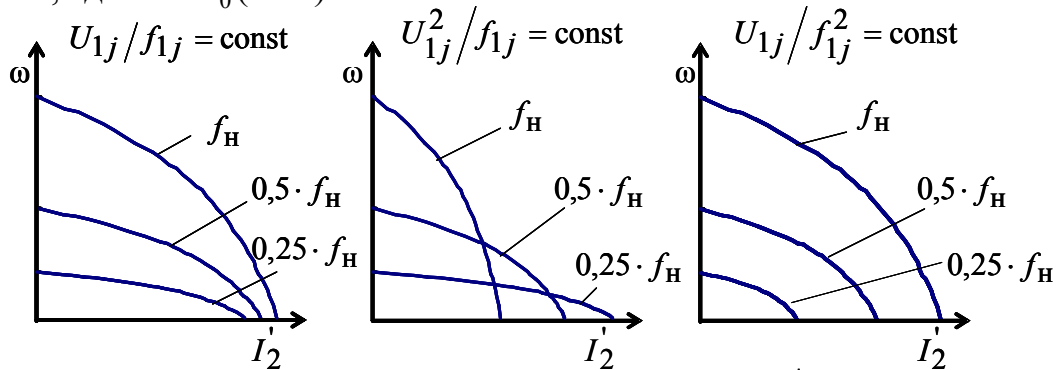


Рис. 5.37. Электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$  для трех законов регулирования класса  $U_{1j}/f_{1j}$

Для короткозамкнутого асинхронного двигателя одной из основных является электромеханическая характеристика  $I_1 = f(\omega)$ , отражающая зависимость тока статора  $I_1$  от скорости  $\omega$  (скольжения  $s$ ). Ток статора  $I_1$  определяется путем сложения вектора тока намагничивания  $\overline{I_0}$  и вектора тока ротора  $\overline{I_2'}$ . Обычно это производится с помощью круговой диаграммы.

Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя  $I_0$  реактивным, ток статора  $I_1$  через приведенный ток ротора  $I_2'$  можно найти по формуле [6]

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}, \quad (5.61)$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}} f_{1*}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}}. \quad (5.62)$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется следующим выражением:

$$M = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s \left[ X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}. \quad (5.63)$$



Механическая характеристика асинхронного двигателя имеет критический момент и критическое скольжение, которые определяются обычным способом, положив  $dM/ds = 0$ . Тогда критический момент

$$M_{kj} = \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} \left[ R_1 \pm \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2) \left( 1 + \frac{R_1^2}{X_{\text{мн}}^2 \cdot f_{1*}^2} \right)} \right]}, \quad (5.64)$$

где  $\omega_{0j} = 2 \cdot \pi \cdot f_{1j} / p$  – синхронная угловая скорость;  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя.

Критическое скольжение

$$s_{kj} = \pm R_2' \sqrt{\frac{1 + (R_1 / X_{\text{мн}} \cdot f_{1*})^2}{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}}. \quad (5.65)$$

Знак «+» означает, что критический момент и скольжение относятся к двигательному режиму, знак «-» – к генераторному режиму рекуперативного торможения.

**Пример 5.5.** Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6УЗ, работающего в системе автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель, рассчитать и построить статические механические и электромеханические характеристики при частотном регулировании скорости в соответствии с законом регулирования  $U_{1j} / f_{1j} = \text{const}$  при следующих значениях частот напряжений обмотки статора: 50, 25, 10, 5 Гц.

Основные параметры асинхронного двигателя и его схемы замещения приведены в примере 5.1.

**Решение.** Преобразователи частоты со звеном постоянного тока или инверторы напряжения, выпускаемые промышленностью, формируют зависимость  $U_{1j} / f_{1j} = \text{const}$  в соответствии с графиком, приведенным на рис. 5.38. Стандартная настройка промышленных электроприводов позволяет ввести три точки аппроксимации закона регулирования: для максимальной  $f_{\text{max}}$ , средней  $f_{\text{cp}}$  и минимальной  $f_{\text{min}}$  частоты и соответствующие им координаты максимального  $U_{1\text{max}}$ , среднего  $U_{1\text{cp}}$  и минимального  $U_{1\text{min}}$  напряжения преобразователя.

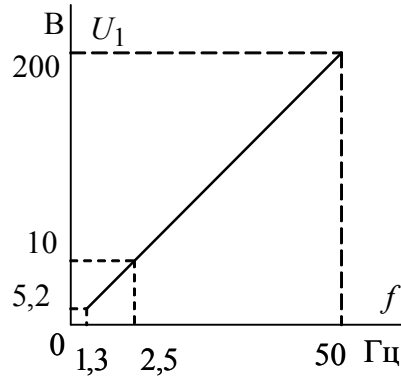


Рис. 5.38. Зависимость напряжения от частоты в автономных инверторах напряжения, выпускаемых промышленностью

Если регулировать частоту  $f_{1j}$  и напряжение  $U_{1j}$  в соответствии с законом  $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$  и графиком рис. 5.38, то при  $f_{1н} = 50$  Гц и  $U_1 = 200$  В коэффициент пропорциональности

$$\gamma = \frac{U_1}{f_{1н}} = \frac{200}{50} = 4,$$

тогда, соответственно, для частот регулирования  $f_{1н} = 50$  Гц,  $f_{12} = 25$  Гц,  $f_{13} = 10$  Гц,  $f_{14} = 5$  Гц фазные напряжения будут равны  $U_{11} = 200$  В,  $U_{12} = 100$  В,  $U_{13} = 40$  В,  $U_{14} = 20$  В.

Механическая характеристика асинхронного двигателя при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется выражением (5.63):

$$M = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s \left[ X_{кн}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\muн} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}$$

и при подстановке численных значений параметров схемы замещения асинхронного двигателя для частоты  $f_{1н} = 50$  Гц получим

$$M = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,393}{104,7 \cdot s \left[ 5,234^2 \cdot 1 + \left( 1,878 + \frac{1,393}{s} \right)^2 + \left( \frac{1,878 \cdot 1,393}{s \cdot 54,47 \cdot 1} \right)^2 \right]},$$

где  $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  – скольжение.

Механические характеристики, рассчитанные по (5.63) в математической системе MathCAD, приведены на рис. 5.39. С целью наглядного представления о регулировании скорости механические характеристики на рисунке приведены в координатах  $M = f(\omega_*)$ .

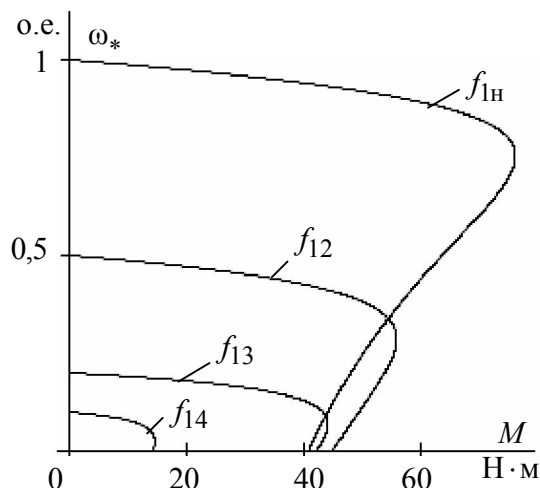


Рис. 5.39. Механические характеристики асинхронного двигателя типа 4A112MB6У3 при частотном регулировании скорости в соответствии с законом регулирования  $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$

Анализ характеристик показывает значительное снижение критического момента асинхронного двигателя при частотном регулировании скорости в соответствии с законом регулирования  $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$ .

Электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$  для данного закона регулирования скорости могут быть рассчитаны в соответствии с (5.60) по уравнению

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}}\right)^2}}$$

Пересчет скольжения  $s$  на скорость  $\omega$  произведем в соответствии с выражением  $\omega = \omega_0(1 - s)$ .

При подстановке численных значений параметров для частоты  $f_{1H} = 50$  Гц выражение электромеханической характеристики запишется следующим образом:

$$I_2' = \frac{200}{\pm \sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{s}\right)^2 + 5,352^2 \cdot 1 + \left(\frac{1878 \cdot 1,393}{s \cdot 54,323 \cdot 1}\right)^2}}$$

Электромеханические характеристики, рассчитанные по (5.60) в математической системе MathCAD, приведены на рис. 5.40.

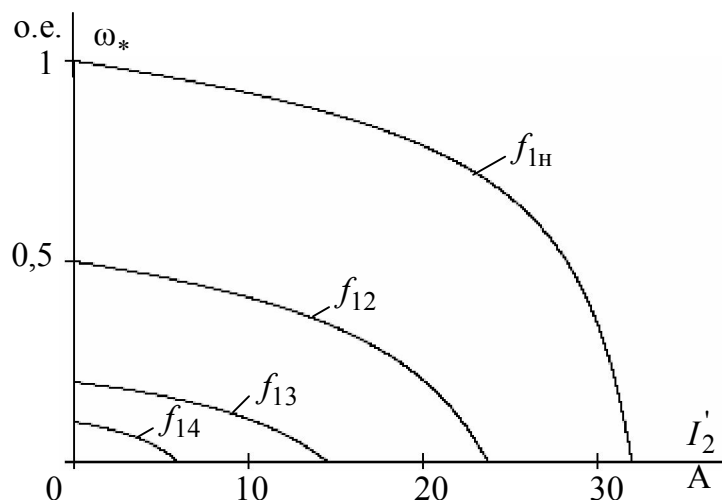


Рис. 5.40. Электромеханические характеристики асинхронного двигателя типа 4А112МВ6У3 при частотном регулировании скорости в соответствии с законом регулирования  $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$

Расчет электромеханических характеристик  $I_1 = f(\omega_*)$  произведем по уравнению (5.61):

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_2')^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2},$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}} \cdot f_{1*}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}}.$$

Пересчет скольжения  $s$  на угловую скорость  $\omega$  для каждой из характеристик проведем в соответствии с выражением  $\omega = \omega_0(1 - s)$ . Так как с изменением частоты  $f_{1j}$  и напряжения статора  $U_{1j}$  ток холостого хода  $I_0$  изменяется, то его значение для каждой из частот будем определять по выражению

$$I_0 = \frac{U_{1j}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\text{сн}} + X_{\text{мн}})^2 \cdot f_{1*}^2}}. \quad (5.66)$$

Как следует из анализа электромеханических характеристик (см. рис. 5.43–5.45), регулирование скорости изменением частоты напряжения статора с законом регулирования  $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$  приводит к значительному уменьшению пусковых токов, а в данном примере, как следствие – к уменьшению допустимого диапазона нагрузок для двигательного режима работы электропривода.

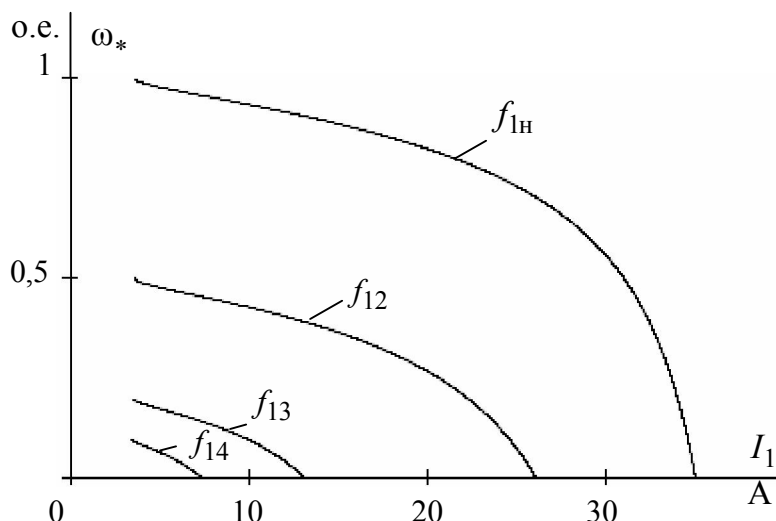


Рис. 5.41. Электромеханические характеристики  $I_1 = f(\omega_*)$  асинхронного двигателя типа 4A112MB6У3 при частотном регулировании скорости в соответствии с законом  $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$

Поскольку с увеличением мощности электродвигателя значение сопротивления  $R_1$  в относительных единицах уменьшается, то у двигателей большой мощности с уменьшением частоты  $f_1$  сокращение рабочего диапазона нагрузок происходит в меньшей степени.

## 5.2. Синхронный двигатель

Синхронные двигатели находят все более широкое применение в промышленности, это объясняется их высокими технико-экономическими показателями:

- главным преимуществом синхронных двигателей перед остальными типами электрических машин является то, что они способны работать с  $\cos\varphi = 1$ , а при перевозбуждении работать с опережающим  $\cos\varphi$ . Способность синхронного двигателя работать компенсатором реактивной мощности имеет чрезвычайно важное значение, потому что основные потребители электрической энергии представляют собой активно-индуктивную нагрузку;
- современные синхронные двигатели имеют высокий КПД, составляющий 96-98 %, что на 1–2 % выше КПД асинхронных двигателей той же мощности;
- синхронный двигатель обладает абсолютно жесткой механической характеристикой;

- перегрузочную способность синхронного двигателя можно регулировать током обмотки возбуждения, причем она в меньшей степени зависит от напряжения питающей сети по сравнению с асинхронными двигателями, у которых эта зависимость квадратичная;

- важным преимуществом конструкции синхронных двигателей является большой воздушный зазор, вследствие чего они легко охлаждаются внешним вентилятором;

- особенности конструкции синхронных двигателей позволяет изготавливать их на мощности в десятки мегаватт.

Синхронные машины наиболее перспективные электромеханические преобразователи энергии, их совершенствование в ближайшее время приведет к очередному скачку в развитии автоматизированного электропривода.

### **5.2.1. Схема включения, особенности конструкции синхронных двигателей**

Схема включения обмоток синхронного двигателя приведена на рис. 5.42. Статор синхронного двигателя выполняется из шихтованной электротехнической стали с тремя обмотками, сдвинутыми на 120 градусов, аналогично статору асинхронного двигателя. К обмоткам статора подключается трехфазное синусоидальное напряжение сети или преобразователя переменного тока.

Магнитодвижущая сила ротора синхронного двигателя создается либо с помощью постоянных магнитов (рис. 5.42, *а*), что присуще только маломощным двигателям специального назначения, либо с помощью обмотки возбуждения.

По конструктивному выполнению роторов с обмоткой возбуждения различают следующие типы синхронных двигателей:

- двигатели с неявно выраженными полюсами, так называемые турбодвигатели с массивными роторами и выфрезерованными в них пазами для укладки обмоток возбуждения (рис. 5.42, *б*);

- двигатели с явно выраженными полюсами и обмотками возбуждения, состоящими из катушек, насаженных на полюсы (рис. 5.42, *в*)

На роторе синхронного двигателя имеется дополнительная короткозамкнутая пусковая обмотка в виде беличьей клетки. На принципиальных схемах пусковая беличья клетка изображается сплошной окружностью.

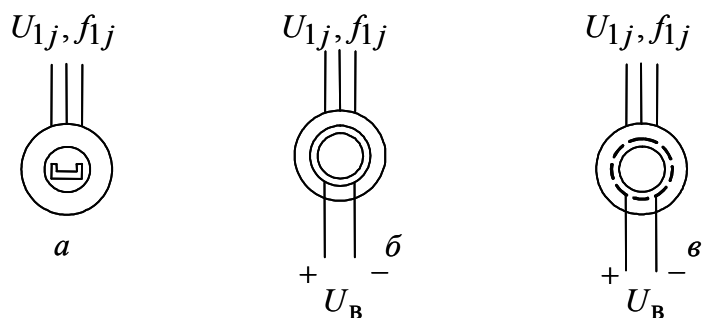


Рис. 5.42. Условное графическое обозначение синхронных трехфазных двигателей: а – возбуждение от постоянных магнитов; б – ротор с неявнополюсной обмоткой; в – ротор с явнополюсной обмоткой

Пусковая беличья клетка обеспечивает пусковую механическую характеристику синхронного двигателя (рис. 5.43) аналогичную механической характеристике асинхронного двигателя, собственно говоря, пуск синхронных двигателей – асинхронный.

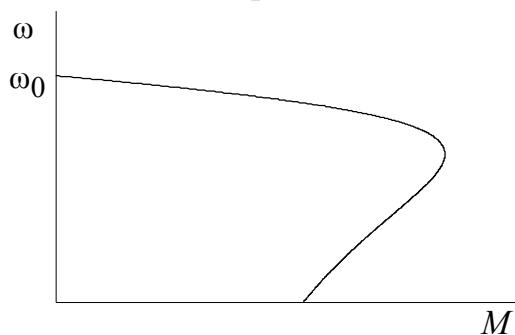


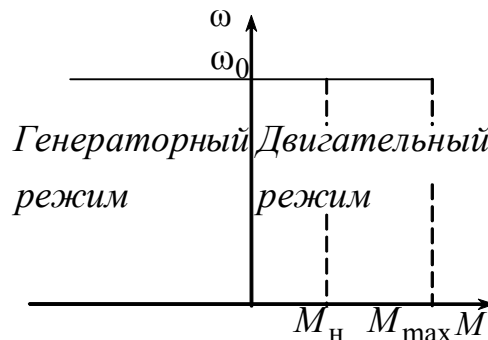
Рис. 5.43. Пусковая механическая характеристика синхронного двигателя

После вхождения синхронного двигателя в синхронизм его скорость при изменениях момента нагрузки на валу до некоторого максимального значения  $M_{\max}$  остается постоянной и равной синхронной скорости  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / z_p$ .

Статическая механическая характеристика синхронного двигателя (рис. 5.44) имеет вид горизонтальной прямой параллельной оси моментов. Если момент нагрузки превысит значение  $M_{\max}$ , то синхронный двигатель выпадает из синхронизма.

Для определения максимального момента синхронного двигателя  $M_{\max}$  служит *угловая характеристика*. Угловой характеристикой синхронного двигателя называется зависимость момента  $M$  от внутреннего угла поворота ротора синхронного двигателя  $\theta$ , представляющего собой

угол сдвига между вектором ЭДС статора  $\overline{E_{1j}}$  и вектором фазного напряжения  $\overline{U_{1j}}$  питающей сети или, что то же самое, угол сдвига между осью магнитного поля, созданного обмотками статора синхронного двигателя, и осью его полюсов.



5.44. Статическая механическая характеристика синхронного двигателя

### 5.2.2. Электромеханические свойства неявнополюсных синхронных двигателей

Угловую характеристику неявнополюсного синхронного двигателя легко можно найти при условии пренебрежения активным сопротивлением обмотки статора двигателя ( $R_1 \approx 0$ ). Векторная диаграмма, отражающая работу синхронного двигателя с учетом принятого допущения, приведена на рис. 5.45. На рис. 5.45 приняты следующие обозначения:  $I_1$  – ток обмотки статора синхронного двигателя;  $X_1$  – индуктивное сопротивление фазы обмотки статора;  $\varphi$  – угол между векторами фазного напряжения и фазного тока обмотки статора.

Примем подводимую к синхронному двигателю мощность равной электромагнитной мощности:

$$P_1 = P_{эм} = 3 \cdot U_{1j} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi. \quad (5.67)$$

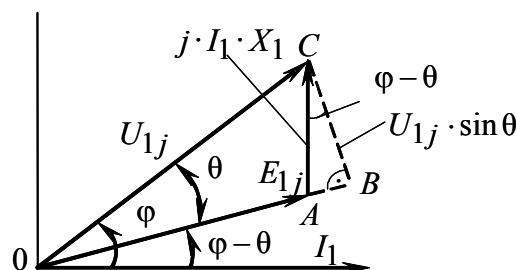


Рис. 5.45. Упрощенная векторная диаграмма неявнополюсного синхронного двигателя



Тогда электромагнитный момент синхронного двигателя

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_0} = \frac{3 \cdot U_{1j} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi}{\omega_0}. \quad (5.68)$$

Из векторной диаграммы рис. 5.45 следует, что

$$U_{1j} \cdot \cos \varphi = E_{1j} \cdot \cos(\varphi - \theta). \quad (5.69)$$

Треугольник  $ABC$  позволяет определить

$$\cos(\varphi - \theta) = \frac{U_{1j} \cdot \sin \theta}{I_1 \cdot X_1}. \quad (5.70)$$

Подставим (5.70) в (5.69) и решим полученное выражение относительно  $\cos \varphi$ , получим

$$\cos \varphi = \frac{E_{1j} \cdot \sin \theta}{I_1 \cdot X_1}. \quad (5.71)$$

Подставив (5.69) в (5.68), получим выражение угловой характеристики синхронного двигателя

$$M = M_{\max} \cdot \sin \theta, \quad (5.72)$$

где  $M_{\max} = \frac{3 \cdot U_{1j} \cdot E_{1j}}{\omega_0 \cdot X_1}$  – максимальный момент синхронного двигателя.

Анализ (5.72) показывает, что угловая характеристика неявнополюсного синхронного двигателя представляет собой синусоидальную функцию внутреннего угла машины (см. рис. 5.46).

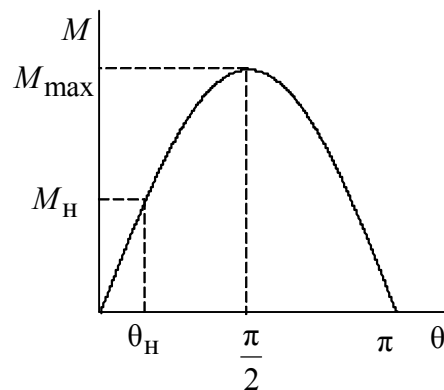


Рис. 5.46. Угловая характеристика неявнополюсного синхронного двигателя

Максимального значения момент неявнополюсного синхронного двигателя достигает при угле сдвига  $\theta = \pi/2$ . Максимальный момент  $M_{\max}$  характеризует перегрузочную способность синхронного двигателя.

ля. При больших значениях угла синхронный двигатель выпадает из синхронизма. Важной величиной является номинальный угол сдвига  $\theta_H = 25^\circ \div 30^\circ$ , которому соответствует номинальный момент  $M_H$ .

Синхронный двигатель является обратимой машиной, то есть он может работать во всех основных энергетических режимах: двигательном, генераторном параллельно с сетью и независимо от сети, так как его возбуждение обеспечивается независимой обмоткой.

**Пример 5.6.** Рассчитать и построить угловую и механическую характеристики неявнополюсного синхронного двигателя серии СТДП-6300-2УХЛ4.

Технические данные двигателя:

- номинальная мощность  $P_H = 6300$  кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1H} = 6000$  В;
- номинальная частота вращения  $n_H = n_0 = 3000$  об/мин;
- перегрузочная способность двигателя по моменту  $\frac{M_{\max}}{M_H} = 2,2$ ;
- номинальный КПД  $\eta_H = 97,4$  %;
- индуктивное сопротивление обмотки статора  $X_1 = 7,3$  Ом.

**Решение.** Найдем синхронную угловую скорость двигателя

$$\omega_0 = \omega_H = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,1415 \cdot 3000}{30} = 314,15 \text{ рад/с.}$$

Определим номинальный момент двигателя

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{6300000}{314,15} = 20054,114 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Максимальный момент двигателя при номинальном напряжении питающей сети

$$M_{\max} = 2,2 \cdot 20054,114 = 44119 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номинальная ЭДС двигателя

$$E_{1H} = 0,95 \cdot U_{1H} = 0,95 \cdot 6000 = 5700 \text{ В.}$$

Уравнение угловой характеристики неявнополюсного синхронного двигателя

$$M = \frac{3 \cdot U_{1j} \cdot E_{1j}}{\omega_0 \cdot X_1} \sin \theta = \frac{3 \cdot 6000 \cdot 5700}{314,15 \cdot 7,3} \cdot \sin \theta = 44739,1 \cdot \sin \theta.$$

Угловая характеристика в соответствии с полученным выражением представлена на рис. 5.47, а. Статическая механическая характеристика синхронного двигателя приведена на рис. 5.47, б.

Номинальный угол  $\theta$ , определенный по угловой характеристике синхронного двигателя, составляет  $\theta_{\text{эл.н}} = 26,92^\circ$ . Статическая механическая характеристика синхронного двигателя – прямая линия, параллельная оси абсцисс.

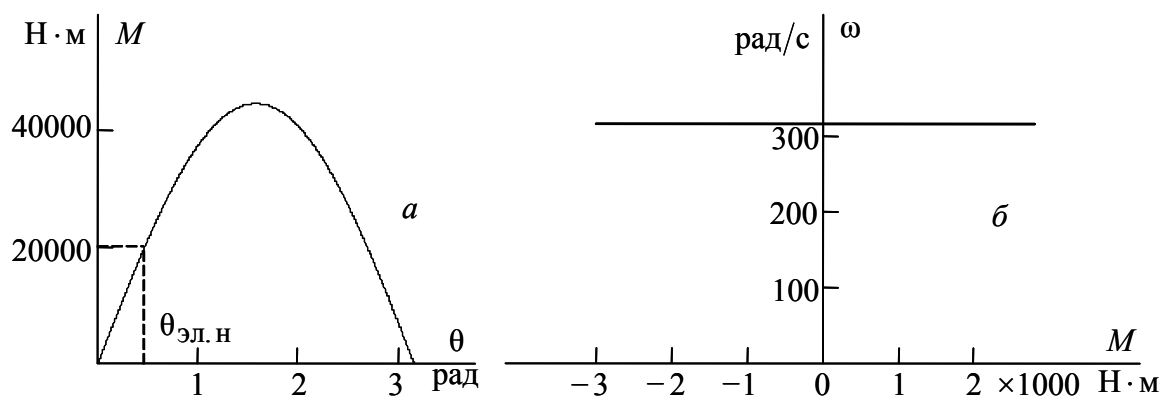


Рис. 5.47. Угловая (а) и механическая (б) характеристики неявнополюсного синхронного двигателя

### 5.2.3. Электромеханические свойства явнополюсных синхронных двигателей

Основное большинство серийно выпускаемых синхронных двигателей выполняются с явнополюсным ротором, на котором размещена обмотка возбуждения. Питание обмотки возбуждения осуществляется через контактные кольца от источника постоянного напряжения, а трехфазная обмотка статора подключается к сети переменного напряжения. Двухфазная схема замещения такой машины [20] представлена на рис. 5.48.

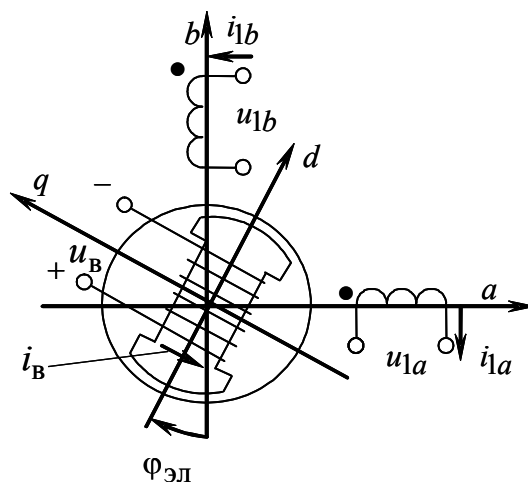


Рис. 5.48. Схема включения двухфазного синхронного двигателя с явнополюсным ротором

Как следует из рис. 5.48, обмотки фаз статора двухфазного синхронного двигателя питаются от двух источников переменного напряжения, фазы которых сдвинуты на 90 электрических градусов:

$$\begin{aligned} U_{1a} &= U_{1\max} \sin \omega_{0\text{э}} \cdot t; \\ U_{1b} &= U_{1\max} \sin\left(\omega_{0\text{э}} \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) = -U_{1\max} \cdot \cos \omega_{0\text{э}} \cdot t, \end{aligned} \quad (5.73)$$

где  $\omega_{0\text{э}} = 2 \cdot \pi \cdot f_1$  – угловая частота питающего напряжения.

Обмотка возбуждения синхронного двигателя размещена на явнополюсном роторе, симметричном относительно оси  $d$ , и подключена к источнику постоянного напряжения  $u_{\text{в}}$ .

Уравнение угловой характеристики явнополюсного синхронного двигателя определяется уравнением

$$M = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_1 \cdot \sin \theta_{\text{эл}}}{\omega_0 \cdot x_{1d}} + \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0} \left( \frac{1}{x_{1q}} - \frac{1}{x_{1d}} \right) \sin 2\theta_{\text{эл}}, \quad (5.74)$$

где  $x_{1d}$  – индуктивное сопротивление обмотки статора синхронного двигателя по продольной оси  $d$ ;  $x_{1q}$  – индуктивное сопротивление обмотки статора синхронного двигателя по поперечной оси  $q$ .

Анализ уравнения (5.74) показывает, что электромагнитный момент синхронной явнополюсной машины состоит из двух составляющих, первая из которых представляет электромагнитный момент  $M_1$ , возникающий в результате взаимодействия полей статора и ротора, вторая составляющая – реактивный момент  $M_2$ , возникающий из-за несимметрии магнитной цепи машины и связанного с ней стремления ротора ориентироваться по оси поля статора. Вследствие явнополюсности машины энергия магнитного поля максимальна при любом из двух возможных соосных с полем статора положений ротора, что и определяет зависимость реактивного момента от двойного угла  $\theta_{\text{эл}}$ . Угловая характеристика синхронной машины с явнополюсным ротором приведена на рис. 5.49. Анализ ее показывает, что увеличение угла  $\theta_{\text{эл}}$  вызывает на начальном участке рост электромагнитного момента, близкий к линейному. При номинальном электромагнитном моменте угол  $\theta_{\text{эл.ном}}$  обычно составляет 20 – 30 градусов. Перегрузочная способность синхронной машины с явнополюсным ротором  $\lambda_{\max} = M_{\max} / M_{\text{н}} = 2 - 3$  о. е. Реактивный момент синхронной машины с явнополюсным ротором увеличивает крутизну рабочего участка угловой характеристики и повышает перегрузочную способность двигателя.

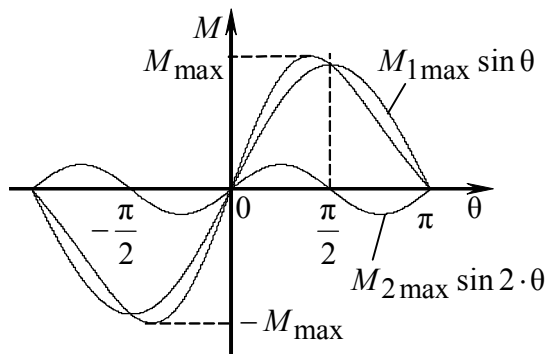


Рис. 5.49. Угловая характеристика явнополюсного синхронного двигателя

Явнополюсная синхронная машина развивает момент даже при отсутствии тока возбуждения – за счет реактивного момента. Это свойство синхронной машины легло в основу создания синхронных электроприводов без возбуждения на базе *синхронных реактивных двигателей*. У этих машин индуктивные сопротивления по продольным и поперечным осям различаются значительно, что и создает достаточный по величине реактивный момент на валу двигателя [6].

