

**Н. И. ТОМАШЕВСКИЙ  
Д. Н. ТОМАШЕВСКИЙ  
С. Е. МИРОНОВ**

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Учебное пособие



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**Н. И. Томашевский, Д. Н. Томашевский, С. Е. Миронов**

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

*Учебное пособие*

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
для студентов вуза, обучающихся  
по направлению подготовки  
13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2018

УДК 62-83(075.8)

ББК 31.291я73

Т56

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. завкафедрой «Энергетика» ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» *Шанчуров С. М.*;  
директор науч.-техн. центра ООО НПП «РЭЛТЕК», канд. техн. наук,  
доц. *Фаткуллин С. М.*

Научный редактор — д-р техн. наук, доц. *Фризен В. Э.*

**Томашевский, Н. И.**

Т56 Электромеханические свойства и энергетические характеристики электроприводов : учеб. пособие / Н. И. Томашевский, Д. Н. Томашевский, С. Е. Миронов. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 199, [1] с.  
ISBN 978-5-7996-2498-9

В пособии излагаются основные теоретические положения дисциплины «Электрический привод». Рассматриваются разомкнутые системы электроприводов постоянного и переменного тока в двигательном и тормозных режимах работы. Даются математические описания электродвигателей при работе на статических и динамических характеристиках.

Пособие предназначено для бакалавров всех форм обучения по образовательной программе «Электротехнологические процессы и установки с системами питания и управления».

Библиогр: 14 назв. Рис. 137. Табл. 2.

УДК 62-83(075.8)

ББК 31.291я73

ISBN 978-5-7996-2498-9

© Уральский федеральный  
университет, 2018

---

## Список сокращений

---

АД	— асинхронный двигатель
АД КЗР	— асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
АД ФР	— асинхронный двигатель с фазным ротором
АИН	— автономный инвертор напряжения
АИТ	— автономный инвертор тока
АМ	— асинхронная машина
ВВВ	— внешнее возмущающее воздействие
ВК	— выходная координата
ВУВ	— внешнее управляющее воздействие
Г-Д	— генератор-двигатель
ДП	— дополнительные полюса
ДПТ	— двигатель постоянного тока
ДР	— двигательный режим
ДТ	— динамическое торможение
ИО	— исполнительный орган
ИОРМ	— исполнительный орган рабочей машины
КЗ	— короткое замыкание
КО	— компенсационная обмотка
КПД	— коэффициент полезного действия
МПТ	— машина постоянного тока
МПТ НВ	— машина постоянного тока независимого возбуждения
МПТ ПВ	— машина постоянного тока последовательного возбуждения
МПТ СВ	— машина постоянного тока смешанного возбуждения
НВ	— независимое возбуждение
НС	— намагничивающая сила
ОВ	— обмотка возбуждения

ОДП	— обмотка дополнительных полюсов
ОНВ	— обмотка независимого возбуждения
ОПВ	— обмотка последовательного возбуждения
ОС	— обратная связь
ОЯ	— обмотка якоря
ПВ	— последовательное возбуждение
ПМЭ	— преобразователь механической энергии
ПЭЭ	— преобразователь электрической энергии
РМ	— рабочая машина
РТ	— рекуперативное торможение
САУ	— система автоматического управления
СВ	— смешанное возбуждение
СД	— синхронный двигатель
СМ	— синхронная машина
ТП-Д	— тиристорный преобразователь-двигатель
ТПВ	— торможение противовключением
УПЧ	— управляемый преобразователь частоты
УПЧ-Д	— управляемый преобразователь частоты—двигатель
УТП	— управляемый тиристорный преобразователь
УПЭЭ	— управляемый преобразователь электрической энергии
ЭД	— электрический двигатель
ЭДС	— электродвижущая сила
ЭП	— электрический привод
ЭС	— электрическая сеть
ЭФ	— электрифицированный

---

## Предисловие

---

**У**чебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения. Целью пособия является оказание помощи студентам при самостоятельной работе с рекомендуемой литературой.

В задачу пособия не входит изложение всего материала дисциплины, весьма разнообразного и достаточно полно представленного в рекомендуемой литературе разных лет издания. Вместе с тем вся рекомендуемая литература заслуживает внимания, поскольку она утверждена в качестве учебников в интереснейшей области знания и практики, избранной самим студентом для профессионального становления. В каждом издании, безусловно, содержится полезная информация, которую следует изучать, внимательно вникать в сущность прочитанного и составлять собственное мнение. С учетом сказанного в рекомендуемую литературу включены и лучшие прежние издания, которые стали библиографической редкостью, но не утратили актуальности.

В предлагаемом пособии представлен материал по физическим основам электромеханики приводов постоянного и переменного тока; рассматриваются электромеханические свойства и энергетика разомкнутых систем силовой части, то есть не охваченных автоматическими обратными связями. Показана логическая преемственность с дисциплиной «Электрические машины», в которой изучены принципы устройства, направленные на оптимальное конструирование и обеспечение требуемых электромагнитных и механических рабочих параметров машин. Дисциплина же «Электрический привод» фактически вводит электрические машины в «активную жизнедеятельность» в двигательном и различных тормозных режимах работы в установив-

шихся и переходных движениях при совершении полезной механической работы.

Современный электропривод мыслится не иначе как автоматизированный. Эти задачи решаются в следующих специальных дисциплинах: «Теория автоматического управления», «Системы автоматического управления».

Названные дисциплины специальной подготовки представляют ядро профессионального формирования специалистов в широкой области теории и практики автоматизированного электропривода, на основе которого в настоящее время и осуществляется построение промышленных установок и технологических комплексов.



---

# ГЛАВА ПЕРВАЯ. Основные положения и понятия ЭП

---

## 1.1. Электропривод и электрифицированная рабочая машина (механизм)

---

**Э**лектрическим приводом (ЭП) называют часть машинного устройства, включающую в свой состав электрический двигатель (ЭД), возможные преобразователи электрической энергии (ПЭЭ) и механической энергии (ПМЭ), а также систему автоматического управления (САУ). Его назначением является приведение в заданное движение исполнительных органов рабочей машины (ИОРМ) в соответствии с технологическими требованиями конкретного механизированного производства.

Рабочая машина (производственный механизм), оснащенная электрическим приводом, называется электрифицированной. Мнемоническая структура электрифицированной рабочей машины представлена на рис. 1.1.

Электрический привод представляет собой электромеханический комплекс преобразовательных устройств, который (благодаря САУ) обеспечивает управляемый процесс энергопреобразования в силовой цепи электропривода, включающей в себя электрический канал «ЭС — ПЭЭ — ЭД» и механический канал «ЭД — ПМЭ — ИОРМ» передачи преобразуемой энергии. Направление больших стрелок между функциональными звеньями электропривода на рис. 1.1 связывает различные формы энергии, указывая на работу электропривода в двигательном режиме.

Охарактеризуем функциональные звенья электрического привода.

1. Основополагающим звеном электропривода является электрический двигатель (ЭД), без которого не появилось бы понятие «электропривод». ЭД осуществляет процесс качественного электромагнитно-механического преобразования потребляемой электрической энергии  $W'_{эл}$  через промежуточную электромагнитную энергию  $W_{эм}$  в механическую форму энергии  $W'_{мех}$ , которая развивается на его валу и передается исполнительному органу рабочей машины (ИОРМ) для приведения его в движение и совершения полезной механической работы. Поскольку ЭД подразделяют по роду тока, то и электроприводы называют ЭП постоянного или переменного тока и далее указывают тип ЭД (независимого, параллельного, последовательного или смешанного возбуждения; асинхронный или синхронный трехфазный); возможно указание формы движения якоря или ротора (вращательное, шаговое, линейное).

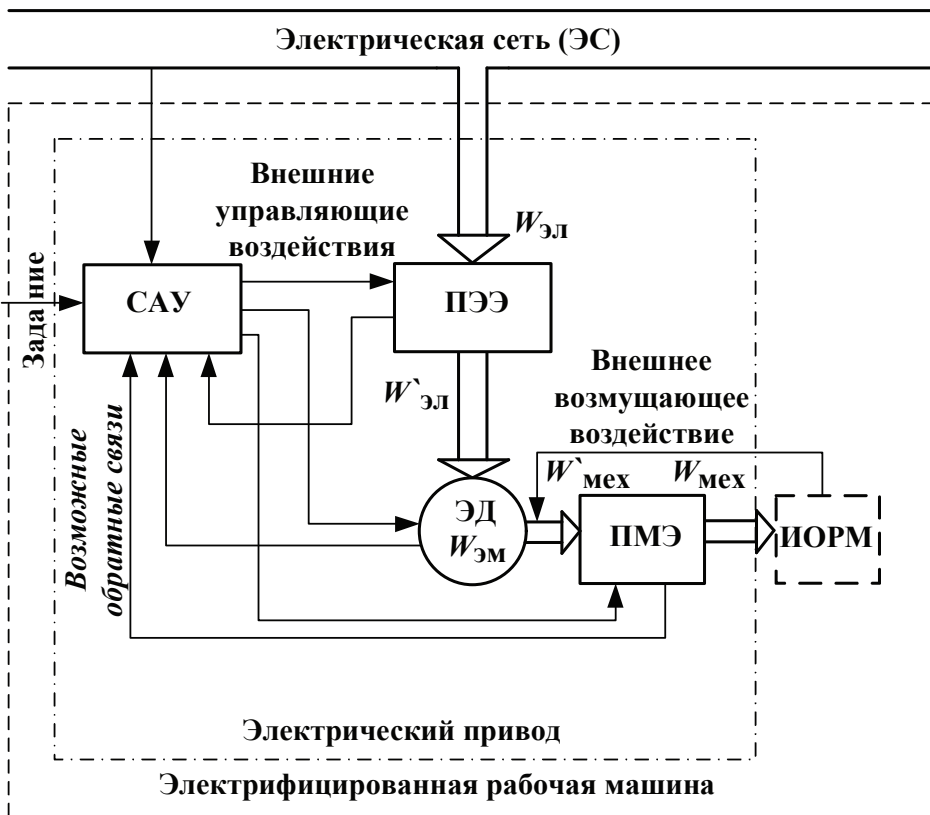


Рис. 1.1. Мнемоническая структура электрифицированной рабочей машины

2. Преобразователь электрической энергии (ПЭЭ) преобразует электрическую энергию одних параметров  $W_{эл}$  в электрическую же других параметров  $W'_{эл}$ , при этом возможны режимы инвертирования и выпрямления. По принципу работы ПЭЭ могут быть электромашинными (применявшимися ранее) и полупроводниковыми (современная тенденция). ПЭЭ может отсутствовать в составе электропривода, в таком случае последний называют сетевым, то есть потребляющим электроэнергию непосредственно из сети. А при наличии ПЭЭ в названии электропривода фигурирует тип преобразователя, например: система «Г — Д», система «ТП — Д» и др.

3. Преобразователь механической энергии (ПМЭ) одних параметров  $W'_{мех}$  в механическую же других параметров  $W_{мех}$  представляет собой так называемые передаточные механизмы, которые не только редуцируют момент, скорость, путь (редукторы), но и могут преобразовывать форму механического движения, например, вращательного в поступательное (колесно- и червячно-реечные передачи) или в качательное (кривошипно-шатунные и другие передачи). При отсутствии ПМЭ в составе электропривода последний называют безредукторным.

4. Система автоматического управления (САУ) в современном понимании представляет собой командно-информационный преобразователь, формирующий внешнее управляющее воздействие (ВУВ) на функциональные звенья силовой части электропривода в соответствии с заданием со стороны технологического процесса рабочей машины и степенью его отработки электроприводом, информация о которой поступает по цепям обратных связей (ОС). На САУ может возлагаться выполнение определенных функций и интеллектуального плана (логических, расчетных и др.), САУ отдельных электроприводов могут объединяться в системы технологической автоматизации конкретных механизированных производств.

В практике различных механизированных производств еще используются простейшие электроприводы, обычно асинхронные, с так называемым ручным или полуавтоматическим управлением от какого-либо коммутационного аппарата в распоряжении оператора, который использует визуальную обратную связь (ОС) с объектом управления и осуществляет определенное элементарное внешнее управляющее воздействие (ВУВ) в целях его включения в работу или отключения.

## 1.2. Режимы работы электропривода

---

С понятием «режимы работы электропривода» связано свойство обратимости электрических машин, позволяющее изменять направление преобразования энергии, то есть работать не только в двигательном режиме, но и в различных тормозных: рекуперативном, противовключением и динамическом (с независимым или самовозбуждением).

Все названные режимы работы ЭП могут относиться как к установившимся, так и к переходным режимам движения ЭП — см. п. 1.3.

Режим работы ЭП обусловлен определенным балансом энергии (или балансом напряжения и ЭДС в главной цепи машины), что далее подробно рассматривается. Конкретный режим работы определяется условиями своего существования, к которым следует отнести:

- источник подводимой к электрической машине энергии для последующего ее преобразования электромагнитным путем (со стороны электрической цепи или со стороны вала — электрический или механический соответственно);
- направление и баланс энергопреобразования;
- схемное решение включения электрических цепей машины.

## 1.3. Режимы движения электропривода

---

Понятие «режимы движения ЭП» обусловлено балансом механической энергии на валу системы «ЭП — РМ» (или балансом моментов движущих, противодействующих движению и инерционных, приложенных к валу, что не следует путать с предыдущим понятием (п. 1.2), поскольку различные режимы движения могут быть как в двигательном, так и в тормозных режимах работы. Режимы движения подразделяют на установившиеся и неустойчивые (переходные).

Электродвигатель обеспечивает движение исполнительного органа рабочей машины через определенные элементы кинематики (муфты, валы, шкивы, зубчатые передачи и т. п.). Как известно, механическое движение передается при условии минимально допустимой деформации элементов кинематической связи, которую в практическом плане допустимо назвать достаточно жесткой. Если же потребуется учиты-

вать упругие элементы, возможность проскальзывания и люфты в передаче движения, то их учитывают особо [12, с. 120].

Здесь будем полагать кинематическую связь элементов передачи движения абсолютно жесткой и воспользуемся принципом Даламбера, который гласит, что в несвободной системе с жесткими связями в любой момент времени силы движущие, силы реакции на движение (противодействующие движению) и силы инерционные уравновешены, что можно записать для линейного движения

$$\sum F_{\text{движ}}(t) = \sum F_{\text{реакц}}(t) + \sum F_{\text{инерц}}(t)$$

и для вращательного движения, если использовать понятия моментов,

$$\sum M_{\text{движ}}(t) = \sum M_{\text{сопр.движ}}(t) + \sum M_{\text{инерц}}(t). \quad (1.1)$$

А теперь распространим это на несвободную механическую систему «ЭД — ИОРМ», в которой первую составляющую  $M_{\text{движ}}$  обозначим  $M_{\text{в.д}}$  и назовем развиваемым механическим моментом на валу двигателя

$$M_{\text{в.д}} = M_{\text{эм.д}} - \Delta M_{\text{с.хх.д}}, \quad (1.2)$$

где  $M_{\text{эм.д}}$  — развиваемый внутри двигателя электромагнитный момент;

$\Delta M_{\text{с.хх.д}}$  — механический момент постоянных (const) потерь холостого хода, покрываемый в двигательном режиме работы электромагнитным моментом двигателя.

Перейдем к составляющей  $M_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{дин}}}{\omega} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}$ , Н·м. В ре-

альных рабочих машинах моменты со стороны рабочего органа, которые называют статической нагрузкой на двигатель электропривода, не всегда являются противодействующими движению.

Моменты статической нагрузки  $M_{\text{с}}$ , которые на рис. 1.1, а также на рис. 1.6 означают внешнее возмущающее воздействие (ВВВ) на двигатель и отражают реакцию со стороны ИОРМ на движение. Их различают не только по величине, но и по отношению к направлению движения, подразделяя на реактивные  $M_{\text{с.р}}$  и активные  $M_{\text{с.а}}$ .

Реактивные статические моменты при любом направлении движения противодействуют движению, поэтому при изменении направления движения изменяют знак, что отражается в записи:  $M_{\text{с.р}} = M_{\text{с}} \text{sign } \omega$ . Их физическая сущность связана с разрушением обрабатываемых ма-

териалов (строгание, фрезерование, точение, резание, шлифование) и трением в элементах кинематики, то есть с нарушением внутримолекулярных связей вещества.

Активные статические моменты возникают, например, в подъемных механизмах: при подъеме груза происходит увеличение запаса потенциальной энергии в системе.  $M_{с.а}$  противодействует движению в этом направлении, то есть носит реактивный характер. При опускании груза, когда запас потенциальной энергии снижается за счет преобразования в кинетическую энергию движения, активные моменты становятся движущими; они не меняют знака, но изменяют отношение к направлению движения.

Изложенное можно упрощенно изобразить в системе координат  $n = f(M_c)$  или  $\omega = f(M_c)$ , рис. 1.2, при  $M_c = \text{const}$ .

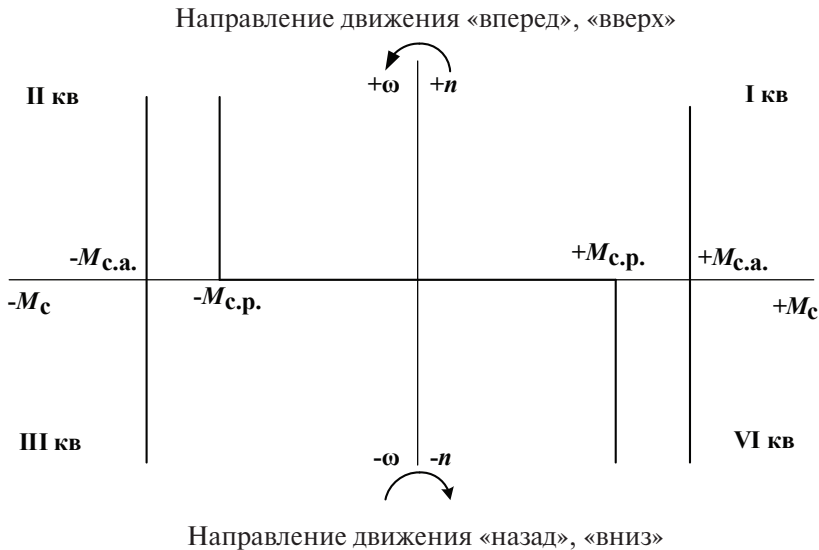


Рис. 1.2. Механические характеристики нагрузки при  $M_c = \text{const}$

Итак, момент статической нагрузки, Н·м, со стороны рабочей машины запишется как

$$\pm M_c = \pm M_{с.р.} - M_{с.а.} \quad (1.3)$$

Определимся с третьей составляющей  $M_{инерц.}$ , Н·м, выражения (1.1). Для этого используем введенные в уравнениях (1.2) и (1.3) понятия  $M_{в.д}$  и  $M_c$  и их знаки

$$M_{дин} = M_{в.д} - M_c = M_{инерц.} \quad (1.4)$$

где  $M_{\text{дин}}$  в дальнейшем будем называть динамическим моментом, характеризующим динамическую нагрузку на электропривод,  $M_{\text{дин}} = M_{\text{инерц}}$ .

Раскроем энергетическую сущность  $M_{\text{дин}} = M_{\text{инерц}}$  на приращении углового пути вала двигателя  $d\alpha$

$$M_{\text{инерц}} d\alpha = dA_{\text{дин}} = dW_{\text{кин}}, \quad (1.5)$$

где  $W_{\text{кин}} = \text{Вт} \cdot \text{с} = \text{Дж}$ .

Выражение (1.5) представляет собой работу инерционных масс в системе «ЭД — ИОРМ», связанных с валом ЭД по противодействию изменению скорости движения; она численно равна изменению запаса кинетической энергии в системе «ЭД — ИОРМ». Согласно выражению (1.6) определяется динамическая мощность, Вт,

$$P_{\text{дин}} = \frac{dA_{\text{дин}}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} \right) = J_{\Sigma} \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_{\Sigma}}{dt},$$

где  $J_{\Sigma}$  — суммарный момент инерции масс ( $m$ ), сосредоточенных в системе «ЭД — РМ» на радиусе инерции ( $\rho$ ) от оси вращения ЭД,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $J_{\Sigma} = m\rho^2$ ;

$\omega$  — угловая скорость вращения вала ЭД, рад/с;

$\frac{d\omega}{dt}$  — угловое ускорение вала ЭД,  $\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon$ , рад/с<sup>2</sup>.

Общее выражение динамического момента, Н·м, как инерционного запишется

$$M_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{дин}}}{\omega} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}, \quad (1.6)$$

где первое слагаемое обусловлено ускорением ( $\varepsilon$ ), то есть изменением угловой скорости, а второе — изменением момента инерции. Это может иметь место, например, в результате изменения инерционных масс ( $m$ ) по причине изменения радиуса инерции ( $\rho$ ) в таких механизмах, как моталки и разматыватели полосопрокатных станов, миксеры и конверторы от смещения центра тяжести при сливе металла, механизмах с кривошипно-шатунной кинематикой и др. Для указанных механизмов оказывается более удобным вторую составляющую выражать не через производную по времени, а по углу поворота, что позволяет сделать элементарное преобразование

$$\frac{\omega}{2} \frac{dJ_{\Sigma}}{dt} \left( \frac{d\alpha}{d\alpha} \right) = \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_{\Sigma}}{d\alpha}, \quad \text{где} \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega.$$

На основании уравнений (1.4) и (1.6) запишем выражение, Н·м, адекватное структуре записи (1.1),

$$M_{в.эд} = M_c + M_{дин} = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ_{\Sigma}}{dt}, \quad (1.7)$$

если  $J_{\Sigma}$  не изменяется в процессе движения,  $J_{\Sigma} = \text{const}$ ; последнее слагаемое обращается в нуль, и выражение значительно упрощается

$$M_{в.д} = M_c + M_{дин} = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.8)$$

Охарактеризуем его составляющие:

$M_{в.д}$  — развиваемый на валу ЭД движущий механический момент;

$M_c$  — статический момент сопротивления движению со стороны ИОРМ и  $\Delta M_{с.хх.д}$ , характеризует статическую нагрузку на валу ЭД;

$M_{дин}$  — динамический момент сопротивления изменению скорости движения системы «ЭД — ИОРМ», характеризует динамическую нагрузку на валу ЭД.

В задачах электропривода вместо  $M_{в.д}$  часто оказывается удобнее использовать выражение электромагнитного момента  $M_{эм.д}$ , который развивается внутри ЭД и физически связан как с электромагнитным состоянием среды энергопреобразования, так и с определяющими этот процесс переменными в механических и электрических цепях ЭД. Для этого используем (1.2), из которого  $M_{хх.д}$ , реактивный по своему характеру, приплюсуем к  $M_c$

$$M_{эм.д} = M_c + \Delta M_{с.хх.д} + M_{дин} = M_{с_{\Sigma}} + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.9)$$

Переписав выражение (1.9) относительно  $M_{дин}$ , получаем выражения, отражающие физическую сущность динамического момента:

$$M_{дин} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} \Big|_{J_{\Sigma} = \text{const}} = M_{эм} - M_{с_{\Sigma}}.$$

Первое слагаемое  $M_{эм}$  характеризует механическую инерционность в системе, которая противодействует изменению скорости движения и представлена произведением  $J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}$ , где  $J_{\Sigma} = m\rho^2$ . Второе слагаемое

$M_{с_{\Sigma}}$  указывает на причину изменения скорости движения, то есть появление ускорения  $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ;  $\frac{d\omega}{dt} < 0$ , которое представлено неравенством



$M_{эм} - M_{сэ}$ , другими словами, наличием избытка в алгебраической разности движущих и противодействующих движению моментов.

Отметим, что каждое из уравнений (1.7)–(1.9) носит название уравнения движения электропривода в системе «ЭД — ИОРМ». Рассмотрим его частные представления.

1.  $M_{эм.д} = M_{сэ}$ , то есть  $M_{дин} = 0$  и  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , соответствует установившемуся

режиму движения электропривода с неизменной скоростью ( $\omega = \text{const}$ ) либо состоянию покоя, когда  $\omega = 0$ .

2.  $M_{эм.д} - M_{сэ} > 0$ ,  $M_{дин} > 0$  и  $\frac{d\omega}{dt} > 0$ , соответствует ускорению движе-

ния электропривода в области  $\omega > 0$ .

3.  $M_{эм.д} - M_{сэ} < 0$ ,  $M_{дин} < 0$  и  $\frac{d\omega}{dt} < 0$ , соответствует замедлению дви-

жения электропривода в области  $\omega < 0$ .

Последние состояния движения (п. 2 и п. 3) характеризуют переходный (или неустановившийся) режим движения электропривода.

Итак, режимы движения электропривода подразделяют на установившиеся и переходные (или неустановившиеся).

Следует понимать, что записанные выше условия состояний движения соответствуют двигательному режиму работы ЭД в положительном направлении его движения. Безусловно, переход ЭД на работу в тормозных режимах и учет изменения направления движения потребуют внесения корректировок в представленные выше условия, что далее будет показано.

## 1.4. Статические характеристики электродвигателей и рабочих машин

В теории и инженерной практике электропривода широко используются понятия статических характеристик ЭД и РМ.

### 1.4.1. Статические характеристики ЭД

Статической характеристикой электродвигателя называют геометрическое место точек в конкретной системе координат, выражающее

установившуюся скорость движения электрической машины в двигательном или тормозных режимах работы электропривода как функцию величины и характера статического момента на валу электродвигателя (ЭД) [13, с. 8].

Установившееся движение может характеризоваться угловой скоростью вращения двигателя  $\omega$ , рад/с, или числом оборотов в минуту  $n$ , об/мин. При теоретических исследованиях обычно используют понятие угловой скорости  $\omega$ , рад/с, в практических задачах используют понятие частоты вращения  $n$ , выраженной через число оборотов в минуту, что допускает ГОСТ. Частота вращения указывается в каталогах и на паспортных табличках электрических машин. Соотношение угловой скорости и частоты вращения,  $n_d$ , об/мин, следующее:

$$\omega_d = \frac{2\pi}{60} \cdot n_d \cong 0,105 n_d,$$

$$n_d = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega_d \cong 9,55 \omega_d.$$

Статические характеристики двигателей электроприводов различных типов могут быть представлены в виде следующих зависимостей:

$$\omega_d = f(M_B), \quad \text{или} \quad n_d = f(M_B),$$

$$\text{а также} \quad \omega_d = f(M_{эм}), \quad \text{или} \quad n_d = f(M_{эм}),$$

которые называют механическими характеристиками.

В асинхронных электроприводах часто используют вместо  $\omega$  и  $n$  понятие скольжения  $s$ :

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_r}{n_0},$$

где  $\omega_0$  и  $n_0$  — синхронные угловая скорость и частота вращения магнитного поля;

$\omega_r$  и  $n_r$  — угловая скорость и частота вращения ротора.

Статическую нагрузку на двигатель отражают и так называемые электромеханические характеристики:

- электромеханические характеристики машины постоянного тока  $\omega_d = f(I_a)$ , или  $n_d = f(I_a)$ , где  $I_a$  — величина тока в цепи якоря;
- электромеханические характеристики в функции токов статора и ротора асинхронных машин переменного тока,  $\omega_d = f(I_s)$ ,  $\omega_d = f(I_r)$ , или  $n_d = f(I_s)$ ,  $n_d = f(I_r)$ .

Статические характеристики ЭД подразделяют на следующие разновидности:

- естественные, когда электрическая машина непосредственно связана с электрической сетью, и основные, когда она получает электроэнергию через преобразователь; на естественной и основной характеристиках располагаются координаты номинального режима;
- искусственные, соответствующие тем или иным параметрам источника электроэнергии и параметрам электрических цепей машины;
- граничные, характеризующие идеализированную машину постоянного тока, отражающие ее электромагнитное состояние.

Отметим, что электромагнитное состояние асинхронных машин характеризует вид статической механической характеристики, а в синхронных машинах на электромагнитное состояние позволяет влиять обмотка возбуждения постоянного тока, расположенная на полюсах ротора.

Вид статических характеристик ЭД определяется типом электропривода, параметрами его электрических цепей и источника электрической энергии. По виду статических характеристик можно оценить электромеханические свойства и энергетику электропривода как в двигательном, так и в различных тормозных режимах. Статические характеристики ЭД изображаются в четырех квадрантах системы координат, что создает удобство их восприятия как относительно направления движения, так и режима работы электропривода, что рассматривается в последующих главах. Здесь же покажем естественные статические характеристики ЭД постоянного и переменного тока (рис. 1.3). Различия в характере изменения скорости вращения с изменением развиваемого момента  $M_{эм}$  оценивают в соответствии с коэффициентом жесткости

$$\beta = \frac{dM_{эм}}{d\omega} = \operatorname{ctg} \gamma, \quad (1.10)$$

где угол  $\gamma$  определяется по наклону касательной к интересующей точке характеристики, который отсчитывается от положительной оси абсцисс против часовой стрелки.

Статические характеристики ЭД подразделяют на следующие три группы (рис. 1.3):

1 — абсолютно жесткая характеристика,  $\beta = -\infty$ , которой обладают синхронные двигатели переменного тока (СД);

2 — жесткие характеристики,  $\beta = \text{const} < 0$ , такими обладают двигатели постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) и асинхронные двигатели переменного тока (АД) на линейном участке характеристики;

3 — мягкие характеристики,  $\beta = \text{var} < 0$ , которыми обладают двигатели постоянного тока последовательного (ДПТ ПВ) и смешанного возбуждения (ДПТ СВ).

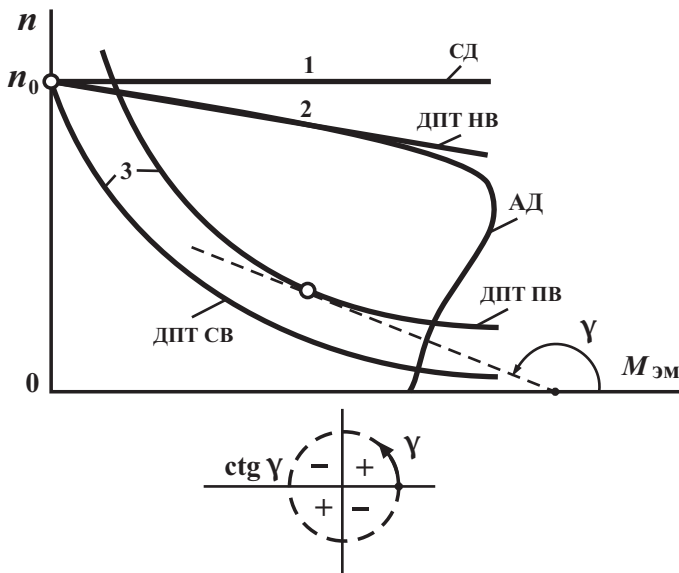


Рис. 1.3. Механические характеристики электрических машин

#### 1.4.2. Статические характеристики РМ

*Статической характеристикой рабочей машины (РМ)* называют геометрическое место точек, выражающее зависимость статического момента  $M_c$  как функцию установившейся скорости движения исполнительного (рабочего) органа. В некоторых случаях  $M_c$  может не только быть функцией скорости, но и зависеть от пути, времени и особенностей технологического процесса, в котором участвуют исполнительные органы рабочей машины. Возможные законы изменения статических моментов рабочих машин были классифицированы В. К. Поповым [14], [3, с. 231]. Классификация рабочих машин включает в себя пять классов:

- 1-й класс РМ, в которых  $M_c$  практически остается независимым от скорости — см. рис. 1.2 и 1.4. К таковым относятся: пасса-

жирские и грузовые лифты, скиповые и шахтные подъемники с уравнивающим канатом, ленточные транспортеры, толкатели, строгальные станки, когда масса может считаться неизменной ( $m = \text{const}$ ), а также некоторые прокатные станы при  $F_{\text{обжат}} = \text{const}$ , поршневые насосы;

- 2-й класс охватывает РМ,  $M_c$  которых представляют собой различные функции скорости, что можно проиллюстрировать выражением

$$M_c = M_{\text{тр}} + (M_N - M_{\text{тр}}) \left( \frac{n}{n_N} \right)^x, \quad (1.11)$$

где  $M_{\text{тр}}$  — постоянный момент трения;

$M_N$  — момент РМ при номинальной нагрузке;

$x$  — показатель степени, отражающий специфику РМ, то есть изменение  $M_c(n)$ . Возможны следующие значения  $x$ :

$x = 0 \dots 2$  и до  $3 \dots 4$  в центрифугах;

$x = 0$ , тогда  $M_c = \text{const}$  и от  $n$  не зависит, что относится к РМ первого класса;

$x = 1$  —  $M_c$  линейно связан с  $n$ , что имеет место в электромашинных преобразователях энергии по системе «Г — Д» при работе на постоянное внешнее сопротивление;

$x = 2, 3$  — в таких случаях статические характеристики РМ имеют параболический характер, которыми обладают центробежные насосы, вентиляторы и центрифуги, а также гребные винты;

$x = -1$  — это особый случай, когда гиперболическим характером статической характеристики РМ не обладают, но она требуется по технологическим условиям, поэтому такую характеристику РМ принудительно формируют электроприводом путем управления его скоростью при сохранении постоянства мощности в системе «ЭП — РМ» ( $P = M\omega \approx \text{const}$ ). Статические характеристики такого типа обеспечивают качество обработки торцевых поверхностей большого диаметра на токарных и расточных станках, качество укладки полосы на моталках непрерывных прокатных станов и др.

Примерный вид рассмотренных статических характеристик РМ представлен на рис. 1.4. Поскольку  $M_c$  обычно противодействует движению (в положительном направлении), характеристики изображаются во II квадранте системы координат, что соответствует их положительному коэффициенту жесткости  $\beta$ ;

- 3-й класс охватывает РМ,  $M_c$  которых зависит от угла поворота исполнительного органа  $M_c = f(\alpha)$ , когда в кинематическую цепь входят кривошипно-шатунные или эксцентрикковые передачи — это ножницы для резки металла, прессы, кантователи, опрокидыватели в металлургической промышленности; сюда следует отнести механизмы рулевых устройств, некоторые типы разводных мостов. Часто зависимость  $M_c(\alpha)$  не может быть выражена аналитически и представляется графически. К этому классу относится и шахтный подъемник без уравнивающего каната, для которого характерно изменение длины и массы каната  $M_c = f(l, m)$ ;

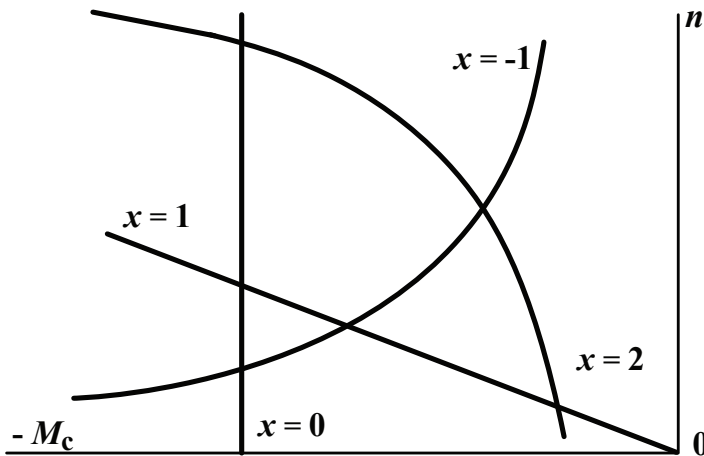


Рис. 1.4. Статические характеристики РМ

- 4-й класс включает РМ, в которых  $M_c$  одновременно зависит от скорости и конфигурации пути с поворотами, движением под уклон и с подъемом — это весь электрифицированный колесный транспорт  $M_c = f(V, \alpha)$ , — что вызывает изменение  $M_c$ ;
- 5-й класс охватывает РМ, в которых  $M_c = f(t)$  и  $M_c$  является функцией времени, обычно в силу свойств обрабатываемых материалов и различных случайных факторов, — это дробилки, шаровые мельницы, мешалки и разного назначения перемешиватели, дефибреры в бумажной промышленности, мездрильные машины в кожевенном производстве и др. Здесь  $M_c$  не может быть выражен ни аналитически, ни графически, его определе-

ние выполняют из некоторых усредненных кривых в результате экспериментальных исследований.

### 1.4.3. Установившийся режим движения системы «ЭП — РМ»

Рассмотрим случай ЭП с АД КЗР, приводящим в движение центробежный насос. Условием установившегося режима движения, о чем говорилось ранее, является равенство на едином валу системы «ЭД — РМ» моментов:  $M_{в.д}$  движущего, развиваемого ЭД, и  $M_{в.рм}$ , противодействующего движению со стороны РМ,

$$M_{в.д} = M_{эм} - \Delta M_{с.хх.д} = M_{в.рм}, \quad (1.12)$$

где  $M_{эм}$  — электромагнитный момент, развиваемый внутри АД,  $M_{эм} = M_{в.д} + \Delta M_{с.хх.д}$ ;

$\Delta M_{с.хх.д}$  — момент постоянных потерь (холостого хода), который покрывается внутри АД за счет развиваемого электромагнитного момента.

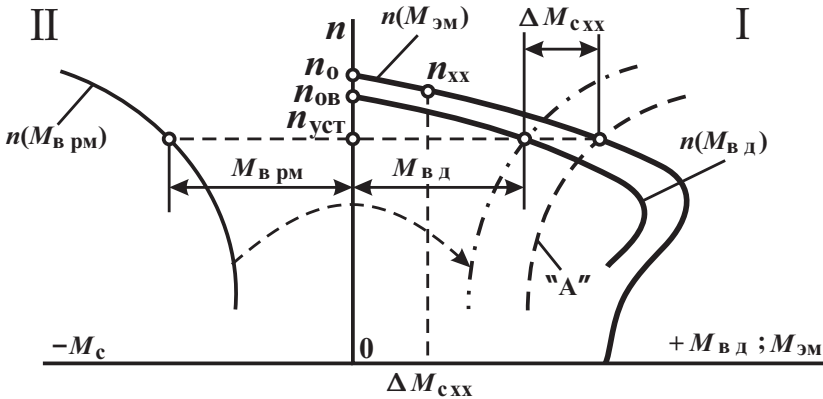


Рис. 1.5. Наложение механических характеристик АД и нагрузок вентиляторного типа

Выражение (1.12) можно интерпретировать графически, используя статические характеристики АД и насоса в соответствующей системе координат (рис. 1.5), где  $n_{уст} = \text{const}$  при  $|M_{в.д}| = |M_{в.рм}|$ . Строим зеркальную проекцию  $n(M_{в.рм})$ , прибавляем  $\Delta M_{с.хх}$  и получаем точку установившейся скорости по характеристике  $n(M_{эм})$ , которая широко используется в различных задачах ЭП.

В задачах ЭП обычно исходят из построения механической характеристики  $n = f(M_{\text{эм}})$ , в которой учитывается  $\Delta M_{\text{с.хх}}$ , часто принимаемый неизменным, и относительно его размещают  $\Delta M_{\text{в.рм}}$  (см. характеристику «А» на рис. 1.5), т. е.  $\Delta M_{\text{с.хх}}$  сразу относят к статической нагрузке. В таком случае в двигательном режиме условие установившегося режима движения ( $n = \text{const}$ ) системы «ЭД — РМ» запишется

$$M_{\text{эм}} = \Delta M_{\text{с.хх}} + M_{\text{в.рм}} = M_{\text{с}\Sigma}.$$

В рассмотренном примере установившегося движения простейшей системы «ЭД — РМ» все статические нагрузки сосредоточены на одном валу. В большинстве реальных электрических систем, связанных с различными формами движения, статические нагрузки могут быть рассредоточены в кинематике РМ и связаны с различными скоростями движения. В таких случаях выполняют приведение статических нагрузок к валу ЭД.

Заметим, что, наряду с понятиями статических характеристик ЭД и РМ, при изучении переходных процессов в ЭП используют понятия динамических характеристик системы «ЭП — РМ», которые являются функциями параметров электрических, электромагнитных и механических цепей, а также при изучении законов внешних управляющих и возмущающих (ВУВ и ВВВ) воздействий на систему.

## **1.5. Номинальные режимы нагрузки электродвигателей**

---

Слово «режимы» в ЭД и ЭП используется не только в определениях режимов работы (п. 1.2) и режимов движения (п. 1.3), но и при классификации так называемых режимов нагрузки.

Под понятием режимов нагрузки понимают все реальное многообразие сочетаний режимов работы и режимов движения ЭД и ЭП во времени, которое в соответствии с ГОСТ 183–74 (СТ СЭВ 1346–78) сведено к типовым нагрузочным диаграммам восьми так называемых номинальных режимов нагрузки ЭД и ЭП, обозначенных S1, S2, ..., S8, [12, с. 26]. С номинальными режимами нагрузки соотносится характер перегрева двигателя  $\tau = f(t)$ , а значит, и полнота использова-



ния заложенных в его конструкцию активных материалов, гарантия надежной и экономичной работы электропривода, а также номинальная механическая мощность двигателя ( $P_{2N}$ ) и другие номинальные величины, которые указываются в каталогах и паспорте двигателя.

Для подъемно-транспортных машин и других РМ в режимах нагрузки S3, S4, S5, S7 и S8 существует понятие «режимы интенсивности» работы и движения, которые касаются не только статических, но и динамических нагрузок в переходных режимах движения системы «ЭП — РМ». Режимы интенсивности подразделяются на следующие: легкие, средние, тяжелые, особо тяжелые и весьма тяжелые, которые связаны не только с понятиями «продолжительность включения», «продолжительность нагрузки», но и с «числом циклов (или включений) в час» и с «коэффициентом инерционности» системы «ЭП — РМ». Все это порой становится решающим при выборе типа электропривода.

Для полноты понимания общих задач разработки ЭП и практики его эксплуатации рекомендуется познакомиться со следующими понятиями:

- нагрузочные диаграммы РМ и ЭП [12, с. 20–26];
- номинальная мощность [12, с. 33–38];
- перегрузочная способность ЭД [12, с. 38–40].

## 1.6. Выходные координаты электропривода

*Выходными координатами электропривода (ВК ЭП)* называют физические величины, выражающие параметры механической энергии  $W_{\text{мех}}$  на валу двигателя как результат электромагнитно-механического процесса энергопреобразования. В любом типе ЭП к таковым относятся:

- момент на валу  $M_{\text{в}} = \Delta M_{\text{эм}} - \Delta M_{\text{с.хх}}$ ;
- угловая скорость вращения вала  $\omega$ ;
- проходимый валом угловой путь  $\alpha$ .

В общем случае ВК ЭП отражают требования к электроприводу со стороны технологического процесса рабочей машины (РМ) конкретного механизированного производства [12, с. 20–26]. Эти требова-

ния отражаются и на параметрах потребляемой электрической энергии  $W_{1(эл)}$ , и, если необходимо, на способе управления ее преобразованием, и на выборе конкретного типа ЭП, поскольку различные типы ЭД неодинаковы по своим электромеханическим свойствам и приемлемым энергетическим возможностям.

На основании баланса электромеханического преобразования потребляемой электрической энергии  $W_{1(эл)}$  (как в ЭП с ДПТ НВ, так и в асинхронном ЭП), можно получить выражение механической энергии на валу  $W_{2(в)}$  через выходные координаты ЭД в установившемся и в переходном режимах движения (без учета проявления различных инерционностей в электромагнитных цепях машин).

В соответствии с выражением электромагнитного момента (1.9) можно записать

$$M_{эм} = M_{в} + \Delta M_{с.хх} + M_{дин} = M_{с} + M_{с.хх} + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{с_{\Sigma}} + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где  $M_{в}$  уравнивает момент статического сопротивления движению со стороны РМ,  $M_{в} = M_{с}$ ;

$\Delta M_{с.хх}$  — постоянный момент потерь холостого хода, от нагрузки не зависит, может быть функцией скорости движения ЭД;

$M_{дин}$  — динамический момент, обеспечивает ускорение движению системы «ЭП — РМ»,  $M_{дин} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{эм} - M_{с_{\Sigma}}$ .