**Пример 5.7.** Рассчитать и построить угловую и механическую характеристики явнополюсного синхронного двигателя серии СДКП2-16-29-10КУХЛ4.

Технические данные двигателя:

- номинальная мощность  $P_H = 500$  кВт;
- номинальное линейное напряжение  $U_{1H} = 6000$  В;
- номинальная частота вращения  $n_H = n_0 = 600$  об/мин;
- номинальный ток статора  $I_{1H} = 57$  А;
- номинальный КПД  $\eta_H = 94$  %;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos \varphi_H = 0,9$
- кратность пускового момента  $\frac{M_{II}}{M_H} = k_{II} = 0,8$ ;
- перегрузочная способность двигателя по моменту

$$\frac{M_{\max}}{M_H} = k_{\max} = 2,0;$$

- кратность момента, развиваемого двигателем в режиме асинхронного пуска при  $s = 0,05$ ,  $\frac{M_{s=0,05}}{M_H} = 1,5$ ;
- кратность пускового тока  $\frac{I_{\Pi}}{I_{1H}} = k_i = 5,0$ ;
- момент инерции ротора  $J = 0,53 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;
- индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси  $d$   $x_{1d} = 31,2 \text{ Ом}$ ;
- индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси  $q$   $x_{1q} = 19,4 \text{ Ом}$ .

**Решение.** Найдем синхронную угловую скорость двигателя

$$\omega_0 = \omega_H = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,1415 \cdot 600}{30} = 62,83 \text{ об/мин.}$$

Определим номинальный момент двигателя

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{500000}{62,83} = 7957,98 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент двигателя при номинальном напряжении питающей сети

$$M_{\max} = 2,0 \cdot 7957,98 = 15915,96 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальное фазное напряжение двигателя

$$U_1 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464,1 \text{ В}.$$

Номинальная фазная ЭДС двигателя

$$E_{1H} = \frac{0,95 \cdot U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{0,95 \cdot 6000}{\sqrt{3}} = 3290,89 \text{ В}.$$

Уравнение угловой характеристики явнополюсного синхронного двигателя (5.74)

$$\begin{aligned} M &= \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_1 \sin \theta_{\text{эл}}}{\omega_0 \cdot x_{1d}} + \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0} \left( \frac{1}{x_{1q}} - \frac{1}{x_{1d}} \right) \sin 2\theta_{\text{эл}} = \\ &= \frac{3 \cdot 3464,1 \cdot 3290,89}{62,83 \cdot 31,2} \sin \theta_{\text{эл}} + \frac{3 \cdot 3464,1^2}{2 \cdot 62,83} \left( \frac{1}{19,4} - \frac{1}{31,2} \right) \sin 2\theta_{\text{эл}} = \\ &= 17446 \sin \theta_{\text{эл}} + 5601 \sin 2\theta_{\text{эл}} \end{aligned}$$

Угловая характеристика явнополюсного синхронного двигателя в соответствии с полученным выражением представлена на рис. 5.50.

Анализ рис. 5.50 показывает, что номинальный момент  $M_H = 7957,98 \text{ Н}\cdot\text{м}$  синхронный двигатель СДКП2-16-29-10КУХЛ4 развивает при номинальном угле сдвига  $\theta_H = 0,4 \text{ рад}$  (22,9 град). Реактивная составляющая момента явнополюсного синхронного двигателя (кривая 1) соизмерима с активной составляющей (кривая 2) и существенно влияет на форму результирующей характеристики (кривая 3).

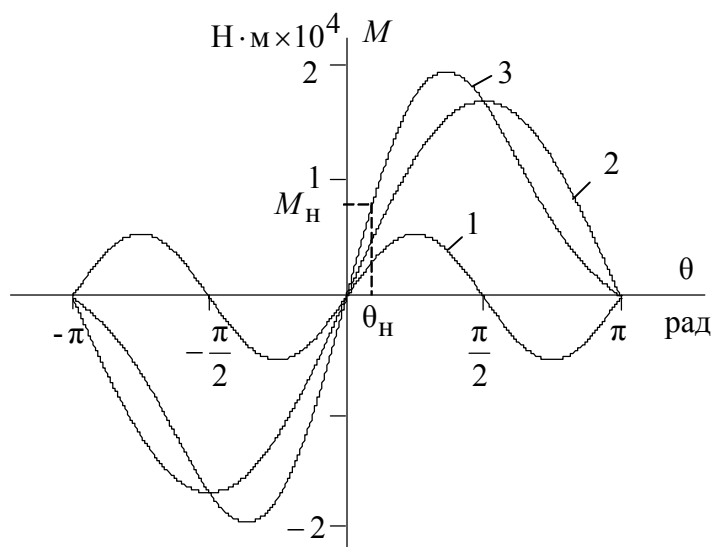


Рис. 5.50. Угловая характеристика явнополюсного синхронного двигателя СДКП2-16-29-10КУХЛ4

Статическая механическая характеристика синхронного двигателя приведена на рис. 5.51.

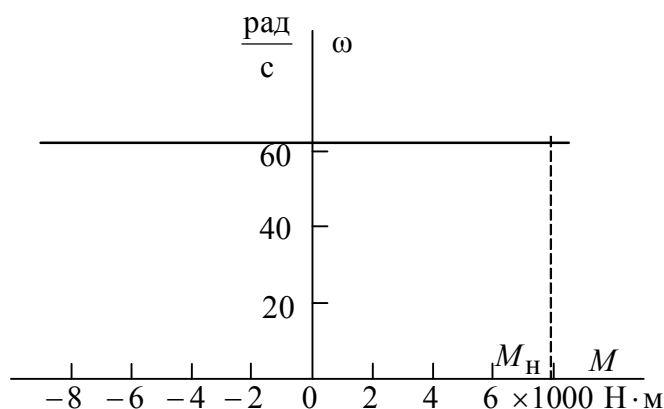


Рис. 5.51. Статическая механическая характеристика синхронного двигателя

Статическая механическая характеристика явнополюсного синхронного двигателя представляет собой прямую линию параллельную

оси абсцисс. Номинальный момент синхронного двигателя, момент с которым синхронный двигатель может работать сколь угодно долго без перегрева, составляет  $M_H = 7957,98 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Максимальный момент двигателя при номинальном напряжении питающей сети  $M_{\max} = 15915,96 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

#### 5.2.4. Пуск и синхронизация синхронных двигателей

Пуск и синхронизация синхронных двигателей различается в зависимости от особенностей технологического процесса, в котором участвует электропривод. Различают *легкий* и *тяжелый* пуск синхронного двигателя. Легкий пуск синхронного двигателя происходит при малых моментах инерции электропривода  $J_{\Sigma}$  и малых моментах сопротивления  $M_c$  на валу электродвигателя. Тяжелый пуск осуществляется при относительно больших моментах инерции электропривода  $J_{\Sigma}$  и моментах сопротивления  $M_c$ . Тяжелый пуск осуществляется за значительное время и вхождение двигателя в синхронизм осложняется.

Для мощных двигателей схемы силовых цепей практически сведены с незначительными вариациями к одной, принципиальная схема которой приведена на рис. 5.52.

Пуск синхронного двигателя осуществляется в асинхронном режиме. В большинстве случаев синхронный двигатель мощностью до нескольких сотен киловатт пускают прямым включением в сеть. Кратность пускового тока при прямом пуске  $k_i = \frac{I_{\text{п}}}{I_{1\text{н}}} = 4 \div 5$ .

При пуске синхронных двигателей мощностью несколько мегаватт возникает необходимость ограничения пусковых токов. Способы ограничения пусковых токов вытекают из уравнения тока короткого замыкания асинхронного двигателя

$$I'_{2\text{кз}} = \frac{U_{1j}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}}, \quad (5.75)$$

где  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмотки статора синхронного двигателя в режиме асинхронного пуска;  $R_1, X_{1\sigma}$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;  $R_2', X_{2\sigma}'$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенные к обмотке статора.



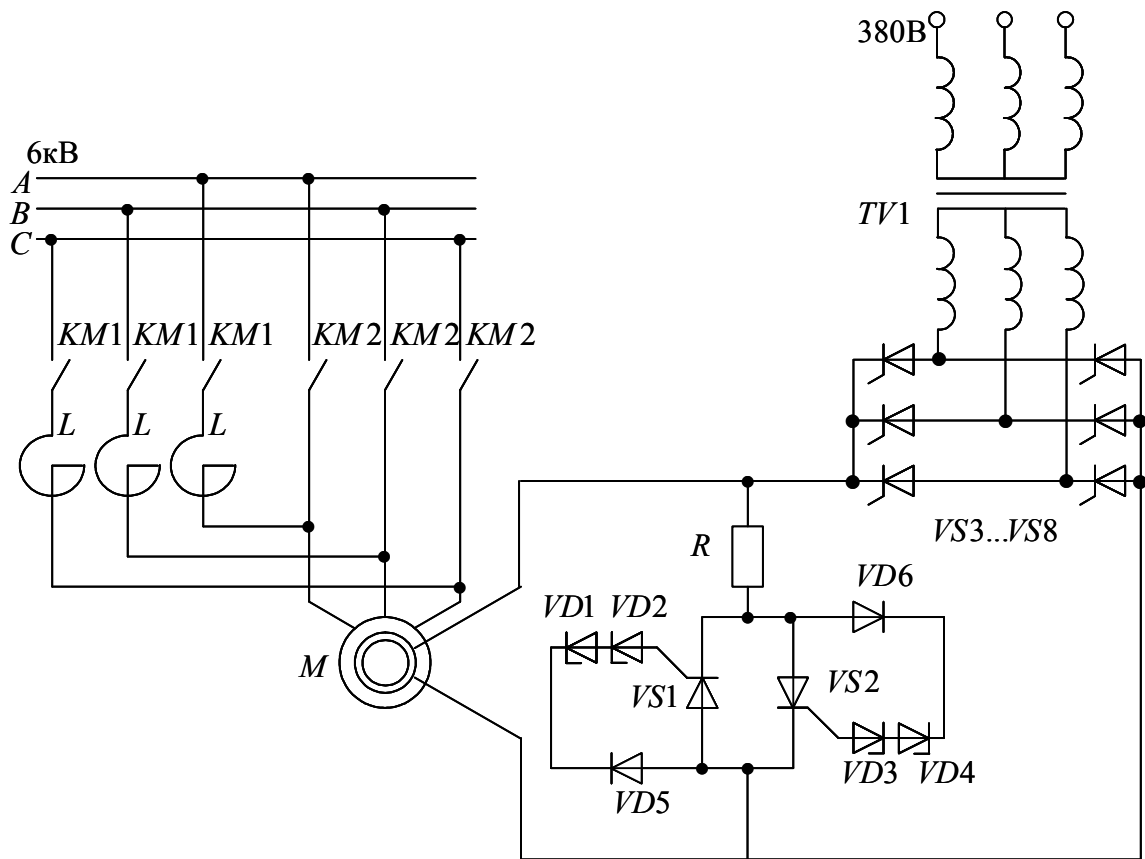


Рис. 5.52. Схема силовых цепей синхронного двигателя

Из анализа выражения для тока короткого замыкания (5.75) вытекают три возможных способа токоограничения при асинхронном пуске синхронного двигателя:

- введение на время пуска добавочного активного сопротивления  $R_{1доб}$  в цепи обмоток статора;
- введение на время пуска добавочного реактивного сопротивления  $X_{1доб}$  в цепи обмоток статора;
- кратковременное уменьшение на время пуска фазного напряжения обмоток статора.

Наиболее часто токоограничение при пуске синхронных двигателей осуществляется использованием реакторов  $L$ , включаемых в цепи обмоток статора. В некоторых случаях вместо реакторов  $L$  применяются активные резисторы. Кратковременное понижение напряжения обмоток статора достигается включением в схему трансформаторов или автотрансформаторов. Вариант схемы ограничения тока статора при пуске

синхронного двигателя с применением автотрансформатора приведен на рис. 5.53.

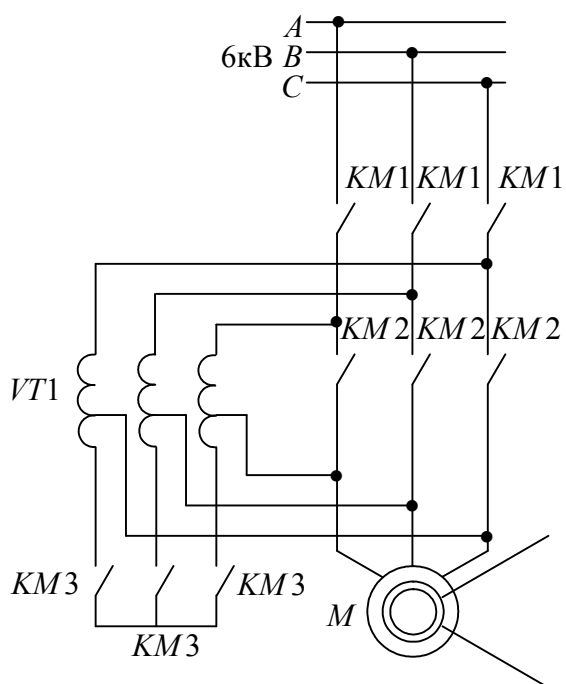


Рис. 5.53. Схема силовых цепей синхронного двигателя с автотрансформаторным ограничением пускового тока

Статические электромеханические характеристики, поясняющие процесс пуска синхронного двигателя с токоограничением, приведены на рис. 5.54.

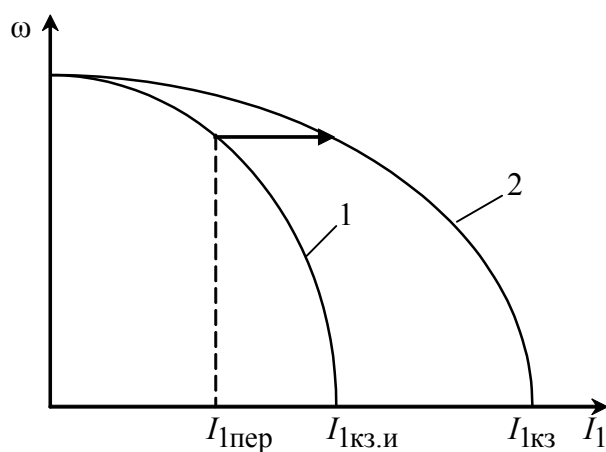


Рис. 5.54. Статические электромеханические характеристики, поясняющие процесс пуска синхронного двигателя

Пуск двигателя начинается по характеристике 1, с добавочной индуктивностью  $L$  в цепи обмотки статора или пониженном напряжении  $U_{1j}$  обмотки статора. По истечении некоторого времени, когда пусковой ток уменьшится до тока переключения  $I_{\text{пер}}$ , добавочные индуктивности (см. рис. 5.52) из цепи обмотки статора выводятся, и процесс пуска продолжается по характеристике 2.

При пуске в асинхронном режиме импульсы управления на тиристоры  $VS3...VS8$  не подаются и напряжение управляемого выпрямителя равно нулю. В обмотке возбуждения синхронного двигателя индуцируется переменная ЭДС скольжения, под действием которой через стабилитроны  $VD1, VD2$  и  $VD3, VD4$  открываются вспомогательные тиристоры  $VS1$  и  $VS2$ . В процессе асинхронного пуска обмотка возбуждения синхронного двигателя закорачивается на разрядное сопротивление  $R$ . Когда двигатель достигает скорости близкой к подсинхронной, ЭДС скольжения уменьшается, уменьшается и напряжение на управляющих электродах тиристоров  $VS1, VS2$  и они перестают включаться. Разрядное сопротивление отключается от обмотки возбуждения. После чего в обмотку возбуждения подается постоянный ток от управляемого выпрямителя  $VS3...VS8$ .

Пусковая беличья клетка синхронного двигателя рассчитана на кратковременный режим работы, как правило,  $20 \div 50$  с., длительная работа в асинхронном режиме недопустима. Кроме обеспечения режима пуска, беличья клетка играет роль демпфирующей обмотки, стабилизируя переходные процессы при работе двигателя в синхронном режиме.

Для синхронных двигателей мощностью до нескольких сотен киловатт возможен пуск прямым включением в сеть без промежуточных пусковых характеристик. Примерный вид переходных процессов момента  $M$  и скорости  $\omega$  при прямом пуске синхронного двигателя с учетом электромагнитных переходных процессов приведен на рис. 5.55. Синхронный двигатель разгоняется в асинхронном режиме до подсинхронной скорости  $\omega_{\text{пс}}$ , после чего в момент времени  $t_{\text{вкл}}$  на его обмотку возбуждения подается напряжение возбуждения  $U_{\text{ов}}$  и двигатель втягивается в синхронизм. Принципиально на процесс вхождения в синхронизм влияет момент подключения напряжения к обмотке возбуждения. Наиболее благоприятным моментом включения напряжения возбуждения является такое, при котором мгновенное значение наведенной ЭДС в обмотке возбуждения будет равно нулю. Однако, как показали специальные исследования [11], относительное положение ротора относительно магнитного поля, созданного обмотками статора, не

имеет большого практического значения ни с точки зрения качества переходного процесса, ни времени его окончания. Поэтому в большинстве практических случаев схема управления не усложняется путем введения устройств, обеспечивающих включение возбуждения в наиболее благоприятный момент времени.

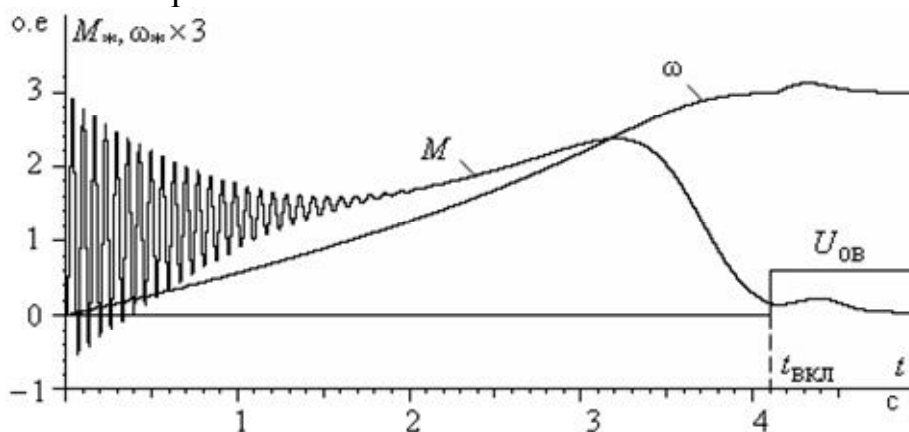


Рис. 5.55. Кривые переходных процессов момента  $M$  и скорости  $\omega$  при пуске синхронного двигателя

Проверку условия вхождения в синхронизм можно производить, пользуясь выражением

$$\omega_{\text{пс}} \geq \omega_0 \left( 1 - 0,0564 \sqrt{\frac{M_{\text{max}}}{J_{\Sigma} \cdot \omega_0^2}} \right), \quad (5.76)$$

где  $M_{\text{max}}$  — максимальный момент синхронной машины;  $J_{\Sigma}$  — приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции электропривода.

Процесс втягивания в синхронизм зависит в основном от двух параметров: значения подсинхронной скорости  $\omega_{\text{пс}}$  и приведенного к валу двигателя суммарного момента инерции электропривода  $J_{\Sigma}$ .

### 5.2.5. Регулирование скорости синхронных двигателей

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

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

Так как изменение числа пар полюсов  $z_p$  у серийно выпускаемых двигателей не применяется, то *частотное регулирование* является практически единственным способом регулирования угловой скорости синхронных двигателей. Оно характеризуется в основном такими же показателями, что и частотное регулирование скорости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Это регулирование плавное, двухзонное. Диапазон регулирования вверх от номинальной синхронной скорости ограничивается механической прочностью ротора, его балансировкой и качеством подшипников. Диапазон регулирования вниз от номинальной синхронной скорости может достигать значений  $D = 1 : (50 \div 100)$  и более с учетом абсолютной жесткости механических характеристик двигателя и обеспечения синусоидальности напряжения питания. Стабильность скорости высокая. Допустимая нагрузка при постоянном возбуждении и независимой вентиляции соответствует номинальному моменту.

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

В отличие от асинхронного короткозамкнутого двигателя при частотном регулировании скорости синхронный двигатель обладает тремя каналами управления моментом: изменением тока возбуждения  $I_{в}$ , изменением напряжения обмоток статора  $U_{1j}$  и изменением частоты  $f_{1j}$  напряжения обмоток статора.

Для явнополюсного синхронного двигателя может быть получено уравнение электромагнитного момента, вывод которого дан в [20]:

$$M = \frac{3 \cdot z_p}{2} L_{12d} \frac{U_{1j} \cdot I_{вj} \cdot \sin \theta_{эл}}{X_{1qj}} + \frac{3 \cdot z_p}{2} (L_{1d} - L_{1q}) \frac{U_{1j} (E_{1j} - U_{1j}) \cdot \sin \theta_{эл} \cdot \cos \theta_{эл}}{X_{1qj} \cdot X_{1dj}}. \quad (5.77)$$

Индекс  $j$  в уравнении (5.77) показывает изменение соответствующего параметра.

Пренебрегая второй составляющей электромагнитного момента в выражении (5.77), получим

$$M = A \frac{U_{1j} \cdot I_{вj}}{f_{1j}} \sin \theta_{эл}, \quad (5.78)$$

где  $A$  – постоянный коэффициент.

Если принять, что при частотном регулировании скорости синхронного двигателя запас устойчивости должен оставаться постоянным, то необходимо выполнение условия

$$\theta_{\text{эл.}j} = \theta_{\text{эл.н}}$$

или

$$\sin \theta_{\text{эл.}j} = \sin \theta_{\text{эл.н}}, \quad (5.79)$$

где  $\theta_j$  – угол поворота ротора синхронного двигателя при совместном изменении момента сопротивления  $M_c$ , частоты напряжения обмоток статора  $f_{1j}$ , напряжения обмоток статора  $U_{1j}$ , потока возбуждения  $I_{\text{в}j}$ .

Решим (5.78) относительно  $\sin \theta_{\text{эл}}$ , получим:

$$\sin \theta_{\text{эл}} = \frac{M \cdot f_{1j}}{A \cdot U_{1j} \cdot I_{\text{в}j}}. \quad (5.80)$$

Подставим (5.80) в (5.79):

$$\frac{M \cdot f_{1j}}{U_{1j} \cdot I_{\text{в}j}} = \frac{M_{\text{н}} \cdot f_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}} \cdot I_{\text{вн}}},$$

откуда

$$\frac{U_{1j} \cdot I_{\text{в}j}}{U_{1\text{н}} \cdot I_{\text{вн}}} = \frac{M \cdot f_{1j}}{M_{\text{н}} \cdot f_{j\text{н}}}. \quad (5.81)$$

Из выполнения условия (5.81) вытекают следующие законы частотного регулирования скорости синхронного двигателя:

- $f_{1j} = \text{var}$ ;  $I_{\text{в}} = I_{\text{в.н}} = \text{const}$ ;  $U_{1j} = U_{1\text{н}} = \text{const}$ . Регулирование скорости осуществляется при постоянной мощности. При данном способе регулирования при сниженных угловых скоростях синхронный двигатель обладает значительным максимальным моментом  $M_{\text{max}}$ . Однако увеличение максимального момента при сниженных угловых скоростях сопровождается увеличением тока статора вследствие уменьшения реактивных сопротивлений машины. Способ регулирования может применяться при регулировании скорости вверх от номинальной  $\omega_{0\text{н}}$ ;

- $f_{1j} = \text{var}$ ;  $I_{\text{в}} = I_{\text{в.н}} = \text{const}$ ;  $\frac{U_{1j}}{f_{1j}} = \text{const}$ . Регулирование скорости

производится при постоянном моменте. Закон регулирования применяется при независимой от угловой скорости механической характеристике производственного механизма, то есть при  $M_c = \text{const}$ ;

- $f_{1j} = \text{var}$ ;  $I_B = I_{B.H} = \text{const}$ ;  $\frac{U_{1j}}{\sqrt{f_{1j}}} = \text{const}$ . Регулирование скорости производится при постоянной мощности ( $P_c = \text{const}$ ) вниз от номинальной скорости  $\omega_{0H}$ ;

- $f_{1j} = \text{var}$ ;  $I_B = I_{B.H} = \text{const}$ ;  $\frac{U_{1j}}{f_{1j}^2} = \text{const}$ . Регулирование скорости производится при вентиляторной нагрузке, то есть при  $M_c = M_0 + k \cdot \omega^2$ .

Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов преобразователь частоты – синхронный двигатель для законов регулирования класса  $U_{1j}/f_{1j} = \text{const}$  приведены на рис. 5.56.

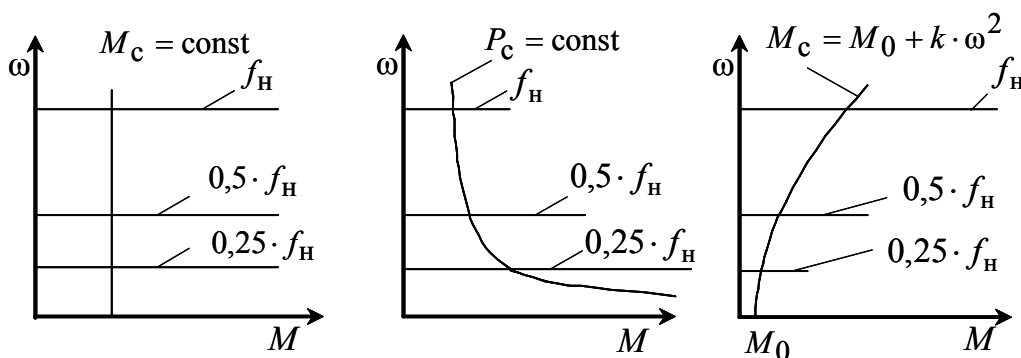


Рис. 5.56. Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов преобразователь частоты – синхронный двигатель

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

Синхронный двигатель обладает очень важным свойством – при подаче на статорные обмотки постоянного напряжения ( $f_1 = 0$ ) он создает тормозной момент при неподвижном роторе, обеспечивая механическую фиксацию ротора в заданном положении.

### Контрольные вопросы и задания

1. Изобразите основную схему включения асинхронного двигателя в сеть.

2. Что такое схема «замещения асинхронного двигателя» и с какой целью она применяется?
3. Дайте определение механической характеристике асинхронного двигателя.
4. Почему у асинхронного двигателя используют в расчетах два типа электромеханических характеристик?
5. Дайте определение току намагничивания  $I_0$  асинхронного двигателя.
6. В каких энергетических режимах может работать асинхронный двигатель на естественной характеристике?
7. Назовите три характерные точки на механической характеристике асинхронного двигателя.
8. Изменением каких параметров асинхронного двигателя можно регулировать его скорость?
9. Что такое динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя?
10. Охарактеризуйте реостатное регулирование скорости асинхронного двигателя.
11. Назовите особенности регулирования скорости асинхронного двигателя изменением фазного напряжения.
12. Как изменяются потери мощности в роторе асинхронного двигателя при фазовом регулировании скорости?
13. Может ли работать асинхронный двигатель на участке механической характеристики с положительной жесткостью?
14. Что такое «мягкий пускатель»?
15. Назовите основные типы преобразователей частоты.
16. Поясните схему и принцип регулирования частоты в непосредственном преобразователе частоты.
17. Поясните принцип действия мостового инвертора тока.
18. Поясните принцип действия инвертора напряжения.
19. Поясните принцип синусоидального широтно-импульсного регулирования напряжения автономного инвертора напряжения.
20. Назовите основные способы совместного регулирования частоты и напряжения асинхронного двигателя.
21. Изобразите основную схему включения в сеть синхронного двигателя.
22. Поясните пусковую характеристику синхронного двигателя.
23. Что такое угловая характеристика синхронного двигателя?
24. Чем отличаются угловые характеристики явнополюсного и неявнополюсного синхронного двигателя?



## 6. ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

### 6.1. Электроприводы постоянного тока

Выбор функциональной схемы электропривода большинства производственных механизмов определяется характером нагрузки. Наиболее тяжёлые перегрузки, которые могут привести к поломке механических частей оборудования, возникают у тех машин и механизмов, для которых возможна работа на упор при нормальном течении технологического процесса. В этом случае необходимо обеспечить автоматическое ограничение момента двигателя на допустимом уровне. Для электродвигателя постоянного тока ограничение момента осуществляется путём ограничения тока якоря

$$I_{\text{дв. max}} \leq \frac{M_{\text{доп}}}{c}, \quad (6.1)$$

где  $M_{\text{доп}}$  – максимально допустимый момент производственного механизма, определяемый его механической прочностью;  $c$  – коэффициент электромагнитного момента.

Ограничение тока необходимо также для защиты двигателя и преобразователя от перегрузок в переходных режимах. Максимальный ток якоря  $I_{\text{дв. max}}$  двигателя следует ограничить на уровне

$$I_{\text{дв. max}} \leq I_{\text{дв. н}} \cdot \lambda_I, \quad (6.2)$$

где  $\lambda_I$  – коэффициент допустимой перегрузки двигателя по току.

Для некоторых производственных механизмов необходимо ограничивать на допустимом уровне ускорение  $(d\omega/dt)_{\text{доп}}$  рабочих органов в переходных режимах, в этом случае максимальный ток якоря двигателя определяется условием

$$I_{\text{дв. max}} \leq \frac{J_{\Sigma}}{c} \left( \frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{доп}} + \frac{M_c}{c}, \quad (6.3)$$

где  $J_{\Sigma}$  – эквивалентный момент инерции электропривода,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $M_c$  – момент статической нагрузки на валу двигателя,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ .

Таким образом, ток двигателя определяется допустимой нагрузкой механизма по условиям его механической прочности, допустимой перегрузкой двигателя по току и допустимым ускорением перемещения рабочего органа производственного механизма. Выбранное из условий (6.1), (6.2) и (6.3) наименьшее значение тока  $I_{\text{дв. max}}$  в дальнейшем будем называть допустимым стопорным током и обозначать  $I_{\text{ст}}$ .