### **1.6.1. Математическое описание энергопреобразования в ЭП с ДПТ НВ**

Распределение потребляемой из сети электрической энергии можно описать с помощью следующего выражения

$$W_{1(эл)} = \int P_{1(эл)} \cdot dt = \int U_a I_a \cdot dt = \int P_{эм} \cdot dt + \int \Delta P_{ав} \cdot dt. \quad (1.13)$$

В процессе электромеханического преобразования энергии  $W_{1(эл)} > W_{эм} = W_{мех} > W_{2(в)}$ , из-за необходимости покрытия потерь на нагревание,  $\Delta W_a = \int I_a^2 \cdot R_a \cdot dt$  в сопротивлениях рабочей цепи (якоря)

ДПТ НВ, при этом покрытие указанных потерь непосредственно осуществляется источником  $W_{1(эл)}$ . Электромагнитная энергия  $W_{эм} = W_{мех} > W_{2(в)}$  направляется на дальнейшее преобразование в механическую форму:

$$\begin{aligned}
W_{\text{эм}} &= \int P_{\text{эм}} \cdot dt = \int E_a I_a \cdot dt = \\
&= W_{\text{мех}} = \int P_{\text{мех}} \cdot dt = \int M_{\text{эм}} \cdot \omega \cdot dt = \\
&= \int P_{2(\theta)} \cdot dt + \int P_{\text{дин}} \cdot dt + \int \Delta P_{\text{с.хх}} \cdot dt = \\
&= \int M_c \omega \cdot dt + \int J_{\Sigma} \omega \frac{d\omega}{dt} \cdot dt + \int \Delta M_{\text{с.хх}} \cdot \omega \cdot dt = \\
&= \int M_c d\alpha + \int J_{\Sigma} \omega \cdot d\omega + \Delta W_{\text{с.хх}} = \\
&= A_{\text{пол}} \pm J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} + \Delta W_{\text{с.хх}}.
\end{aligned} \tag{1.14}$$

Таким образом, потребляемая электрическая энергия  $W_{1(\text{эл})}$  в процессе преобразования покрывает переменные потери в цепи якоря, а в остальном расходуется на совершение полезной механической работы  $A_{\text{пол}}$  на валу, участвует в изменении запаса кинетической энергии  $\Delta W_{\text{кин}}$  в системе «ЭП – РМ» и покрытии потерь холостого хода  $\Delta W_{\text{с.хх}}$

$$W_{1(\text{эл})} = A_{\text{пол}} \pm \Delta W_{\text{кин}} + \Delta W_{\text{ар}} + \Delta W_{\text{с.хх}}. \tag{1.15}$$

Энергия покрытия потерь в статоре не входит в баланс якорной цепи ДПТ НВ, а в ДПТ параллельного возбуждения  $\Delta W_{\text{св}} = \int I_{\text{в}}^2 \cdot R_{\text{в}} \cdot dt$  несоразмерно мала и не превышает 3–5 %, так как  $I_{\text{в}} \ll I_{\text{ан}}$ .

Графическая интерпретация энергопреобразования на примере установившегося движения ДПТ НВ с номинальной нагрузкой показана на рис. 1.6, где представлено полное соответствие координат потребляемой мощности (энергии) на входе ЭП с основными его выходными координатами  $\omega$  и  $M$ .

Для графической интерпретации используются две трехмерные системы координат:

- правая — «вход» — ось  $x$  — электрическая нагрузка (ток в цепи якоря  $I_a$ ); ось  $y$  — подводимое к цепи якоря напряжение  $U_a$ ; ось  $z$  — время работы; произведение  $U_a I_a$  определяет потребляемую электрическую мощность  $P_{1(\text{эл})}$ , которая соответствует площади  $S$  в координатах  $y(x)$ ;
- левая — «выход» — ось  $x$  — механическая нагрузка на валу, представленная в функции скорости вала  $M_{\text{с.хх}} = f(\omega)$  с повышенным моментом трогания (точка 1) из-за трущихся поверхностей в подшипниках и редукторе, а также вентиляционных потерь  $\Delta M_{\text{с.хх}} = \omega^2$  в самовентилируемых машинах и  $M_c = M_{\text{в}} = \text{const}$ , ко-

которые в сумме дают  $M_{\text{эм}}$ ; ось  $y$  — угловая скорость  $\omega$ ; ось  $z$  — время работы, если представить  $\omega(t)$  и  $M_{\text{эм}}(t)$  в осях  $y(z)$  и  $x(z)$ , то получаются нагрузочные диаграммы [12, с. 20–23].

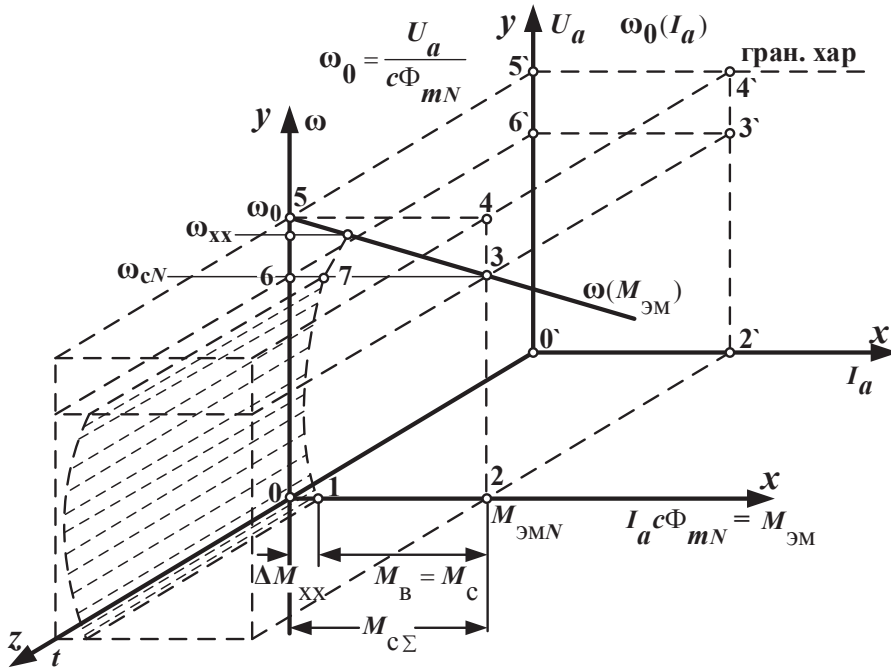


Рис. 1.6. Графическая интерпретация процесса энергопреобразования на примере установившегося движения ДПТ НВ

Следует обратить внимание на связь левой координатной системы с правой через электромагнитное состояние ЭД, обеспеченное магнитным потоком обмотки независимого возбуждения  $\Phi_m$  и конструктивным коэффициентом  $c = \frac{pN}{2\pi a}$  через произведение  $c\Phi_{mN} = \text{const}$

за счет принятых специальных мер при создании ЭД.

Разделив по оси  $y$  правой системы координат  $U_a$  на  $c\Phi_{mN}$  и умножив по оси  $x$   $I_a$  на  $c\Phi_{mN}$ , обеспечивают переход к левой системе координат — получают ось скорости  $\omega$  и ось момента  $M_{эм}$ , а в целом — координатную систему механической характеристики  $\omega = f(M_{эм})$  ЭП:

- скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = \frac{U_a}{c\Phi_{mN}}$ ;

- скорость реального холостого хода  $\omega_{xx} = \frac{E_{a.xx}}{c\Phi_{mN}}$ ;
- скорость при нагрузке  $M_c = M_{эмN} \quad \omega_{cN} = \frac{E_{aN}}{c\Phi_{mN}}$ ;
- номинальный момент  $M_{эмN} = c\Phi_{mN} \cdot I_{aN}$ .

Здесь произведения переменных по осям  $y$  и  $x$  в плоскости  $\omega(M_{эм})$  отражают площади фигур  $S$ , соответствующие конкретной мощности, что удобно записать через знак « $\supset$ » аппарата математической логики:

— потребляемая электрическая мощность одинаково выражается в обеих системах координат на рис. 1.6

$$P_{l(эл)} = U_a I_a = \omega_0 M_{эм} \supset S(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 0),$$

а будучи умноженной на время  $t$ , фигура, растянутая вдоль оси  $z$ , даст представление о потребляемой электрической энергии  $W_{l(эл)}$ ;

— в точке установившегося движения с координатами  $(\omega_{cN} \cdot M_{эмN})$  потребляемая  $P_{l(эл)}$  расходуется на покрытие переменных потерь в цепи якоря

$$\Delta P_{av} = I_a^2 \cdot R_a = \Delta \omega_{cN} \cdot M_{эмN} \supset S(3, 4, 5, 6, 7, 3)$$

и большая часть — на развитие электромагнитной мощности

$$P_{эмN} = E_{aN} \cdot I_{aN} = \omega_{cN} \cdot M_{эмN} \supset S(0, 1, 2, 3, 7, 6, 0),$$

которая в свою очередь покрывает потери холостого хода

$$\Delta P_{с.хх} = \omega_{с.ххN} \cdot \Delta M_{ххN} \supset S(0, 1, 7, 6, 0)$$

и расходуется на совершение полезной механической работы на валу

$$A_{пол} = \omega_{cN} \cdot M_{cN} \supset S(1, 2, 3, 7, 1).$$

### 1.6.2. Математическое описание энергопреобразования в ЭП с АД ФР

Баланс потребляемой активной энергии запишется как

$$W_{l(эл)} = \int P_{l(эл)} \cdot dt = \int 3U_s I_s \cos \varphi \cdot dt = \int P_{эм} \cdot dt + \int \Delta P_{sv} \cdot dt.$$

Специфика энергопреобразования в АД отличается от ДПТ принципом создания электромагнитной среды, поскольку в АД электромаг-

нитные цепи статора и ротора одновременно выполняют как функцию возбуждения, так функцию рабочих обмоток в процессе энергопреобразования. При этом соотношение энергий будет следующим:  $W_{1(эл)} > W_{эм} > W_{мех} > W_{2(г)}$ . Поэтому переменные потери в цепи ротора АД покрываются за счет  $W_{эм}$  с дальнейшим ее преобразованием в  $W_{мех}$  и  $W_{2(г)}$ , где

$$\begin{aligned}
 W_{эм} &= \int P_{эм} \cdot dt = \int M_{эм} \cdot \omega_0 \cdot dt = \int P_{мех} \cdot dt + \int \Delta P_{rv} \cdot dt = \\
 &= \int P_{2(г)} \cdot dt + \int P_{дин} \cdot dt + \int \Delta P_{с.хх} \cdot dt + \int 3I_r^2 \cdot R_r \cdot dt = \\
 &= \int M_c \omega \cdot dt + \int J_{\Sigma} \omega \frac{d\omega}{dt} \cdot dt + \int \Delta M_{с.хх} \cdot \omega \cdot dt + \Delta W_{rv} = \\
 &= \int M_c \cdot d\alpha + \int J_{\Sigma} \cdot \omega \cdot d\omega + \Delta W_{с.хх} + \Delta W_{rv} = \\
 &= A_{пол} \pm J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} + \Delta W_{с.хх} + \Delta W_{rv}.
 \end{aligned} \tag{1.16}$$

В итоге энергопреобразования баланс потребляемой электроэнергии  $W_{1(эл)}$  в АД ФР принимает вид

$$W_{1(эл)} = A_{пол} \pm \Delta W_{кин} \pm \Delta W_{sv} \pm \Delta W_{rv} \pm \Delta W_{с.хх}. \tag{1.17}$$

Рассмотренные в § 1.6.1 и § 1.6.2 примеры убеждают, что развиваемая на валу механическая энергия выражается одинаково

$$W_{мех} = A_{полн} \pm \Delta W_{кин} + \Delta W_{с.хх}$$

и направляется на совершение определенной работы.

При рассмотрении энергопреобразования как переходного процесса используют мгновенные значения переменных и выходных координат. На рис. 1.7 представлен переходный процесс во времени (нагрузочные диаграммы) разгона при пуске ДПТ НВ и АД, в котором все переменные взаимообусловлены,

$$\alpha(t) = \int_t \omega \cdot dt; \quad \omega(t) = \int_t \frac{M_{дин}}{J_{\Sigma}} \cdot dt = \int_t \frac{M_{эм} - M_{с\Sigma}}{J_{\Sigma}} \cdot dt;$$

$$M_{эм}(t) = M_{с\Sigma}(t) + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}(t);$$

$$W_{эм}(t) = \int_t M_{в} \omega \cdot dt + \int_t J_{\Sigma} \omega \cdot d\omega = \int_t M_{с\Sigma} \cdot d\alpha + \Delta W_{кин} + \Delta W_{(a,r)v}.$$

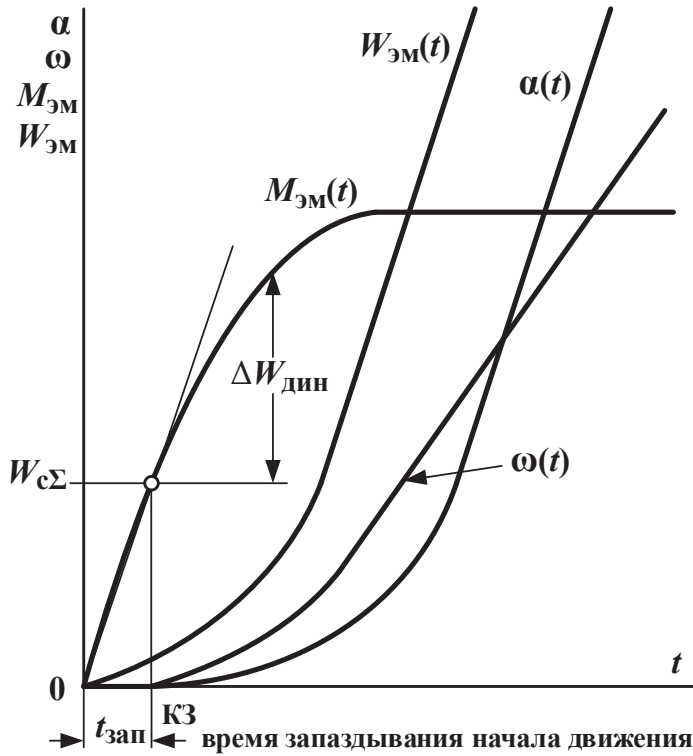


Рис. 1.7. Переходный процесс во времени разгона при пуске ДПТ НВ и АД

С установлением  $M_{\text{дин}} = \text{const}$  закон изменения  $W_{\text{эм}}(t)$  становится идентичным закону изменения проходимого валом углового пути  $\alpha(t)$ . Аналогичное соответствие между ними сохранится и после вхождения ЭП в установившийся режим движения (на рис. 1.7 не показано), когда скорость станет  $\omega = \text{const}$  и динамические составляющие затухнут ( $M_{\text{дин}} = 0$ ;  $\frac{d\omega}{dt} = 0$  и  $M_{\text{эм}} = M_{\text{с}\Sigma}$ ).

## 1.7. Управление выходными координатами ЭД

В механизированных производствах имеются РМ, которые не требуют особого управления (вентиляторы, компрессоры, насосы, транспортеры и др.), когда все ограничивается прямым пуском для включения в работу и отключением для остановки. В таких случаях выходные

координаты ЭП определяются по номинальным данным выбираемого ЭД и редуктора при разработке ЭП [12, с. 96–100]. Здесь возможное изменение ВК обычно связано с изменением нагрузки  $M_c$  на валу, отчего такую причину в ЭП называют *внешним возмущающим воздействием* (ВВВ) со стороны РМ, а процесс их изменения — *самоуправлением* — следствием, заложенным в принципе работы ЭД.

Современный электропривод мыслится как управляемый по выходным координатам. Под *управлением ВК ЭП* понимают определенную организацию процесса электромеханического энергопреобразования, которая обеспечивает достижение конкретной цели: качества, производительности, надежности электрифицируемой (ЭФ) РМ и даже экономии электроэнергии.

Все многообразие задач механизированного производства, которое должен обеспечить управляемый ЭП, сводится в итоге к организации механического движения исполнительного органа РМ, которая задана требованиями технологического процесса. К задачам механизированного производства относятся: разгон или замедление, поддержание постоянства (регулирование) или изменение скорости движения в рабочем процессе (управление), обеспечение требуемого положения или пути движения исполнительного органа РМ при подведении к нему достаточной механической энергии для совершения полезной работы и своевременного накопления или расходования запаса кинетической энергии в соответствии с уравнениями (1.15) и (1.18), с учетом и неизбежным покрытием потерь энергии.

Законы изменения выходных координат в различных типах ЭД могут реализоваться тем или иным способом внешнего управляющего воздействия ВУВ САУ ЭП на процесс преобразования подводимой к ЭД электрической энергии.

Наиболее рационально осуществлять ВУВ на переменные подводимой к ЭД электроэнергии. Для этого требуется иметь в составе ЭП управляемый преобразователь электрической энергии (УПЭЭ), дорогостоящий по сравнению с ЭД и не во всех типах ЭП практически приемлемый, хотя и обеспечивающий высокие электромеханические и энергетические показатели.

В ЭП с ЭД постоянного и переменного тока, при наличии УПЭЭ, формирование законов воздействия на переменные потребляемой электрической энергии осуществляется автоматически в соответствии с требованиями технологического процесса в форме задания, посту-



пающего в САУ ЭП. Такие системы ЭП называются *замкнутыми системами управления ЭП*, в которых ВУВ, в соответствии с заданием и получаемой информацией по цепям обратных связей об отработке заданных выходных координат и ВВВ, САУ ЭП обеспечивает через автоматические регуляторы необходимую непрерывную корректировку выходных координат.

Несоизмеримо простыми, но ограниченными в электромеханических и энергетических возможностях являются способы организации ВУВ на изменение параметров электрических цепей ЭП, например активного сопротивления в рабочей цепи ЭД, когда избыток потребляемой энергии гасится в форме тепловых потерь на нагревание  $R$ . Это обычные сетевые электроприводы, не имеющие в своем составе УПЭЭ. Обратная связь в таких ЭП обеспечивается через оператора с помощью аппаратуры ручного или полуавтоматического воздействия на параметры электромагнитных цепей ЭД, создающие условия работы на искусственных статических характеристиках ЭД. Такие ЭП представляют собой *разомкнутые системы управления ЭП*.

С точки зрения управления процессом энергопреобразования и обеспечения выходных координат как в замкнутых, так и в разомкнутых системах управления, электропривод является объектом управления. А для обеспечения требуемой технологическим процессом механической энергии (мощности), а также выходных координат механического движения у исполнительного органа РМ, электропривод выполняет функции управляемого силового источника механической энергии (мощности) и регулятора в системе электрифицированной РМ.

Влияние конкретных переменных и параметров электрических цепей и источника электроэнергии на выходные координаты различных типов ЭД представлены условными мнемоническими схемами рис. 1.8–1.12.

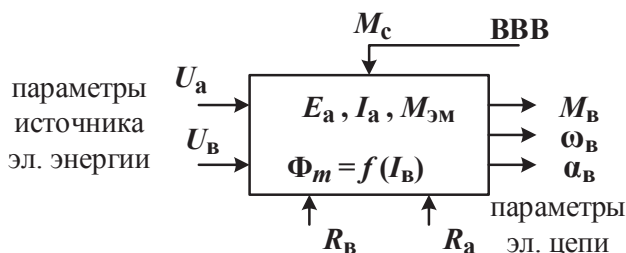


Рис. 1.8. Мнемоническая схема электропривода с ДПТ НВ

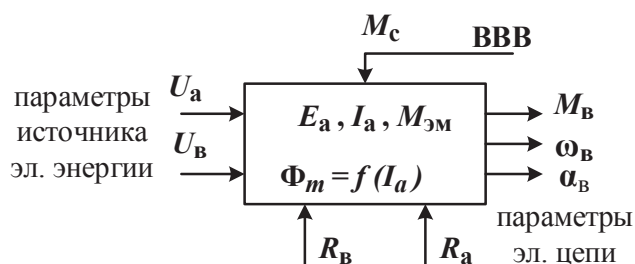


Рис. 1.9. Мнемоническая схема электропривода с ДПТ ПВ (СВ)

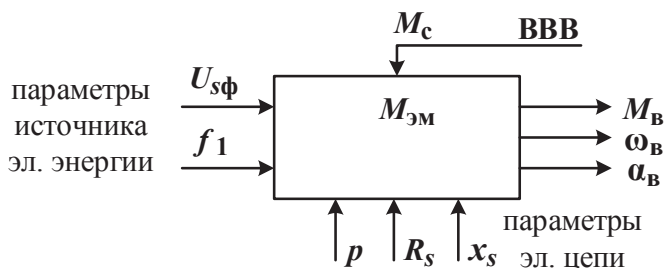


Рис. 1.10. Мнемоническая схема электропривода с АД КЗ

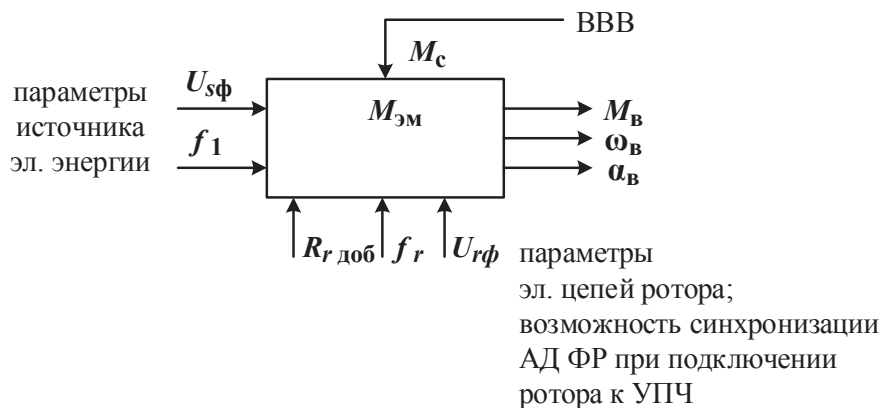


Рис. 1.11. Мнемоническая схема электропривода с АД ФР

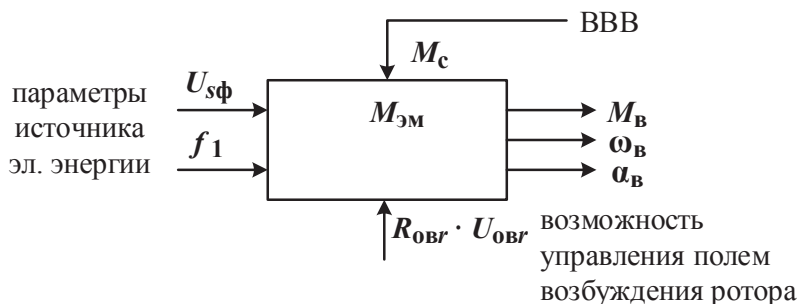


Рис. 1.12. Мнемоническая схема электропривода с СД

## 1.8. Требования к выходным координатам и их производным, оценка управления скоростью ЭП

В зависимости от функционального назначения РМ и специфики технологического процесса одни координаты могут быть наиболее значимыми, а другие — зависимыми и подчиненными.

Выявление наиболее значимых координат механического движения, влияющих на качество, производительность и особенности движения, привело к необходимости относить ЭФ РМ и ее электропривод к соответствующей функциональной группе:

- программные электроприводы, когда внешнее управляющее воздействие (ВУВ) на электропривод формируется по заранее заданной программе; это может быть моментный, скоростной и позиционный ЭП;
- следящие электроприводы, когда ВУВ на ЭП не является заранее известной функцией и закон управления может оказаться произвольным; это обычно скоростные и позиционные ЭП;
- стабилизации, когда обеспечивается поддержание постоянства какой-либо выходной координаты, а ВУВ представляет собой постоянную уставку, что используется в моментных и скоростных ЭП.

В табл. 1 показано, что значимость конкретных выходных координат в названных группах электроприводов неодинакова.

Таблица 1

**Характеристики выходных координат электроприводов различных групп**

Электропривод	Момент	Скорость	Путь
Программный	х	х	х
Следящий	—	х или	х
Стабилизации	х или	х	—

Во всех функциональных группах оказывается необходимым обеспечение координаты скорости. По наиболее значимой координате для технологического процесса ЭФ РМ принято называть и электропривод:

- моментный, когда главным технологическим требованием является обеспечение действия заданного закона  $M = f(t)$ , а поведение остальных координат оказывается соподчиненным, например, электропривод механизма моталки обеспечивает постоянство натяжения материала, хотя радиус намотки изменяется;
- скоростной, когда реализуется заданный закон  $\omega = f(t)$  (программный или следящий) либо реализуется закон поддержания постоянства скорости при изменении внешнего возмущающего воздействия (ВВВ), то есть поддержание постоянства скорости, несмотря на изменение нагрузки на валу, который называют режимом стабилизации движения;
- позиционный, в котором определяющим является прохождение заданного пути или требуемого положения исполнительного органа РМ (нажимное устройство, манипулятор, лифт, летучие ножницы).

При формировании выходных координат ЭП учитывают, что конкретные рабочие машины нуждаются в конечных значениях механической мощности, а энергетические и прочностные возможности электродвигателей и других функциональных звеньев ЭП ограничены определенными типоразмерами и габаритами. Все это отражается на параметрах электрических и механических цепей электроприводов. Поэтому при реализации заданных законов изменения выходных координат электроприводов должны удовлетворяться ограничения, не только диктуемые механизмом и технологией, но и возможные огра-

ничения со стороны допустимых значений переменных процесса энергопреобразования в цепях ЭП ( $\frac{d\omega}{dt}$ ,  $\frac{dI}{dt}$  и др.).

Разнообразие требований к обеспечению выходных координат оказывается непосредственно связанным с задачами формирования необходимых статических и динамических свойств электропривода в процессе осуществляемого энергопреобразования. Часто задачи формирования статических и динамических свойств могут противоречить друг другу, поэтому структурные и технические решения по их реализации могут оказываться различными. Кроме того, разные типы электроприводов постоянного и переменного тока в этом отношении имеют неодинаковые возможности. Знания электромеханических возможностей и энергетических показателей различных типов ЭП постоянного и переменного тока позволяют оптимально удовлетворять требования технологического процесса к законам движения ИО ЭФ РМ.

Отметим, что превалирующее значение той или иной координаты не всегда оказывается явным. Кроме того, на разных интервалах технологического цикла значимость выходных координат может меняться. Например, предусматривается формирование так называемой экскаваторной характеристики в электроприводах механизмов, в которых не исключается работа на упор. В таких случаях (главные приводы прокатных станов, строгальных станков и др.), при тенденции к перегрузке, САУ автоматически обеспечивает ограничение развиваемого момента, а в области допустимых нагрузок обеспечивает режим стабилизации скорости. Другой пример: в лифтах многоэтажных зданий развивается повышенная скорость установившегося движения, а при разгоне и подходе к остановке скорость снижается автоматически через ограничение до допустимых значений ускорения и динамического момента.

Особая значимость координаты скорости  $\omega$  связана с технико-экономическими показателями управления движением ИО РМ, к которым относятся:

- диапазон (пределы) изменения скорости, определяется отношением в процессе управления ее максимального к минимальному значениям

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$$

при номинальной нагрузке на валу и обозначается как отношение, например, 1000:1; 5:1 и т. п.;

- плавность управления скоростью, характеризуется отношением скоростей на соседних статических характеристиках при номинальной нагрузке на валу

$$П = \frac{\omega_i}{\omega_{i\pm 1}}.$$

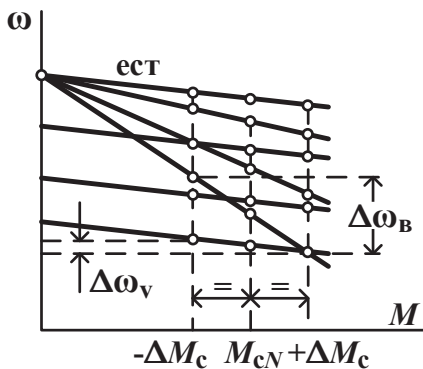


Рис. 1.13. Изменение механических характеристик ДПТ при изменении параметров

Чем меньше их различие (скачок, рис. 1.13), тем выше плавность  $П$ , которая зависит от ВУВ. Например, в ДПТ НВ изменение  $U_a$  управляемым ПЭЭ обеспечивает значительный диапазон  $D$  и высокую плавность  $П$ , а использование  $R_{a,доб}$  в цепи якоря снижает  $D$  и  $П$ , которое сводится к увеличивающейся ступенчатости с глубиной управления «вниз»;

- направление изменения скорости «вниз» или «вверх» от основной (или естественной) характеристики,

определяется способом реализации ВУВ. Например, в ДПТ НВ, при наличии УПЭЭ в цепях якоря и возбуждения, возможно двухзонное управление скоростью: «вниз» воздействием  $U_a = var$  при значительном  $D$  (1500...1000:1) и высокой  $П$ ; «вверх» через воздействие на магнитный поток  $\Phi_m \downarrow$  при  $D$  порядка (3...4):1 плавно или ступенчато, что в итоге может обеспечить  $D$  до 10 000:1. В сетевых ЭП с ДПТ НВ показатели снижаются: «вверх» воздействием на  $\Phi_m$  в  $D$  порядка до 3:1 плавно или ступенчато, «вниз» с использованием  $R_{a,доб} = var$  в  $D$  порядка (3...5):1 из-за снижения устойчивости работы и снижения КПД, в итоге  $D$  не превышает 15:1. В сетевых ЭП с АД показатели не превышают 2,5:1, а в частотно-управляемых АД и СД в зависимости от используемого закона управления, особенно в замкнутых системах управления, могут реализовываться «вниз» и «вверх» в полном диапазоне порядка 1000:1 и высокой плавности  $П$ ;

- стабильность работы при номинальной нагрузке и заданной скорости зависит от жесткости механической характеристики и сохранения устойчивого движения при возможных колебаниях нагрузки  $M_c$  на валу со стороны РМ. Это успешно решается в замкнутых системах ЭП с автоматическим регулированием скорости, которые исключают процесс «самоуправления». В разомкнутых системах ЭП все зависит от используемых ВУВ (рис. 1.13). Например, при управлении подводимым к якору напряжением  $U_a = \text{var}$  жесткость характеристик сохраняется неизменной, что определяет стабильность работы при  $\pm \Delta\omega = \text{const}$  и снижение потребления энергии при  $\downarrow \omega$ . При резисторном управлении в цепи якоря  $R_{a.\text{доб}} = \text{var}$ , по мере снижения скорости,  $\Delta\omega$  увеличивается, характеристики смягчаются, стабильность, устойчивость и КПД падают, а неоправданное потребление энергии из сети возрастает и идет на покрытие тепловых потерь;
- допустимая нагрузка и полнота использования ЭД по тепловому состоянию в процессе управления скоростью непосредственно предопределяется типом ЭП и используемым законом ВУВ в замкнутой или разомкнутой системе ЭП.

В общем случае, в зависимости от конструктивных особенностей РМ и специфики технологического процесса, статическая нагрузка может быть или неизменной  $M_c = \text{const}$ , или изменяющейся по линейному закону (см. § 1.4.2, уравнение (1.11), рис. 1.4, при  $x = 0$  или  $x = 1$ ), либо по гиперболическому закону (см. там же при  $x = -1$ ), либо по параболическому закону (при  $x = 2$ ), либо иметь произвольный характер (в функции линейного  $l$ , либо углового  $\alpha$  пути, либо в функции времени). Поэтому для полноты использования ЭД с точки зрения допустимого перегрева рациональной будет такая система ЭП, которая обеспечивает управление скоростью при любом характере нагрузки работы ЭД с номинальным током в главной цепи энергопреобразования (в ДПТ  $I_a = I_{aN}$ ; в АД  $I_s = I_{sN}$ ,  $I_r = I_{rN}$ ).

Различают следующие способы управления скоростью ЭП: при постоянстве электромагнитного момента  $M_{\text{эм}} = \text{const}$  (первая зона, «вниз» от естественной или основной статической характеристики) либо при постоянстве мощности  $P = \text{const}$  (вторая зона, «вверх» от естественной или основной статической характеристики). Это удобно показать на примере ДПТ НВ.

Первая зона:  $M_{\text{эм}} = c\Phi_{mN} \cdot I_{aN} = \text{const}$ , где  $I_{aN} = \text{const}$  при номинальном магнитном потоке  $\Phi_{mN} = \text{const}$ , а далее характеристики электрической машины определяются используемым ВУВ.

При наличии УПЭЭ, когда управление скоростью  $\omega$  производится ВУВ путем изменения подводимого напряжения  $U_a = \text{var}$ , а значит,

$$\omega_0 = \frac{U_a}{c\Phi_{mN}} = \text{var}, \text{ никаких коммутаций в цепи ОНВ не производится.}$$

Потребляемая цепью якоря электрическая мощность

$$P_{1(\text{эл})} = U_a \uparrow \downarrow I_{aN} = \omega_0 \uparrow \downarrow M_{\text{эм}} = \text{var.}$$

Развиваемая электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_a \uparrow \downarrow I_{aN} = \omega \uparrow \downarrow M_{\text{эм}} = \text{var.}$$

Развиваемая на валу механическая мощность

$$P_{2(\text{в})} = \omega \uparrow \downarrow M_{\text{в}} \uparrow \downarrow = \omega \uparrow \downarrow (M_{\text{эм}} - M_{\text{с}}) = \text{var},$$

где  $M_{\text{с}}$  может быть  $\text{const}$  или  $\text{var}$ .

Мощность покрываемых потерь в цепи ОНВ

$$\Delta P_{\text{онв.в}} = I_{\text{вN}}^2 \cdot R_{\text{в}} = \text{const.}$$

Мощность покрываемых потерь в цепи якоря

$$\Delta P_{a.v} = I_a^2 R_a = \text{const.}$$

Использование УПЭЭ в цепи якоря обеспечивает изменение потребляемой  $P_{1(\text{эл})}$  пропорционально изменению  $\omega$ ; потери энергии остаются неизменными на уровне номинальных; работа отличается высокой устойчивостью и экономичностью.

В сетевом (питаемом от сети постоянного напряжения) ЭП, когда управление скоростью  $\omega$  производится ВУВ на величину добавочного сопротивления в цепи якоря  $R_{a.\text{доб}} = \text{var}$ , потребляемая цепью якоря электрическая мощность

$$P_{1(\text{эл})} = U_{aN} \cdot I_{aN} = \omega_0 \cdot M_{\text{эм}} = \text{const},$$

развиваемая электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_a \uparrow \downarrow I_{aN} = \omega \uparrow \downarrow M_{\text{эм}} = \text{var},$$

развиваемая на валу механическая мощность

$$P_{2(\text{в})} = \omega \uparrow \downarrow M_{\text{в}} \uparrow \downarrow = \omega \uparrow \downarrow (M_{\text{эм}} - M_{\text{с}}) = \text{var},$$

где  $M_{\text{с}}$  может быть  $\text{const}$  или  $\text{var}$ .



Мощность покрываемых потерь в цепи якоря

$$\Delta P_{a.v} = I_a^2 \cdot R_{a\text{доб}} = \text{var}.$$

Использование воздействия на  $R_{a\text{доб}}$  не обеспечивает изменений в потреблении  $P_{1(\text{эл})}$  при управлении  $\omega$ ; увеличение  $R_{a\text{доб}}$  при управлении  $\omega$  «вниз» приводит к повышению потерь мощности в цепи якоря, снижению устойчивости работы и неэкономичной эксплуатации ЭП из-за снижения КПД.

Вторая зона:  $P = \omega M_{\text{эм}} = \omega c \Phi_{mN} I_{aN} = \text{const}$  на всех интервалах процесса энергопреобразования при  $\omega > \omega_0 = \text{var}$ .

Управление скоростью производится при направлении «вверх» от естественной или основной статической характеристики ВУВ на магнитный поток  $\Phi_m = \text{const}$ , создаваемый обмоткой независимого возбуждения в двух вариантах. Поскольку  $\Phi_m = f(I_B)$ ,

а  $I_B = f\left(\frac{U_B}{R_{B\text{доб}}}\right)$ , при наличии УПЭЭ в цепи обмотки возбуждения ис-

пользуется воздействие на  $U_B = \text{var}$ , а в обычных сетевых ЭП производят воздействие на  $R_{B\text{доб}} = \text{var}$ . В том и другом варианте потребляемая от независимого или параллельного источника электрическая мощность запишется

$$P_{\text{нв.эл}} = U_{\text{нв.эл}} \cdot I_B = \text{var}.$$

Потребляемая цепью якоря электрическая мощность

$$P_{1(\text{эл})} = U_{aN} \cdot I_{aN} = \text{const}.$$

Развиваемая электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_{aN} \cdot I_{aN} = \omega \uparrow \downarrow M_{\text{эм}} = \text{const},$$

где  $E_a = c \Phi_m \downarrow \uparrow \omega \uparrow \downarrow = \text{const}$ ;  $M_{\text{эм}} = c \Phi_m \downarrow \uparrow I_{aN} = \text{var}$ .

Развиваемая на валу механическая мощность

$$P_{2(\text{мех})} = \omega \uparrow \downarrow M_B \downarrow \uparrow = \omega \uparrow \downarrow (M_{\text{эм}} \downarrow \uparrow - M_c) = \text{const},$$

где  $M_c$  может быть  $\text{const}$  или  $\text{var}$ .

Мощность покрываемых потерь в цепи возбуждения

$$\Delta P_{\text{нв}} = I_B^2 \cdot R_{B\text{доб}} = \text{var},$$

в ЭП с УПЭЭ  $\Delta P_{\text{нвн}} < \Delta P_{\text{нвн}}$ ; в сетевом ЭП  $\Delta P_{\text{нвн}} > \Delta P_{\text{нвн}}$ , но эти отличия практически несущественны,  $I_{\text{вн}}$  составляет 3...5 % от  $I_{\text{ан}}$ .

Мощность покрываемых потерь в цепи якоря

$$\Delta P_{a.v} = I_{a.N}^2 \cdot R_{\text{я(собств)}} = \text{const}.$$

Проведенный анализ позволяет изложенное представить как рациональные способы управления скоростью ЭП (в графическом виде — рис. 1.14);

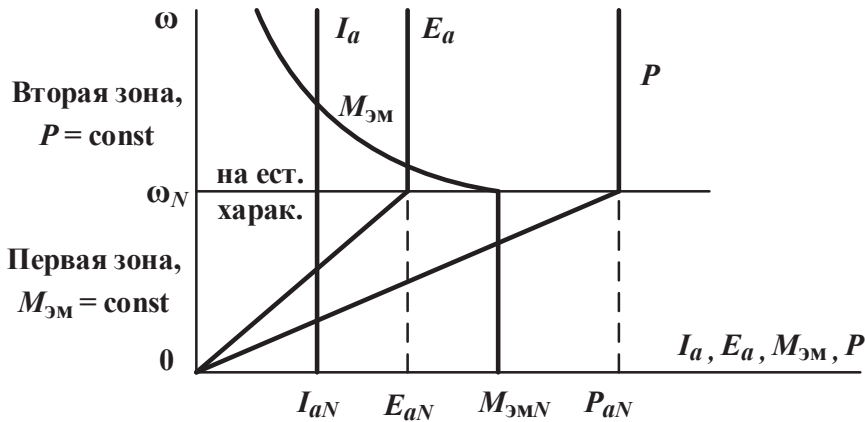


Рис. 1.14. Графическая интерпретация способов управления скоростью ЭП

- экономичность управления скоростью прежде всего характеризуется величиной потерь потребляемой электрической мощности, по которым определяются эксплуатационные расходы, все ранее названные показатели, а также капитальные затраты на ЭП.

В общем случае, когда, при различных  $\omega$ ,  $\Delta P_{av}$  и  $\Delta P_{c.xx}$  по тем или иным причинам отличаются на разных ступенях управления  $i$ , определяется средневзвешенный КПД

$$\eta_{\text{ср.взв}} \approx \frac{\sum_1^m P_{bi} \cdot t}{\sum_1^m (P_{bi} + \Delta P_{avi} + \Delta P_{c.xxi}) t}.$$

Потери всегда больше при воздействии на параметры электрических цепей ( $R_a$ ) в сравнении с воздействием на параметры УПЭЭ.

Капитальные затраты на УПЭЭ могут значительно превышать стоимость самого ЭД. Также требуется учитывать фактор привлечения обслуживающего персонала высокой квалификации с соответствующей оплатой труда. Однако затраты быстро окупаются.

## 1.9. Многодвигательные электроприводы

*Электроприводы* называют *многодвигательными*, когда для приведения в движение исполнительного органа РМ используется два и более двигателей. Такие электромеханические системы используются в зависимости от цели их практического назначения.

1. Системы ЭП с жестким механическим соединением валов ЭД с валом ИО РМ обеспечивают определенные удобства:

- снижение суммарного момента инерции  $J_{\Sigma}$  примерно на 20 % в двухдвигательном ЭП по сравнению с однодвигательным;
- возможность создания ЭФ РМ повышенной мощности при использовании серийных ЭД относительно небольшой мощности;
- взаимное резервирование ЭД при развиваемой мощности;
- упрощение механического оборудования и конструктивные удобства по размещению ЭД.

Особое внимание здесь уделяется обеспечению равного распределения нагрузки между ЭД. Например, в двухдвигательном ЭП с ДПТ НВ такая задача может решаться как в обычном сетевом ЭП, так и в системе «УПЭЭ — Д», рис. 1.15, при наличии удвоенного напряжения источника энергии, подводимой к цепи последовательно соединенных якорей ЭД. При равенстве параметров ( $1R_a = 2R_a$ ) и номинальном магнитном потоке, в ЭД обеспечивается суммарная механическая характеристика  $\omega = f(M_{\Sigma})$  — «1» на рис. 1.16, где  $M_c$  между ЭД распределен одинаково  $M_{\Sigma} = I_a c\Phi_{mN} = M_c$ . Обмотки возбуждения включаются параллельно одна другой на напряжение независимого источника энергии.

С учетом возможного разброса параметров ЭД в цепях якорей ( $1R_a \neq 2R_a$ ), в цепях ОНВ предусматриваются подстроечные резисторы  $1R_{bn} = 2R_{bn}$ , воздействующие на ток возбуждения  $I_b$ , а значит, и на  $\Phi_m$ . Результат показан на рис. 1.16, характеристики «2» и «3» отражают неодинаковое распределение нагрузки  $M_c$  между якорями при

$\omega_c = \omega_N$ . Путем заблаговременной подстройки  $1R_{вн}$  и  $2R_{вн}$  и воздействия на  $\Phi_m$ , распределение нагрузки выравнивается при заданной скорости (характеристики «4» и «5» показаны штриховыми линиями).

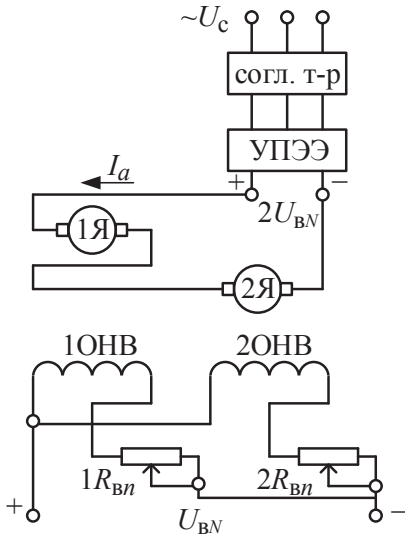


Рис. 1.15. Схема ЭП при последовательном включении цепей якоря

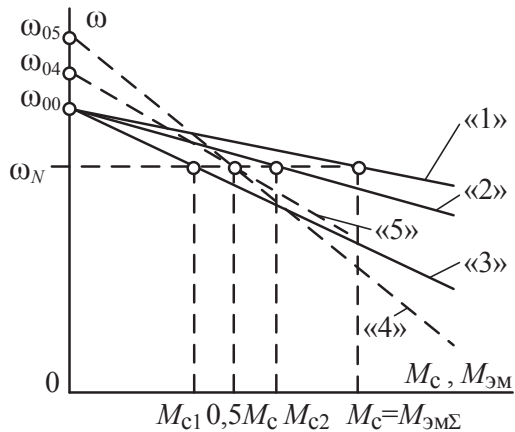


Рис. 1.16. Механические характеристики при последовательном включении цепей якоря

Возможно и параллельное включение цепей якоря. В таком случае УПЭЭ выбирается на двойной ток цепи якоря.