В автоматизированных электроприводах ограничение тока двигателя осуществляется путём создания специальных электромеханических характеристик электропривода. Характеристики должны обеспечивать требуемую точность поддержания угловой скорости при рабочих нагрузках и ограничение тока на допустимом уровне при увеличении нагрузки сверх установленного значения. Идеальная характеристика с ограничением тока показана на рис. 6.1, кривая 1.

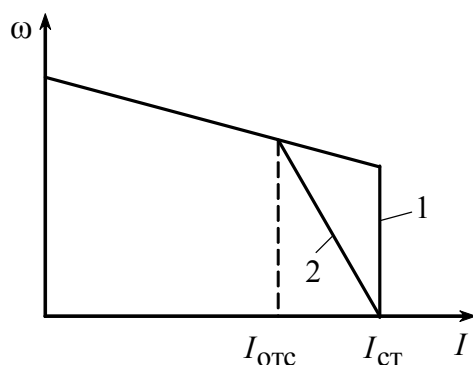


Рис.6.1. Электромеханические характеристики с ограничением тока

Реальная электромеханическая характеристика вследствие ограниченного коэффициента усиления контура регулирования тока представлена на рис. 1, кривая 2.

### 6.1.1. Система преобразователь-двигатель постоянного тока с токовой отсечкой

Функциональная схема системы преобразователь-двигатель (П-Д) с токовой отсечкой изображена на рис. 6.2.

На вход преобразователя  $U$  с любой физической природой (электромашинный, магнитный, полупроводниковый преобразователь и др.) подается задающее напряжение  $U_3$ . Преобразователь управляет двигателем по цепи обмотки якоря изменением напряжения. Датчик тока  $UA$  – в простейшем случае резистор – выдает напряжение, пропорциональное току якоря двигателя  $M$ . В цепь обратной связи включены: диод  $VD$  и источник опорного напряжения  $U_{оп}$ , которое снимается с потенциометра  $RP$ . Сигнал обратной связи  $U_{от}$  формируется на резисторе  $R1$ .

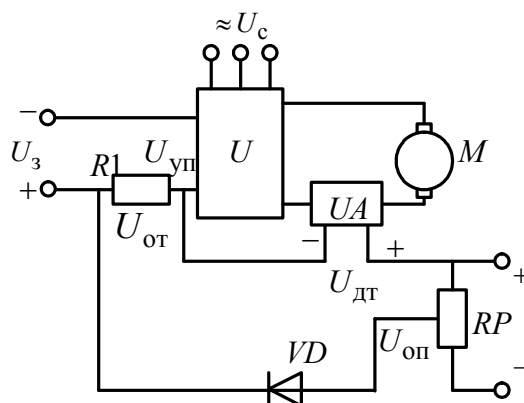


Рис. 6.2. Функциональная схема системы преобразователь-двигатель с токовой отсечкой

Семейство электромеханических характеристик разомкнутой системы П-Д изображено на рис. 6.3. Каждая из этих характеристик соответствует определенному значению задающего напряжения  $U_{zi}$ , которое в разомкнутой системе регулирования равно  $U_{уп.i}$ .

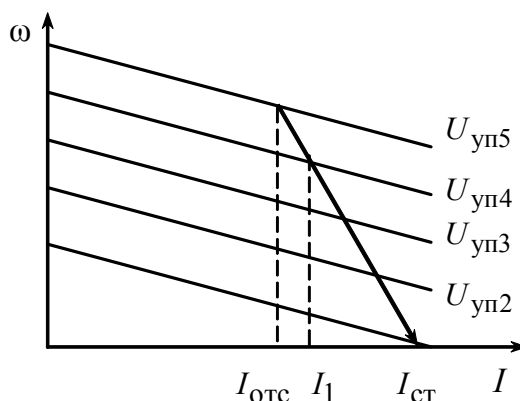


Рис. 6.3. Электромеханические характеристики системы преобразователь-двигатель с токовой отсечкой

Пусть двигатель работает на электромеханической характеристике, соответствующей напряжению управления  $U_{уп5}$ . При холостом ходе двигателя напряжение датчика тока  $U_{дт} < U_{оп}$  и токовая связь не действует. С увеличением нагрузки напряжение  $U_{дт}$  датчика тока растёт и при токе якоря  $I = I_{отс}$  становится равным опорному напряжению  $U_{оп}$ . Дальнейшее увеличение нагрузки, например, до тока  $I_1$  приводит к превышению напряжением  $U_{дт}$  значения опорного напряжения ( $U_{дт} > U_{оп}$ ). В цепи обратной связи через диод  $VD$  начинает протекать ток  $I_{дт}$ . На-

напряжение управления преобразователем  $U_{уп}$  при действии обратной связи, равное разности задающего напряжения  $U_3$  и напряжения обратной связи  $U_{от}$ , уменьшается. Двигатель переходит на электромеханическую характеристику, соответствующую новому значению напряжения  $U_{уп4} < U_{уп5}$ .

Дальнейшее увеличение нагрузки, благодаря действию обратной связи, приводит к уменьшению сигнала управления  $U_{уп}$ , который последовательно принимает значения  $U_{уп3}, U_{уп2}$ , что отвечает переходу изображающей точки экскаваторной характеристики по соответствующим электромеханическим характеристикам разомкнутой системы. Двигатель останавливается при достижении током значения  $I_{ст}$ . При неподвижном якоре двигателя ЭДС преобразователя уравнивается падением напряжения в якорной цепи двигателя.

Изменяя с помощью потенциометра  $RP$  напряжение  $U_{оп}$ , можно изменить ток  $I_{отс}$ , при котором вступает в действие отрицательная обратная связь, и, следовательно, регулировать предельный момент двигателя.

Необходимость гальванической развязки схемы управления и силовых цепей электропривода позволяет использовать активное сопротивление в качестве датчика тока только в электроприводах с электромашинами и магнитными усилителями или в качестве первичного датчика. В тиристорных электроприводах сигнал, пропорциональный току якоря, получают, как правило, с помощью трансформатора тока  $TA$ , включаемого в силовые цепи переменного тока тиристорного преобразователя (рис. 6.4).

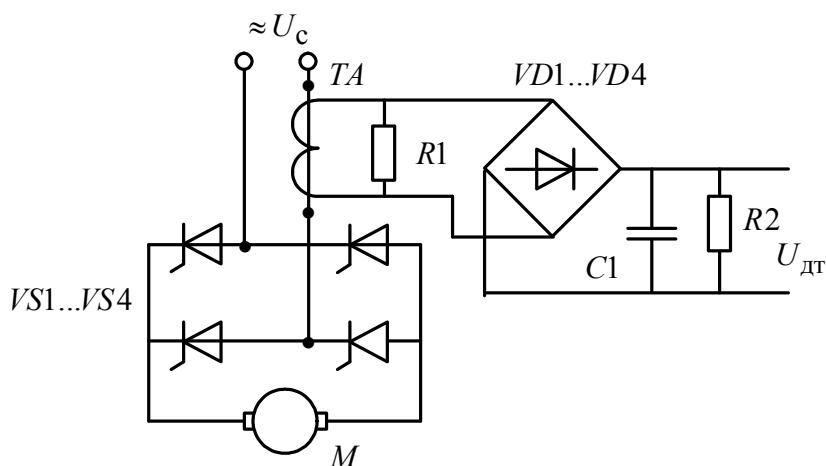


Рис. 6.4. Датчик тока, выполненный на трансформаторе тока

## 6.1.2. Электромеханические характеристики системы преобразователь-двигатель с токовой отсечкой

Расчет электромеханических характеристик системы преобразователь-двигатель с токовой отсечкой, функциональная схема которой изображена на рис. 6.2, произведем с учетом следующих допущений:

- статическая характеристика преобразователя  $E_{\Pi} = f(U_{\text{уп}})$  линейна;
- коэффициент передачи датчика тока  $k_{\text{дт}}$  постоянен во всем диапазоне изменения тока двигателя;
- диод  $VD$  – идеальный вентиль, у которого прямое сопротивление равно нулю, а обратное сопротивление – бесконечности.

Составим систему уравнений, которые описывают элементы и связи системы электропривода в установившемся режиме работы для двух участков электромеханической характеристики.

На первом участке характеристики ток якоря двигателя  $0 \leq I \leq I_{\text{отс}}$  и токовая связь не действует, тогда система уравнений запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{\Pi} &= E_{\Pi} - I \cdot R_{\Pi}; \\ E_{\Pi} &= k_{\Pi} \cdot U_{\text{уп}}; \\ U_{\text{дв}} &= E_{\text{дв}} + I(R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}}); \\ E_{\text{дв}} &= c \cdot \omega; \\ U_{\text{з}} &= U_{\text{уп}}, \end{aligned} \tag{6.4}$$

где  $U_{\Pi}$  – напряжение на выходе преобразователя, В;  $E_{\Pi}$  – ЭДС холостого хода преобразователя, В;  $R_{\Pi}$  – эквивалентное сопротивление преобразователя, Ом;  $k_{\Pi} = \frac{E_{\Pi}}{U_{\text{уп}}}$  – коэффициент передачи преобразователя;

$R_{\text{дт}}$  – сопротивление датчика тока.

Решая систему уравнений (6.4), учитывая, что  $U_{\Pi} = U_{\text{дв}}$ , получим уравнение электромеханической характеристики разомкнутой системы электропривода

$$\omega = k_{\Pi} \cdot k_{\text{дв}} \cdot U_{\text{з}} - I \cdot k_{\text{дв}} \cdot R_{\text{яц}}, \tag{6.5}$$

где  $R = R_{\text{дв}} + R_{\Pi} + R_{\text{дт}}$  – сопротивление якорной цепи системы П-Д;

$k_{\text{дв}} = \frac{1}{c}$  – коэффициент передачи двигателя.

На втором участке характеристики  $I \geq I_{отс}$  вступает в действие токовая отсечка. Напряжение управления преобразователем

$$U_{уп} = U_3 - U_{от}, \quad (6.6)$$

а напряжение обратной связи по току

$$U_{от} = k_T \cdot I - U_{оп}, \quad (6.7)$$

где  $k_T$  – коэффициент передачи обратной связи по току, Ом;  $U_{оп}$  – опорное напряжение, В.

Решая совместно (6.4), (6.6) и (6.7), получим уравнение электро-механической характеристики замкнутой системы с отрицательной обратной связью по току

$$\omega = k_{п} \cdot k_{дв} (U_3 + U_{оп}) - I \cdot R_{яц} \cdot k_{дв} \left( 1 + \frac{k_T \cdot k_{п}}{R_{яц}} \right). \quad (6.8)$$

Анализ выражений (6.5) и (6.8) показывает, что при действии токовой отсечки крутизна электро-механической характеристики возрастает, и её можно регулировать изменением коэффициента  $k_T$ . На рис. 6.5 показаны электро-механические характеристики системы для различных  $k_T$ , причем,  $k_{Т3} > k_{Т2} > k_{Т1}$ . Изменение  $U_{оп}$  приводит к пропорциональному изменению фиктивной угловой скорости идеального холостого хода  $\omega_{0ф} = k_{п} \cdot k_{дв} (U_3 + U_{оп})$  и, следовательно, к параллельному смещению характеристик. Например, характеристика при  $k_{Т1}$  и  $U_{оп2} > U_{оп1}$  показана на рис. 6.5. штриховой линией.

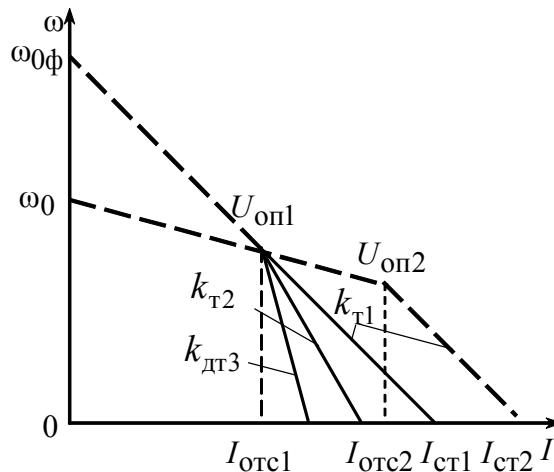


Рис. 6.5. Электро-механические характеристики электропривода для различных значений коэффициента передачи датчика тока

Изменение  $U_3$  также приводит к пропорциональному изменению угловых скоростей идеального холостого хода  $\omega_0$  и  $\omega_{0ф}$ . Коэффициенты при аргументе в выражениях (6.5) и (6.8) остаются постоянными, а электромеханические характеристики параллельно смещаются, как показано на рис. 6.6, причем  $U_{33} > U_{32} > U_{31}$ .

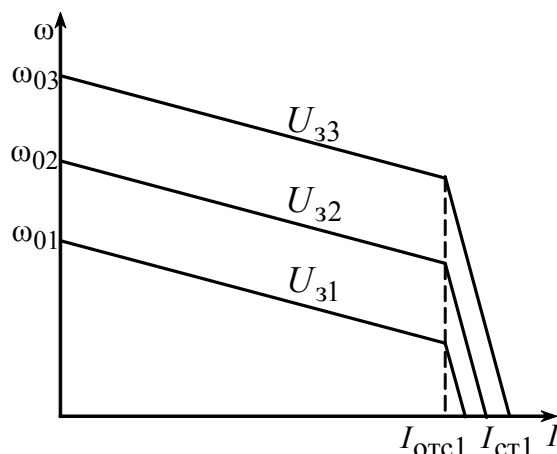


Рис. 6.6. Электромеханические характеристики электропривода для различных значений задающего напряжения

Если решить уравнение (6.8) относительно тока  $I$  двигателя, то получим выражение

$$I = \frac{k_{\Pi}(U_3 + U_{оп})}{R_{яц}(1 + k_T \cdot k_{\Pi}/R_{яц})} - \omega \frac{1}{R_{яц} \cdot k_d(1 + k_T \cdot k_{\Pi}/R_{яц})}, \quad (6.9)$$

которое показывает, что при действии отрицательной обратной связи по току электропривод будет работать в режиме автоматического поддержания тока двигателя, а угловая скорость двигателя представляет собой основное возмущающее воздействие.

Структурная схема системы автоматического регулирования (см. рис. 6.2) при действии отрицательной обратной связи по току может быть представлена в виде, приведенном на рис. 6.7. В цепь отрицательной обратной связи по току введен нелинейный элемент (НЭ) с коэффициентом передачи, равным единице, и зоной нечувствительности, определяемой опорным напряжением  $U_{оп}$ .

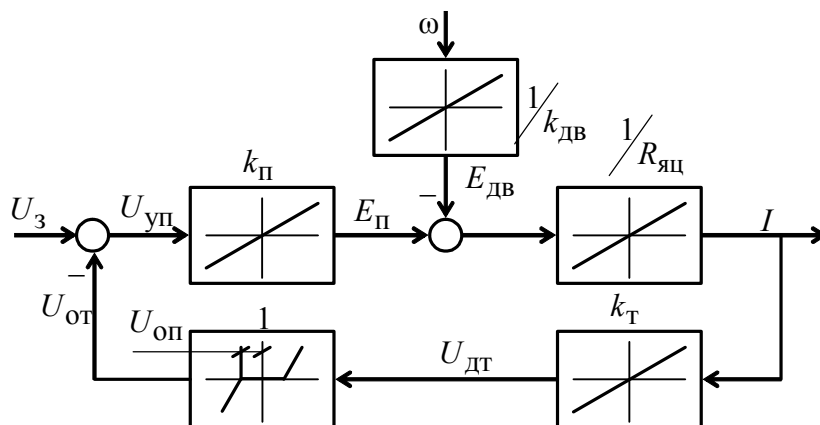


Рис. 6.7. Структурная схема системы автоматического регулирования тока с отрицательной обратной связью по току

Опорное напряжение  $U_{оп}$  можно рассматривать как некоторое эквивалентное задающее воздействие при действии отрицательной обратной связи по току и перенести его на вход системы. Тогда структурная схема системы будет соответствовать рис. 6.8.

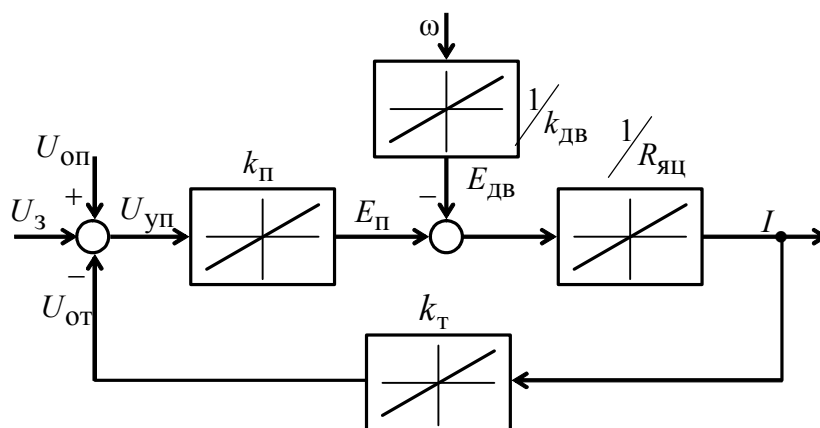


Рис. 6.8. Структурная схема электропривода, работающего в режиме стабилизации тока двигателя

Значение требуемого коэффициента усиления  $k_{треб}$  контура тока находится по формуле

$$k_{треб} = \frac{\delta_{рГ}}{\delta_{зГ}} - 1, \quad (6.10)$$

где  $\delta_{рГ}$  – статическая погрешность поддержания тока в разомкнутой системе электропривода, о.е.;  $\delta_{зГ}$  – статическая погрешность поддержания тока в замкнутой системе;



$$\delta_{\text{рГ}} = \frac{I_{\text{кз}} - I_{\text{отс}}}{I_{\text{отс}}}, \quad (6.11)$$

где  $I_{\text{кз}} = \frac{k_{\text{п}} \cdot U_{\text{зmax}}}{R_{\text{яц}}}$  – ток короткого замыкания, определяемый для верхней регулировочной характеристики, А;  $U_{\text{зmax}}$  – максимальное задающее напряжение, В.

Статическая погрешность замкнутой системы  $\delta_{\text{зГ}}$  поддержания тока при действии токовой отсечки определяется требованиями технического задания для  $I_{\text{отс}}$  и  $I_{\text{ст}}$  по выражению

$$\delta_{\text{зГ}} = \frac{I_{\text{ст}} - I_{\text{отс}}}{I_{\text{отс}}}. \quad (6.12)$$

Тогда

$$k_{\text{треб}} = \frac{k_{\text{п}} \cdot U_{\text{з. max}} / R_{\text{яц}} - I_{\text{отс}}}{I_{\text{ст}} - I_{\text{отс}}} - 1. \quad (6.13)$$

Коэффициент передачи обратной связи по току  $k_{\text{Г}}$ , требуемый для получения заданной электромеханической характеристики в режиме стабилизации тока при  $I > I_{\text{отс}}$ , в соответствии со структурной схемой рис. 6.8, равен

$$k_{\text{Г}} = \frac{k_{\text{треб}}}{k_{\text{п}} / R_{\text{яц}}}. \quad (6.14)$$

Для окончательного расчета параметров контура токовой отсечки найдем  $U_{\text{оп}}$ . Значение опорного напряжения можно определить из выражения (6.7). При  $I = I_{\text{отс}}$  узел токоограничения вступает в действие, но напряжение обратной связи по току  $U_{\text{от}} = 0$ , тогда

$$U_{\text{оп}} = k_{\text{Г}} \cdot I_{\text{отс}}. \quad (6.15)$$

**Пример 6.1.** Рассчитать параметры и электромеханические характеристики системы тиристорный преобразователь-двигатель с токовой отсечкой. Влиянием режима прерывистого тока пренебречь. Токовая отсечка вступает в действие при токе  $I_{\text{отс}} = 3 \cdot I_{\text{дв.н}}$ . Полная остановка электродвигателя должна произойти при токе стопорения  $I_{\text{ст}} = 4 \cdot I_{\text{дв.н}}$ . Тиристорный преобразователь имеет симметричную трехфазную мостовую схему выпрямления. Система импульсно-фазового управления (СИФУ) выполнена по вертикальному принципу управления с синусоидальным опорным напряжением. Коэффициент усиления тиристорного преобразователя  $k_{\text{п}} = 32,41$ . Эквивалентное сопротивление ти-

ристорного преобразователя  $R_{\pi} = 1,202 \text{ Ом}$ . Эквивалентная индуктивность тиристорного преобразователя  $L_{\pi} = 0,0405 \text{ Гн}$ . Максимальное задающее напряжение  $U_{з\max} = 10 \text{ В}$ .

Электродвигатель типа ПБСТ-52 имеет следующие паспортные данные:  $P_{\text{дв.н}} = 2,5 \text{ кВт}$ ;  $U_{\text{дв.н}} = 200 \text{ В}$ ;  $I_{\text{дв.н}} = 13,2 \text{ А}$ ;  $\omega_{\text{н}} = 104,7 \text{ рад/с}$ ;  $R_{\text{дв.гор}} = 1,248 \text{ Ом}$ ;  $J_{\text{дв}} = 0,109 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

**Решение.** Функциональная схема электропривода приведена на рис. 6.9.

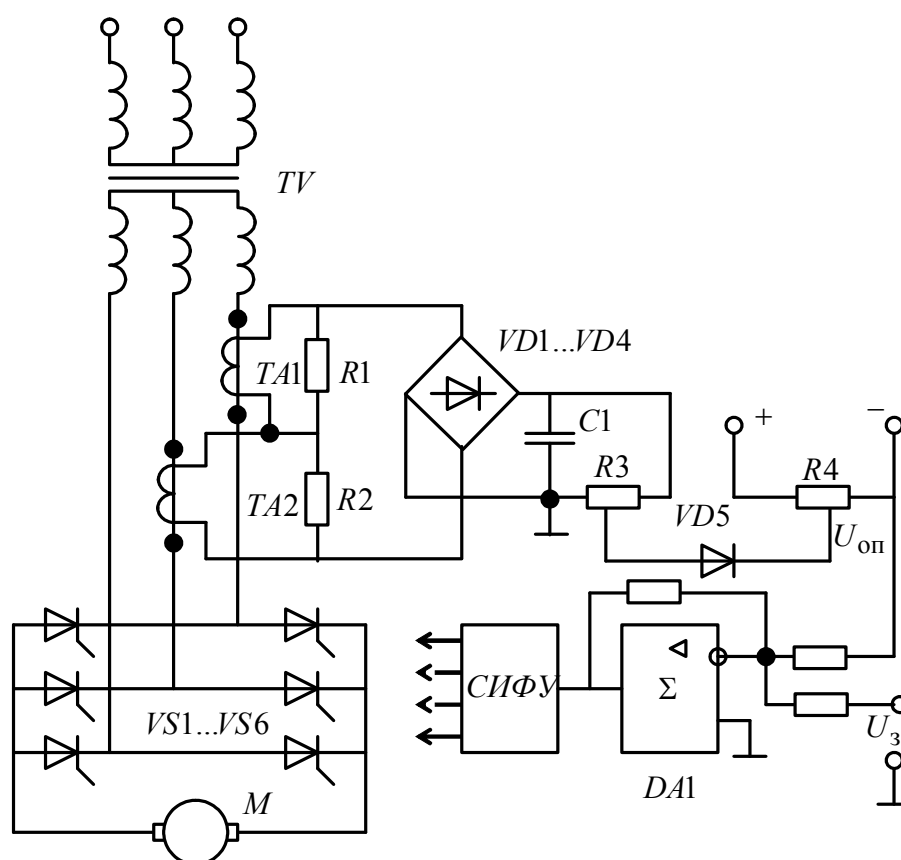


Рис. 6.9. Функциональная схема электропривода тиристорный преобразователь-двигатель с токовой отсечкой

Значение необходимого коэффициента усиления  $k_{\text{треб}}$  контура регулирования тока найдем по выражению (6.13)

$$k_{\text{треб}} = \frac{k_{\pi} \cdot U_{з.\max} / R_{\text{яц}} - I_{\text{отс}}}{I_{\text{ст}} - I_{\text{отс}}} - 1 =$$

$$= \frac{32,41 \cdot 10 / 2,45 - 39,6}{52,8 - 39,6} - 1 = 6,02,$$

где  $R_{\text{яц}} = R_{\text{п}} + R_{\text{дв.гор}} = 1,202 + 1,248 = 2,45$  – сопротивление якорной цепи, Ом;  $I_{\text{отс}} = 3 \cdot I_{\text{дв.н}} = 3 \cdot 13,2 = 39,6$  – ток отсечки, А;  $I_{\text{ст}} = 4 \cdot I_{\text{дв.н}} = 4 \cdot 13,2 = 52,8$  – ток стопорения, А.

Требуемый коэффициент обратной связи по току  $k_{\text{T}}$  определим по формуле (6.14)

$$k_{\text{T}} = \frac{k_{\text{треб}}}{k_{\text{п}} / R_{\text{яц}}} = \frac{6,02}{32,41 / 2,45} = 0,4552 \text{ Ом}$$

Опорное напряжение  $U_{\text{оп}}$  найдем согласно выражению (6.15)

$$U_{\text{оп}} = k_{\text{T}} \cdot I_{\text{отс}} = 0,4552 \cdot 39,6 = 18,026 \text{ В.}$$

В качестве первичного датчика тока используем два трансформатора тока типа 6ТА с номинальным первичным током 15 А. При  $R1 = R2 = 0,6$  Ом трансформатор тока обеспечивает погрешность не более 0,5 %, а его коэффициент передачи  $k_{\text{дт}} = 0,2$  Ом. Как показано на функциональной схеме рис. 6.9, в две фазы вторичной обмотки силового трансформатора  $TV$  включены трансформаторы тока  $TA1$  и  $TA2$ , таким образом, что их общий коэффициент передачи при преобразовании тока якоря двигателя равен  $\sqrt{3} \cdot k_{\text{дт}}$ . Диодный мост  $VD1 \dots VD4$  выпрямляет переменное напряжение вторичной обмотки датчиков тока, а емкостный фильтр  $C1$  служит для подавления переменной составляющей в выпрямленном напряжении. Тогда структурную схему датчика тока можно представить в виде, изображенном на рис. 5.10, где приняты следующие обозначения:  $k_{\text{пот}}$  – коэффициент передачи потенциометра  $R3$ ;  $k_{\text{ф}}$  – коэффициент передачи фильтра.

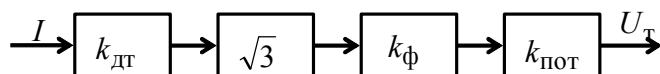


Рис. 5.10. Структурная схема датчика тока.

Для обеспечения  $k_{\text{T}}$  найдем коэффициент передачи потенциометра  $k_{\text{пот}}$ , учитывая, что емкостный фильтр имеет коэффициент передачи  $k_{\text{ф}} = 1,4$ :

$$k_{\text{пот}} = \frac{k_{\text{T}}}{k_{\text{дт}} \cdot \sqrt{3} \cdot k_{\text{ф}}} = \frac{0,4552}{0,2 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,4} = 0,9291.$$

Обозначим

$$k_T = k_{от} \cdot k_{дт}, \quad (6.16)$$

где  $k_{от} = \sqrt{3} \cdot k_{\phi} \cdot k_{пот} = \frac{k_T}{k_{дт}}$  – коэффициент согласования обратной связи по току.

Тогда 
$$k_{от} = \frac{k_T}{k_{дт}} = \frac{0,4552}{0,2} = 2,276.$$

Уравнение электромеханической характеристики разомкнутой системы электропривода при  $I < I_{отс}$  имеет следующий вид:

$$\omega = k_{\Pi} \cdot k_{дв} \cdot U_3 - I \cdot k_{дв} \cdot R_{яц}.$$

При подстановке численных значений параметров получим

$$\omega = 32,41 \cdot 0,514 \cdot U_3 - I \cdot 0,514 \cdot 2,45, \quad (6.17)$$

где  $k_{дв} = \frac{1}{c} = \frac{\omega_H}{U_H - I_H \cdot R_{дв.гор}} = \frac{104,7}{220 - 13,2 \cdot 1,248} = 0,514$  рад/В·с.

Уравнение электромеханической характеристики для участка стабилизации тока ( $I \geq I_{отс}$ ) при подстановке (6.16) в (6.8) преобразуется к виду

$$\omega = k_{\Pi} \cdot k_{дв} (U_3 + U_{оп}) - I \cdot R_{яц} \cdot k_{дв} \left( 1 + \frac{k_{от} \cdot k_{дт} \cdot k_{\Pi}}{R_{яц}} \right). \quad (6.18)$$

При подстановке численных значений параметров получим

$$\omega = 32,41 \cdot 0,514 (U_3 + 18,026) - I \cdot 2,45 \cdot 0,514 \left( 1 + \frac{2,276 \cdot 0,2 \cdot 32,41}{2,45} \right). \quad (6.19)$$

Рассчитанные по уравнениям (6.17) и (6.18) электромеханические характеристики системы электропривода ТП-Д с токовой отсечкой для трех значений задающего напряжения  $U_{3,маx} = 10$  В,  $U_{32} = 8$  В и  $U_{31} = 5$  В приведены на рис. 6.11.

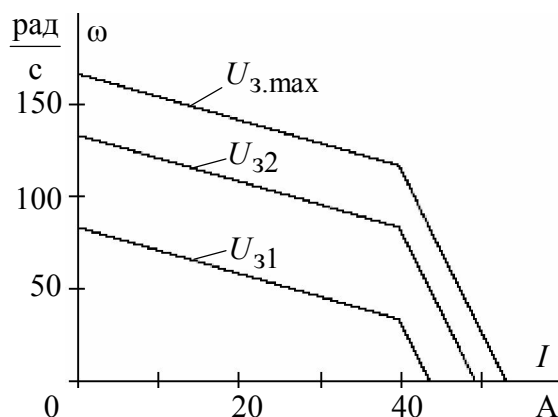


Рис. 6.11. Электромеханические характеристики электропривода с токовой отсечкой

**Пример 6.2.** Рассчитать статическую и динамическую механические характеристики электропривода тиристорный преобразователь - двигатель с токовой отсечкой для максимального задающего напряжения  $U_{\text{зmax}} = 10\text{В}$ . Функциональную схему, параметры двигателя, преобразователя и системы управления принять из условия примера 6.1.