В замкнутых системах ЭП с УПЭЭ не требуется удвоенное напряжение, подводимое к якорной цепи двухдвигательного ЭП. Используют УПЭЭ на номинальное напряжение, а якоря ЭД включают параллельно друг другу. Контроль и выравнивание нагрузки производится автоматически через непрерывное слежение за рабочими токами при помощи специального блока в цепи САУ ЭП. Аналогично такая схема применяется и в асинхронном частотно-управляемом ЭП по системе «УПЧ — АД» при соответствующих законах управления.

2. Системы ЭП с «электрическим валом» используются в многодвигательных электромеханических системах для обеспечения одинаковых или пропорциональных законов движения исполнительным органом, не имеющим механических связей в силу конструктивных особенностей РМ. Такие системы используются в ЭП затворов шлюзов, разводных мостов, некоторых порталных кранов и др., в которых меха-

нические связи невозможны или вызывают неоправданное усложнение кинематики при значительных расстояниях, длинах, диаметрах и низком КПД указанных типов передач.

Такие ЭП в своей основе содержат асинхронные АД с фазным ротором, которые одновременно выполняют функции рабочих машин и уравнительных машин, обеспечивающих синхронность вращения роторов и равное распределение нагрузки на механически несвязанных валах. Они используются в электромеханических системах относительно небольшой мощности с небольшим изменением нагрузки. Электрическая и эквивалентная схемы замещения ротора представлены на рис. 1.17.

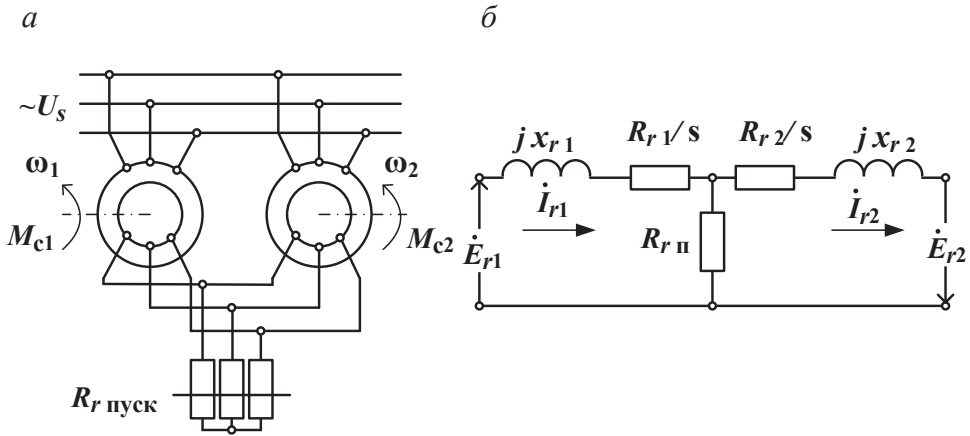


Рис. 1.17. Электрическая (а) и эквивалентная (б) схемы замещения ротора

Статорные цепи АД включаются согласно, а роторные — встречно (с использованием общего пускового резистора  $R_{r.пуск}$ ). При нормальной работе  $\omega_1 = \omega_2$ , ЭДС роторов одинаковы и уравновешены, развиваемые моменты равны  $M_{эм1} = M_{эм2}$ . Если по каким-либо причинам скорость одного из АД изменится, то соответствующая ЭДС  $E_r$  изменится по модулю и аргументу. В цепи роторов появляется уравнительная ЭДС, уравнительный ток и  $M_{эм}$ , в результате чего в системе уравновешиваются значения основных ЭДС и восстанавливается синхронное вращение роторов.

Когда нагрузка может значительно изменяться, тогда многодвигательные системы «электрического вала» строят на основе АД КЗР, передав функцию уравнивания установленным на том же валу ЭД синхронному (СД) или АД ФР [6, с. 138–148] и [3, с. 645–683].

---

## ГЛАВА ВТОРАЯ. Двигательный режим работы электроприводов

---

### 2.1. Определение двигательного режима работы

---

**В** любом типе ЭП с двигателями постоянного или переменного тока двигательный режим работы является основным. Его отличительной особенностью является положительное направление энергопреобразования, как принято в электроприводе, независимо от направления его вращения.

Потребляемая электрическая энергия ( $+W_{эл}$ ) преобразуется электромагнитным путем ( $+W_{эм}$ ) в механическую форму энергии ( $+W_{мех}$ ), которая отдается исполнительным органом рабочей машины (РМ) для приведения ее в движение и совершения полезной работы ( $+A_{мех}$ ). При этом покрываются переменные потери энергии в электрических цепях ( $\Delta W_v$ ) и постоянные потери ( $\Delta W_{с.хх}$ ) в электромагнитных и механических цепях. Таким образом, ЭД является потребителем электрической энергии, с одной стороны, а с другой — источником механической энергии для разнообразных механизированных производств. В двигательном режиме работы ЭП может находиться как в установившемся режиме движения ( $\omega = \text{const}$ ), так и в переходном (неустановившемся,  $\omega = \text{var}$ ).

Наиболее наглядно можно проиллюстрировать сказанное на мнемоническом изображении баланса названных форм энергии  $P = dW/dt = M\omega$  и в системе координат  $\omega = f(M)$ , рис. 2.1.

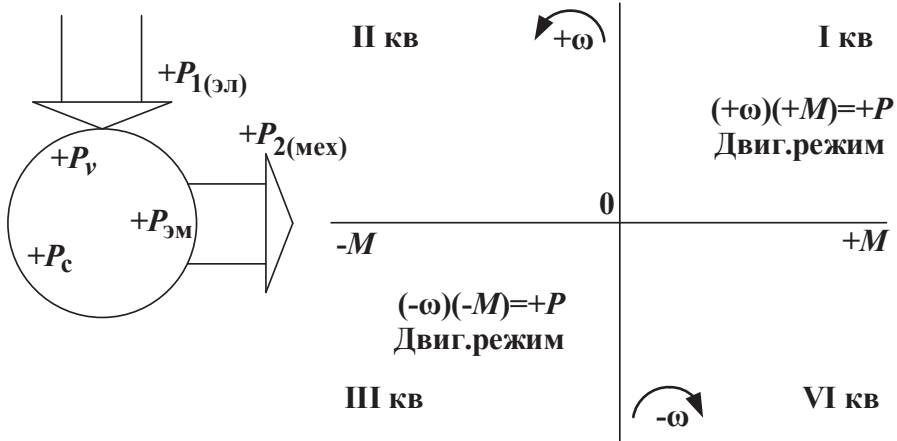


Рис. 2.1. Мнемоническое изображение баланса форм мощности

Необходимо отметить, что все современные промышленные ЭД постоянного и переменного тока работают на едином электромагнитном принципе, в основе которого лежит создание в магнитопроводе ЭД магнитного потока возбуждения  $\Phi_m$ . В результате этого обеспечиваются физические условия силового взаимодействия между электромагнитными цепями статора и якоря (ротора) ЭД.

В качестве основных энергетических показателей оценки энергопреобразования в главном канале ЭД, ЭП и в целом ЭФ РМ (рис. 2.2) обычно используют:

- значения соответствующей формы энергии (или мощности) на входе и выходе конкретного канала;
- коэффициент мощности (для АД);
- значения потерь мощности внутри конкретного канала;
- значения КПД  $\eta$  как внутри отдельного канала энергопреобразования, так и в целом — ЭД, ЭП и ЭФ РМ.

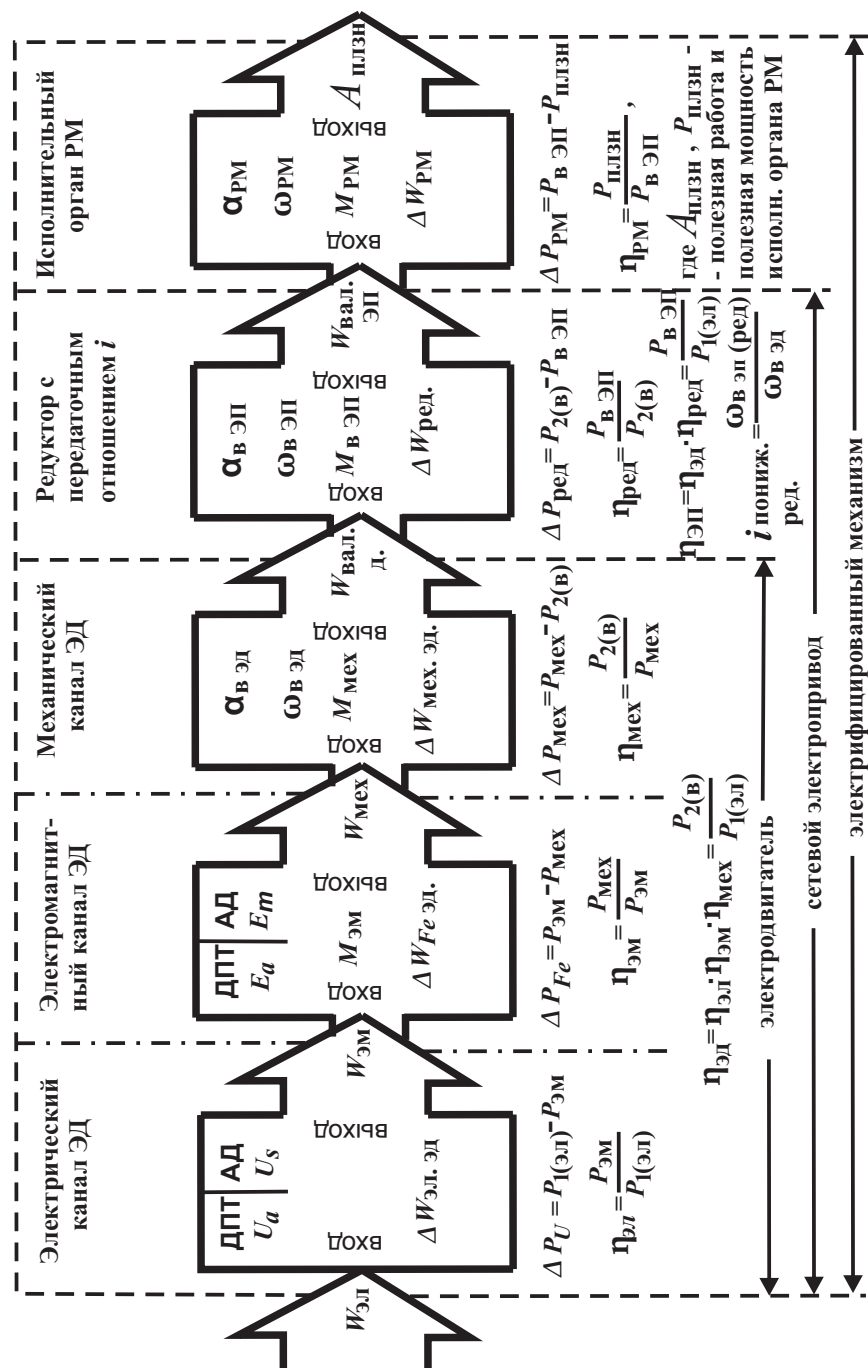


Рис. 2.2. Процесс энергопреобразования в силовом канале системы ЭП



## 2.2. Электроприводы с двигателями постоянного тока

### 2.2.1. Конструктивные особенности машин постоянного тока

Все двигатели постоянного тока объединяет общность конструктивного построения. Неподвижная часть машины называется статором, на внутренней поверхности его магнитопровода симметрично и попеременно располагаются разноименные ( $N$  и  $S$ ) полюсы с обмотками возбуждения, представляющими пары полюсов ( $p$ ); вращающаяся часть, называемая якорем, является наиболее ответственным и сложным в конструктивном отношении элементом машины постоянного тока.

Назначением полюсов возбуждения статора является создание единого магнитного поля в машине, силовые линии которого исходят, например, из северного ( $N$ ) полюса, проходят через воздушный зазор, пронизывают магнитную систему якоря, затем в другом месте опять проходят через воздушный зазор, по ярму статора выходят к южному ( $S$ ) полюсу и замыкаются на северный ( $N$ ) полюс. В общем случае электромагниты возбуждения выполнены в форме соленоидов, могут иметь одну и более пар полюсов ( $p$ ). В принципе электромагниты возбуждения могли бы быть заменены на постоянные магниты, тогда бы двигатель постоянного тока лишился возможности управления магнитным потоком возбуждения, что широко используется в современных системах электроприводов (ЭП) с двухзонным управлением скоростью.

В современных машинах постоянного тока используется так называемый барабанный тип якоря, который выполняется в конструктивах петлевого (рис. 2.3) или волнового (рис. 2.4) исполнения обмоток, либо в более сложных их модификациях. Все предопределяется назначением двигателя и его номинальными данными: напряжением, скоростью и мощностью.

Обмотка якоря выполняется следующим образом: проводники в пазу, находящиеся в конкретном положении относительно магнитной оси, например северного полюса ( $N$ ), через лобовую часть обмотки входят в продолжение проводников в пазу, который в это же мгновение находится в аналогичном положении относительно магнитной

оси взаимодействующего южного ( $S$ ) полюса. При этом угловое рас-  
согласование между названными пазами равно полюсному делению  
двигателя ( $\tau$ ), которое определяется числом главных полюсов возбу-  
ждения и составляет: в двухполюсной машине  $180^\circ$  эл, в четырехполюс-  
ной  $90^\circ$  эл, в шестиполюсной  $60^\circ$  эл и т. д. Конструктивно это пред-  
усмотрено по каждой паре пазов с проводниками, находящимися под  
взаимодействующими  $N$  и  $S$  полюсами одной пары, а далее — между  
 $S$  и  $N$  следующей пары полюсов.

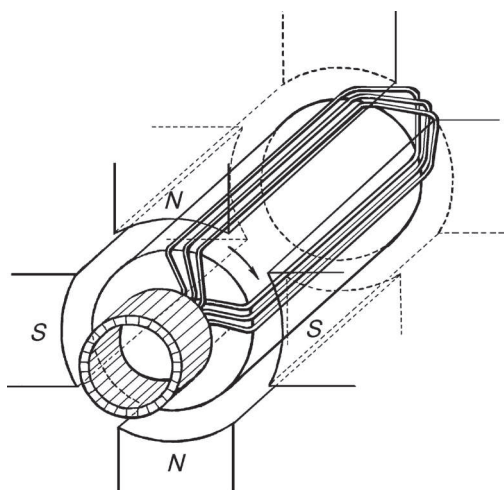


Рис. 2.3. Конструкция якоря  
с петлевой обмоткой

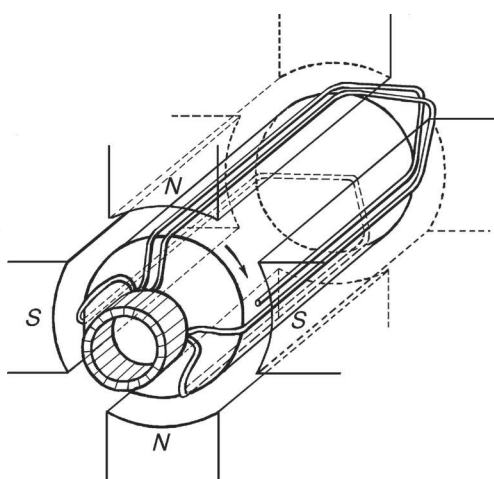


Рис. 2.4. Конструкция якоря  
с волновой обмоткой

Для обеспечения электромагнитного взаимодействия в конкретной системе создаются необходимые условия: что-то должно быть изме-  
няющимся, например, физическая величина электрической ( $\Phi_m$ ) или  
механической переменной ( $\omega$ ).

Электромагнитное взаимодействие рабочей обмотки якоря с обмо-  
ткой возбуждения возможно, когда по цепи возбуждения протекает по-  
стоянный ток возбуждения, создающий в магнитной системе статора  
и якоря магнитный поток ( $\Phi_m$ ), постоянный по величине и неподвиж-  
ный в пространстве. При этом цепь обмотки якоря включена на источ-  
ник постоянного напряжения якорной цепи, которое подается к об-  
мотке якоря через щеточно-коллекторное устройство, выполняющее  
в двигательном режиме машины функцию механического инвертора  
(преобразователя подводимого постоянного напряжения в перемен-  
ное), поскольку по проводникам обмотки якоря должен протекать пе-

ременный ток ( $I_n$ ), а во внешней цепи якоря — рабочий постоянный ток якоря ( $I_a$ ).

При названных условиях проводники работающих секций обмотки якоря пронизываются силовыми линиями магнитного поля возбуждения, исходящими от полюсов, под которыми эти проводники находятся. Описанное обстоятельство позволяет при барабанном типе якоря использовать как петлевое, так и волновое исполнение обмоток так, что все заложенные в пазы проводники, находящиеся под соответствующими полюсами, являются активно работающими, по ним протекает переменный ток  $I_n$ .

Рассмотрим конструкцию обмоток. Начало проводников полусекции, например под северным полюсом, присоединяется к ламели (изолированной контактной пластине) коллектора, а концы проводников другой половины секции, под южным полюсом, присоединяются к другой ламели, отстоящей от первой на величину коллекторного деления ( $y_k$ ). На рис. 2.5 в развернутом виде показаны фрагменты исполнения петлевой и волновой обмоток и их присоединения к ламелям коллектора.

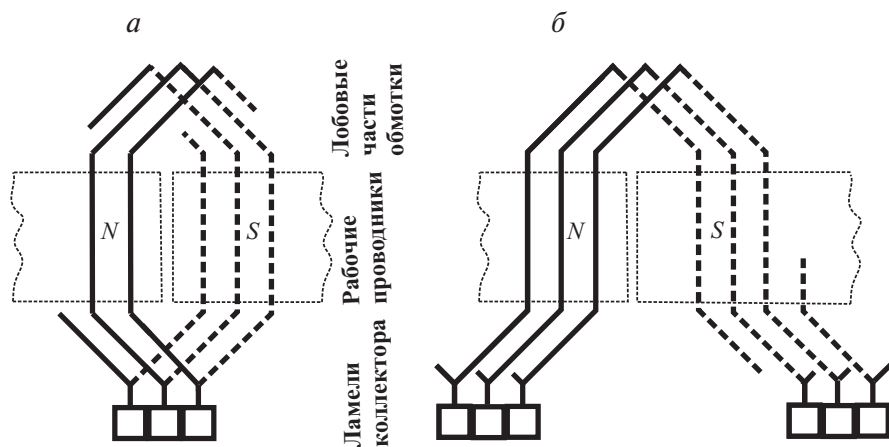


Рис. 2.5. Фрагменты исполнения петлевой (а) и волновой (б) обмоток и их присоединения к ламелям коллектора

Проводники в пазу, находящиеся под одним, например северным полюсом (на рис. 2.5 показаны сплошной линией), через лобовую часть обмотки поочередно последовательно соединяются с проводниками в пазу под южным полюсом (показаны пунктиром), образуют единую электрическую цепь, начало и конец которой подключаются к различ-

ным коллекторным пластинам. Такая электрическая цепь называется *секцией обмотки якоря* и состоит из двух секционных сторон: на интервале полюсного деления  $N - S$  секционная сторона под северным полюсом (проводники обозначены сплошными линиями) от коллектора восходит к лобовой части, а секционная сторона под южным полюсом (проводники обозначены пунктиром) нисходит от лобовой части обмотки якоря к другой пластине коллектора. А на интервале полюсного деления  $S - N$  картина будет обратной.

Конструктивные особенности исполнения петлевой и волновой обмоток связаны с понятиями, называемыми шагами обмоток, которые необходимо знать для выполнения обмотки:

- $y_1$  называется первым шагом, который равен величине полюсного деления ( $\tau$ ), измеряемого линейно по дуге или в градусах между магнитными осями (серединами) соседних полюсов; при том и другом типе обмотки представляет ширину витка обмотки;
- $y_2$  — второй шаг, равен расстоянию между разноименными секционными сторонами соседних секций;
- $y$  — результирующий шаг, определяется расстоянием между одноименными секционными сторонами соседних секций;
- $y_k$  — шаг по коллектору, равен расстоянию между центрами соседних коллекторных пластин, принадлежащих одной секции.

Из рис. 2.6 можно видеть, что между шагами обмоток существует определенная зависимость:

- для петлевой обмотки  $y = y_1 - y_2 = y_k = 1$ , так как начало и конец обмотки присоединяются к соседним коллекторным пластинам;
- для волновой обмотки  $y = y_1 + y_2$ .

Вместе с тем конструктивные особенности обмоток определяются по номинальным величинам напряжения и тока в цепи якоря. Прежде всего это номинальное напряжение ( $U_a$ ), на которое рассчитывается обмотка якоря.

При значительной величине напряжения обмотка якоря должна иметь значительное число активных проводников ( $N_a$ ) и соответствующее число витков ( $w_a$ ), что может вызвать трудности с их размещением на якоре. Такая проблема разрешается исключительно конструктивными приемами. Во-первых, заданное число активных проводников связывают с количеством витков в секции ( $w_s$ ), что позволяет уменьшить число пазов ( $Z_a$ ). На рис. 2.6 показана часть волновой обмотки, у которой между двумя коллекторными пластинами находятся

три последовательно соединенных витка, представляющих одну секцию, занимающую два паза под соответствующими полюсами  $N$  и  $S$ . Во-вторых, еще можно уменьшить число реальных пазов, закладывая двухслойную обмотку, в которой сверху и внизу каждого паза рядом укладывается несколько секционных сторон (обычно не более пяти), относящихся к разным секциям.

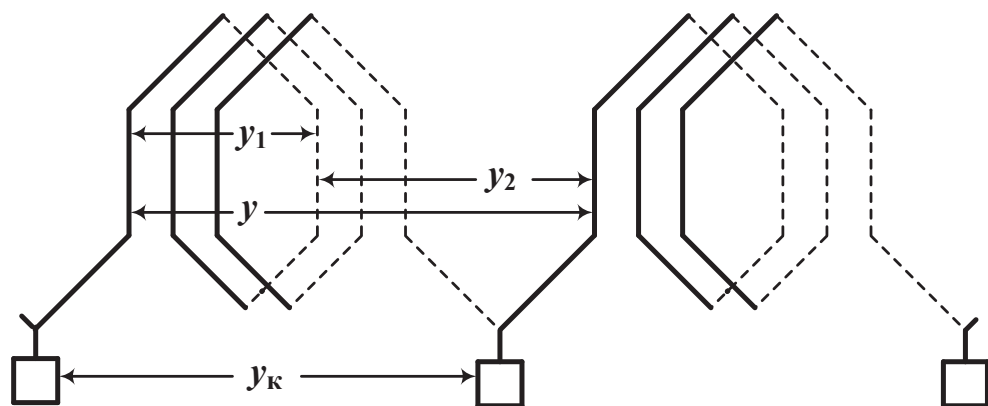


Рис. 2.6. Часть волновой обмотки

Обратим внимание на то, что с каждой коллекторной пластиной соединяются два проводника (см. рис. 2.5, рис. 2.6): левый относится к концу предыдущей секционной стороны, расположенной внизу паза, а правый относится к началу следующей секционной стороны, лежащей сверху паза.

Обычно для упрощения считают, что секция состоит из одного витка, но если секция состоит из нескольких витков (рис. 2.6), то секционная сторона содержит столько проводников, сколько витков в секции.

Названные приемы позволяют создавать обмотку якоря на заданное номинальное напряжение с необходимым числом проводников при минимальном числе пазов и коллекторных пластин, обеспечивая приемлемые габариты якоря и коллектора двигателя.

В свете изложенного интересно выяснить существующую зависимость между числом активных проводников ( $N_a$ ) обмотки якоря, числом ее витков ( $w_a$ ), числом секций ( $s_a$ ) и числом коллекторных пластин ( $K_a$ ).

Поскольку каждый виток состоит из двух полусекций проводников, общее число витков обмотки определяется половиной активных проводников

$$w_a = \frac{N_a}{2}.$$

Число секций обмотки якоря  $s_a$  определяется числом витков обмотки якоря  $w_a$ , деленным на число витков в секции  $w_c$

$$s_a = \frac{N_a}{2} \frac{1}{w_c}.$$

Поскольку к каждой коллекторной пластине присоединяются два конца — начало одной секции и конец другой и каждая секция имеет два конца, постольку число коллекторных пластин  $K_a$  равно числу секций

$$K_a = s_a = \frac{N}{2w_c}.$$

Кроме показанного выше отличия, петлевая и волновая обмотки якоря имеют различную взаимосвязь числа пар полюсов возбуждения ( $p$ ) с числом параллельных ветвей обмотки якоря ( $a$ ). В общем случае для многополюсной машины обмотка якоря имеет столько параллельных ветвей, сколько полюсов имеет машина:

- при петлевой обмотке  $2a = 2p$ , или  $a = p$ ;
- при волновой обмотке  $2a = 2$ , или  $a = 1$  при любом  $p$ .

Объясняется это следующим: каждая параллельная ветвь обмотки состоит из  $N/2a$  последовательных соединений проводников, причем в петлевой обмотке эти проводники располагаются только под каким-нибудь одним полюсом, а в волновой обмотке — под всеми полюсами данной полярности. Поскольку все параллельные ветви якоря подключены параллельно к шинам, соединяющим одноименные щетки, напряжение на зажимах якоря будет уравниваться ЭДС одной параллельной ветви. Изложенное позволяет утверждать, что электромагнитные и электромеханические свойства двигателей с петлевой и волновой обмотками в целом будут идентичными.

К конструктивным особенностям машин постоянного тока следует отнести то, что щетки на коллекторе расположены по оси (под серединами) главных полюсов. При этом важно представлять, что в действительности проводники секции, замкнутые накоротко щетками, находятся в нейтральных зонах, то есть отстоят от оси главных полюсов на  $\tau/2$  и находятся между соседними главными полюсами (или на оси дополнительных полюсов).

Двигатели постоянного тока различаются системой организации магнитного потока возбуждения:

- с независимым возбуждением, когда цепь обмотки возбуждения (ОВ) включена на напряжение независимого источника (либо с параллельным подключением ОВ на источник напряжения цепи якоря); будем обозначать такие машины «ДПТ НВ с напряженческими обмотками возбуждения», в которых главный магнитный поток  $\Phi_m = f(i_v)$ , при этом  $i_{vN}$  составляет  $(3...5) \% \cdot I_{aN}$  от номинального тока якоря;
- с последовательным возбуждением «ДПТ ПВ», когда обмотка возбуждения является токовой и, включаясь последовательно с рабочей обмоткой якоря, обтекается током нагрузки якоря, здесь  $\Phi_m = f(I_a)$ ;
- со смешанным возбуждением «ДПТ СВ»; имеет две обмотки возбуждения — напряженческую и токовую: первая включается независимо или параллельно относительно якоря, а вторая — последовательно с ним; результирующий суммарный магнитный поток будет

$$\Phi_{m\Sigma} = \Phi_{онв}(i_v) + \Phi_{опв}(I_a) = f(i_v; I_a).$$

Отсюда вытекает, что двигатели параллельного и независимого возбуждения создают  $\Phi_m$ , фактически независимый от  $I_a$  (если не учитывать реакцию якоря), и обладают электромеханическими свойствами, существенно отличающимися от тех, которыми обладают двигатели последовательного и смешанного возбуждения. Это определяет и области их практического использования в электроприводах различного назначения.

Для улучшения условий коммутации на коллекторе между главными полюсами статора устанавливаются дополнительные полюсы с соответствующими обмотками (ДП). В крупных машинах на основных полюсах возбуждения располагают так называемые компенсационные обмотки (КО) для снижения размагничивающего влияния реакции якоря; эти обмотки, находясь на полюсах магнитопровода статора, включаются последовательно в якорную цепь и создают компенсирующий магнитный поток в функции рабочего тока якоря. Обмотки ДП и КО также являются токовыми обмотками.

Необходимо отметить, что в реальных двигателях не весь магнитный поток  $\Phi$ , созданный электромагнитами возбуждения, замыкается



через магнитную систему якоря. Часть потока замыкается через воздух, его называют потоком рассеяния  $\Phi_\sigma$  и полагают пропорциональным току возбуждения  $\Phi_\sigma \equiv I_B$ .

Главный магнитный поток  $\Phi_m$  своими силовыми линиями замыкается через воздушный зазор и проходит по всей магнитной системе «статор — якорь», определяется не только током возбуждения  $i_B$ , но и магнитными свойствами материала магнитопровода. В целом зависимость  $\Phi_m = f(i_B)$ , а значит, и  $\Phi_\Sigma(i_B)$  (рис. 2.7, а) оказывается не только нелинейной функцией из-за насыщения, но и неоднозначной из-за гистерезиса.

Понятие магнитного потока лежит в основе определения индуктивностей. Как известно, индуктивность катушки со стальным сердечником зависит от насыщения, что имеет место в электрических машинах, и описывается кривой намагничивания  $\Phi = f(i)$ . При работе на линейной части кривой намагничивания  $\Phi \equiv I$ , при этом индуктивность цепи может быть значительной  $L = d\Phi/di$  и считается величиной неизменной. Обычно в конце линейной части кривой намагничивания находится точка номинального режима работы.

Как показано на рис. 2.7, а, на восходящем участке кривой намагничивания  $\Phi_m(i_B)$  на интервале до  $0,8\Phi_{mN}$  зависимость близка к линейной, а после  $0,8\Phi_{mN}$  на характеристике сказывается насыщение стали магнитопровода.

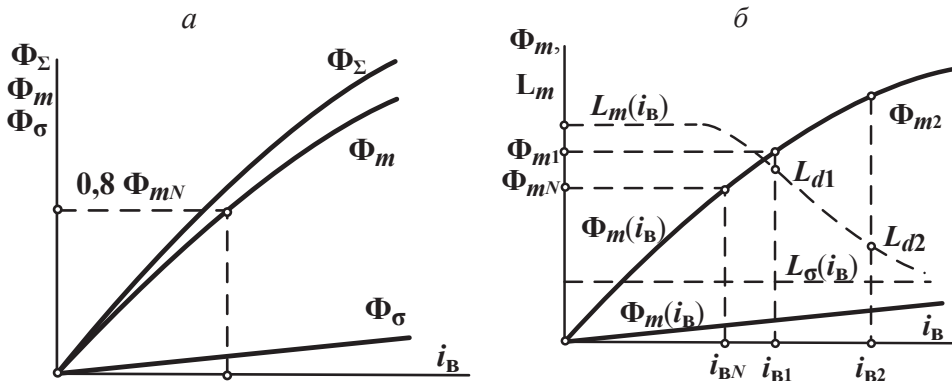


Рис. 2.7. Линейный (а) и нелинейный (б) участки кривой намагничивания

В области значительного превышения тока (рис. 2.7, б), в сравнении с номинальным, по мере проявления насыщения стали сердеч-



ника, индуктивность цепи уменьшается. В таких случаях используют понятия усредненной дифференциальной индуктивности от точки к точке по кривой намагничивания (точки обозначены  $L_{d1}, L_{d2}$ ), определенные через касательные к  $\Phi(i)$ . Что касается индуктивности рассеяния  $L_\sigma$ , то она соответствует магнитному потоку рассеяния  $\Phi_\sigma$ , который считается замыкающимся через воздух, поэтому от насыщения не зависит и остается небольшим, изменяющимся линейно  $\Phi_\sigma(i_B)$ .

Полный магнитный поток  $\Phi_\Sigma$ , Вебер = В·с, создаваемый катушкой со стальным сердечником, математически выражается комплексным числом или векторной величиной

$$\dot{\Phi}_\Sigma = \dot{\Phi}_m + \dot{\Phi}_\sigma,$$

где  $\Phi_m$  — главный рабочий магнитный поток;

$\Phi_\sigma$  — магнитный поток рассеяния.

### 2.2.2. Принцип работы ДПТ

Одним из основополагающих факторов в принципе работы ДПТ является среда энергопреобразования, которая характеризуется величиной магнитного потока  $\Phi_m$ , создаваемого обмоткой возбуждения ОВ. Магнитный поток от полюсов исходит силовыми линиями через полюсные наконечники, проходит через воздушный зазор и замыкается через якорь, то есть пересекает своими силовыми линиями проводники рабочей части обмотки якоря, находящиеся под полюсными наконечниками ОВ. Магнитная система является концентратором электромагнитного поля. Степень концентрации магнитного поля в магнитопроводе машины характеризуется магнитной индукцией  $B$ , Вебер

$$\frac{\text{Вебер}}{\text{м}^2} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \text{Тл},$$

которая определяется производной главного магнитного потока  $\Phi_m$  по площади его распределения  $S$  под полюсами возбуждения

$$B = \frac{d\Phi_m}{dS}.$$

В задачах электропривода, всегда связанных с использованием внешних проявлений физических процессов, протекающих в электрических машинах, принимается и используется усредненное мгновенное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл,

$$B = \frac{d\Phi_m}{dS} \approx \frac{p\Phi_m}{\pi DL}, \quad (2.1)$$

где  $S$  — площадь под парой полюсных наконечников,  $\text{м}^2$ ,  $S = \tau L$ .

Здесь  $\tau$  — ширина дуги полюсного наконечника,  $\text{м}$ ,  $\tau = \frac{\pi D}{p}$ ,

где  $D$  — диаметр посередине воздушного зазора,  $\text{м}$ ;

$p$  — число пар полюсов;

$L$  — длина полюсного наконечника, равная активной длине якоря,  $\text{м}$ .

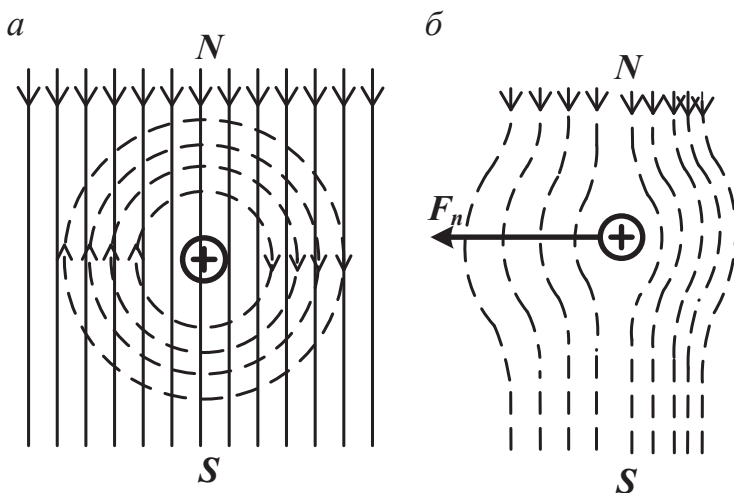


Рис. 2.8. Иллюстрация принципа работы ДПТ

Принцип работы двигателей постоянного тока основан на электромагнитном воздействии через воздушный зазор постоянного во времени и неподвижного в пространстве магнитного поля статора на электромагнитные поля вокруг каждого проводника, образованные переменным током  $I_n$ , протекающим по проводникам в активной части обмотки якоря. Ток  $I_n$  является инвертированным из постоянного тока  $I_a$ , протекающего во внешней цепи якоря. Наложение и взаимодействие названных магнитных полей вызывает изменение концентрации силовых линий около каждого проводника с током  $I_n$  (рис. 2.8, а, б). С одной стороны, результирующее поле становится разреженным, а с другой — уплотненным (рис. 2.8, б).

Естественное стремление силовых линий замыкаться по кратчайшему пути оказывает силовое воздействие на проводник с током  $I_n$ . Таково чисто физическое объяснение электродинамического эффекта, которое связано с понятием напряженности электромагнитного поля  $H$ ,  $\frac{A}{м} = \text{Эрстед}$ , то есть с силой электромагнитного воздействия

поля на находящийся в нем проводник с током.

Следует отметить, что обмотка якоря конструктивно представляет собой набор рамок с током, сдвинутых одна относительно другой на определенный угол. Величину переменного тока  $I_n$  можно выразить через постоянный ток  $I_a$ , а также через число активных проводников  $N$  или число витков  $w$  и параллельных ветвей обмотки якоря  $a$

$$I_n = I_a \frac{N}{2a} = I_a \frac{w}{a}. \quad (2.2)$$

На каждый виток активного проводника, находящегося под полюсом ОВ, действует пара сил, максимальные значения которых соответствуют взаимно перпендикулярному положению вектора напряженности магнитного поля возбуждения  $H_B$  и вектора напряженности магнитного поля рамки с током  $H_p$ , направления которых определяются правилом буравчика, рис. 2.9.

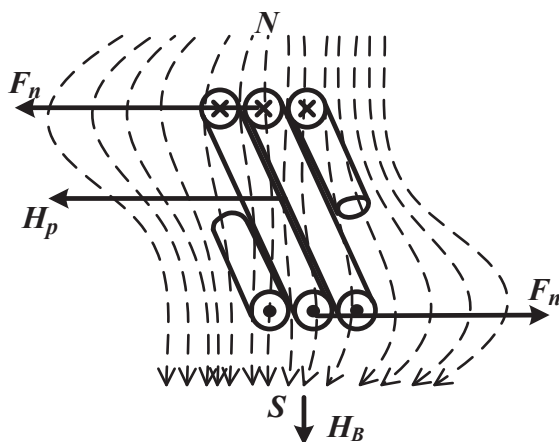


Рис. 2.9. Силовые линии магнитного поля обмотки ДПТ

Величина электродинамической силы  $F_n$ , Н, определяется по закону Био — Савара — Лапласа

$$F_n = BLI_n = \frac{p\Phi_m}{\pi DL} LI_a \frac{N}{2a} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi_m \frac{I_a}{D},$$

направление которой определяется по правилу левой руки, рис. 2.10.

Здесь  $I_a/D$  — напряженность электромагнитного поля рамки,  $I_a/D = H_p$ ,  $\frac{A}{M} = \text{Вб}$ .

Поскольку обмотка якоря представляет сумму активных рамок, в целом на якорь действует электромагнитный момент,  $M_{\text{эм}}$  Н·м, определяемый суммой пар электродинамических сил на плече радиуса их приложения

$$M_{\text{эм}} = 2 \sum_1^n F_n \cdot \frac{D}{2} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi_m I_a = c \Phi_m I_a,$$

где  $c$  — безразмерный конструктивный коэффициент двигателя,  $c = \frac{pN}{2\pi a}$ .

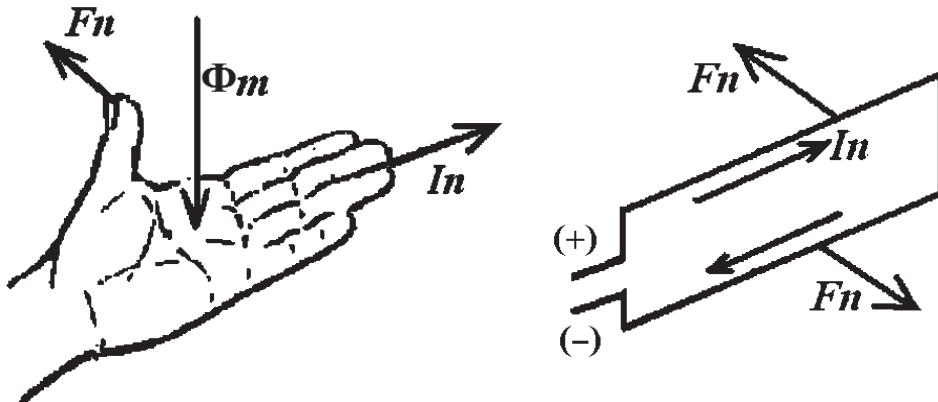


Рис. 2.10. Определение направлений векторов по правилу левой руки

Развиваемый электромагнитный момент обеспечивает приведение якоря во вращательное движение. При этом проводники его обмотки пересекают силовые линии магнитного поля возбуждения и в них индуцируется электродвижущая сила  $E_n$ , В,

$$E_n = B L V_n, \quad (2.3)$$

где  $V_n$  — круговая скорость вращения проводника, м/с,  $V_n = \omega \frac{D}{2}$ .

Здесь  $\omega$  — угловая скорость вращения якоря, рад/с,  $\omega = \int_t \frac{M_{\text{дин}}}{J} dt$ ,

где  $J$  — момент инерции якоря двигателя, кг·м<sup>2</sup>.

Направление ЭДС легко установить по правилу правой руки, (рис. 2.11). Уравнения (2.1), (2.2) и (2.3) характеризуют электромагнитное состояние среды энергообразования через индукцию  $B$ , силу тока  $I_n$  в проводнике, пересекающем это поле, и индуцируемую в проводнике ЭДС  $E_n$ . В этой среде  $\Phi_m$  пересекается рамками с током, имеющими по две активные стороны, поэтому можно записать выражение для полной ЭДС обмотки якоря  $E_a$ , В,

$$E_a = 2 \left( \frac{pN}{2\pi a} \Phi_m \frac{LD}{D2L} \omega \right) = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi_m \omega = c \Phi_m \omega.$$

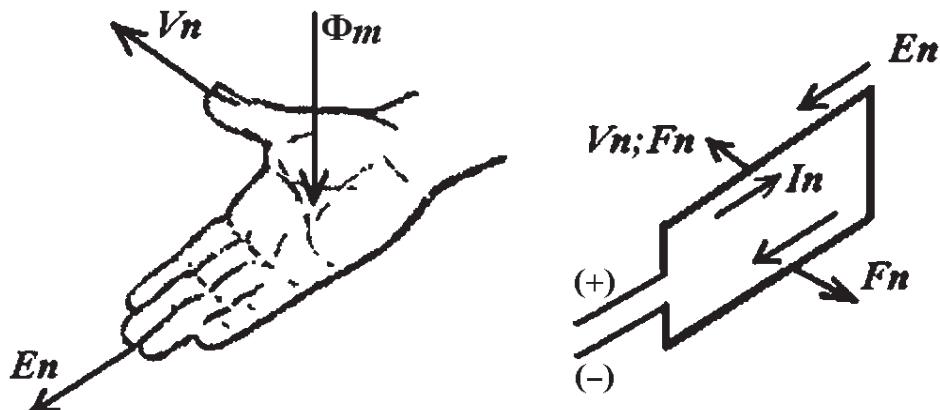


Рис. 2.11. Определение направлений векторов по правилу правой руки

Полученное уравнение закона электромагнитной индукции, реализуется в принципе действия и конструктивном воплощении ЭД постоянного тока. В силу физической природы возникновения и направленности навстречу току,  $E_a$  можно назвать противоЭДС вращения, которая выполняет естественную функцию внутреннего физического регулятора тока  $I_a$ , характеризующего нагрузку на валу двигателя.

### 2.2.3. Электрические схемы включения, энергетический баланс цепи якоря и статические характеристики ДПТ

Двигатели постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения (ДПТ НВ) включаются по следующей схеме (рис. 2.12).

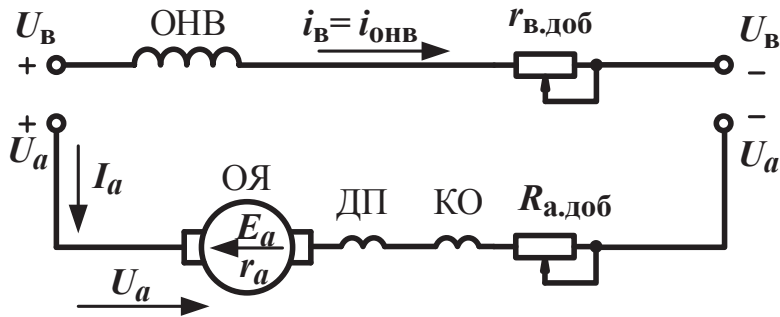


Рис. 2.12. Схема включения ДПТ НВ

Магнитный поток ДПТ НВ определяется током обмотки возбуждения ( $\Phi_m = f(i_B)$ ), при этом номинальный ток обмотки возбуждения  $i_{BN}$  составляет 3...5 % от номинального значения тока якоря  $I_{aN}$ . Его изменение возможно либо путем включения добавочного сопротивления  $r_{в.доб}$ , либо изменения независимо подводимого напряжения  $U_B$ .