**Решение.** Электромагнитный момент двигателя постоянного тока определяется уравнением

$$M = \frac{I}{k_{\text{ДВ}}}. \quad (6.20)$$

Подставив (6.20) в (6.5), получим уравнение механической характеристики разомкнутой системы электропривода

$$\omega = k_{\text{П}} \cdot k_{\text{ДВ}} \cdot U_{\text{з}} - M \cdot k_{\text{ДВ}}^2 \cdot R_{\text{яц}}, \quad (6.21)$$

а после подстановки численных значений параметров

$$\omega = 32,41 \cdot 0,514 \cdot U_{\text{з}} - M \cdot 0,514^2 \cdot 2,45.$$

Уравнение механической характеристики для участка стабилизации тока ( $I \geq I_{\text{отс}}$ ) можно получить при совместном решении уравнений (6.20) и (6.18), тогда

$$\omega = k_{\text{П}} \cdot k_{\text{ДВ}} (U_{\text{з}} + U_{\text{оп}}) - M \cdot k_{\text{ДВ}}^2 \cdot R_{\text{яц}} \left( 1 + \frac{k_{\text{от}} \cdot k_{\text{дт}} \cdot k_{\text{П}}}{R_{\text{яц}}} \right). \quad (6.22)$$

Подставив в (6.22) значения параметров, получим

$$\omega = 32,41 \cdot 0,514 (U_{\text{з}} + 18,026) - M \cdot 0,514^2 \cdot 2,45 \left( 1 + \frac{2,276 \cdot 0,2 \cdot 32,41}{2,45} \right).$$

Результаты расчетов механической характеристики электропривода внесем в табл. 6.1.

Таблица 6.1

$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	0	76,94	102,59
$\omega, \text{рад/с}$	166,5	116,64	0

Для расчета динамической механической характеристики электропривода ТП-Д с токовой отсечкой составим структурную схему электропривода (рис. 6.12).

Тиристорный преобразователь представим апериодическим звеном с постоянной времени

$$T_{\text{П}} = \frac{0,5}{m_{\text{в}} \cdot f_{1\text{Н}}} = \frac{0,5}{6 \cdot 50} = 0,00167 \text{ с},$$

где  $f_{1H} = 50$  Гц – частота питающей сети;  $m_B = 6$  – число пульсов выпрямленного напряжения.

Определим дополнительные параметры двигателя:

- Коэффициент ЭДС ( $V \cdot c / \text{рад}$ ) и электромагнитного момента ( $H \cdot m / A$ ) при номинальном потоке возбуждения

$$c = \frac{U_{\text{дв.н}} - I_{\text{дв.н}} \cdot R_{\text{дв.гор}}}{\omega_H} = \frac{220 - 13,2 \cdot 1,248}{104,7} = 1,943.$$

- Индуктивность обмотки якоря двигателя

$$L_{\text{дв}} = k_L \frac{U_{\text{дв.н}}}{2 \cdot p \cdot n_{\text{дв.н}} \cdot I_{\text{дв.н}}} = 12 \cdot \frac{220}{2 \cdot 3 \cdot 1000 \cdot 13,2} = 0,033 \text{ Гн},$$

где  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $k_L = 6 - 8$  для быстроходных некомпенсированных машин;  $k_L = 8 - 12$  для нормальных некомпенсированных машин;  $k_L = 5 - 6$  для компенсированных машин.

- Индуктивность якорной цепи

$$L_{\text{яц}} = L_{\text{дв}} + L_{\text{п}} = 0,033 + 0,0405 = 0,0735 \text{ Гн}.$$

- Электромагнитная постоянная времени якорной цепи

$$T_{\text{яц}} = \frac{L_{\text{яц}}}{R_{\text{яц}}} = \frac{0,0735}{2,45} = 0,03 \text{ с}.$$

В соответствие со структурной схемой рис. 6.12 в программной среде WINDORA составлена схема имитационной модели электропривода и произведены расчеты переходных процессов и динамической механической характеристики.

Нелинейный элемент с коэффициентом передачи, равным единице, и зоной нечувствительности, определяемой опорным напряжением  $U_{\text{оп}} = 18,026$ , моделируется звеном кусочно-линейной аппроксимации PGON. Окно ввода параметров звена кусочно-линейной аппроксимации представлено в таблице 6.2.

Таблица 6.2

	X1	X2
x1	0	0
x2	18.026	0
x3	70.026	52.00

Механическая часть электропривода смоделирована одномассовой механической системой с моментом инерции  $J = 0,109 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ , нагру-

женной моментом сопротивления  $M_c = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  типа «сухое трение» и представлено звеном НАФТИНТ.

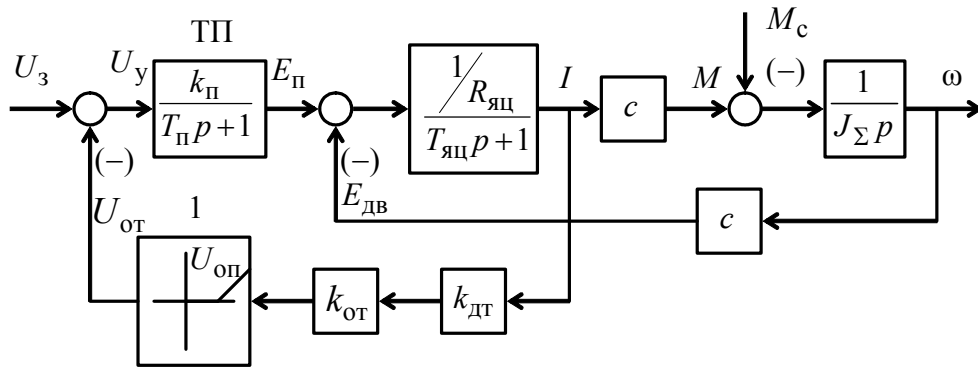


Рис. 6.12. Структурная схема линеаризованной системы тиристорного электропривода с токовой отсечкой

Результаты моделирования переходных процессов пуска двигателя при максимальном задающем напряжении  $U_{3\max} = 10 \text{ В}$  приведены на рис. 6.13 в виде кривых  $\omega = f(t)$  и  $M = f(t)$ .

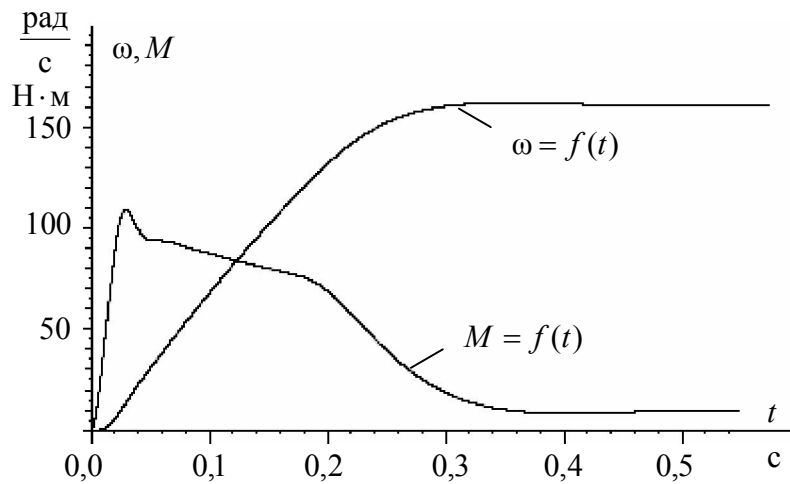


Рис. 6.13. Графики переходных процессов  $\omega = f(t)$  и  $M = f(t)$  при отработке ступенчатого входного сигнала  $U_{3\max} = 10 \text{ В}$

Динамическая механическая характеристика, построенная по результатам моделирования переходных процессов, приведена на рис. 6.14, кривая 2. Там же показана статическая механическая характе-

ристика (ломанная 1), построенная по результатам расчетов, сведенных в табл. 6.1.

**Выводы.** Получено хорошее совпадение динамических и статических механических характеристик, однако, как показали результаты исследований динамический момент, а следовательно, и ток якоря двигателя превышают в переходных режимах допустимые значения по условиям коммутации. Возможен выход из строя двигателя из-за порчи коллектора.

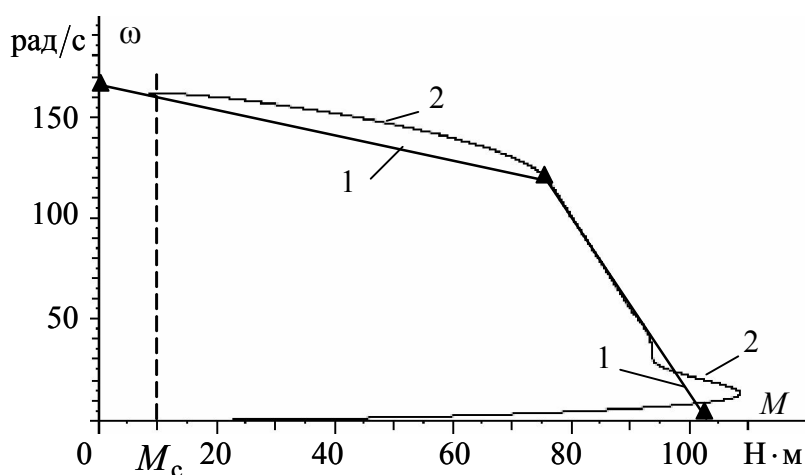


Рис. 6.14. Механические характеристики электропривода с токовой отсечкой: 1 – статическая характеристика; 2 – динамическая характеристика; ▲ – расчетные точки статической характеристики

### 6.1.3. Система преобразователь-двигатель с отрицательными обратными связями по скорости и току с отсечками

Функциональная схема рассматриваемой системы электропривода приведена на рис. 6.15.

Здесь двигатель  $M$  управляется по цепи обмотки якоря от отдельного преобразователя  $U$ . На валу двигателя находится датчик скорости – тахогенератор  $BR$ , который формирует сигнал отрицательной обратной связи  $U_{oc}$ , пропорциональный скорости вращения двигателя. Сигнал, пропорциональный току двигателя, вырабатывается датчиком тока ДТ. Опорное напряжение создается стабилитроном  $VD1$ .

На первом участке электромеханической характеристики, т. е. при  $I \leq I_{отс}$ , электропривод работает в режиме стабилизации угловой скорости двигателя с отрицательной обратной связью по скорости.



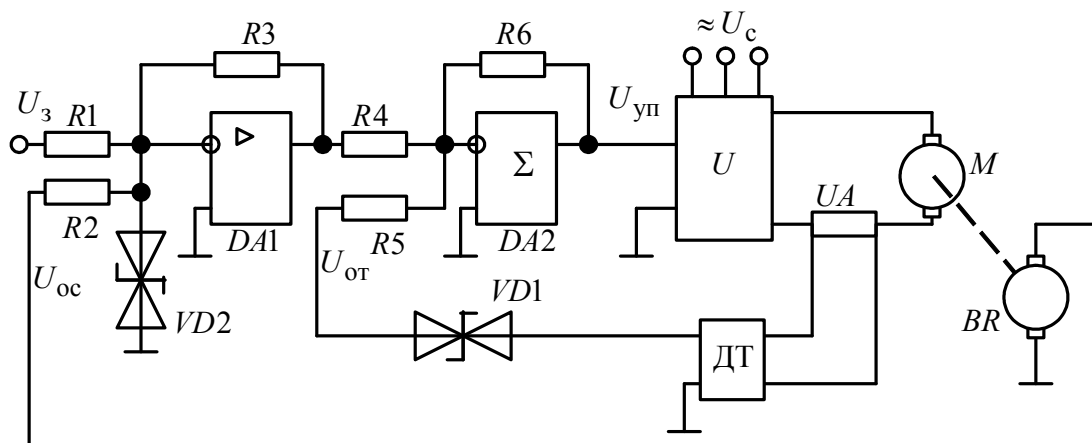


Рис. 6.15. Функциональная схема электропривода с отрицательными обратными связями по скорости и току с отсечками

Напряжение  $U_{уп}$  управления преобразователем в соответствии с функциональной схемой рис. 5.16 определяется выражением

$$U_{уп} = k_{pc} \cdot k_{\Sigma} \cdot (U_3 - U_{oc}), \quad (6.23)$$

где  $k_{pc}$  – коэффициент усиления регулятора скорости;  $k_{\Sigma}$  – коэффициент передачи сумматора;  $U_{oc}$  – напряжение отрицательной обратной связи по скорости;

$$U_{oc} = k_c \cdot \omega, \quad (6.24)$$

где  $k_c = k_{oc} \cdot k_{дс}$  – коэффициент обратной связи по скорости, В·с/рад;  $k_{дс}$  – коэффициент передачи датчика скорости, В·с/рад;  $k_{oc}$  – коэффициент согласования, о. е.

Подставляя  $U_{уп}$  из (6.23) в уравнение (6.5) электромеханической характеристики разомкнутой системы, принимая, что  $U_{уп} = U_3$ , получим после преобразований уравнение электромеханической характеристики системы с отрицательной обратной связью по скорости

$$\omega = \frac{k_{pc} \cdot k_{\Sigma} \cdot k_{п} \cdot k_{дв} \cdot U_3}{1 + k_{pc} \cdot k_{\Sigma} \cdot k_{п} \cdot k_{дв} \cdot k_c} - I \frac{R_{яц} \cdot k_{дв}}{1 + k_{pc} \cdot k_{\Sigma} \cdot k_{п} \cdot k_{дв} \cdot k_c}. \quad (6.25)$$

Структурная схема электропривода, соответствующая статическому режиму работы на участке стабилизации скорости, приведена на рис. 6.16.

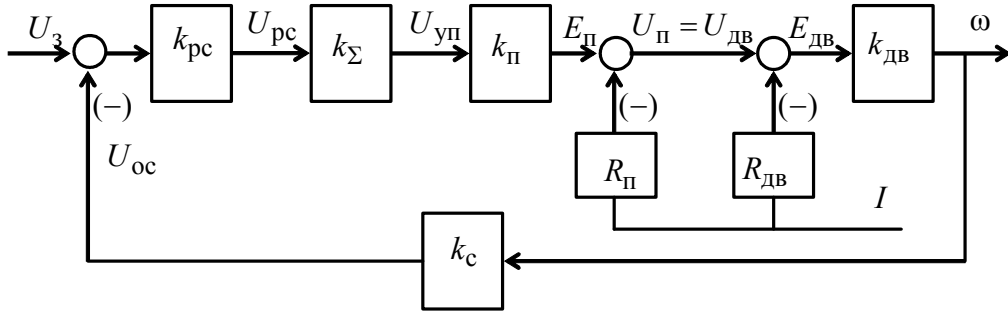


Рис. 6.16. Структурная схема электропривода соответствующая статическому режиму работы на участке стабилизации скорости

На втором участке электромеханической характеристики ( $I \geq I_{отс}$ ) вступает в действие токовая отсечка и напряжение управления преобразователя равно

$$U_{уп} = k_{pc} k_{\Sigma} (U_3 - U_{oc}) - k_{\Sigma} U_{от}, \quad (6.26)$$

где  $U_{от} = k_T I - U_{оп}$  – напряжение обратной связи по току;  $k_T = k_{от} \cdot k_{дт}$  – коэффициент обратной связи по току, Ом;  $k_{дт}$  – коэффициент передачи датчика тока, Ом;  $k_{от}$  – коэффициент согласования, о. е.

Структурная схема электропривода, соответствующая статическому режиму работы на участке действия токовой отсечки и отрицательной обратной связи по скорости, приведена на рис. 6.17.

Совместное решение выражений (6.5) и (6.26) позволяет получить уравнение электромеханической характеристики, где действуют обе обратные связи:

$$\omega = \frac{k_{pc} \cdot k_{\Sigma} \cdot k_{П} \cdot k_{ДВ} (U_3 + U_{оп})}{1 + k_{pc} \cdot k_{\Sigma} \cdot k_{П} \cdot k_{ДВ} \cdot k_c} - I \frac{R_{яц} \cdot k_{ДВ} \left( 1 + \frac{k_{pc} \cdot k_{\Sigma} \cdot k_{П} \cdot k_T}{R_{яц}} \right)}{1 + k_{pc} \cdot k_{\Sigma} \cdot k_{П} \cdot k_{ДВ} \cdot k_c}. \quad (6.27)$$

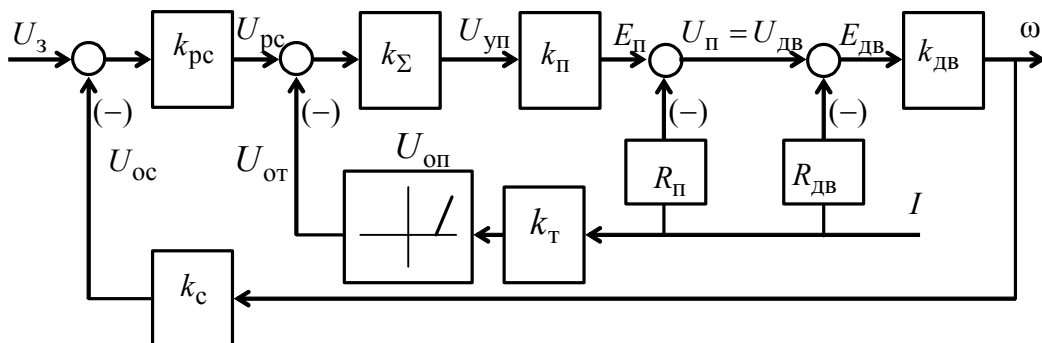


Рис. 6.17. Структурная схема электропривода на участке действия токовой отсечки и стабилизации скорости

Анализ выражений (6.25) и (6.27) показывает, что при действии токовой отсечки наклон характеристики (6.27) к оси абсцисс возрастает в  $(1 + k_y \cdot k_{\Pi} \cdot k_{дт}/R_{яц})$  раз вследствие увеличения коэффициента при аргументе  $I$ . На втором участке электромеханической характеристики отрицательная обратная связь по току и отрицательная обратная связь по скорости, осуществляющая стабилизацию скорости, противодействуют друг другу. Обратная связь по току, стабилизируя ток, снижает скорость двигателя, а связь по скорости старается ее повысить. Поэтому для эффективной стабилизации тока отрицательную обратную связь по скорости отключают путем введения узлов отсечки, ограничивающих разность сигналов  $U_3 - U_{oc}$  на определенном уровне. В схеме, представленной на рис. 6.15, такую отсечку выполняет стабилитрон  $VD2$ , который в большинстве электроприводов используется и для защиты входных цепей регулятора скорости от перенапряжений. При возрастании разности  $U_3 - U_{oc}$  до напряжения пробоя стабилитрона  $VD2$ , определяемого его типом, дальнейший рост напряжения на входе регулятора прекращается.

При больших коэффициентах усиления регулятора отрицательная обратная связь по скорости отключается при входе в режим насыщения операционного усилителя регулятора скорости. На выходе регулятора скорости устанавливается максимальный сигнал  $U_{pc.max}$ . В этом случае напряжение управления преобразователем

$$U_{уп} = k_{\Sigma} \cdot (U_{pc.max} - U_{от}). \quad (6.28)$$

Таким образом, на третьем участке статической характеристики при  $I > I_{отс}$  и  $U_3 - U_{oc} > U_{VD2}$  действует только одна отрицательная обратная связь по току, а электромеханическая характеристика системы преобразователь - двигатель определяется выражением

$$\omega = k_{\Sigma} \cdot k_{\Pi} \cdot k_{дв} \cdot (U_{pc.max} + U_{оп}) - I \cdot R_{яц} \cdot k_{дв} \cdot (1 + k_{\Sigma} \cdot k_{\Pi} \cdot k_{т}/R_{яц}). \quad (6.29)$$

Структурная схема электропривода для режима стабилизации тока приведена на рис. 6.18.

Отметим, что разность  $U_3 - U_{oc}$  при любом  $U_3$  достигает напряжения  $U_{VD2}$  при одном и том же изменении угловой скорости  $\Delta\omega_{отс}$ , которое определяется выражением

$$\Delta\omega_{отс} = \frac{U_{VD2}}{k_c} \quad (6.30)$$

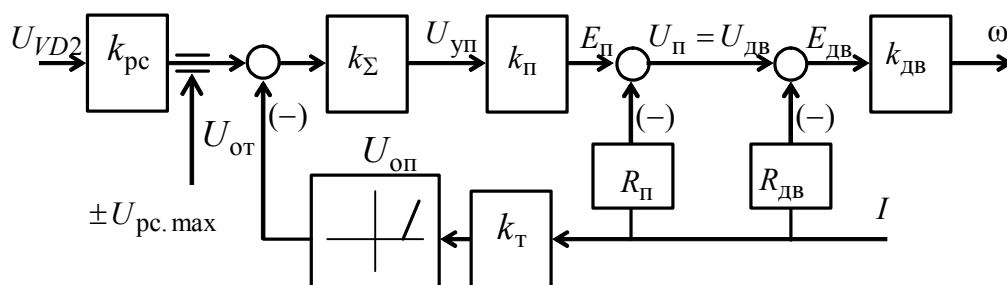


Рис. 6.18. Структурная схема, соответствующая статическому режиму работы электропривода – стабилизации тока

Коэффициент передачи  $k_T$  обратной связи по току в этом случае можно найти из выражения (6.29), полагая, что при  $I = I_{ст}$  угловая скорость  $\omega = 0$ , а опорное напряжение  $U_{оп} = k_T \cdot I_{отс}$  определяется зависимостью (6.15). Тогда

$$k_T = \frac{U_{рс.мах} - I_{ст} \cdot R_{яц} / k_\Sigma \cdot k_\Pi}{I_{ст} - I_{отс}} \quad (6.31)$$

Электромеханические характеристики для различных  $U_3$  приведены на рис. 6.19. При постоянных коэффициентах передачи элементов системы ТП-Д три участка электромеханических характеристик взаимно параллельны и не пересекаются.

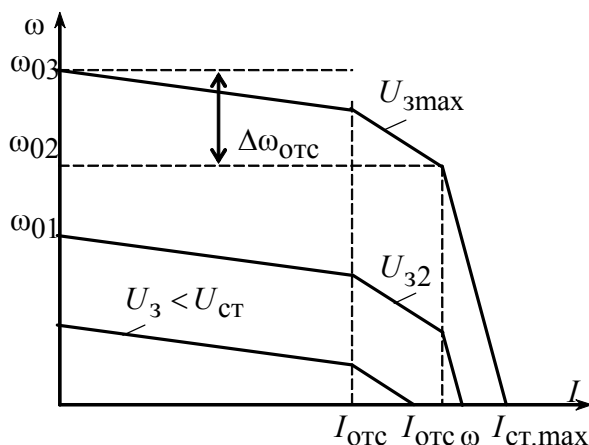


Рис. 6.19. Электромеханические характеристики электропривода с отрицательными обратными связями по скорости и току с отсечками

Рассмотренные электроприводы с токовой отсечкой (задержанной отрицательной обратной связью по току) дают лишь общее представление о способах стабилизации тока и скорости. В настоящее время токовая отсечка применяется в ограниченном типе электроприводов, в основном в электроприводах экскаваторов.

Двухконтурные электроприводы постоянного тока, разрабатываемые в 70-х годах двадцатого века, применяемые и в настоящее время, строились исключительно по принципу подчиненного регулирования.

#### **6.1.4. Электропривод постоянного тока с подчиненным регулированием**

Системы электропривода с подчиненным контуром тока получили первоначальное применение в электроприводах постоянного тока (см. рис. 6.20). Токковый контур состоит из регулятора тока РТ, обычно пропорционально-интегрального типа. На его вход через резистор  $R7$  подается сигнал задания тока якоря  $U_{зт}$ , а через резистор  $R8$  – сигнал отрицательной обратной связи  $U_{от}$  по току якоря двигателя  $M$ . Первичным датчиком тока якоря двигателя служат два трансформатора тока  $TA1$  и  $TA2$ . Датчик тока включает также в себя диодный выпрямитель  $VD1...VD4$ , сглаживающий фильтр на конденсаторе  $C1$  и делитель напряжения  $R3$ . Назначение датчика тока является преобразование тока якоря в пропорциональное ему напряжение обратной связи по току  $U_{от}$ , соответствующее стандартному напряжению системы управления, а также обеспечение гальванической развязки силовой цепи и схемы управления.

Преобразователь выполнен на тиристорах  $VS1...VS6$ . Управление тиристорами осуществляет система импульсно-фазового управления.

Внешний контур осуществляет регулирование скорости двигателя. Регулятор скорости РС в данном случае пропорционально-интегрального типа. На его вход через резистор  $R4$  подается сигнал задания скорости  $U_{зс}$ , а через резистор  $R5$  – сигнал отрицательной обратной связи  $U_{ос}$  по скорости двигателя. Первичным датчиком скорости является тахогенератор  $BR$ . Конденсатор  $C4$  выполняет роль фильтра низких частот, сглаживающий коммутационные и коллекторные колебания напряжения тахогенератора. Резисторы  $R_{11}$  и  $R_{10}$  образуют делитель, обеспечивающий напряжение обратной связи по скорости  $U_{ос}$ , соответствующее стандартному напряжению системы управления.

Особенностью системы подчиненного регулирования является равенство количества регуляторов и замкнутых контуров числу регулируемых координат.

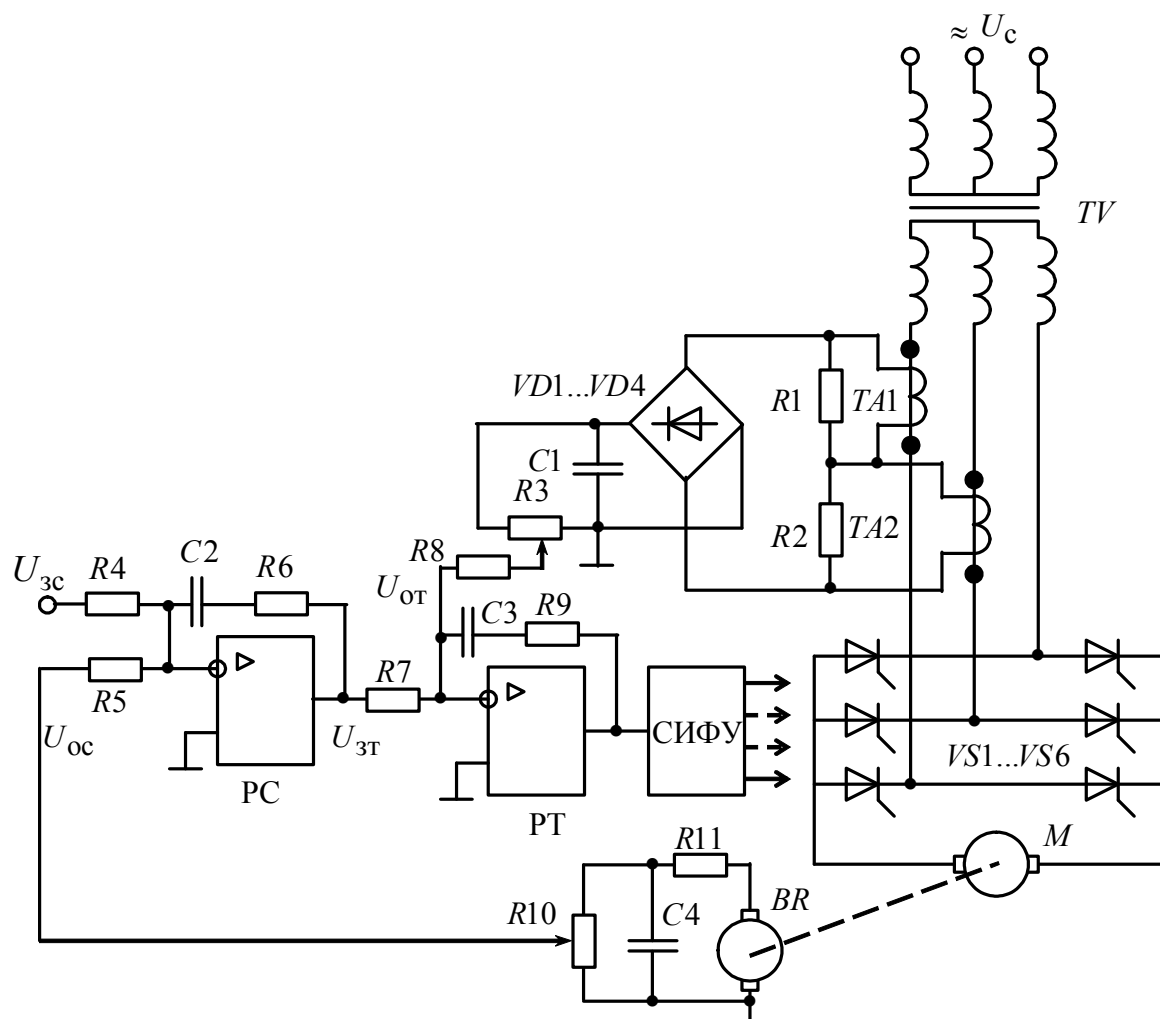


Рис. 6.20. Функциональная схема электропривода с подчиненным контуром тока

Как следует из анализа рис. 6.20, выходной сигнал внешнего контура регулирования скорости  $U_{OT}$  является сигналом задания внутреннего контура регулирования тока. Таким образом, каждый внутренний контур оказывается подчиненным внешнему контуру. Это и послужило основанием названия системы регулирования. Кроме того, такое построение системы позволяет осуществлять независимую настройку контуров регулирования.

Структурная схема линеаризованной двухконтурной системы электропривода, соответствующая функциональной схеме рис. 6.20, приведена на рис. 6.21.

Структура двигателя на рис. 6.21 приведена в соответствии с описывающими его уравнениями (3.12). Тиристорный преобразователь представлен апериодическим звеном с коэффициентом передачи  $k_{\Pi}$  и постоянной времени  $T_{\Pi}$ . Датчики тока и скорости также представлены апериодическими звеньями с коэффициентами передачи  $k_T$  и  $k_c$  и постоянными времени  $T_T$  и  $T_c$  соответственно.

Отличие схемы рис. 6.21 от классической двухконтурной подчиненного регулирования состоит в наличии сигнала отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя, показанной на рисунке пунктиром.

Так как контур тока настраивают исходя из необходимости ограничения тока якоря двигателя на допустимом уровне, то при анализе схемы внутренней обратной связи по ЭДС двигателя пренебрегают, а контур настраивают на оптимум по модулю. При таком подходе регулятор тока получается пропорционально-интегрального типа с передаточной функцией

$$W_{\text{рт}}(p) = k_{\text{рт}} \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{рт}} \cdot p} \right), \quad (6.32)$$

где  $T_{\text{рт}} = T_{\text{яц}}$  – постоянная времени регулятора, с;

$k_{\text{рт}} = \frac{T_{\text{яц}} \cdot R_{\text{яц}}}{a_{\text{мт}} \cdot k_{\Pi} \cdot k_T \cdot T_{\text{мт}}}$  – коэффициент передачи регулятора тока;

$a_{\text{мт}} = 1 - \delta$  – коэффициент настройки на модульный оптимум контура тока;

$a_{\text{мт}} = 2$  – стандартный коэффициент настройки.