В цепи якоря также имеется внешнее добавочное пускорегулировочное сопротивление. Собственное (внутреннее) сопротивление якоря  $r_a$  включает в себя сопротивление проводников обмотки якоря  $r_j$  и сопротивление щеточно-коллекторного контакта  $r_{щ}$ . Во внешнюю цепь якоря могут быть включены обмотка дополнительных полюсов ОДП и компенсационная обмотка, которые располагаются на статоре.

Несмотря на относительную сложность конструкции ДПТ, особенно это относится к конструкции обмоток якоря и щеточно-коллекторного узла, электромагнитно-механический процесс энергопреобразования достаточно прост для восприятия. Он наглядно представляется при рассмотрении баланса потребляемой якорной цепью электрической мощности  $P_{1(эл)}$  установившегося двигательного режима работы

$$\begin{aligned} P_{1(эл)} &= U_a I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a = P_{эм} + \Delta P_{ав} = \omega M_{эм} + \Delta P_{ав} = \\ &= \omega M_{г} + \omega \Delta M_{хх} + \Delta P_{ав} = P_{2(мех)} + \Delta P_{с.хх} + \Delta P_{ав}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $I_a$  — ток в цепи якоря, характеризующий статическую нагрузку на валу,  $I_a = M_{эм} / c \Phi_m$ ;

$E_a$  — противоЭДС вращения якоря,  $E_a = c \Phi_m \omega$ ;

$\Delta P_{av}$  — потери электрической мощности на нагревание сопротивлений в цепи якоря,  $\Delta P_{av} = I_a^2 \cdot R_a$ ;

$M_B$  — развиваемый на валу механический момент,  $M_B = M_{эм} - \Delta M_{с.хх}$ ;

$P_{2(мех)}$  — механическая мощность, отдаваемая с вала ЭД,  $P_{2(мех)} = \omega_0 M_B$ ;

$\Delta P_{с.хх}$  — постоянные потери холостого хода на перемагничивание магнитопровода и вихревые токи, а также механические на трение  $\Delta P_{с.хх} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{тр} = \omega M_{хх}$ ;

$P_{эм}$  — электромагнитная мощность, развиваемая внутри ЭД,  $P_{эм} = E_a I_a = \omega M_{эм}$ .

Разделив  $P_{1(эл)}$  на  $I_a$ , получают уравнение баланса напряжения, приложенного к якору,

$$U_a = E_a + I_a R_a = c \Phi_m \omega + I_a R_a,$$

откуда легко получить уравнения статических характеристик ДПТ НВ.

Уравнение статической электромеханической характеристики  $\omega = f(I_a)$  имеет вид

$$\omega = \frac{U_a}{c \Phi_m} - I_a \frac{R_a}{c \Phi_m} = \omega_0 - \Delta \omega_I, \quad (2.5)$$

а уравнение статической электромеханической характеристики  $\omega = f(M_{эм})$  с учетом  $I_a = M_{эм} / c \Phi_m$  запишется

$$\omega = \frac{U_a}{c \Phi_m} - M_{эм} \frac{R_a}{(c \Phi_m)^2} = \omega_0 - \Delta \omega_M, \quad (2.6)$$

то есть при компенсации реакции якоря статические характеристики линейны.

Оценку электромеханических свойств и энергетики в установившемся режиме движения ДПТ НВ удобно производить из сопоставления статических характеристик  $\omega(I_a)$  и  $\omega(M_{эм})$ . Для этого их изображают в совмещенной системе координат таким образом, чтобы масштаб по оси  $\omega$ , а главное по осям абсцисс  $I_a$  и  $M_{эм}$  обеспечивал полное совпадение естественных (основных) характеристик (рис. 2.13). В дальнейшем это обеспечит удобство их сопоставления, особенно при изменении потока  $\Phi_m = \text{var}$ .

Рассмотрим влияние параметров электрических цепей на вид искусственных характеристик ДПТ НВ. К таковым относятся  $R_a$ ,  $U_a$  и  $\Phi_m$ .

1.  $R_a = r_a + R_{\text{доб}} - \text{var}$ ;  $U_{aN}$ ;  $\Phi_{mN}$ . Введение добавочного сопротивления обычно используется в разомкнутых системах сетевого ЭП для ограничения тока  $I_a$  при пуске и управлении скоростью путем ступенчатого изменения величины  $R_{\text{доб}}$ . Увеличение  $R_{\text{доб}}$  при неизменной нагрузке на валу ( $M_c = \text{const}$ ) снижает жесткость характеристик ( $\beta_i = \text{var}$ ), а значит, и устойчивость работы. При этом увеличиваются переменные потери  $\Delta P_{av} = I_a^2 \cdot R_{\text{доб}}$ , рассеивание тепла в окружающую среду, экономичность работы и КПД установки падают. Этот способ регулирования используют при управлении скоростью «вниз» от естественной характеристики, рис. 2.13.

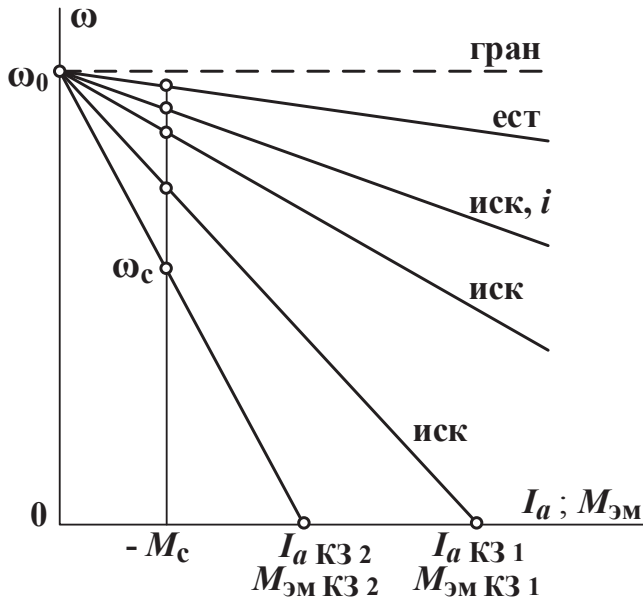


Рис. 2.13. Статические характеристики ДПТ НВ при  $R_a = \text{var}$

2.  $U_a = \text{var}$ ;  $R_a = r_a$ ,  $\Phi_{mN}$ . В таких случаях используется переключение якорной цепи на напряжение другой сети, если имеется такая возможность, либо применяют в составе ЭП ПЭЭ (систему «Г — Д» или «ТП — Д»). В последнем случае соответственно увеличиваются капитальные затраты, но обеспечивается экономичная эксплуатация, плавное управление скоростью и устойчивая работа на жестких характеристиках, что показано на рис. 2.14. Все статические характеристики облада-



ют одинаковой жесткостью ( $\beta_i = \text{const}$ ). Этот способ регулирования используют при управлении скоростью «вниз» от естественной (основной) характеристики.

3.  $\Phi_m = \text{var}$ ;  $R_a = r_a$ ,  $U_{aN}$ . Заметим, что изменение  $\Phi_m = f(i_b)$  оказывает неодинаковое влияние на электромеханическую и механическую характеристики, которые совпадают при соответствующем подборе масштабов  $I_a$  и  $M_{эм}$  только при естественных (основных) характеристиках, когда  $\Phi_{mN}$ ,  $\beta_I = \beta_M = \text{const}$ .

Влияние  $\Phi_m$  используют для управления скоростью «вверх» от естественной (основной) характеристики как в разомкнутых, так и в замкнутых системах ЭП. Такой способ управления скоростью ЭП применяют в РМ второго класса (см. § 1.4.2), когда с помощью ЭП системе «ЭП — РМ» придется формировать необычную характеристику — см. уравнение (1.11) при  $x = -1$ . В таком случае управление скоростью системы производится по закону сохранения постоянства мощности  $P = M \downarrow \omega \uparrow = \text{const}$ , который обеспечивает  $M_c = f(\omega)$  в области  $\omega > \omega_N$  изменяющимся по гиперболическому закону.

Для управления магнитным потоком  $\Phi = f(i_b)$  изменяют ток возбуждения  $i_b = U_b / r_{b, \text{доб}}$  (при помощи подводимого напряжения  $U_b$  или величины  $r_{b, \text{доб}}$ ). При снижении  $\Phi_m$  увеличивается  $\omega_0 = U_a / (c\Phi_m)$  и уменьшается  $M_{эмкз} = c\Phi_m I_{акз}$ , а ток короткого замыкания  $I_{акз}$  не зависит от  $\Phi_m$  и остается неизменным. Снижение  $\Phi_m$  оставляет неизменными противоЭДС  $E_a = c\Phi_m \omega = \text{const}$  и переменные потери в цепи якоря  $\Delta P_{aV} = I_{aN}^2 \cdot r_a = (U_a - E_a) I_{aN} = \text{const}$  при условии выполнения гиперболического закона изменения  $M_c(\omega)$ . В результате этого при  $\Phi_m < \Phi_{mN}$  жесткость  $\beta_I$  характеристики  $\omega(I_a)$  снижается меньше по сравнению с жесткостью  $\beta_M$  характеристики  $\omega(M_{эм})$  — рис. 2.15.

Изложенным не исчерпываются возможности влияния на вид статических характеристик и на электромеханические свойства ДПТ НВ [13, с. 43].

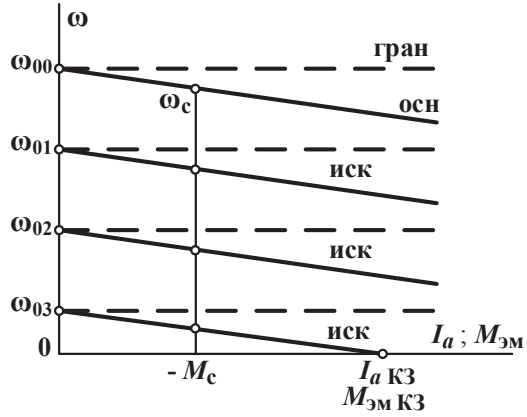


Рис. 2.14. Статические характеристики ДПТ НВ при  $U_a = \text{var}$

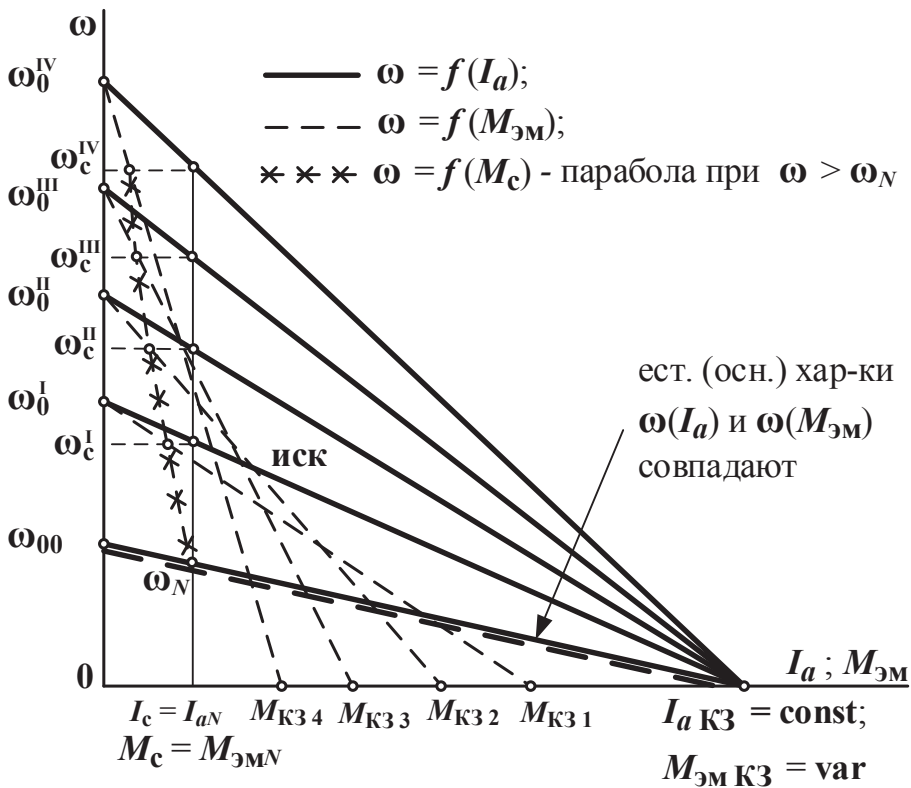


Рис. 2.15. Статические характеристики ДПТ НВ при  $\Phi = \text{var}$

### Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ ПВ) и смешанного возбуждения (ДПТ СВ)

Обмотки последовательного возбуждения ДПТ ПВ (рис. 2.16) и ДПТ СВ (рис. 2.17) рассчитаны на протекание рабочего тока якоря  $I_a$ , который и является в ДПТ ПВ током возбуждения,  $I_a = I_B$ ;  $\Phi_m = f(I_a)$ .

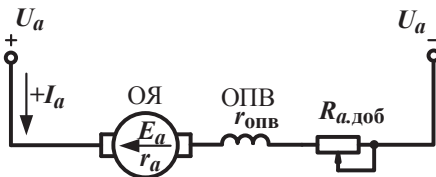


Рис. 2.16. Схема ДПТ ПВ

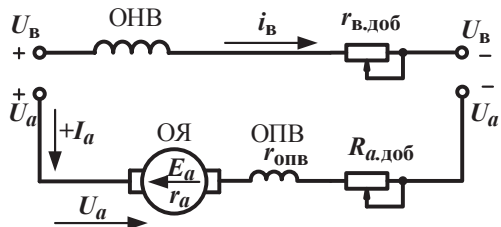


Рис. 2.17. Схема ДПТ СВ

Электромагнитное состояние ДПТ СВ характеризуется суммарной кривой намагничивания (рис. 2.18). Внешне баланс потребляемой якорем ДПТ ПВ и СВ электрической мощности  $P_{1(эл)}$  принципиально не отличается от баланса (2.4). Не имеет внешнего отличия и запись уравнений статических характеристик (2.5) и (2.6). Однако в ДПТ ПВ материальная среда энергопреобразования характеризуется зависимостью магнитного потока  $c\Phi_m = f(I_a)$  от рабочего тока в цепи якоря, что приводит к нелинейному виду его статических характеристик. В меньшей степени это наблюдается в машинах смешанного возбуждения, где  $c\Phi_m = f(i_b \text{ и } I_a)$ . Важно отметить, что в двигателе последовательного возбуждения  $E_a = c\Phi_m = f(I_a) \cdot \omega$  и  $M_{эм} = c\Phi_m(I_a) \cdot I_a$ , а в двигателе смешанного возбуждения  $E_a = c\Phi_{m\Sigma}(i_b, I_a) \cdot \omega$ ;  $M_{эм} = c\Phi_{m\Sigma}(i_b, I_a) \cdot I_a$ . Сказанное отражается на количественных величинах в балансах  $P_{1(эл)}$  и электромеханических свойствах рассматриваемых двигателей, когда их статические характеристики приобретают нелинейную форму.

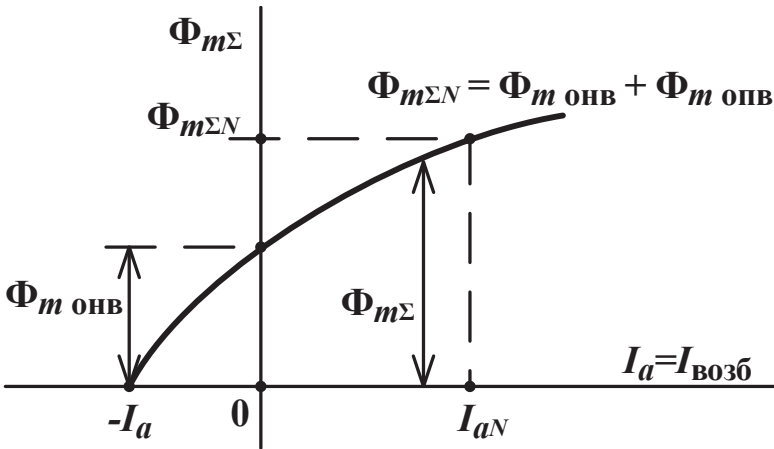


Рис. 2.18. Суммарная кривой намагничивания ДПТ СВ

Рассмотрим влияние параметров электрических цепей на вид искусственных характеристик ДПТ ПВ и ДПТ СВ. Для изменения вида статических характеристик ДПТ ПВ и ДПТ СВ здесь используют влияние параметров электрических цепей  $R_{адоб}$ ,  $U_a$  и  $\Phi_m$ .

1.  $R_{адоб} = \text{var}$ ,  $U_{aN}$ ,  $\Phi_{m \text{ опв}} = f(I_a)$ , рис. 2.19. Используются в сетевых ЭП для управления скоростью «вниз» от естественной характеристики.

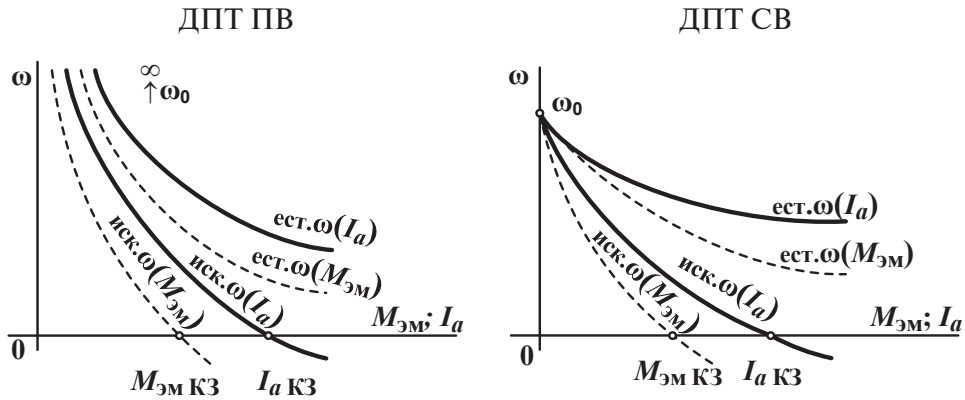


Рис. 2.19. Статические характеристики при  $R_a = \text{var}$

2.  $U_a = \text{var}$ ,  $R_a = r_{\text{я}}$ ,  $\Phi_{\text{мопв}} = f(I_a)$ , рис. 2.20.

При  $U_a = \text{var}$  одноименные характеристики сдвигаются параллельно; такой способ включения используют при наличии сетей с различными значениями  $U_a$ .

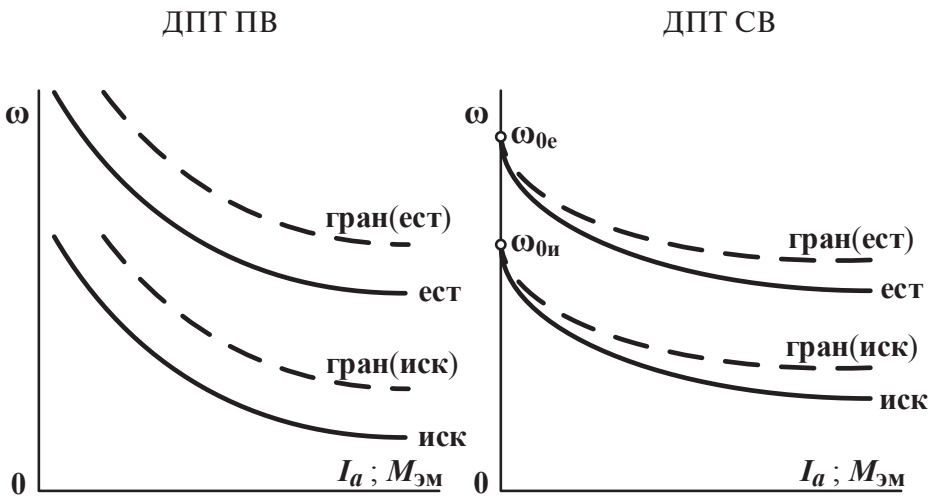
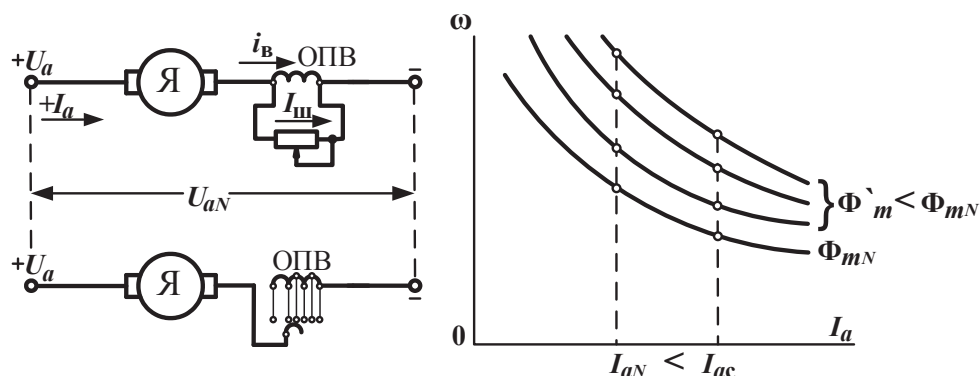


Рис. 2.20. Статические характеристики при  $U_a = \text{var}$

3.  $\Phi_{\text{мопв}} = \text{var}$ ,  $U_{aN}$ ,  $R_a = r_{\text{я}}$ , рис. 2.21.

Влияние  $\Phi_m$  ДПТ ПВ используют для увеличения  $\omega$  в области перегрузки; для этого используют схему шунтирования ОПВ, а в тяговых ЭП электрифицированного транспорта применяют специальные ЭД с переключением числа витков ОПВ.

Рис. 2.21. Схема и статические характеристики при  $\Phi = \text{var}$ 

4. Использование искусственных схем включения ДПТ ПВ [6, с. 43], когда электромагнитное состояние ЭП формируется путем включения ОПВ в то или другое плечо делителя напряжения, питающего силовую цепь якоря.

### Сопоставление электромеханических свойств ДПТ

Если сопоставить различные типы ДПТ с одинаковыми номинальными данными, то естественные статические характеристики позволят определить области их рационального практического использования — рис. 2.22 и рис. 2.23.