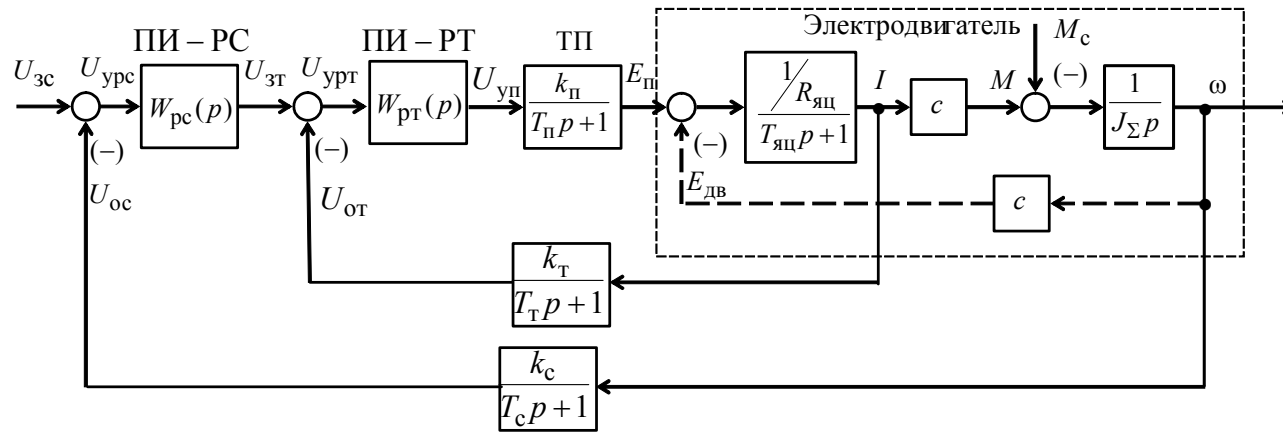


Рис. 6.21. Структурная схема линейризованной двухконтурной системы электропривода, выполненного по принципу подчиненного регулирования

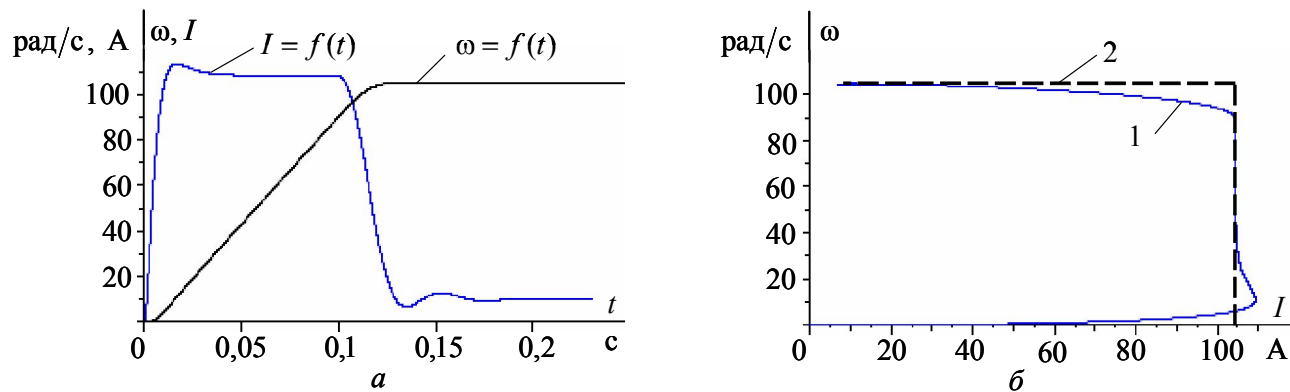


Рис. 6.22. Графики (а) переходных процессов тока и скорости и (б) динамическая электромеханическая характеристика пуска двигателя при максимальном задающем напряжении



На рис. 6.21 приняты следующие обозначения:

$k_{\Pi}$  – коэффициент передачи тиристорного преобразователя;

$k_T = \frac{U_{зт. \max}}{I_{дв. \max}}$  – коэффициент обратной связи по току;

$U_{зт. \max}$  – максимальное напряжение задания на ток двигателя;

$I_{дв. \max}$  – максимально допустимый ток якоря двигателя;

$T_{\mu T} = T_{\Pi} + T_T$  – суммарная малая постоянная времени;

$T_{\Pi} = \frac{1}{2 \cdot m \cdot f_1}$  – постоянная времени тиристорного преобразователя;

$m$  – число управляемых полупериодов напряжения за период напряжения питающей сети,

$f_1$  – частота питающей сети.

С пропорционально-интегральным регулятором тока статическая погрешность регулирования тока стремиться к нулю, так как такой регулятор теоретически имеет бесконечно большой коэффициент усиления.

Контур скорости настраивается на модульный (МО) или симметричный (СО) оптимум.

При настройке контура скорости на модульный оптимум регулятор скорости получается пропорционального типа с передаточной функцией

$$W_{pc}(p) = k_{pc} = \frac{J_{\Sigma} \cdot k_T}{c \cdot k_c \cdot a_{\mu c} \cdot T_{\mu c}}, \quad (6.33)$$

где  $J_{\Sigma}$  – момент инерции электропривода;  $a_{\mu c} = 2$  – стандартный коэффициент настройки на модульный оптимум;

$k_c = \frac{U_{зс. \max}}{\omega_H}$  – коэффициент обратной связи по скорости;

$U_{зс. \max}$  – максимальное напряжение задания скорости двигателя;

$\omega_H$  – номинальная скорость двигателя;

$c$  – коэффициент ЭДС и электромагнитного момента двигателя при номинальном потоке возбуждения;

$T_{\mu c} = a_{\mu c} \cdot T_{\mu T} + T_c$  – суммарная малая постоянная времени.

При настройке на симметричный оптимум регулятор скорости получается пропорционально-интегрального типа с передаточной функцией

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \left( 1 + \frac{1}{T_{pc} \cdot p} \right), \quad (6.34)$$

где  $T_{pc} = 4 \cdot T_{\mu c}$  – постоянная времени регулятора скорости ПИ-типа.

Коэффициент усиления регулятора скорости ПИ-типа также определяется по уравнению (6.33).

Электропривод с ПИ-регулятором скорости имеет меньшее быстроедействие при отработке управляющего воздействия, но в нем теоретически отсутствует погрешность поддержания скорости при изменении момента на валу двигателя. Динамические провалы скорости при скачкообразном изменении нагрузки на валу двигателя присущи обоим типам регуляторов.

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  при отработке скачка задающего напряжения приведены на рис. 6.22, а. На рис. 6.22, б показана динамическая электромеханическая характеристика электропривода, построенная по результатам расчета переходных процессов. Как следует из результатов расчета динамическая погрешность электропривода с ПИ-регуляторами скорости и тока не равна нулю на всех этапах разгона двигателя. Ток якоря двигателя превышает значение  $I_{дв.мах}$  в первые моменты времени протекания переходных процессов в электроприводе за счет инерционностей в контуре тока. Для сравнения на рис. 6.22, б изображена статическая электромеханическая характеристика электропривода, кривая 2.

Для вывода уравнения статической электромеханической характеристики электропривода, работающего в режиме стабилизации скорости, составим систему уравнений, описывающих элементы и связи в электроприводе. При этом будем считать, что ток якоря непрерывный, а активные сопротивления преобразователя, включенные последовательно с обмоткой якоря двигателя, отнесем к якорю двигателя.

На первом участке электромеханической характеристики (ток якоря двигателя  $0 \leq I \leq I_{дв.мах}$ ) в электроприводе одновременно действует отрицательная обратная связь по току и отрицательная обратная связь по скорости. Система уравнений для этого режима работы электропривода запишется в следующем виде:

$$U_{урс} = U_{зс} - U_{ос};$$

$$U_{ос} = k_c \cdot \omega;$$

$$U_{зт} = k_{pc} \cdot U_{урс};$$

$$U_{урт} = U_{зт} - U_{от};$$

$$U_{от} = k_T \cdot I;$$

$$\begin{aligned}
U_{уп} &= k_{рТ} \cdot U_{урТ}; \\
E_{п} &= k_{п} \cdot U_{уп}; \\
E_{п} &= U_{дв}; \\
U_{дв} &= E_{дв} + I \cdot R_{яц}; \\
E_{дв} &= c \cdot \omega.
\end{aligned} \tag{6.35}$$

Решим систему уравнений (6.35) относительно угловой скорости  $\omega$ , получим

$$\omega = \frac{k_{дв} \cdot k_{п} \cdot k_{рТ} \cdot k_{рс} \cdot U_{зс}}{1 + k_{дв} \cdot k_{п} \cdot k_{рТ} \cdot k_{рс} \cdot k_{с}} - I \frac{k_{дв} \cdot (R_{яц} + k_{п} \cdot k_{рТ} \cdot k_{т})}{1 + k_{дв} \cdot k_{п} \cdot k_{рТ} \cdot k_{рс} \cdot k_{с}}, \tag{6.36}$$

где  $k_{дв} = 1/c$  – коэффициент передачи двигателя, управляемого по цепи обмотки якоря изменением напряжения;  $R_{яц} = R_{дв.гор} + R_{п}$  – сопротивление якорной цепи двигателя равно сумме сопротивлений двигателя и преобразователя.

Остальные параметры обозначены в соответствии со структурной схемой (см. рис. 6.21).

В случае применения в электроприводе ПИ-регуляторов скорости и тока, имеющих в статике коэффициенты усиления, равные собственным коэффициентам усиления операционных усилителей, на базе которых они выполнены, электромеханическая характеристика электропривода в режиме стабилизации скорости стремиться к горизонтальной прямой, параллельной оси абсцисс:

$$\begin{aligned}
\lim \omega &\rightarrow \frac{U_{зс}}{k_{с}} \\
k_{рс} &\rightarrow \infty \\
k_{рТ} &\rightarrow \infty
\end{aligned} \tag{6.37}$$

Так как собственные коэффициенты усиления операционных усилителей имеют хотя и большую, но все же конечную величину ( $k_{оу} = 20000 \div 40000$ ), скорость двигателя  $\omega$  будет падать с увеличением нагрузки на его валу. Это будет приводить к росту напряжения на выходе регулятора скорости. При некотором значении тока якоря двигателя  $I_{дв.мах}$  регулятор скорости входит в режим насыщения и на его выходе устанавливается максимально возможное напряжение насыщения  $U_{зт.мах}$ . Дальнейший рост нагрузки на валу двигателя не приводит к изменению напряжения на выходе регулятора скорости. Отрицатель-

ная обратная связь по скорости отключается. В электроприводе остается действовать только одна отрицательная обратная связь по току. Электропривод переходит в режим стабилизации тока якоря.

Для вывода уравнения электромеханической характеристики электропривода, работающего в режиме стабилизации тока, составим систему уравнений, описывающих элементы и связи в электроприводе:

$$\begin{aligned}
 U_{урт} &= U_{зт.мак} - U_{от}; \\
 U_{от} &= k_T \cdot I; \\
 U_{уп} &= k_{рТ} \cdot U_{урт}; \\
 E_{п} &= k_{п} \cdot U_{уп}; \\
 E_{п} &= U_{дв}; \\
 U_{дв} &= E_{дв} + I \cdot R_{яц}; \\
 E_{дв} &= c \cdot \omega.
 \end{aligned} \tag{6.38}$$

Решение системы уравнений (6.38) относительно угловой скорости  $\omega$  позволяет получить уравнение электромеханической характеристики электропривода в режиме стабилизации тока якоря:

$$\omega = k_{дв} \cdot k_{п} \cdot k_{рТ} \cdot U_{зт.мак} - I \cdot k_{дв} \cdot (R_{яц} + k_{п} \cdot k_{рТ} \cdot k_T). \tag{6.39}$$

При больших коэффициентах усиления регулятора тока  $k_{рТ}$  электромеханическая характеристика (6.39) принимает вид

$$\lim_{k_{рТ} \rightarrow \infty} \omega \rightarrow \infty - I \cdot \infty \tag{6.40}$$

Анализ выражения (6.40) показывает, что электромеханическая характеристика электропривода в режиме стабилизации тока якоря – вертикальная прямая со скоростью идеального холостого хода равной бесконечности, и коэффициентом при аргументе  $I$ , также равном бесконечности. Так как собственный коэффициент усиления операционного усилителя регулятора тока имеет все же конечную величину ( $k_{оу} = 20000 \div 40000$ ), то скорость двигателя  $\omega$  на участке стабилизации тока якоря будет падать с увеличением нагрузки на валу двигателя.

Решим выражение (6.39) относительно тока якоря  $I$ , получим

$$I = \frac{k_{п} \cdot k_{рТ} \cdot U_{зт.мак}}{R_{яц} + k_{п} \cdot k_{рТ} \cdot k_T} k_{дв} - \frac{\omega}{k_{дв} \cdot (R_{яц} + k_{п} \cdot k_{рТ} \cdot k_T)}. \tag{6.41}$$

При больших коэффициентах усиления регулятора тока в статике (6.41) преобразуется к виду

$$\lim_{k_{рТ} \rightarrow \infty} I \rightarrow \frac{U_{зт. \max}}{k_T} = I_{дв. \max}; \quad (6.42)$$

Электромеханические характеристики электропривода, построенные по уравнениям (6.36) и (6.41) для различных задающих напряжений приведены на рис. 6.23.

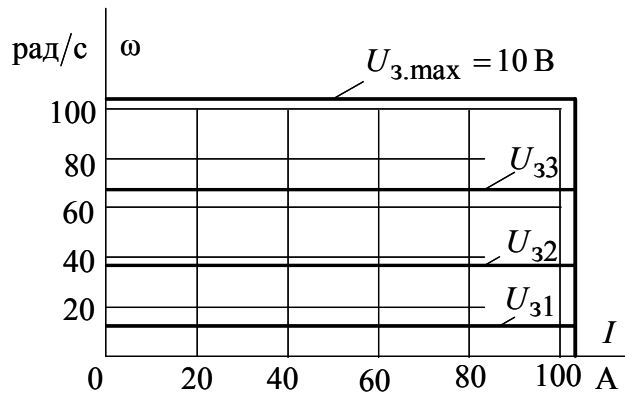


Рис. 6.23. Электромеханические характеристики двухконтурного электропривода с ПИ-регуляторами скорости и тока

В реверсивном электроприводе с двумя комплектами управляемых выпрямителей статические и динамические характеристики электропривода располагаются в четырех квадрантах.

## 6.2. Электроприводы переменного тока с асинхронными двигателями

### 6.2.1. Асинхронные электроприводы с регулированием напряжения обмоток статора

Как было показано в разделе 5, регулировать скорость вращения асинхронного двигателя можно, изменяя напряжение обмоток статора. Однако в разомкнутом электроприводе такое регулирование происходит в ограниченном диапазоне скоростей. Для электроприводов с постоянной нагрузкой на валу двигателя изменение скорости может происходить в диапазоне от синхронной  $\omega_0$  до скорости  $\omega_0(1 - s_k)$ . Для электроприводов с вентиляторной нагрузкой диапазон регулирования значительно расширяется и на практике может достигать значений  $D = 1:10$ . Однако указанное регулирование возможно только в хорошо отбалансированных вентиляторах с малым пусковым моментом  $M_0$ .

Увеличить диапазон регулирования скорости в асинхронных электроприводах с регулированием напряжений обмоток статора удается введением отрицательной обратной связи по скорости двигателя [13]. В таком электроприводе (см. рис. 6.24) асинхронный двигатель  $M$  питается по цепи обмоток статора от регулятора напряжения, собранного из трех пар встречно-параллельно включенных тиристоров  $VS1...VS6$ , управляемых от системы импульсно-фазового управления.

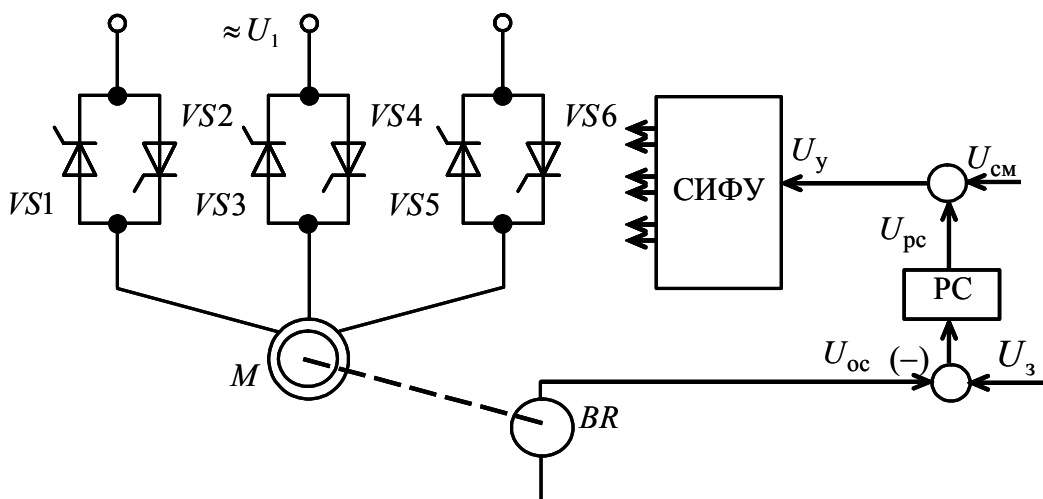


Рис. 6.24. Функциональная схема асинхронного электропривода с фазовым регулированием напряжения и отрицательной обратной связью по скорости

Напряжение управления  $U_y$  СИФУ образуется путем суммирования сигналов смещения  $U_{см}$  и регулятора скорости  $U_{pc}$ . Скорость вращения двигателя задается напряжением  $U_3$ , которое сравнивается на входе регулятора скорости РС с напряжением отрицательной обратной связи по скорости  $U_{oc}$ , формируемым датчиком скорости  $BR$ .

Для схемы рис. 6.24, с учетом линеаризации характеристик, можно записать

$$U_{1j} = k_{трн} \cdot k_1 \cdot U_y, \quad (6.43)$$

где  $U_{1j}$  – фазное напряжение обмоток статора асинхронного двигателя;  $k_{трн}$  – коэффициент передачи тиристорного регулятора напряжения;  $k_1$  – коэффициент передачи системы импульсно-фазового управления;  $U_y$  – напряжение управления СИФУ.

В свою очередь, напряжение управления

$$U_y = (U_3 - k_c \cdot \omega) k_{pc} + U_{см}, \quad (6.44)$$

где  $k_c$  – коэффициент обратной связи по скорости;  $k_{pc}$  – коэффициент усиления регулятора скорости;  $U_{cm}$  – напряжение смещения, необходимое для получения характеристики с минимальным моментом двигателя, равным моменту холостого хода.

Подставив (6.44) в (6.43), получим

$$U_{1j} = k_{трн} \cdot k_1 [(U_3 - k_c \cdot \omega)k_{pc} + U_{cm}]. \quad (6.45)$$

Механические характеристики в замкнутой системе образуются из множества характеристик разомкнутой системы. Принцип действия электропривода в замкнутой системе заключается в следующем. Предположим, что двигатель работал на характеристике с фазным напряжением  $U_{11}$  (рис. 6.25) с моментом  $M_{c1}$ , что соответствует скорости  $\omega_1$  электропривода. Предположим, что нагрузка на валу двигателя возросла и стала равной  $M_{c2}$ .

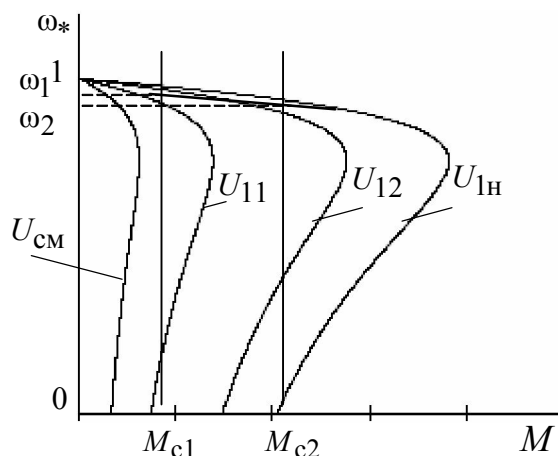


Рис. 6.25. Механические характеристики асинхронного электропривода

Так как момент двигателя  $M$  стал меньше момента сопротивления  $M_c$  на его валу, то в соответствии с уравнением движения скорость электропривода начинает падать. Это приводит к тому, что сигнал отрицательной обратной связи по скорости  $U_{oc} = k_c \cdot \omega$  уменьшается. Анализ уравнения (6.45) показывает, что в этом случае фазное напряжение  $U_{1j}$  возрастает и, следовательно, электропривод переходит на механическую характеристику, соответствующую фазному напряжению  $U_{12}$ . Новая точка установившейся работы электропривода соответствует скорости  $\omega_2$ . Результирующая характеристика замкнутой системы электропривода для задающего напряжения  $U_{32}$  более жесткая, а ее жесткость определяется общим коэффициентом усиления контура регули-

рования скорости. При снижении задающего напряжения до уровня  $U_{31}$  электропривод работает в режиме стабилизации скорости и на неустойчивом участке механической характеристики. Механические характеристики замкнутой системы ограничены слева характеристикой с минимальным моментом, определяемой напряжением смещения  $U_{см}$ , справа – естественной механической характеристикой двигателя, формируемой полностью открытыми тиристорами регулятора напряжения.

### 6.2.2. Структурная схема асинхронного электродвигателя, управляемого по цепи обмоток статора изменением напряжения

Составим структурную схему асинхронного двигателя, управляемого по цепи обмоток статора изменением напряжения. Если в первом приближении пренебречь влиянием электромагнитной инерции в цепях статора и ротора асинхронного двигателя, то структурную схему асинхронного двигателя можно найти из упрощенной формулы Клосса, представив ее в следующем виде:

$$M(U_*, s) = \frac{2 \cdot M_{кн} \cdot U_*^2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (6.46)$$

где  $M_{кн}$  – критический момент асинхронного двигателя при номинальном напряжении обмоток статора;  $U_* = \frac{U_{1j}}{U_{1н}}$  – относительное напряжение.

Подставив в (6.46) значение скольжения  $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ , получим после преобразований

$$M(U_*, \omega) = \frac{2 \cdot M_{кн} \cdot \omega_0 \cdot s_k \cdot (\omega_0 - \omega) \cdot U_*^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + s_k^2 \cdot \omega_0^2}. \quad (6.47)$$

Раскладывая уравнение (6.47) в ряд Тейлора в окрестности точки  $M = 0$ ;  $\omega = \omega_0$ , пренебрегая членами высшего порядка малости, можно получить

$$\Delta M = k_m \cdot \Delta U_* + k_\beta \cdot \Delta \omega, \quad (6.48)$$

где  $k_m = \frac{\Delta M}{\Delta U_*}$  – коэффициент чувствительности по моменту к изменению первой гармоники напряжения,  $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{В}^{-1}$ ;



$k_{\beta} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$  – жесткость механической характеристики асинхронного двигателя, Н·м·с/рад.

Как показали результаты расчетов в разделе 5.1.6 (см. рис. 5.18), при работе двигателя на участке механической характеристики от  $\omega = 0$  до  $\omega = \omega_0(1 - s_k)$  жесткость  $k_{\beta}$  – положительна, на участке от  $\omega_0(1 - s_k)$  до  $\omega_0$  жесткость – отрицательна.

Подставим (6.48) в уравнение движения (2.1), получим, перейдя от приращений к абсолютным величинам:

$$k_M \cdot U_* + k_{\beta} \cdot \omega - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (6.49)$$

Структурная схема асинхронного двигателя, составленная по (6.49), приведена на рис. 6.26.

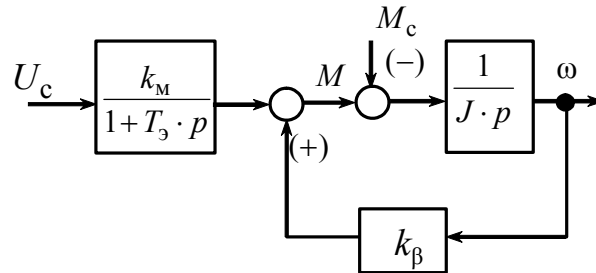


Рис. 6.26. Структурная схема асинхронного двигателя

Аналитическое выражение для определения жесткости  $k_{\beta}$  – (5.42).

Для упрощения определения  $k_{\beta}$  аппроксимируем естественную механическую характеристику асинхронного двигателя двумя прямыми  $a$  и  $b$ , как показано на рис. 6.27. Прямая  $a$  соответствует работе двигателя на устойчивом участке механической характеристики и проходит через точки идеального холостого хода  $\omega_0$  и номинальной скорости  $\omega_H$ . В этом случае приращение момента  $\Delta M = -M_H$ , скорости  $\Delta \omega = \omega_0 - \omega_H$ , тогда [14]

$$k_{\beta} = \frac{-M_H}{\omega_0 - \omega_H}, \quad \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад},$$

а в относительных единицах

$$k_{\beta*} = \frac{M_H / M_H}{(\omega_0 - \omega_H) / \omega_0} = -\frac{1}{s_H}, \quad \text{о. е.}, \quad (6.50)$$

где  $s_H$  – номинальное скольжение двигателя.

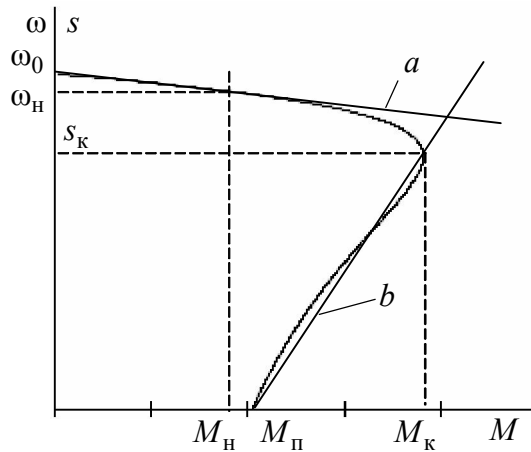


Рис. 6.27. Аппроксимация механической характеристики асинхронного двигателя

Прямая  $b$  соответствует работе асинхронного двигателя на неустойчивом участке механической характеристики и проходит через точки пускового  $M_{\text{п}}$  и критического момента  $M_{\text{к}}$ . На этом участке характеристики  $\Delta M = M_{\text{п}} - M_{\text{к}}$ , а  $\Delta \omega = -\omega_0(1 - s_{\text{к}})$ , тогда

$$k_{\beta} = \frac{M_{\text{п}} - M_{\text{к}}}{-\omega_0(1 - s_{\text{к}})}, \quad \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{рад}$$

или в относительных единицах

$$k_{\beta*} = \frac{(M_{\text{п}} - M_{\text{к}}) / M_{\text{п}}}{-\omega_0(1 - s_{\text{к}}) / \omega_0} = -\frac{k_{\text{п}} - k_{\text{макс}}}{(1 - s_{\text{к}})}, \quad \text{о. е.}, \quad (6.51)$$

где  $k_{\text{п}}$  – кратность пускового момента;

$k_{\text{макс}}$  – кратность максимального момента.

Аналитическое выражение для  $k_{\text{м}}$  можно найти из (6.46):

$$k_{\text{м}} = \frac{dM}{dU_*} = \frac{4 \cdot M_{\text{кн}} \cdot \omega_0 \cdot s_{\text{к}} \cdot (\omega_0 - \omega) \cdot U_*}{(\omega_0 - \omega)^2 + \omega_0^2 \cdot s_{\text{к}}^2}. \quad (6.52)$$

Рассчитанные по (6.52) значения коэффициента чувствительности по моменту  $k_{\text{м}}$  от скорости приведены на рис. 6.28.

Анализ выражения (6.52) показывает, что коэффициент  $k_{\text{м}}$  зависит от текущего значения скорости  $\omega$  и напряжения обмоток статора двигателя. Когда скорость равна синхронной  $\omega_0$ , то  $k_{\text{м}} = 0$  и изменение напряжения статора не приводит к изменению электромагнитного момента. При снижении скорости  $k_{\text{м}}$  сначала увеличивается, достигая макси-

мального значения при критическом скольжении  $s_k$ , а затем вновь уменьшается.

Максимальное значение коэффициента чувствительности по моменту определяется из уравнения

$$k_M = 2 \cdot M_{KH} \cdot U_* \quad (6.53)$$

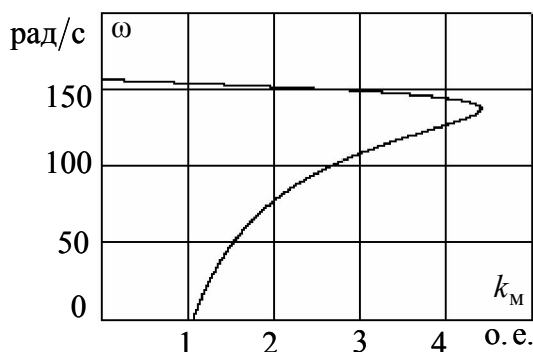


Рис. 6.28. Зависимость коэффициента чувствительности по моменту  $k_M$  от скорости асинхронного двигателя

При изменении напряжения обмоток статора асинхронного двигателя его электромагнитный момент изменяется пропорционально квадрату фазного напряжения. Однако из-за значительной индуктивности обмоток двигателя изменение момента протекает во времени примерно по экспоненциальному закону с постоянной времени

$$T_3 = \frac{L_1 + L_2'}{R_1 + R_2'} \quad (6.54)$$

где  $L_1 + L_2' = \frac{X_k}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}$  – индуктивность короткого замыкания.

Тогда электромагнитная часть двигателя описывается аperiodическим звеном, а его структурная схема с учетом электромагнитных процессов представлена на рис. 6.29.

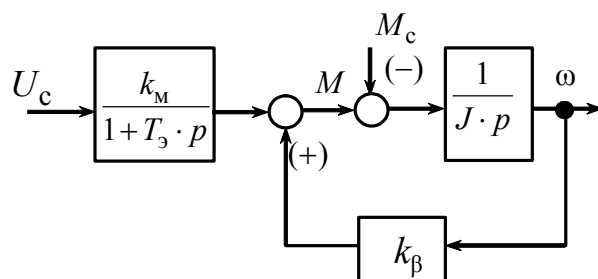


Рис. 6.29. Упрощенная структурная схема асинхронного двигателя с учетом электромагнитной инерции

### 6.2.3. Структурная схема асинхронного электропривода с регулированием напряжения статора

Линеаризованная структурная схема системы тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель (ТРН–АД) с отрицательной обратной связью по скорости, соответствующая функциональной схеме рис. 6.24, приведена на рис. 6.30.

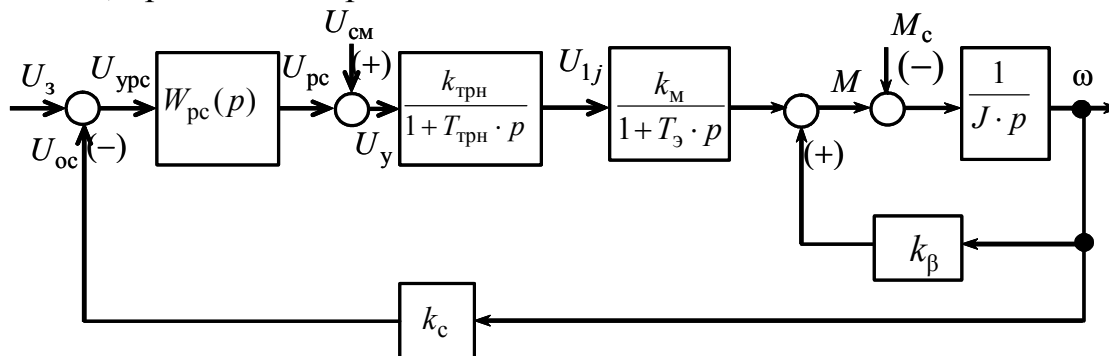


Рис. 6.30. Структурная схема асинхронного электропривода с регулированием напряжения статора

На рис. 6.30. приняты следующие обозначения:

$W_{рс}(p)$  – передаточная функция регулятора скорости;

$k_c = k_{дс} \cdot k_{ос}$  – коэффициент обратной связи по скорости, В · с/рад ;

$k_{дс}$  – коэффициент передачи датчика скорости, В · с/рад ;

$k_{ос}$  – коэффициент согласования, о.е.;

$k_{ТРН} = k_{п} \cdot k_1$  ;  $T_{ТРН}$  – коэффициент передачи и постоянная времени

тиристорного регулятора напряжения;

$J_{\Sigma}$  – момент инерции электропривода.

В качестве расчетного значения коэффициента чувствительности по моменту  $k_M$  принимаем его максимальное значение  $k_M = 2 \cdot M_{кн}$ , при котором условия устойчивости контура регулирования скорости наилучшие.

Примем  $k_{\beta} = 0$ , то есть механическая характеристика асинхронного двигателя в зоне регулирования скорости принимается абсолютно мягкой. Это допущение может быть приемлемым для синтеза параметров регулятора скорости, так как основной диапазон регулирования скорости расположен в зоне неустойчивых участков механических характеристик двигателя. Однако исследование переходных процессов необходимо производить с учетом максимального положительного значения  $\beta$ , при котором условия устойчивости системы также наилучшие.

Разомкнутый контур скорости, настроенный на модульный оптимум, должен иметь следующую передаточную функцию:

$$W_{\text{мо}}(p) = \frac{1}{a_{\mu\text{с}} \cdot T_{\mu\text{с}} \cdot p(T_{\mu\text{с}} \cdot p + 1)}, \quad (6.55)$$

где  $a_{\mu\text{с}} = 1 - 6$  – коэффициент настройки на модульный оптимум контура скорости;  $a_{\mu\text{с}} = 2$  – стандартный коэффициент настройки.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости рассматриваемой системы (см. рис. 6.30) определяется следующим образом:

$$W_{\text{кс}}(p) = W_{\text{рс}}(p) \cdot \frac{k_{\text{трн}}}{1 + T_{\text{трн}} \cdot p} \cdot \frac{k_{\text{м}}}{1 + T_{\text{э}} \cdot p} \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p} \cdot k_{\text{с}}. \quad (6.56)$$

С целью упрощения решения задачи синтеза параметров регулятора скорости понизим порядок передаточной функции контура скорости. Для чего найдем *суммарную малую постоянную времени*  $T_m = T_{\text{трн}} + T_{\text{э}}$ , тогда выражение (6.56) преобразуется к виду

$$W_{\text{кс}}(p) = W_{\text{рс}}(p) \cdot \frac{k_{\text{трн}} \cdot k_{\text{м}}}{1 + T_m \cdot p} \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p} \cdot k_{\text{с}}. \quad (6.57)$$

Приравнивая правые части выражений (6.56) и (6.57) и решая полученное уравнение относительно передаточной функции регулятора скорости, получаем

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{(1 + T_m \cdot p) \cdot J_{\Sigma} \cdot p}{a_{\mu\text{с}} \cdot T_{\mu\text{с}} \cdot p \cdot (T_{\mu\text{с}} \cdot p + 1) \cdot k_{\text{с}} \cdot k_{\text{трн}} \cdot k_{\text{м}}}. \quad (6.58)$$

Если принять равными  $T_m = T_{\mu\text{с}}$ , то регулятор скорости будет иметь передаточную функцию

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{J_{\Sigma}}{a_{\mu\text{с}} \cdot T_m \cdot k_{\text{с}} \cdot k_{\text{трн}} \cdot k_{\text{м}}} = k_{\text{рс}}. \quad (6.59)$$

Таким образом, при настройке контура скорости на модульный оптимум, регулятор скорости будет пропорционального типа с коэффициентом передачи  $k_{\text{рс}}$ .

Оценим в первом приближении устойчивость электропривода, выполненного в соответствии со структурной схемой (см. рис. 6.30), для чего найдем передаточную функцию замкнутой системы по управляющему воздействию

$$W_{\text{зу}}(p) = \frac{k_{\text{рс}} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{м}} / k_{\beta}}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}, \quad (6.60)$$

$$\text{где} \quad a_0 = \frac{k_{pc} \cdot k_{trn} \cdot k_m \cdot k_c}{k_\beta} \pm 1; \quad a_1 = T_m \pm T_{trn} \pm T_\theta;$$

$a_2 = T_m \cdot T_{trn} + T_m \cdot T_\theta \pm T_\theta \cdot T_{trn}$ ;  $a_3 = T_\theta \cdot T_{trn} \cdot T_m$  – коэффициенты характеристического уравнения.

Из критерия Лъенара – Шипара для характеристического уравнения третьего порядка следует, что рассматриваемая система будет устойчива при выполнении условия:

$$\begin{aligned} T_m \cdot T_{trn} + T_m \cdot T_\theta &> T_\theta \cdot T_{trn}; \\ T_m &> T_{trn} + T_\theta \\ k_{pc} \cdot k_{trn} \cdot k_m \cdot k_c / k_\beta &> 1; \end{aligned} \quad (6.61)$$

$$(T_m \cdot T_{trn} + T_m \cdot T_\theta \pm T_\theta \cdot T_{trn})(T_m \pm T_{trn} \pm T_\theta) - (k_{pc} \cdot k_{trn} \cdot k_m \cdot k_c \frac{1}{k_\beta} \pm 1) > 0.$$

Система уравнений (6.61) справедлива для реальных параметров электроприводов, как для положительных, так и отрицательных значений жесткости  $k_\beta$ .

В тех случаях, когда электропривод с П-регулятором скорости не обеспечивает заданных показателей статической погрешности механических характеристик в принятом диапазоне регулирования скорости, контур скорости следует настраивать на симметричный оптимум.

Разомкнутый контур скорости, настроенный на симметричный оптимум, должен иметь следующую передаточную функцию:

$$W(p)_{co} = \frac{4 \cdot T_{\mu c} \cdot p + 1}{a_{cc} \cdot T_{\mu c}^2 \cdot p^2 (T_{\mu c} p + 1)}, \quad (6.62)$$

где  $a_{cc} = 4 - 16$  – коэффициент настройки контура скорости на симметричный оптимум;  $a_{cc} = 8$  – стандартный коэффициент настройки.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости (см. рис. 6.30) с учетом суммарной малой постоянной времени определяется следующим уравнением:

$$W_{kc}(p) = W_{pc}(p) \cdot \frac{k_{trn} \cdot k_m}{1 + T_m \cdot p} \cdot \frac{1}{J_\Sigma \cdot p} \cdot k_c. \quad (6.63)$$

Приравнивая правые части выражений (6.62) и (6.63) и решая полученное уравнение относительно передаточной функции регулятора скорости, получим

$$W_{pc}(p) = k_{pc} + \frac{1}{T_{pc} \cdot p}, \quad (6.64)$$

где  $k_{pc} = \frac{4 \cdot J_{\Sigma}}{a_{cc} \cdot k_{тpн} \cdot k_M \cdot k_c \cdot T_m}$  – коэффициент усиления регулятора скорости;  $T_{pc} = \frac{a_{cc} \cdot k_{тpн} \cdot k_M \cdot k_c \cdot T_m^2}{J_{\Sigma}}$  – постоянная времени интегрирования регулятора скорости, с.

Графики переходных процессов момента и скорости электроприводов, настроенных на модульный и симметричный оптимум, определены для различных  $a_c$  [15]. Однако для асинхронного электропривода, имеющего участок механической характеристики с положительной жесткостью  $k_{\beta}$ , проверка переходного процесса на устойчивость представляет практический и теоретический интерес.

Для исследования системы ТРН–АД с отрицательной обратной связью по скорости «в большом» необходимо исследовать переходные режимы с учетом полной модели асинхронного двигателя.

Графики переходных процессов скорости  $\omega$  и момента  $M$  при пуске электропривода ТРН–АД и последующем набросе нагрузки до  $0,6M_n$  приведены на рис. 6.31. На рис. 6.32 построены динамические механические характеристики. При больших скачкообразных задающих напряжениях ( $U_{zc} > 0,6$  о.е.) сигнал управления регулятором скорости  $U_{ypc} = U_3 - U_{oc}$  велик и к двигателю прикладывается полное напряжение питающей сети, переходные процессы скорости и момента близки к процессам в разомкнутом электроприводе при его пуске прямым включением в сеть. Возникают колебательные процессы момента и скорости, которые рекомендуется уменьшить увеличением инерционности тиристорного регулятора напряжения, путем введения в цепь управления тиристорами дополнительной инерционности [16] и включением задатчика интенсивности на входе электропривода.

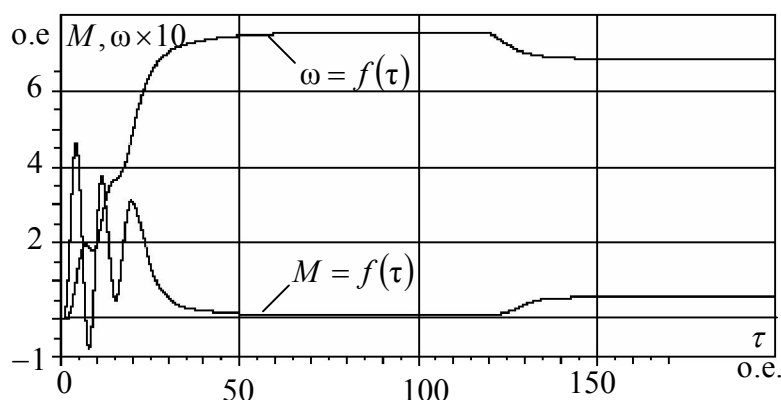


Рис. 6.31. Графики переходных процессов скорости  $\omega$  и момента  $M$  при пуске и набросе нагрузки в электроприводе ТРН–АД.  $U_3 = 8$  В

Увеличение инерционности тиристорного регулятора напряжения достигается введением на его вход дополнительного фильтра с постоянной времени  $T_{\phi} = (3 \div 5) \cdot T_{\text{ТРН}}$ . Эти меры позволяют улучшить качество переходных процессов, снизить влияние свободных составляющих момента и обеспечить отработку управляющих сигналов с минимальными перерегулированиями момента и скорости, однако точность поддержания скорости уменьшится, так как уменьшится коэффициент усиления регулятора скорости.

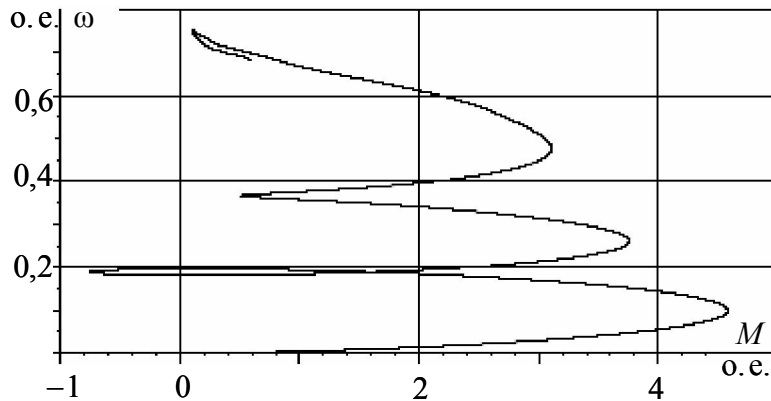


Рис. 6.32. Динамическая механическая характеристика при пуске и набросе нагрузки в электроприводе ТРН–АД.  $U_3 = 8 \text{ В}$

Статические механические характеристики электропривода ТРН–АД с отрицательной обратной связью по скорости возможно построить через установившиеся значения скорости и момента, полученные по результатам расчета переходных процессов. Механические характеристики электропривода ТРН–АД для задающих напряжений  $U_{31} = 8 \text{ В}$  и  $U_{32} = 3 \text{ В}$  приведены на рис. 6.33. Анализ механических характеристик показывает, что погрешность поддержания скорости электропривода на нижней механической характеристике с  $U_{32} = 3 \text{ В}$  составляет  $\delta \approx 80 \%$ .

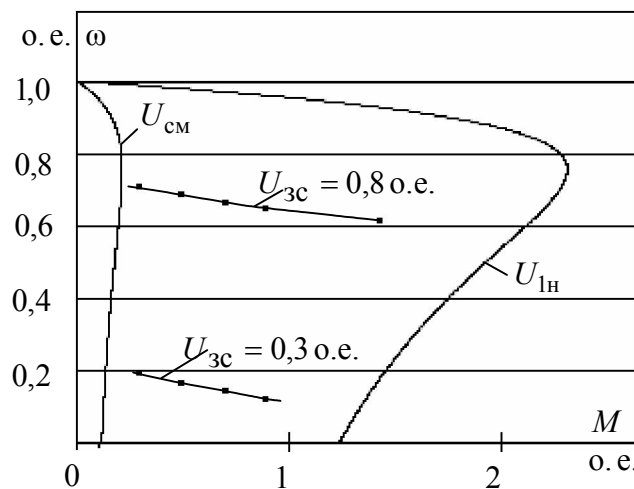


Рис. 6.33. Механические характеристики электропривода ТРН–АД с П-регулятором скорости



В тех случаях, когда указанная погрешность не удовлетворяет требованиям технологического процесса, необходимо параметры регулятора скорости выбирать по симметричному оптимуму, то есть регулятор скорости должен быть пропорционально-интегральным.

Графики переходных процессов скорости  $\omega$  и момента  $M$  при пуске электропривода ТРН–АД с отрицательной обратной связью по скорости и ПИ-регуляторе скорости при скачкообразном изменении задающего напряжения  $U_{3*} = 0,3$  о. е. и последующем набросе нагрузки до  $0,6 \cdot M_{H*}$  приведены на рис. 6.34.

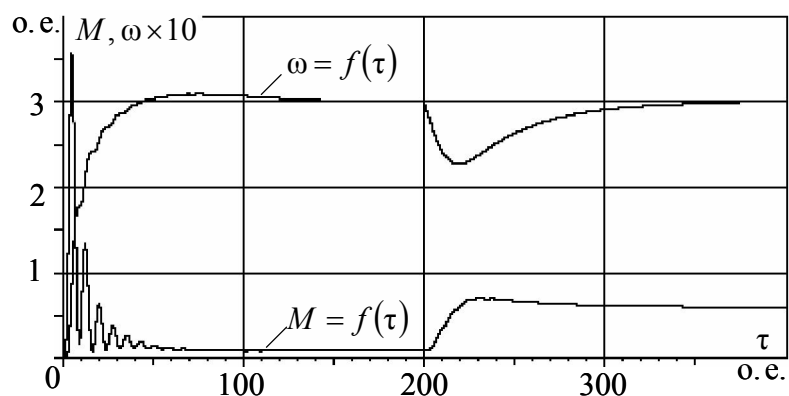


Рис. 6.34. Графики переходных процессов скорости  $\omega$  и момента  $M$  при скачкообразном изменении задающего напряжения  $U_{3*} = 0,3$  о. е. и набросе нагрузки

На рис. 6.35. построены динамические механические характеристики электропривода.

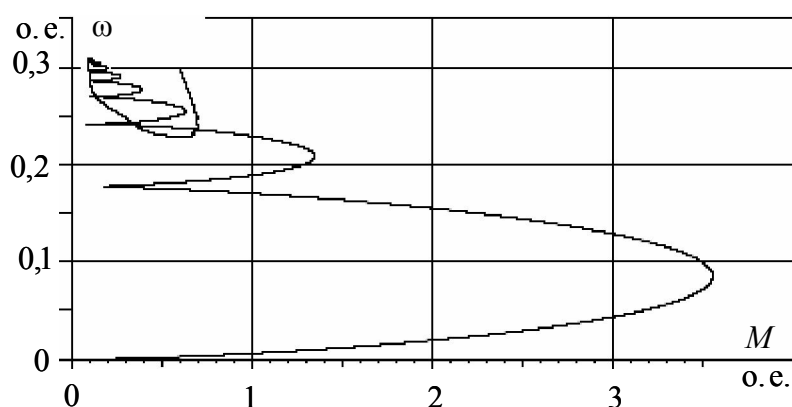


Рис. 6.35. Динамические механические характеристики пуска двигателя скачкообразным изменением задающего напряжения  $U_{3*} = 0,3$  о. е. и последующем набросе нагрузки до  $0,6M_{H*}$

Графики переходных процессов скорости  $\omega$  и момента  $M$  при пуске электропривода ТРН–АД с ПИ-регулятором скорости от датчика интенсивности при задающем напряжении  $U_{3*} = 0,3$  о.е. и последующем набросе нагрузки до  $0,6M_{н*}$  приведены на рис. 6.36.

При пуске электропривода от датчика интенсивности рассчитанные переходные процессы практически совпадают с желаемыми типовыми процессами регулируемого электропривода, колебания скорости и момента при пуске и набросе нагрузки не проявляются.

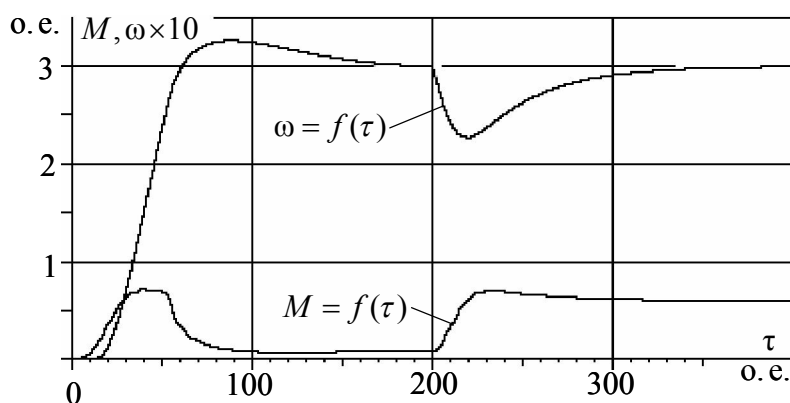


Рис. 6.36. Графики переходных процессов скорости  $\omega$  и момента  $M$  при пуске электропривода ТРН–АД с ПИ-регулятором скорости от датчика интенсивности при  $U_{3*} = 0,3$  о. е. и набросе нагрузки до  $0,6 \cdot M_{н*}$

Использование ТРН для пуска АД позволяет снизить пусковые потери на 10–15 % при условии выбора оптимального времени нарастания напряжения. Установлено [17], что рациональное время нарастания напряжения составляет  $0,02 \div 0,04$  с. (соответствует  $\tau = 6,2 \div 12,4$  о. е.). Увеличение времени нарастания напряжения приводит к росту пусковых потерь энергии, которые могут превысить потери прямого пуска. Однако при однократных пусках АД этими потерями можно пренебречь, а основным критерием выбора времени нарастания напряжения следует считать отсутствие значительных колебаний электромагнитного момента двигателя на начальных участках переходных процессов. В этом случае время нарастания напряжения может быть увеличено до  $0,1 \div 0,2$  с.

Динамические механические характеристики, рассчитанные по результатам переходных процессов пуска электропривода с датчиком интенсивности и моментом сопротивления  $M_{c1} = 0,1$  о. е. и последующим набросом нагрузки до момента сопротивления  $M_{c2} = 0,6$  о. е., приведены на рис. 6.37.

В отличие от электропривода с П-регулятором скорости переходные режимы электропривода ТРН–АД с ПИ-регулятором скорости характеризуются большим временем отработки возмущающего воздействия ( $\tau_B = 100$  о.е.). Установившиеся значения скорости для двух различных моментов сопротивления  $M_{c1} = 0,1$  о.е. и  $M_{c2} = 0,6$  о.е. отмечены на рис. 6.37 треугольниками и они практически равны.

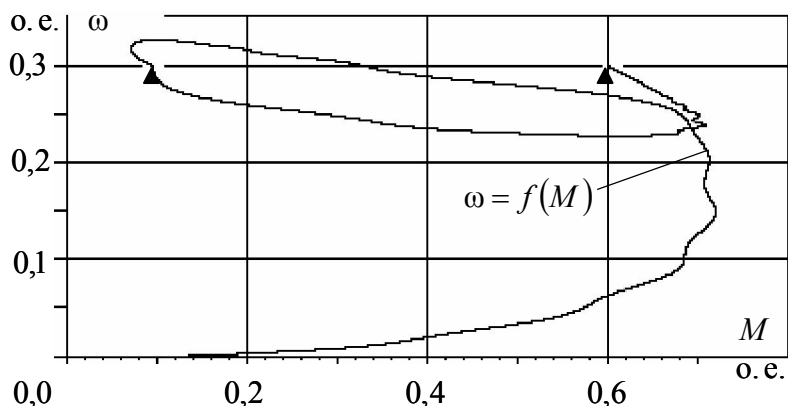


Рис. 6.37. Динамические механические характеристики при пуске электропривода ТРН–АД с ПИ-регулятором скорости от задатчика интенсивности при  $U_{3*} = 0,3$  о.е. и набросе нагрузки до  $0,6 \cdot M_{H*}$

Механические характеристики электропривода ТРН–АД с ПИ-регулятором скорости для задающих напряжений  $U_{3c1} = 8$  В и  $U_{3c2} = 3$  В приведены на рис. 6.38.

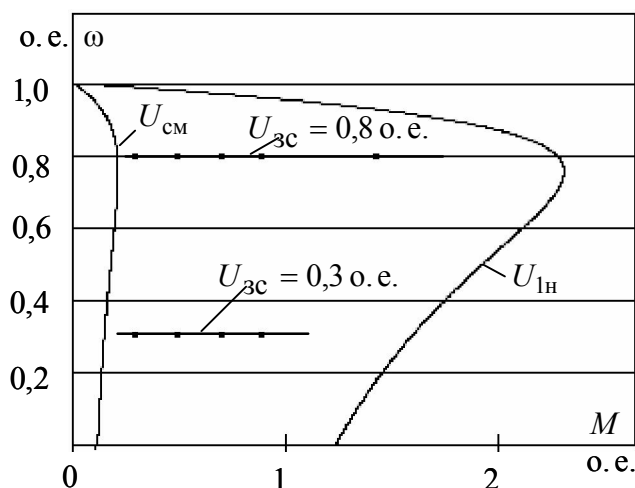


Рис. 6.38. Механические характеристики электропривода ТРН–АД с ПИ-регулятором скорости

Статические механические характеристики электропривода ТРН–АД с ПИ-регулятором скорости построены через установившиеся значения скорости и момента, полученные по результатам расчета переходных процессов.

Анализ механических характеристик показывает, что погрешность поддержания скорости электропривода на нижней механической характеристике с  $U_{32} = 3\text{ В}$  составляет  $\delta \approx 0,033\%$ , то есть механические характеристики замкнутой системы электропривода с ПИ-регулятором скорости близки к астатическим.

Выбор типа регулятора скорости в электроприводе ТРН–АД определяется в конечном итоге требованиями технологического процесса.

#### 6.2.4. Система преобразователь частоты – асинхронный двигатель с положительной обратной связью по току

Основные законы регулирования скорости асинхронного двигателя класса  $U_{1j}/f_{1j}$  при питании его от инвертора напряжения были рассмотрены в разделе 5. Теоретически и практически доказано, что в классе законов  $U_{1j}/f_{1j}$  невозможно одновременно обеспечить удовлетворительные механические и энергетические характеристики в широком диапазоне скоростей и изменения нагрузки. Основная причина этого – возрастание влияния активного сопротивления обмотки статора при снижении частоты питающего напряжения. В асинхронных частотно-регулируемых электроприводах со скалярным управлением, кроме законов регулирования класса  $U_{1j}/f_{1j}$ , получили применение и другие законы регулирования. Схема замещения асинхронной машины, пригодная для анализа как установившихся, так и переходных режимов работы при любой частоте  $f_{1j}$  питающего напряжения  $U_{1j}$  обмоток статора, приведена на рис. 6.39.

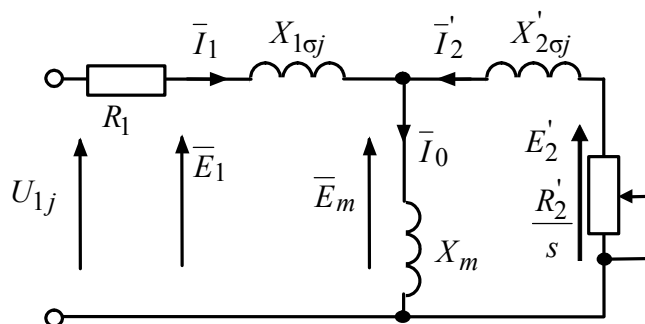


Рис. 6.39. Схема замещения асинхронной машины в установившемся режиме при частотном управлении

В соответствии со схемой замещения (рис. 6.39) можно записать следующие уравнения:

$$U_{1j} = E_1 + R_1 \cdot I_1; \quad (6.65)$$

$$U_{1j} = E_m + (R_1 + j \cdot X_{1\sigma j}) I_1; \quad (6.66)$$

$$U_{1j} = E_2' + (R_1 + j \cdot X_{1\sigma j}) I_1 + j \cdot X_{2\sigma j}' \cdot I_2'. \quad (6.67)$$

Таким образом, компенсируя падения напряжения на сопротивлениях  $R_1$ ,  $R_1 + j \cdot X_{1\sigma j}$ ,  $R_1 + j \cdot X_{1\sigma j}$  и  $X_{2\sigma j}'$ , можно получить частотные законы регулирования скорости классов

$$\frac{E_{1j}}{f_{1j}}, \frac{E_{mj}}{f_{1j}}, \frac{E_{2j}'}{f_{1j}}.$$

В соответствии с уравнениями математической модели асинхронного двигателя в неподвижной системе координат, условие поддержания постоянного соотношения между ЭДС  $E_1$  и частотой напряжения статора  $f_1$  в статике является и условием стабилизации потокосцепления статора  $\psi_1$ . Регулирование класса  $\frac{E_{mj}}{f_{1j}}$  – это регулирование с постоянным потокосцеплением в воздушном зазоре  $\psi_m$ , а регулирование

класса  $\frac{E_{2j}'}{f_{1j}}$  – регулирование с постоянным потокосцеплением ротора.

Если при изменении нагрузки на валу двигателя поддерживать постоянными соответствующие значения ЭДС  $E_1, E_m$  или  $E_2'$ , то механические характеристики асинхронного двигателя получат вид, показанный на рис. 6.40.

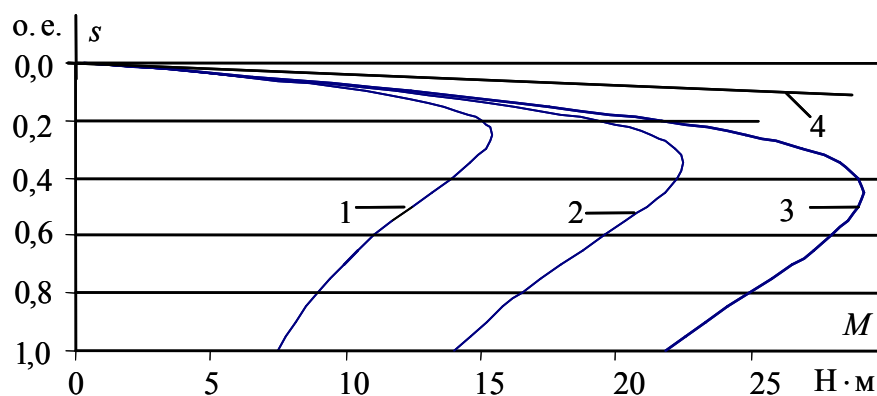


Рис. 6.40. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных законах регулирования:

$$1 - \frac{U_1}{f_1} = \text{const}; \quad 2 - \frac{E_1}{f_1} = \text{const}; \quad 3 - \frac{E_m}{f_1} = \text{const}; \quad 4 - \frac{E_2'}{f_1} = \text{const}$$

Анализ механических характеристик, приведенных на рис. 6.40, показывает, что для стабилизации скорости при изменении нагрузки на валу двигателя предпочтение следует отдавать методу регулирования с  $E_2' = \text{const}$ . Однако такое регулирование предполагает повышение напряжения  $U_{1j}$  по сравнению с номинальным  $U_{1н}$  при всех значениях нагрузки, что в большинстве случаев приводит к насыщению магнитной цепи асинхронного двигателя и его перегреву. Поэтому на практике наибольшее распространение получили такие способы частотного регулирования скорости, как  $E_{1j}/f_{1j} = \text{const}$ ;  $E_{1j}/f_{1j}^2 = \text{const}$ ;  $E_{1j}/\sqrt{f_{1j}} = \text{const}$ . При регулировании скорости в классе законов  $E_{1j}/f_{1j}$  необходимо повышать фазное напряжение  $U_{1j} = E_{1j} + I_1 \cdot R_1$  только на величину падения напряжения  $I_1 \cdot R_1$  на активном сопротивлении обмотки статора, а способ регулирования скорости асинхронного двигателя получил название – частотное регулирование с  $IR$ -компенсацией.

Реализация управления компенсирующего падения напряжения на активном сопротивлении статора возможна как по отклонению, так и по возмущению, со скалярной или векторной  $IR$ -компенсацией.

### 6.2.5. Частотное управление асинхронным электроприводом со скалярной $IR$ -компенсацией

Структурная схема системы скалярного частотного управления с  $IR$ -компенсацией приведена на рис. 6.41. Задатчик интенсивности ЗИ формирует кривую и темп разгона двигателя. Сигналом задания скорости является задающее напряжение  $U_3$ . Блок «преобразователь частота – напряжение» ПЧН формирует требуемую зависимость скалярного управления между частотой и напряжением преобразователя, чем и устанавливает один из принятых способов частотного регулирования скорости класса  $E_{1j}/f_{1j}$ .

При скалярной  $IR$ -компенсации сигнал управления  $U_y$  является суммой сигналов регулирования  $U_p$  и положительной обратной связи по току  $U_{кор}$ :

$$U_y = U_p + U_{кор} = U_p + k_{км} \cdot R_1 \cdot I, \quad (6.68)$$

где  $k_{км}$  – коэффициент положительной обратной связи по току;

$R_1$  – активное сопротивление обмотки статора асинхронного двигателя;

$I$  – сигнал, пропорциональный действующим значениям токов  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  обмоток статора асинхронного двигателя.

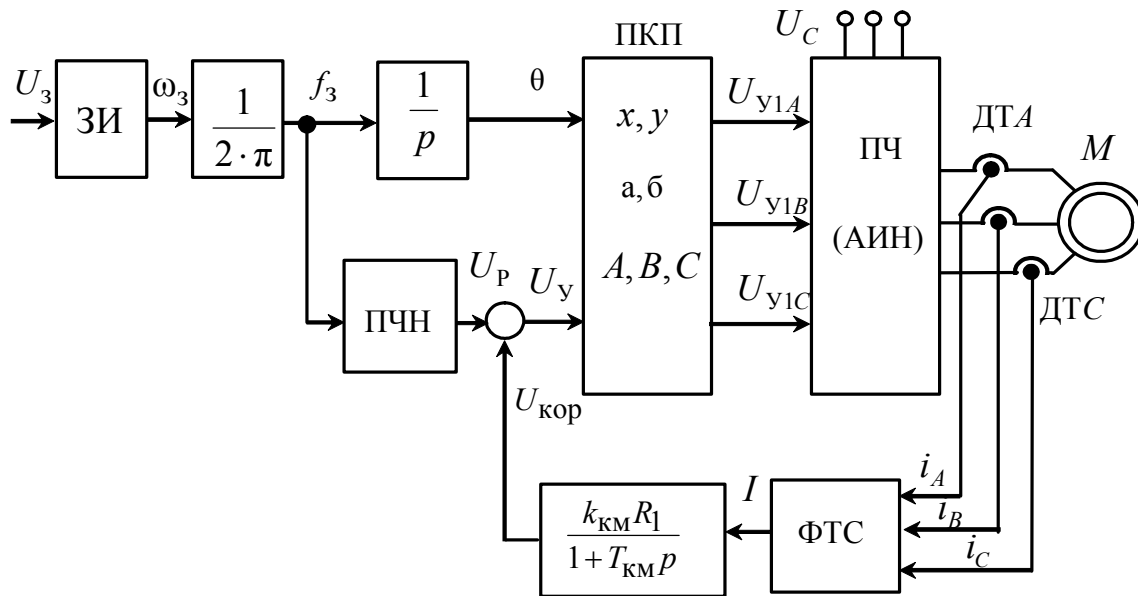


Рис. 6.41. Структурная схема скалярного частотного управления с  $IR$ -компенсацией

Сигнал управления  $U_y$  является входным для прямого координатного преобразователя (ПКП), на выходе которого формируется три синусоидальных напряжения управления  $U_{y1A}$ ,  $U_{y1B}$ ,  $U_{y1C}$ , сдвинутые относительно друг друга на угол  $\pm 2\pi/3$ , с амплитудами, пропорциональными напряжению управления. Сигналы  $U_{y1A}$ ,  $U_{y1B}$ ,  $U_{y1C}$  формируют фазные напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН).

Принцип действия системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода с положительной обратной связью по току заключается в следующем. Предположим, что асинхронный двигатель работал на характеристике 1 (рис. 6.42) с моментом на валу двигателя, равным  $M_1$ . Если момент на валу двигателя увеличится и станет равным  $M_2$ , то возрастет и ток каждой фазы статора двигателя  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ , а следовательно, и сигнал  $I$  формирователя тока статора (ФТС).

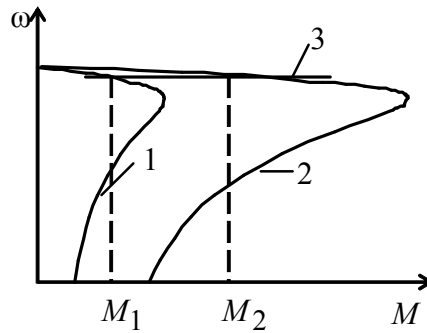


Рис. 6.42. Механические характеристики электропривода (кривые 1, 2) и результирующая характеристика 3 при наличии положительной обратной связи по току

Увеличится и корректирующее напряжение положительной обратной связи  $U_{кор}$ , вычисляемое по выходному току  $I$  звеном с передаточной функцией

$$W(p) = k_{км} \cdot R_1 / (1 + T_{км} \cdot p), \quad (6.69)$$

где  $T_{км}$  – постоянная времени задержки контура тока.

С ростом корректирующего сигнала возрастет и сигнал управления  $U_y$ , что приводит в конечном итоге к росту фазного напряжения  $U_{1j}$  асинхронного двигателя и увеличению его критического момента, который пропорционален квадрату фазного напряжения –  $M_K \equiv U_{1j}^2$ . Характеристика 2 соответствует возросшему фазному напряжению  $U_{1\phi}$ . В результате действия положительной обратной связи электропривод формирует механическую характеристику замкнутой системы 3, жесткость которой определяется коэффициентом  $k_{км}$ .

Для формирования сигнала положительной обратной связи по току может использоваться модуль тока статора  $|I_1|$ , активная составляющая тока статора  $\text{Re} I_1$ , ток  $I_d$  в звене постоянного тока. В большинстве преобразователей сигнал, пропорциональный мгновенному значению тока статора двигателя, снимается с трех резистивных шунтов  $R_{шA}$ ,  $R_{шB}$  и  $R_{шC}$ , включенных в цепь переменного тока инвертора напряжения

Однако если через обмотки статора асинхронного двигателя не протекают токи нулевой последовательности, то достаточно двух датчиков тока, а ток в третьей фазе, например  $B$ , можно определить через токи фаз  $A$  и  $C$ :

$$i_B = -(i_A + i_C), \quad (6.70)$$



где  $i_A; i_B; i_C$  – мгновенные значения токов в фазах  $A, B$  и  $C$ .

Векторные диаграммы при скалярной  $IR$ -компенсации для случаев идеального холостого хода и наличия нагрузки на валу двигателя изображены на рис. 6.43.

При скалярной компенсации меняется только модуль напряжения  $|\overline{U}_{1j}|$  обмотки статора асинхронного двигателя без изменения фазового угла, что приводит к непостоянству векторов ЭДС  $\overline{E}_1$  и потокосцепления  $\overline{\psi}_1$ . Возможны дополнительные возмущения в системе, связанные с изменением фазового угла вектора  $\overline{\psi}_1$ .

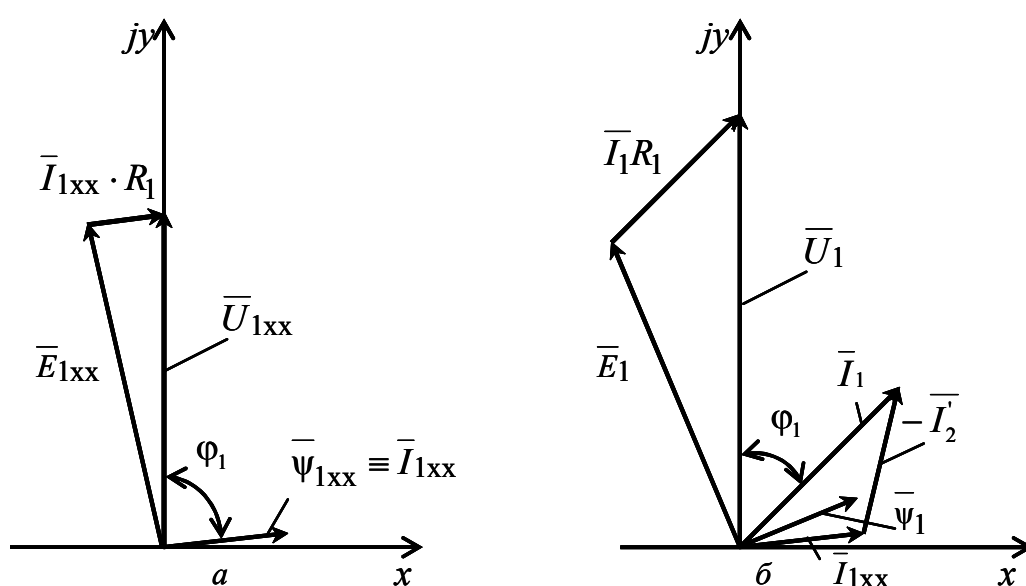


Рис. 6.43. Векторные диаграммы асинхронного двигателя при скалярной  $IR$ -компенсации:  $a$  – режим холостого хода;  $b$  – при наличии нагрузки на валу двигателя

Несмотря на этот недостаток, разомкнутые структуры частотного регулирования скорости на основе автономных инверторов напряжения со скалярной  $IR$ -компенсацией находят широкое применение в приводах длительного режима работы с диапазоном регулирования  $D \leq 1:50$ .

### 6.2.6. Частотное управление асинхронным электроприводом с векторной $IR$ -компенсацией

Если вектор напряжения  $\overline{U}_{1j}$  формируется векторным сложением напряжения задания  $\overline{U}_{zi}$  и сигнала  $\bar{i} \cdot R_1 \cdot k_{KM}$ , вводимого с целью ком-

пенсации падения напряжения в фазах  $A$ ,  $B$  и  $C$  двигателя, то такое управление называют частотным управлением с векторной  $IR$ -компенсацией. Векторное сложение сигналов производится во временной области, то есть суммируются сигналы переменного напряжения.

Функциональная схема частотного управления с векторной  $IR$ -компенсацией приведена на рис. 6.44.

В схеме (см. рис. 6.44) на выходе прямого координатного преобразователя ПКП формируются три синусоидальных напряжения  $U_{3A}$ ,  $U_{3B}$ ,  $U_{3C}$ , сдвинутые относительно друг друга на угол  $\mp 2\pi/3$ , с амплитудами, пропорциональными задающему напряжению  $U_3$ , и частотой  $f$ , определяемой законом регулирования. Напряжения  $\bar{U}_{3A}$ ,  $\bar{U}_{3B}$ ,  $\bar{U}_{3C}$  суммируются с сигналами  $\bar{i} \cdot R_1 \cdot k_{\text{KM}}$  положительных компенсационных обратных связей по току в соответствии с выражением

$$\bar{U}_{yi} = \bar{U}_{zi} + \bar{i}_i \cdot R_1 \cdot k_{\text{KM}}, \quad (6.71)$$

где  $\bar{U}_{yi}$  – вектор напряжения управления  $i$ -й фазой автономного инвертора напряжения;  $\bar{U}_{zi}$  – вектор напряжения задания  $i$ -й фазы;  $\bar{i}_i$  – ток  $i$ -й фазы асинхронного двигателя.

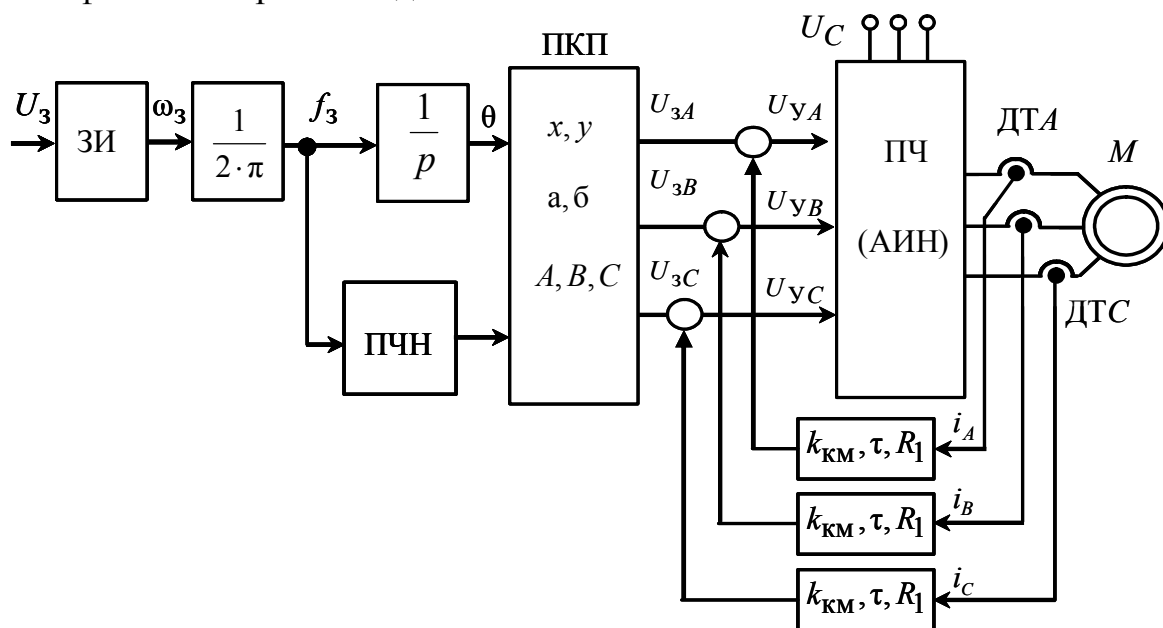


Рис. 6.44. Функциональная схема частотного управления асинхронным электроприводом с векторной  $IR$ -компенсацией

Результирующие сигналы управления  $\bar{U}_{yA}$ ,  $\bar{U}_{yB}$ ,  $\bar{U}_{yC}$  формируют фазные напряжения на выходе преобразователя частоты ПЧ. Векторные диаграммы асинхронного электропривода с векторной  $IR$ -компенсацией приведены на рис. 6.45.

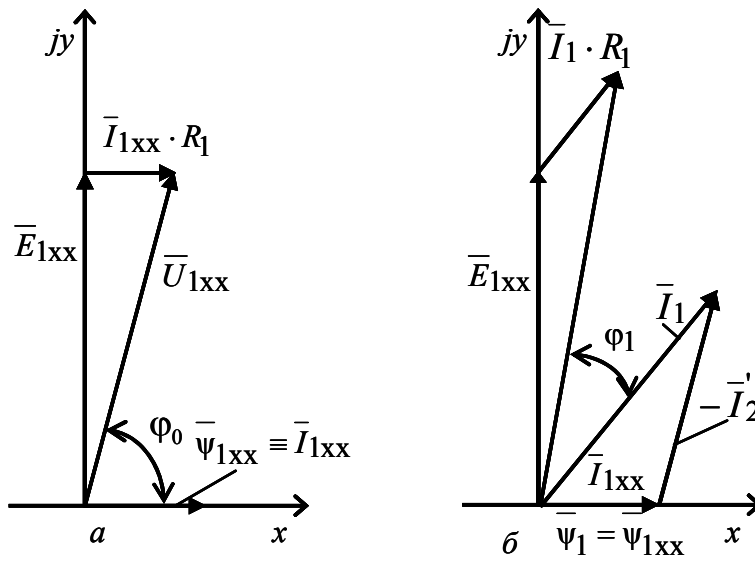


Рис. 6.45. Векторные диаграммы асинхронного электропривода с векторной  $IR$ -компенсации: а – режим холостого хода; б – при наличии нагрузки на валу двигателя

При векторной  $IR$ -компенсации векторы ЭДС  $\bar{E}_1$  и потокосцепления  $\bar{\psi}_1$  остаются постоянными при изменении нагрузки, а модуль вектора напряжения  $|\bar{U}_1|$  и его фазовый угол меняются. Как показали исследования, постоянство вектора потокосцепления  $\bar{\psi}_1$  способствует устойчивой работе электропривода. В электроприводах с микропроцессорным управлением векторная  $IR$ -компенсация дополнительной настройки, как правило, не требует, то есть при выборе такого закона регулирования настройка производится по заложенной в электропривод программе автоматически.

Электромеханическая характеристика, определяющая зависимость приведенного тока ротора от скольжения для режима неполной  $IR$ -компенсации, определяется выражением

$$I_2' = \frac{U_{1j}}{\sqrt{\left( R_{1\text{экв}} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( \frac{R_{1\text{экв}} \cdot R_2'}{s \cdot X_{\text{лн}} \cdot f_{1*}} \right)^2}}, \quad (6.72)$$

где  $R_{1\text{экв}} = R_1 - k_{\text{км}} \cdot R_1 > 0$  – эквивалентное активное сопротивление цепи обмотки статора;  $f_{1*} = f_{1j} / f_{1\text{н}}$  – относительная частота;  $f_{1\text{н}}$  – номинальное значение частоты напряжения статора асинхронного двигателя;  $f_{1j}$  – регулируемое значение частоты напряжение статора.

Ток статора  $I_1$  через приведенный ток ротора  $I_2'$  можно найти по формуле [5]

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}, \quad (6.73)$$

$$\text{где } \sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}} \cdot f_{1*}}{\sqrt{\left(R_{1\text{ЭКВ}} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2 f_{1*}^2}}. \quad (6.74)$$

Так как регулирование скорости асинхронного двигателя производится изменением и напряжения обмотки статора, и частоты питающего напряжения, то ток холостого хода  $I_0$  можно найти в соответствии со схемой замещения (см. рис. 6.39) по следующему уравнению:

$$I_0 = \frac{U_{1j}}{\sqrt{R_{1\text{ЭКВ}}^2 + (X_{1\text{СН}} \cdot f_{1*} + X_{\text{мн}} \cdot f_{1*})^2}}. \quad (6.75)$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя для режима неполной  $IR$ -компенсации, при переменных значениях величины и частоты напряжения питания определяется выражением

$$M = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s_j \left[ X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_{1\text{ЭКВ}} + \frac{R_2'}{s_j} \right)^2 + \left( \frac{R_{1\text{ЭКВ}} \cdot R_2'}{s_j \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right]}. \quad (6.76)$$

При полной  $IR$ -компенсации, когда  $k_{\text{км}} = 1$ , а  $R_{1\text{ЭКВ}} = 0$ , происходит регулирование с законами класса  $E_{1j}/f_{1j} = \text{const}$ . Механическая характеристика электропривода представляется выражением

$$M = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s_j \left[ X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( \frac{R_2'}{s_j} \right)^2 \right]}. \quad (6.77)$$

Критический момент асинхронного двигателя будет равен

$$M_{\text{к}} = \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} \cdot X_{\text{кн}} \cdot f_{1*}}, \quad (6.78)$$

а критическое скольжение

$$s_{\text{к}j} = \pm \frac{R_2'}{X_{\text{кн}} \cdot f_{1*}}. \quad (6.79)$$

Механические характеристики асинхронного двигателя, построенные по выражению (6.77) при частотном регулировании скорости и законом регулирования  $E_{1j}/f_{1*} = \text{const}$ , приведены на рис. 6.46.

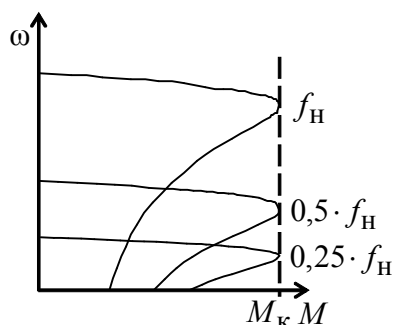


Рис. 6.46. Механические характеристики асинхронного электропривода при частотном регулировании скорости с  $IR$ -компенсацией и законе регулирования  $E_{1j}/f_{1*} = \text{const}$

Как следует из анализа рис. 6.46, при регулировании скорости асинхронного двигателя с законом регулирования  $E_{1j}/f_{1*} = \text{const}$  (полная  $IR$ -компенсация) критический момент асинхронного двигателя остается постоянным.

Механические характеристики асинхронного двигателя, работающего в системе автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель с положительной обратной связью по току, рассчитанные по выражению (6.76), приведены на рис. 6.47. Частотное регулирование скорости осуществляется в соответствии с законом регулирования  $\frac{U_{1j}}{\sqrt{f_{1j}}} = \text{const}$ . Характеристики приведены для различных частот  $f_{1j}$  и коэффициентов положительной обратной связи по току  $k_{\text{км}}$ . С целью наглядного представления о регулировании скорости механические характеристики на рисунке приведены в координатах  $M = f(\omega_*)$ .

Анализ характеристик, приведенных на рис. 6.47, показывает значительное увеличение критического момента асинхронного двигателя особенно на низких скоростях вращения и увеличение их жесткости.

Из выражения (6.75) следует, что при снижении частоты  $f_{1j}$  напряжения обмоток статора ток намагничивания  $I_0$  возрастает. Увеличится также и поток намагничивания двигателя. Поэтому для стабилизации потока намагничивания, по мере уменьшения частоты напряжения статора, в некоторых электроприводах коэффициент положительной обратной связи по току  $k_{\text{км}}$  уменьшают.

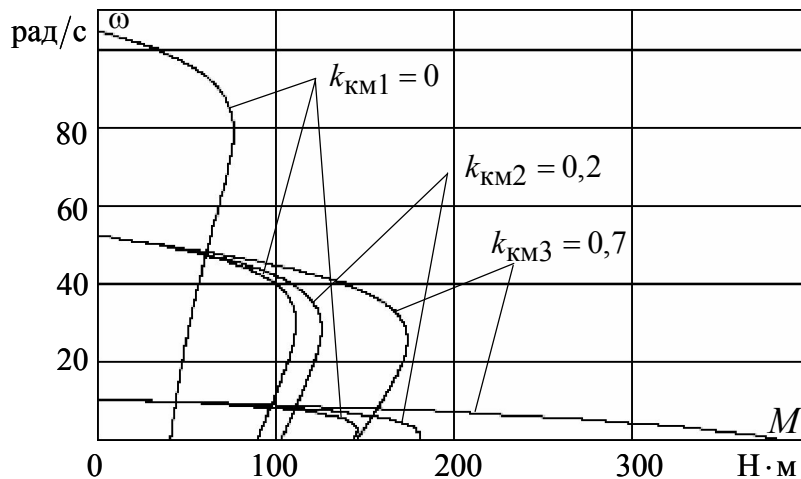


Рис. 6.47. Механические характеристики асинхронного электропривода при частотном регулировании скорости с векторной  $IR$ -компенсацией

Известно, что положительная обратная связь в контуре регулирования физической величины не способствует увеличению устойчивости этого контура, поэтому чем больше коэффициент положительной обратной связи по току  $k_{KM}$ , тем больше будет колебательность электропривода. Это подтверждают теоретические и экспериментальные исследования асинхронных частотно-регулируемых электроприводов с  $IR$ -компенсацией. На рис. 6.48 и рис. 6.49 приведены графики переходных процессов момента и скорости пуска электроприводов с различными коэффициентами положительной обратной связи по току  $k_{KM}$ .

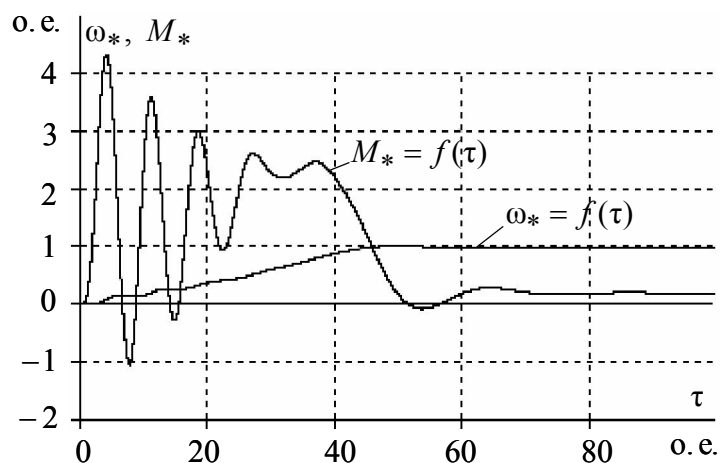


Рис. 6.48. Переходные процессы пуска асинхронного двигателя на частоту  $f_{1max*} = 1,0$  в электроприводе автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель с положительной обратной связью по току.  
 $k_{KM1*} = 0,2$ ,  $T_{KM*} = 0,31415$

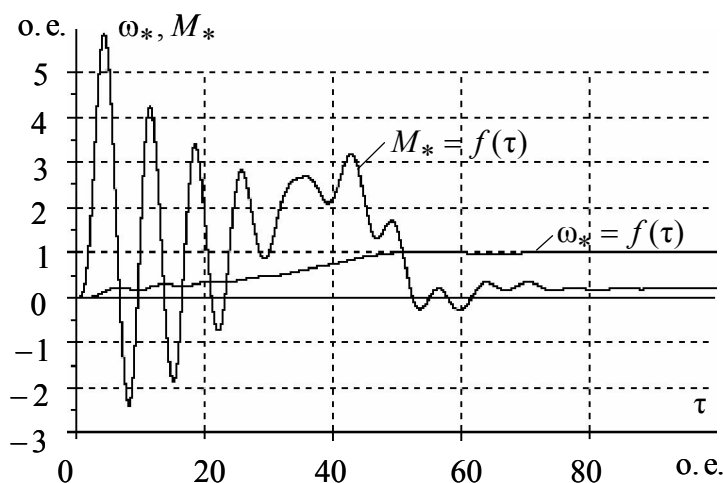


Рис. 6.49. Переходные процессы пуска асинхронного двигателя на частоту  $f_{1\max*} = 1,0$  в электроприводе автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель с положительной обратной связью по току.

$$k_{\text{KM}1*} = 0,7, T_{\text{KM}*} = 0,31415$$

Анализ переходных процессов скорости и момента рис. 6.48 и рис. 6.49 показывает, что увеличение коэффициента положительной обратной связи по току с  $k_{\text{KM}1*} = 0,2$  до  $k_{\text{KM}2*} = 0,7$  привело к увеличению колебательности электромагнитного момента электродвигателя как на начальном, так и на конечном участках переходного процесса пуска двигателя. Поэтому, при окончательной настройке электропривода, постоянную времени  $T_{\text{KM}}$  необходимо увеличить, как и рекомендуют методики настройки электроприводов автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель с положительной обратной связью по току. Стандартная постоянная времени  $T_{\text{KM}}$  контура тока, устанавливаемая в заводской настройке фирм АВВ, НІТАСНІ, Siemens, Веспер, составляет 0,02 с.

### 6.2.7. Частотное управление асинхронным электроприводом с компенсацией момента и скольжения

Сигналом тока можно воздействовать как на канал напряжения, так и на канал частоты. Функциональная схема электропривода с положительными обратными связями по току в канале регулирования напряжения и частоты приведена на рис. 6.50. При одновременном воздействии на канал частоты (компенсация скольжения) и компенсации момента поддержание скорости на требуемом уровне можно обеспечить при меньших значениях напряжения  $U_{1j}$ .

Система электропривода работает следующим образом. Асинхронный двигатель работал на характеристике 1 (см. рис. 6.51) с моментом на валу двигателя, равным  $M_1$ . Если момент на валу двигателя увеличится и станет равным  $M_2$ , то возрастет и ток каждой фазы статора двигателя  $i_A, i_B, i_C$  и сигнал  $I$  формирователя тока статора (ФТС). Увеличится как корректирующее напряжение положительной обратной связи  $U_{кор}$ . Напряжение  $U_{кор}$  вычисляется по выходному току  $I$  звеном с передаточной функцией

$$W(p) = k_{км} / (1 + T_{км} \cdot p), \quad (6.80)$$

где  $k_{км}$  – коэффициент компенсации момента (коэффициент положительной обратной связи по току в канале регулирования напряжения);  $T_{км}$  – постоянная времени задержки компенсации момента.

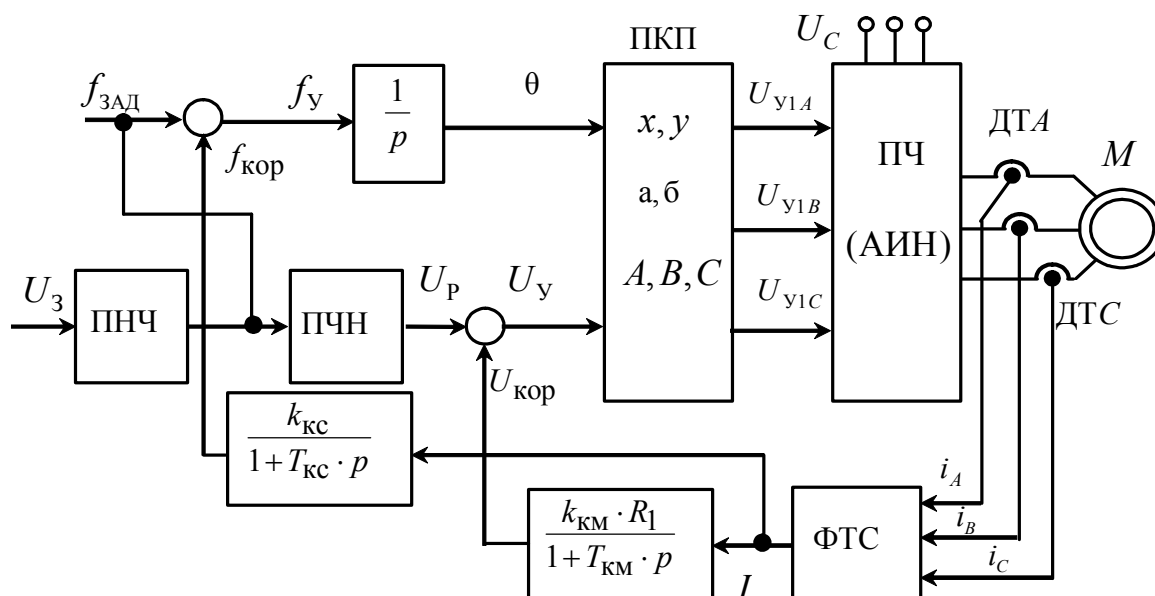


Рис. 6.50. Функциональная схема частотного управления асинхронным электроприводом с компенсацией момента и скольжения

Сигнал положительной обратной связи по частоте  $f_{кор}$  вычисляется звеном с передаточной функцией

$$W(p) = k_{кк} / (1 + T_{кк} p), \quad (6.81)$$

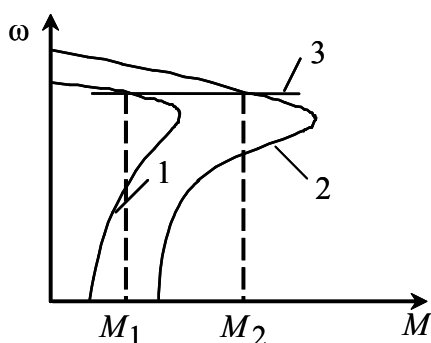
где  $k_{кк}$  – коэффициент компенсации скольжения (коэффициент положительной обратной связи по току в канале регулирования частоты);  $T_{кк}$  – постоянная времени задержки компенсации скольжения.

С ростом сигнала положительной обратной связи возрастает как сигнал управления  $U_y$  канала напряжения, что приводит в конечном



итоге к росту фазного напряжения  $U_{1j}$  асинхронного двигателя, так и сигнал управления  $f_y$  канала частоты, что приводит к росту частоты  $f_{1j}$ . Характеристика 2 соответствует возросшему фазному напряжению  $U_{1j}$  и увеличенной частоте  $f_{1j}$  обмоток статора асинхронного двигателя.

В результате действия корректирующих положительных обратных связей электропривод формирует механическую характеристику замкнутой системы 3.



*Рис. 6.51. Механические характеристики электропривода (кривые 1, 2) и результирующая характеристика 3 при наличии компенсации момента и скольжения*

Анализ характеристик, приведенных на рис. 6.51, показывает, что в случае дополнительного воздействия на канал частоты можно обеспечить поддержание скорости на требуемом уровне при меньших значениях фазного напряжения  $U_{1j}$ . Установлено [1], что структуры с компенсацией частоты оказываются чувствительными к изменению параметров настроек, а с сильной положительной обратной связью могут оказаться неустойчивыми. В рассматриваемой системе компенсация момента необходима только в зоне низких значений частот. Поэтому с ростом задающей частоты  $f_{зад}$  (или, что то же самое, задающего напряжения  $U_3$  при дистанционном управлении) коэффициент  $k_{км}$  можно уменьшить вплоть до нуля, меняя его, например, в функции  $f_{зад}$ .

### **6.2.8. Система векторного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости**

В частотно-регулируемых асинхронных электроприводах векторное управление связано как с изменением частоты и текущих значений переменных (напряжения, тока статора, потокосцепления), так и со вза-

имной ориентацией их векторов в декартовой системе координат. За счет регулирования и амплитудных значений переменных, и фазовых углов между их векторами достигается наиболее качественное регулирование скорости, момента и тока асинхронного двигателя, как в статике, так и динамике. В тех случаях, когда по требованиям технологического процесса диапазон регулирования скорости асинхронного двигателя не должен превышать  $D \leq 1:100$ , применяются бездатчиковые системы асинхронных электроприводов с векторным управлением. В таких системах информация о текущих значениях и пространственных положениях векторов потокосцепления и значениях скорости вращения асинхронного двигателя определяется косвенно по мгновенным значениям токов и напряжений фаз двигателя на основе математической модели асинхронного двигателя. Бездатчиковые системы векторного управления асинхронным двигателем из-за нестабильности параметров схемы замещения двигателя уступают системам с прямым векторным управлением.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя можно определить через произведение вектора  $\overline{\psi_2^*}$ , комплексно сопряженного с вектором потокосцепления обмотки ротора  $\overline{\psi_2}$ , и вектора тока статора  $\overline{I_1}$  [7].

Уравнения электромагнитного момента асинхронного двигателя может быть найдено в следующем виде:

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_2'} (\psi_{2x} \cdot I_{1y} - \psi_{2y} \cdot I_{1x}). \quad (6.82)$$

Если сориентировать систему координат по действительной составляющей потокосцепления ротора  $\psi_{2x}$ , то мнимая составляющая вектора потокосцепления ротора  $\psi_{2y}$  будет равна нулю. В этом случае момент асинхронного двигателя пропорционален произведению действительной составляющей потокосцепления ротора  $\psi_{2x}$  и мнимой составляющей тока статора  $I_{1y}$ :

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot X_m}{2 \cdot X_2'} (\psi_{2x} \cdot I_{1y}). \quad (6.83)$$

На основе выражения (6.83) строятся системы векторного управления асинхронным электроприводом с ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

Функциональная схема асинхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением и ориентацией по вектору потокосцепления ротора приведена на рис. 6.52.

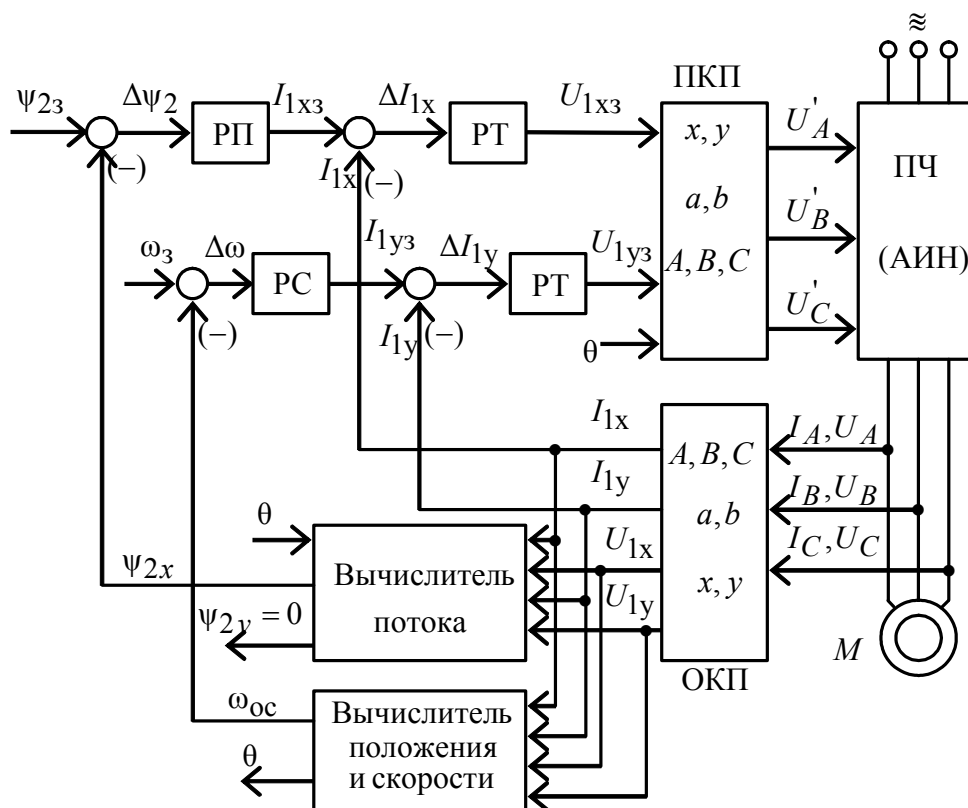


Рис. 6.52. Функциональная схема асинхронного электропривода с бездатчиковым векторным управлением с ориентацией по вектору потокосцепления ротора

- На рис. 6.52 приняты следующие обозначения физических величин:
- $\Psi_{23}$  – сигнал задания потокосцепления ротора;
  - $\omega_3$  – сигнал задания скорости вращения электропривода;
  - $\Psi_{2x}$  – сигнал, пропорциональный действительной составляющей потокосцепления ротора;
  - $\Psi_{2y}$  – сигнал, пропорциональный мнимой составляющей потокосцепления ротора;
  - $I_{1x3}$  – сигнал задания действительной составляющей тока обмотки статора;
  - $I_{1y3}$  – сигнал задания мнимой составляющей тока обмотки статора;

$I_{1x}$  – сигнал, пропорциональный действительной составляющей тока статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$I_{1y}$  – сигнал, пропорциональный мнимой составляющей тока статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$U_{1xz}$  – сигнал задания действительной составляющей напряжения обмоток статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$U_{1yz}$  – сигнал задания мнимой составляющей напряжения обмоток статора асинхронного двигателя во вращающейся системе координат;

$U_{1x}$  – составляющая вектора напряжения обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $x$  вращающейся системы координат;

$U_{1y}$  – составляющая вектора напряжения обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $y$  вращающейся системы координат;

$I_A, I_B, I_C$  – токи фаз обмоток статора асинхронного двигателя;

$U_A, U_B, U_C$  – напряжения фаз обмоток статора асинхронного двигателя.

Схема содержит прямой (ПКП) и обратный (ОКП) координатные преобразователи. Преобразователи координат необходимы так как, что построение системы управления электроприводом переменного тока возможно только во вращающейся системе координат, а токи и напряжения обмоток асинхронного двигателя – гармонические сигналы неподвижной трехфазной системы координат. Взаимный перевод из одной системы координат в другую выполняют координатные преобразователи.

Регуляторами системы управления в соответствии с задающими сигналами скорости  $\omega_3$  и потокосцепления  $\psi_{23}$  и сигналами обратной связи формируются сигналы управления во вращающейся системе координат. В прямом координатном преобразователе управляющие сигналы переводятся в сигналы  $U'_A, U'_B, U'_C$  неподвижной системы координат, которые управляют инвертором.

Обратный координатный преобразователь сначала пересчитывает мгновенные значения напряжений трехфазной системы координат  $A, B, C$  в неподвижную систему координат  $a, jb$  :

$$U_{1a} = \frac{2}{3} \left[ U_{1A} - \frac{1}{2} (U_{1B} + U_{1C}) \right], \quad (6.84)$$

$$U_{1b} = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_{1B} - U_{1C}).$$

Затем напряжения переводятся во вращающуюся систему координат  $x, jy$ :

$$U_{1x} = U_{1a} \cos \theta + U_{1b} \sin \theta, \quad (6.85)$$

$$U_{1y} = -U_{1a} \sin \theta + U_{1b} \cos \theta. \quad (6.86)$$

По этим же формулам выполняется обратное преобразование для расчета токов  $I_{1x}, I_{1y}$ .

Мгновенные значения пространственных углов поворота векторов потокосцепления, тока и напряжения вычисляются на основании скорости вращения поля статора:

$$\theta = \int_0^t \omega dt. \quad (6.87)$$

В современных электроприводах переменного тока потокосцепление ротора  $\psi_{2x}$  вычисляется через уравнения динамической модели асинхронного двигателя с помощью вычислителей потока различного типа. Уравнение для расчета потокосцепления ротора  $\psi_{2x}$  может быть получено из решения системы уравнений, описывающих работу асинхронного двигателя в динамике во вращающейся системе координат [7]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{1x}}{dt} &= U_{1x} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1x} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2x} \right) + \omega_{\text{кс}} \cdot \psi_{1y}; \\ \frac{d\psi_{1y}}{dt} &= U_{1y} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1y} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2y} \right) - \omega_{\text{кс}} \cdot \psi_{1x}; \\ \frac{d\psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R_2'}{X_2' \cdot \sigma} \left( \psi_{2x} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1x} \right) + (\omega_{\text{кс}} - \omega) \cdot \psi_{2y}; \\ \frac{d\psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R_2'}{X_2' \cdot \sigma} \left( \psi_{2y} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1y} \right) - (\omega_{\text{кс}} - \omega) \cdot \psi_{2x}, \end{aligned} \quad (6.88)$$

где  $\omega$  – скорость вращения ротора;  $\psi_{1x}$  – составляющая вектора потокосцепления обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $x$  вращающейся системы координат;  $\psi_{1y}$  – составляющая вектора потокосцепле-

ния обмотки статора, ориентированная вдоль оси  $y$  вращающейся системы координат;  $\sigma$  – коэффициент рассеяния.

Вычислитель потока решает совместно систему уравнений (6.88) относительно составляющих вектора потокосцепления ротора во вращающейся системе координат при

$$\omega_k = 2 \cdot \pi \cdot f_1, \quad (6.89)$$

где  $f_1$  – частота напряжения обмоток статора двигателя.

В бездатчиковых асинхронных электроприводах с векторным управлением информация о скорости вращения электродвигателя рассчитывается вычислителем положения и скорости. В бездатчиковых электроприводах вычисление скорости производится через легко измеряемые напряжения на выходе инвертора, к которому подключен асинхронный двигатель и токи фаз статора двигателя.

В основу принципа построения систем бездатчикового векторного управления положено математическое описание асинхронного двигателя в неподвижной системе координат  $a, jb$  [7]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{1a}}{dt} &= U_{1a} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1a} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2a} \right); \\ \frac{d\psi_{1b}}{dt} &= U_{1b} - \frac{R_1}{X_1 \cdot \sigma} \left( \psi_{1b} - \frac{X_m}{X_2} \psi_{2b} \right); \\ \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\frac{R_2'}{X_2' \cdot \sigma} \left( \psi_{2a} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1a} \right) - \omega \cdot \psi_{2b}; \\ \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\frac{R_2'}{X_2' \cdot \sigma} \left( \psi_{2b} - \frac{X_m}{X_1} \psi_{1b} \right) + \omega \cdot \psi_{2a}; \\ \Psi_{1a} &= L_1 \cdot i_{1a} + L_m \cdot i_{2a}; \\ \Psi_{2b} &= L_1 \cdot i_{1b} + L_m \cdot i_{2b}. \end{aligned} \quad (6.90)$$

Наличие скорости  $\omega$  в системе уравнений (6.90) позволяет определить ее значение через значения других переменных.

Если предположить, что составляющие потокосцепления ротора  $\psi_{2a}$  и  $\psi_{2b}$  в неподвижной системе координат известны, то можно определить его модуль и угол поворота

$$\Psi_2 = \sqrt{\psi_{2a}^2 + \psi_{2b}^2}, \quad (6.91)$$

$$\theta_\psi = \arctg\left(\frac{\psi_{2b}}{\psi_{2a}}\right). \quad (6.92)$$

Зная угол поворота  $\theta_\psi$ , можно легко вычислить скорость вращения двигателя, взяв производную от  $\theta_\psi$  из выражения (6.92)

$$\omega = \frac{d\theta_\psi}{dt} = \frac{d\left(\arctg\left(\frac{\Psi_{2b}}{\Psi_{2a}}\right)\right)}{dt}. \quad (6.93)$$

Производная от  $\arctg\alpha$  может быть найдено в виде [23]

$$\frac{d(\arctg\alpha)}{dt} = \frac{1}{1+\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt}. \quad (6.94)$$

Если  $\alpha = \frac{\Psi_{2b}}{\Psi_{2a}}$ , тогда

$$\omega = \frac{\Psi_{2a}^2}{\Psi_{2b}^2} \cdot \left( \frac{\Psi_{2a} \frac{d\Psi_{2b}}{dt} - \Psi_{2b} \frac{d\Psi_{2a}}{dt}}{\Psi_{2a}^2} \right). \quad (6.95)$$

В тех случаях, когда бездатчиковые системы векторного управления асинхронными двигателями не позволяют обеспечить требуемый диапазон регулирования скорости и качество переходных процессов, применяют системы векторного управления с датчиками скорости.

### 6.2.9. Система векторного управления асинхронным электроприводом с датчиком скорости

Для механизмов, требующих диапазон регулирования скорости  $D \geq 1:1000$ , применяются системы векторного управления асинхронным электроприводом с датчиком скорости. В настоящее время асинхронные электродвигатели со встроенными датчиками скорости не выпускаются, поэтому у потребителя возникают определенные трудности по установке датчиков непосредственно на вал двигателя. При установке датчика скорости необходимо эксцентриситет и несоосность вала датчика и двигателя свести к минимуму.

Функциональная схема системы электропривода с векторным управлением асинхронным электроприводом и датчиком скорости приведена на рис. 6.53

В приведенном на рис 6.53 варианте схемы питание двигателя осуществляется от автономного инвертора напряжения со звеном постоянного тока. Регуляторы потока, скорости и тока выполнены во вращающейся системе координат, а система электропривода построена по принципу подчиненного регулирования. Вычислитель потока определя-

ет текущее значение потокосцепления  $\psi_{2x}$ , решая систему уравнений (6.88).

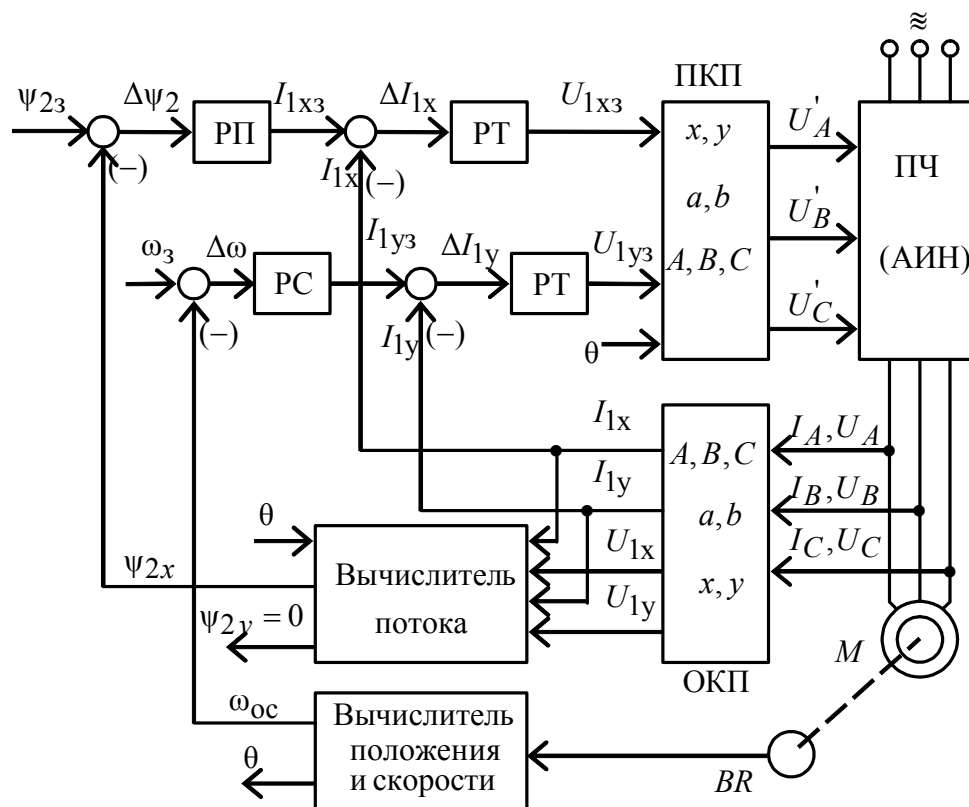


Рис. 6.53. Функциональная схема системы электропривода с векторным управлением асинхронным электроприводом и датчиком скорости

В настоящее время в электроприводах переменного тока используются импульсные (частотные) датчики скорости, частота импульсов на выходе которых пропорциональна скорости вращения двигателя:

$$f_{дс} = \frac{z_p \cdot \omega}{2 \cdot \pi}, \quad (6.96)$$

где  $z_p$  – число меток импульсного датчика скорости.

Вычислитель скорости определяет скорость непосредственным счетом импульсов датчика скорости  $BR$  в соответствии с выражением (6.96) на высокой скорости вращения электропривода и по периоду на низкой скорости, заполняя период  $T_{дс} = 1/f_{дс}$  импульсами высокой частоты. Угол поворота  $\theta$  вычисляется на основании скорости вращения поля статора в соответствии с уравнением (6.87).



Графики переходных процессов скорости, момента и потокосцепления при пуске асинхронного электропривода с векторным управлением приведены на рис. 6.54.

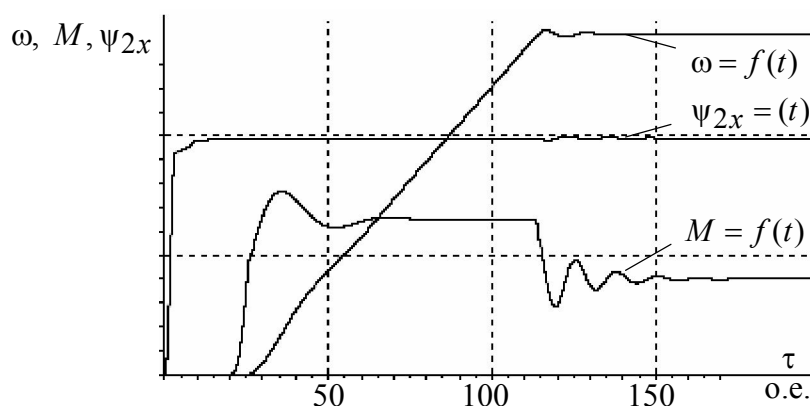


Рис. 6.54. Графики переходных процессов при пуске асинхронного электропривода с векторным управлением

Как следует из анализа графиков, пуск асинхронного электропривода происходит при постоянном потокосцеплении ротора. Кривые изменения скорости и момента аналогичны соответствующим характеристикам в двухконтурных электроприводах постоянного тока с подчиненным регулированием.

### Контрольные вопросы и задания

1. С какой целью ограничивают ток и момент двигателя постоянного тока при пусках, торможениях, регулировании скорости?
2. Что такое обратная связь?
3. Поясните по функциональной схеме рис. 6.2 принцип действия электропривода с токовой отсечкой.
4. Что представляет собой датчик тока в электроприводах постоянного тока?
5. За счет чего можно увеличить точность поддержания заданного параметра в замкнутой системе регулирования?
6. Чем опасно перерегулирование физической величины, например тока, в переходных режимах?
7. С какой целью в электропривод вводят две отрицательные обратные связи по скорости и току?
8. Какие устройства в электроприводах служат датчиками скорости?

9. Почему системы подчиненного регулирования получили преимущественное распространение в электроприводах?
10. Поясните по функциональной схеме рис. 6.20 принцип действия электропривода, выполненного по принципу подчиненного регулирования.
11. В чем отличие систем с П- и ПИ-регуляторами ?
12. Поясните назначение фильтров в электроприводе. Каково назначение фильтра низких частот?
13. Объясните назначение регуляторов в электроприводе. С какой целью в электропривод устанавливают П- или ПИ-регуляторы?
14. Поясните состав и принцип действия линеаризованной структуры двигателя постоянного тока.
15. Какое запаздывание вносят в систему регулирования фильтры и преобразователи?
16. В чем состоит проблема управления асинхронным электроприводом?
17. В чем состоит различие скалярного и векторного управления?
18. Какого диапазона регулирования можно добиться в различных системах асинхронного электропривода?
19. За счет каких обратных связей возможно увеличение жесткости механической характеристики асинхронного частотно-регулируемого электропривода?
20. Дайте сравнительную оценку различным способам стабилизации скорости в асинхронном электроприводе.
21. Какие факторы ограничивают коэффициент положительной обратной связи по току статора асинхронного двигателя?
22. Укажите достоинства и недостатки систем векторного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости.
23. Укажите область применения асинхронных электроприводов с фазовым регулированием скорости и отрицательной обратной связью по скорости.
24. Поясните по функциональной схеме принцип действия асинхронного электропривода с фазовым регулированием скорости и отрицательной обратной связью по скорости.
25. Поясните состав и принцип действия линеаризованной модели асинхронного двигателя рис. 6.29.
26. Какие законы скалярного частотного регулирования скорости асинхронного электродвигателя применяются на практике?
27. Поясните принципы, положенные в основу частотного управления асинхронным электроприводом со скалярной  $IR$ -компенсацией.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова.– М.: Энергоатомиздат, 1989.– 688 с.
2. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода: учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
3. Башарин А. В., Голубев Ф. Н., Кепперман В. Г. Примеры расчетов автоматизированного электропривода. – Л., Энергия, 1971. – 440 с.
4. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. – М.: Энергоатомиздат. 1982.
5. Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Материалы международной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 269–272.
6. Автоматизированный электропривод промышленных установок / под ред. Г. Б. Онищенко.– М.: РАСХН-2001. – 520 с.
7. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты: – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
8. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
9. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.
10. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование систем в MATLAB 6.0: учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001.– 320 с.
11. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей под. ред. Л. Г. Мамякоянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат. 1984. – 240 с.
12. Анисимов В. А., Горнов А. О., Москаленко В. В. Тиристорные пусковые устройства в электроприводах переменного тока // Привод и управление. – 2002. – №1. – С. 32–34.
13. Шубенко В. А., Браславский И. Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. – М.: Энергия, 1972. – 200 с.
14. Усынин Ю. С. Системы управления электроприводов: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
15. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат: Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

16. Козлитин Л. С. Исследование асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения в цепи статора: автореферат диссертации. – М.: Изд-во МЭИ, 1968.

17. Браславский И. Я., Костылев А. В., Степанюк Д. П. Анализ энергопотребления в управляемых переходных режимах систем ТПН-АД. Электроприводы переменного тока// Труды международной тринадцатой научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. С. 241–244.

18. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. с изм., доп. принятыми Главгосэнергонадзором РФ в период с 01.01.92 по 01.01.99. –СПб.: Изд-во ДЕАН, 1999 – 928 с.

19. Москаленко В. В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат; 1986. – 416 с.

20. Ключев В. И. Теория электропривода: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

21. Чернышев И. А., Чернышев А. Ю. Синтез параметров регуляторов системы тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель// Электромеханические преобразователи энергии: материалы международной науч.-техн. конф., 20–22 октября 2005 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 237–240.

22. Вайнтруб О. Ш., Гендельман Б. Р. и др. Системы управления электроприводами с синхронными двигателями с тиристорным возбуждением и автоматическим регулированием возбуждения// Автоматизированный электропривод: материалы всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу. – М.: Энергия, 1980. – С. 180–186.

23. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике: для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

24. Онищенко Г. Б. Электрический привод. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.

25. Водовозов В.М. Теория и системы электропривода. – Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. – 306 с.

26. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

## 7. ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. . . . .	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. . . . .	4
1.1. Общие положения. . . . .	4
1.2. Современный автоматизированный электропривод и тенденции его развития. . . . .	7
2. МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА. . . . .	9
2.1. Уравнение механического движения. . . . .	9
2.2. Механические характеристики электродвигателей. . . . .	11
2.3. Механические характеристики производственных механизмов . . .	13
2.4. Статическая устойчивость механического движения. . . . .	17
2.5. Приведение моментов к одной оси вращения. . . . .	18
2.6. Приведение моментов инерции к одной оси вращения. . . . .	20
3. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА .	23
3.1. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения. . . . .	23
3.2. Статическая и динамическая характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения. . . . .	28
3.3. Определение параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения по каталожным данным. . . . .	29
3.4. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Общие положения. . . . .	34
3.5. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения с помощью резисторов в цепи обмотки якоря. . . . .	35
3.6. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения обмотки якоря . . . . .	37
3.7. Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения. . . .	40
3.8. Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. . . . .	43
3.9. Регулирование скорости двигателя постоянного тока последова- тельного возбуждения с помощью резисторов в цепи обмотки якоря. . . . .	47
3.10. Регулирование скорости двигателя постоянного тока последова- тельного возбуждения изменением напряжения . . . . .	49
3.11. Изменение направления вращения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения . . . . .	51
3.12. Переходные процессы в электроприводах с двигателями постоянного тока . . . . .	52

3.13. Принципы автоматизации управления в релейно-контакторных электроприводах с двигателями постоянного тока. . . . .	63
3.13.1. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу скорости. . . . .	64
3.13.2. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу времени. . . . .	65
3.13.3. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу тока. . . . .	67
4. СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА. . . . .	71
4.1. Общие положения. . . . .	71
4.2. Система генератор-двигатель. . . . .	71
4.3. Электроприводы с полупроводниковыми преобразователями. . . . .	73
4.3.1. Система тиристорный преобразователь-двигатель. . . . .	75
4.3.2. Электроприводы постоянного тока с транзисторными преобразователями. . . . .	81
5. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. . . . .	85
5.1. Асинхронный двигатель. . . . .	85
5.1.1. Схема включения, электромеханические и механические характеристики асинхронных двигателей. . . . .	85
5.1.2. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным. . . . .	91
5.1.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным. . . . .	94
5.1.4. Динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя. . . . .	103
5.1.5. Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением добавочного активного сопротивления в цепи обмотки ротора. . . . .	108
5.1.6. Асинхронный электропривод с фазовым регулированием угловой скорости. . . . .	110
5.1.7. Тиристорные пусковые устройства в электроприводах с асинхронными двигателями. . . . .	120
5.1.8. Системы частотного регулирования угловой скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя. . . . .	123
5.1.9. Преобразователи частоты с непосредственной связью. . . . .	124
5.1.10. Автономные инверторы тока. . . . .	126
5.1.11. Автономные инверторы напряжения. . . . .	129
5.1.12. Асинхронный электропривод с частотным регулированием угловой скорости. . . . .	132
5.2. Синхронный двигатель. . . . .	141
5.2.1. Схема включения, особенности конструкции синхронных	

двигателей. . . . .	142
5.2.2. Электромеханические свойства неявнополюсных синхронных двигателей. . . . .	144
5.2.3. Электромеханические свойства явнополюсных синхронных двигателей . . . . .	147
5.2.4. Пуск и синхронизация синхронных двигателей. . . . .	152
5.2.5. Регулирование скорости синхронных двигателей. . . . .	156
6. ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. . . . .	161
6.1. Электроприводы постоянного тока. . . . .	161
6.1.1. Система преобразователь - двигатель постоянного тока с токовой отсечкой. . . . .	162
6.1.2. Электромеханические характеристики системы преобразователь - двигатель с токовой отсечкой. . . . .	165
6.1.3. Система преобразователь - двигатель с отрицательными обратными связями по скорости и току с отсечками. . . . .	176
6.1.4. Электропривод постоянного тока с подчиненным регулированием. . . . .	181
6.2. Электроприводы переменного тока с асинхронными двигателями. . . . .	189
6.2.1. Асинхронные электроприводы с регулированием напряжения обмоток статора. . . . .	189
6.2.2. Структурная схема асинхронного электродвигателя, управляемого по цепи обмоток статора изменением напряжения. . . . .	192
6.2.3. Структурная схема асинхронного электропривода с регулированием напряжения статора. . . . .	196
6.2.4. Система преобразователь частоты – асинхронный двигатель с положительной обратной связью по току. . . . .	204
6.2.5. Частотное управление асинхронным электроприводом со скалярной $IR$ -компенсацией. . . . .	206
6.2.6. Векторное частотное управление асинхронным электроприводом с $IR$ -компенсацией. . . . .	209
6.2.7. Частотное управление асинхронным электроприводом с компенсацией момента и скольжения. . . . .	215
6.2.8. Система векторного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости. . . . .	217
6.2.9. Система векторного управления асинхронным электроприводом с датчиком скорости. . . . .	223
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ. . . . .	227