Благодаря различным зависимостям момента от тока якоря  $M_{\text{эм}} = f(I_a)$  (это обусловлено неодинаковым электромагнитным состоянием ЭД  $\Phi_m = f(I_{\text{возб}})$ ), в области недогрузки экономичнее работает ДПТ НВ, а в области перегрузки — ДПТ ПВ, так как их работа в названных областях связана с меньшими значениями тока в цепи якоря. Области их применения:

- ДПТ ПВ обладает значительной перегрузочной способностью и применяется в механизмах электрифицированного транспорта (электровозы, метро, трамвай и др.), где исключена работа без нагрузки;
- ДПТ СВ также обладает повышенной перегрузочной способностью, используется в подъемно-транспортных механизмах, где не исключена работа на холостом ходу;
- ДПТ НВ обычно используют в механизмах, требующих достаточно жесткую характеристику, в том числе и при отсутствии нагрузки на валу.

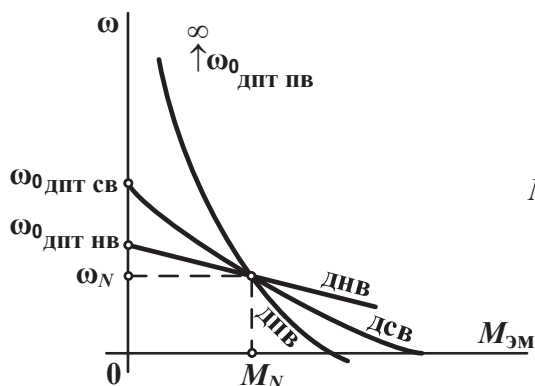


Рис. 2.22. Результат сопоставления механических характеристик ДПТ

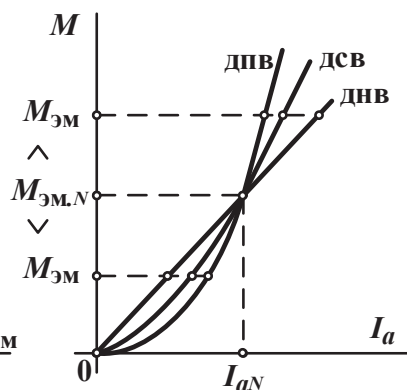


Рис. 2.23. Механические характеристики ДПТ различных типов

## 2.3. Трехфазные асинхронные электроприводы

### 2.3.1. Конструктивные особенности и принцип работы АД

*Асинхронные машины* называют *индукционными*, поскольку принцип электромагнитной индукции заложен в основу силового взаимодействия между статором и ротором.

В пазах статора располагаются три однофазные обмотки, магнитные оси которых сдвинуты в пространстве на угол  $120^\circ$  (или  $2/3\pi$  рад); обмотки могут соединяться в схему, называемую звездой или треугольником, в зависимости от величины линейного напряжения источника. Обмотка статора уложена в пазах таким образом, чтобы обеспечить распределение магнитной индукции вдоль воздушного зазора по закону, близкому к синусоидальному. Обычно используют петлевое исполнение обмоток.

Обмотка статора подключается к источнику трехфазного напряжения, в котором мгновенные значения фазных напряжений сдвинуты во времени относительно друг друга на  $1/3$  периода, то есть на  $120$  электрических градусов ( $2/3\pi$  электрических радиан):

$$\begin{aligned}
u_{SA} &= U_{Sm} \cos(\omega_1 t + \gamma) = \sqrt{2} \cdot U_s \cos(2\pi f_1 t + \gamma); \\
u_{SB} &= U_{Sm} \cos(\omega_1 t + \gamma - \frac{2}{3}\pi) = \sqrt{2} \cdot U_s \cos(2\pi f_1 t + \gamma - \frac{2}{3}\pi); \\
u_{SC} &= U_{Sm} \cos(\omega_1 t + \gamma + \frac{2}{3}\pi) = \sqrt{2} \cdot U_s \cos(2\pi f_1 t + \gamma + \frac{2}{3}\pi),
\end{aligned} \quad (2.16)$$

где  $U_{Sm}$  и  $U_s$  — амплитудное и действующее фазное напряжение;

$\omega_1$  — круговая частота фазного напряжения, эл. рад/с,  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ;

$\gamma$  — начальная фаза напряжения, эл. рад;

$f_1$  — циклическая частота фазного напряжения, Гц = период/с.

Под действием приложенной системы трехфазного напряжения возникает ток, мгновенные значения которого в фазах статора также изменяются во времени по периодическому закону. Амплитуда тока  $I_{Sm}$ , а значит, и создаваемый им магнитный поток  $\Phi_{mS}$ , и намагничивающая сила  $F_{mS} = I_{Sm}w$  ( $w$  — число витков) перемещаются по фазам, чем создается физический эффект вращения магнитного поля статора. Магнитный поток вращающегося магнитного поля статора через воздушный зазор пересекает и проводники обмотки ротора, в которых благодаря явлению электромагнитной индукции индуцируется ЭДС  $E_r$ .

В целях снижения сопротивления прохождению рабочего магнитного потока  $\Phi_m$  между статором и ротором через воздушный зазор  $\delta$  в соответствии с индукционным принципом работы АД последний выполняется минимально возможным (0,4–0,5 мм в машинах небольшой мощности и до нескольких миллиметров в крупных).

При замкнутой цепи обмотки ротора под действием  $E_r$  протекает индукционный ток ротора  $I_r$ , создающий свое вращающееся в том же направлении магнитное поле обмотки ротора. Таким образом, в АД создается суммарное (резльтирующее) вращающееся магнитное поле.

Обратим внимание на то, что обмотки статора и ротора АД одновременно выполняют функции обмоток возбуждения, создающих единое вращающееся магнитное поле, и рабочих обмоток, обеспечивающих преобразование потребляемой из сети электрической энергии электромагнитным путем в механическую энергию, отдаваемую с вала. Сказанное, безусловно, отражается на электромагнитном состоянии в функции нагрузки на валу и на электромеханических свойствах АД.

Электромагнитное состояние АД характеризуется величиной суммарного магнитного потока  $\Phi_m$  от всех фаз и пар полюсов, проходящего по магнитопроводу от статора к ротору через воздушный зазор

$\delta$ , и величиной напряженности магнитного потока  $H$  в воздушном зазоре, которая обуславливает силовое взаимодействие между статором и ротором.

При рассмотрении ДПТ было отмечено, что их электромагнитное состояние обеспечивается специальными электромагнитами возбуждения на статоре (какой-либо другой функции они не выполняют), а взаимодействуют с электромагнитными полями рабочих проводников обмотки якоря, получающими электроэнергию от отдельного источника. В отличие от ДПТ, в АД электромагнитный принцип взаимодействия между статором и ротором совсем другой — индукционный. Тем не менее и в АД и в ДПТ эффект электромагнитного взаимодействия между статором и ротором характеризуется магнитной индукцией  $B$ ,  $\frac{B\delta}{\text{м}^2} = \frac{B \cdot c}{\text{м}^2} = \text{Тл}$ , в каждой точке пространства воздушного

зазора  $\delta$ , которая определяется производной магнитного потока  $\Phi_m$ ,  $B\delta = B \cdot c$ , по площади его распределения  $S$  под каждой парой полюсов

$$B = \frac{d\Phi_m}{dS},$$

откуда

$$\Phi_m = \int B \cdot dS.$$

Поскольку АД выпускаются в широком диапазоне мощностей (от единиц до сотен киловатт) при заданном числе пар полюсов  $p = 1; 2; 3; 4$  и далее, постольку с точки зрения обеспечения нормального теплового состояния АД возникает необходимость в таких случаях использовать различные схемы формирования фаз и числа пар полюсов  $p$  в них при том или ином числе параллельных ветвей. Такая проблема возникает в связи с тем, что основной конструктивной особенностью выполнения трехфазной обмотки АД является процедура укладки ее в пазы статора таким образом, чтобы формировать заданное число пар электромагнитных полюсов возбуждения по каждой фазе.

В машинах небольшой мощности оказывается рациональным использование последовательного соединения проводников катушечных групп всех пар полюсов по фазам АД. При этом образуется общее число витков в фазе  $w_\phi$  и все последовательно соединенные проводники участвуют в формировании каждой пары магнитных полюсов по каждой фазе



$$w_{\phi} = w_n p,$$

где  $w_{\phi}$  — число витков фазы, на которое подается фазное напряжение;  
 $w_n$  — число витков пары полюсов.

В таком случае  $w_{\phi}/w_n = p$  дает информацию о числе пар полюсов в фазе. Потокосцепление фазы выражается как

$$\dot{\Psi}_{m\phi} = w_{\phi} \Phi_{m\phi} = w_n p \Phi_{m\phi},$$

где  $\Phi_{m\phi}$  — рабочий магнитный поток одной фазы.

В машинах значительной мощности требуется разгружать токовую нагрузку в цепях пар полюсов возбуждения. С этой целью используют параллельное подключение цепей полюсов возбуждения за счет увеличения числа параллельных ветвей при подаче фазного напряжения, которое фактически прикладывается параллельно к каждой паре полюсов независимо от числа пар полюсов  $p$ . В таком случае  $w_{\phi}$  не содержит информацию о числе пар полюсов, будучи

$$w_{\phi} = w_n.$$

Потокосцепление фазы выразится следующим образом:

$$\dot{\Psi}_{m\phi} = w_{\phi} \Phi_{m\phi} p = w_n \Phi_{m\phi} p.$$

Как видим, в рассмотренных случаях в выражениях потокосцеплений фаз решающее значение имеет не число витков на фазу  $w_{\phi}$ , а число витков  $w_n$  на пару полюсов  $p$ , обеспечивающее идентичность выражений  $\dot{\Psi}_{m\phi}$  в любом случае.

В задачах электропривода оценку электромагнитного состояния АД выражают через главное потокосцепление  $\dot{\Psi}_m$ ,  $\text{Вб} = \text{В} \cdot \text{с}$ , физическую сущность которого отражает произведение

$$\dot{\Psi}_m = p w_n \cdot \dot{\Phi}_m,$$

где  $p$  — число пар полюсов;

$w_n$  — число витков пары полюсов, участвующих в образовании потокосцепления  $\dot{\Psi}_m$ ;

$\dot{\Phi}_m$  — обобщенный комплекс рабочего магнитного потока всех фаз статора АД,  $\dot{\Phi}_m = \frac{2}{3}(\dot{a}_1 \cdot \Phi_{mA} + \dot{a}_2 \cdot \Phi_{mB} + \dot{a}_3 \cdot \Phi_{mC})$ .

Здесь  $\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dot{a}_3$  — единичные поворачивающие множители.

Отметим, что  $\dot{\Psi}_m$  составляет рабочую часть потокосцеплений, образуемых системой фазных токов обмотки статора  $\dot{\Psi}_s$  и ротора  $\dot{\Psi}_r$ .

с соответствующим учетом потокосцеплений рассеяния статора  $\dot{\Psi}_{s\sigma}$  и ротора  $\dot{\Psi}_{r\sigma}$ , что удобно выразить через математический аппарат обобщенных комплексов или векторов (рис. 2.24, рис. 2.25):

$$\begin{cases} \dot{\Psi}_s = \dot{\Psi}_m + \dot{\Psi}_{s\sigma}, \\ \dot{\Psi}_r = \dot{\Psi}_m + \dot{\Psi}_{r\sigma}. \end{cases} \quad (2.7)$$

Как показано на рис. 2.25, если в АД на каждую фазу приходится одна пара полюсов ( $p = 1$ ), то можно предположить, что одному полюсному делению  $\tau$  соответствует половина окружности по воздушному зазору. В таком случае угловая скорость магнитного поля  $\omega_m$  всецело определяется круговой частотой тока статора  $I_s$  (или приложенного к обмотке статора напряжения  $U_s$ )  $\omega_1$  и будет равна ей  $\omega_m = \omega_1 = 2\pi f_1$ . Другими словами, за один период изменения тока в обмотке статора магнитная ось ( $N-S$ ) двухполюсного вращающегося магнитного поля проходит угловой путь  $a_m = 360^\circ$ , равный двойному полюсному делению, то есть совершает один оборот  $a_m = \int \omega_m \cdot dt = 2\tau_{\text{эл. рад}} = 360^\circ \text{эл.}$

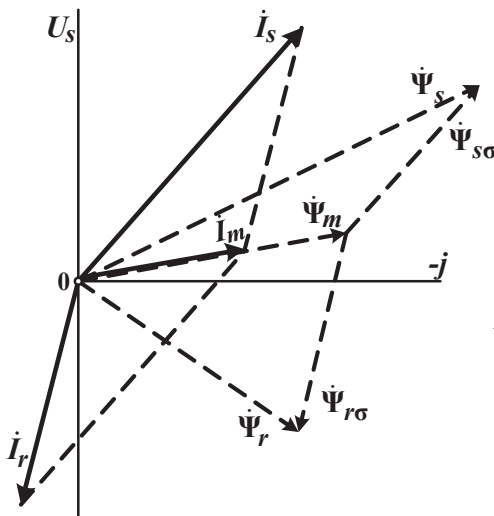


Рис. 2.24. Векторная диаграмма токов и потокосцеплений АД

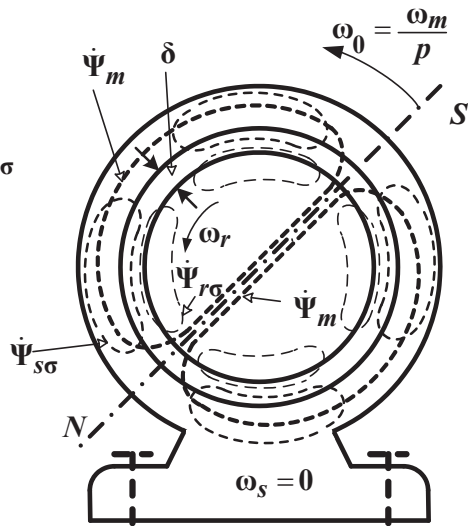


Рис. 2.25. Схематическое изображение АД

Усиление электромагнитного взаимодействия между статором и ротором достигается путем увеличения числа пар полюсов на каждую

фазу обмотки статора. Поэтому АД могут иметь одну и более пар полюсов  $p$ , а их обмотки — конкретное число витков  $w$ . При этом скорость движения вращающегося магнитного поля снижается от увеличения  $p$ . Результирующее вращающееся магнитное поле АД, выраженное обобщенным комплексом  $\dot{\Psi}_m$ , формирует электромеханические свойства и энергетические показатели асинхронной машины. Например, в четырехполюсной машине ( $p = 2$ ) при частоте тока  $\omega_1$  вращающееся магнитное поле за один период изменения тока повернется своей осью ( $N-S$ ) также на два полюсных деления ( $2\tau$ ), но, поскольку их по воздушному зазору не два, а четыре, угловой путь составит только половину окружности воздушного зазора ( $180$  эл. град.), то есть в  $p$  раз меньше.

АД изготавливается с различным числом пар полюсов. Поэтому в электрических машинах переменного тока возникла необходимость сочетать геометрические радианы не только с временными радианами, определяемыми круговой или циклической частотой тока, но и с электрическими радианами, которые определяются и частотой, и числом пар полюсов машины. Отношение электрических радиан  $a_m$ , эл. рад, к геометрическим  $a$ , геом. рад, равно числу пар полюсов

$$\frac{w_\Phi}{w_m} = \frac{a_m}{a} = \frac{\omega_m}{\omega_0} = p,$$

где  $\omega_0$  называют синхронной угловой скоростью вращения магнитного

поля АД, геом. рад/с = рад/с,  $\omega_0 = \frac{\omega_m}{p} = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p}$ .

Итак, под воздействием главного вращающегося магнитного поля увлекается ротор, который приходит во вращение в том же направлении. Однако, в силу индукционного принципа, лежащего в основе работы АД, угловая скорость вращения ротора  $\omega_r$  не может достигнуть значения угловой скорости поля из-за прекращения пересечения вращающимся полем проводников обмотки ротора. При  $\omega_r = \omega_0$  в обмотке ротора не индуцируется ЭДС, исчезает индукционный ток и поле ротора. Под действием сил трения ротор вынужден уменьшить свою скорость и восстановить условия индукционного взаимодействия. Отсюда и название двигателя — асинхронный, то есть вращение ротора несинхронное по отношению к вращающемуся магнитному полю.

Относительное отставание скорости вращения ротора  $\omega_r$ , геом. рад/с, от величины синхронной скорости  $\omega_0$ , геом. рад/с, вдоль окружности по воздушному зазору называется *скольжением*, которое выражается в относительных единицах

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0},$$

откуда

$$\omega_r = \omega_0(1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1 - s).$$

Если скорость выражается через частоту вращения  $n$ , об/мин, то используется равенство

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi}{60} n_0,$$

откуда получают соответствующие выражения для  $n_0$  и  $n_r$ , об/мин,

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p},$$

$$n_r = n_0(1 - s) = \frac{60 f_1}{p} \cdot (1 - s),$$

где  $f_1$  — циклическая частота напряжения сети, период/с = Гц.

Величина номинального скольжения определяется через номинальную скорость вращения ротора

$$s_N = \frac{\omega_0 - \omega_{rN}}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_{rN}}{n_0}$$

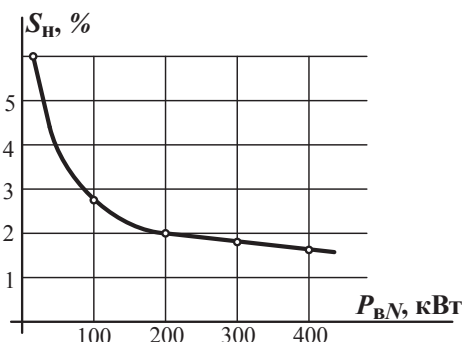


Рис. 2.26. Зависимость номинального скольжения от номинальной мощности

и для определенной серии асинхронных двигателей зависит от величины номинальной мощности. С увеличением номинальной мощности двигателя увеличивается площадь поперечного сечения проводников обмоток, что вызывает снижение их активного сопротивления и уменьшение номинального скольжения, рис. 2.26.

При стандартной частоте напряжения (тока)  $f_1 = 50$  Гц в зависимости от числа пар полюсов  $p$  получается шкала возможных частот вращения главного магнитного поля, об/мин:

$n_0$ .....	3000	.....	1500	.....	1000	.....	750	.....	600	.....	500	.....	375	.....	250
$p$ .....	1	.....	2	.....	3	.....	4	.....	5	.....	6	.....	8	.....	12

### 2.3.2. Электрические и эквивалентные схемы замещения АД

Отметим возможные варианты исполнения обмоток ротора АД:

- обмотка ротора выполняется аналогично трехфазной обмотке статора, концы фаз обычно соединяются внутри в звезду, а начала выводятся через систему трех колец и металлографитовых щеток на клеммную доску и служат для включения в цепь ротора внешних добавочных сопротивлений; такие машины называют АД ФР — с фазным ротором (или с кольцами);
- обмотка ротора выполняется в виде беличьей клетки из меди или алюминия; считается, что число пар полюсов и число фаз на таком роторе обуславливается числом пар полюсов и числом фаз на статоре; такие машины называют АД КЗР — с короткозамкнутым ротором.

Представление о схемах включения АД ФР и АД КЗР в трехфазную сеть дают рис. 2.27 и рис. 2.28, на которых внешняя окружность обозначает обмотку статора с указанием ее схемы включения (звезда или треугольник) и напряжения питающей сети, а внутренняя окружность рис. 2.27 указывает на фазный ротор с возможностью включения в его цепь внешнего сопротивления, рис. 2.28 — на короткозамкнутый ротор с обмоткой, называемой беличьей клеткой.

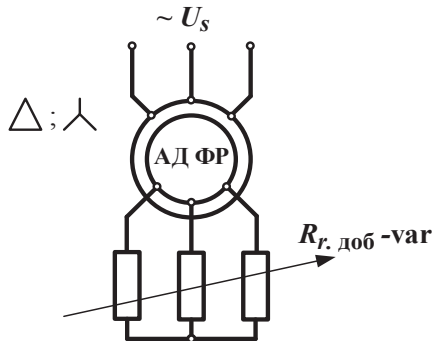


Рис. 2.27. Схема включения в сеть АД ФР

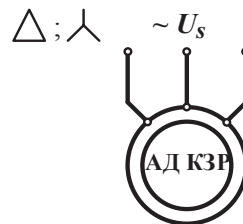


Рис. 2.28. Схема включения в сеть АД КЗ

Рассмотрим эквивалентные схемы замещения АД. Как известно, эквивалентные схемы своей электрической интерпретацией отражают электромагнитные связи между статором и ротором. Наиболее полное отражение дает Т-образная схема замещения для фазы статора, потребляющая электроэнергию от источника напряжения бесконечно большой мощности. Это справедливо для любой круговой частоты питающего напряжения  $\omega_1 = 2\pi f_1$ , рис. 2.29.

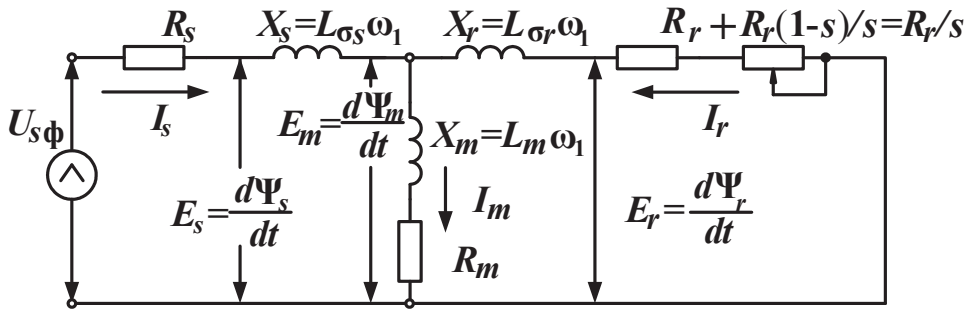


Рис. 2.29. Эквивалентная схема замещения АД:

$L_{\sigma s}$ ,  $L_{\sigma r}$  — индуктивность рассеяния магнитного потока обмотки статора и ротора соответственно;  $L_m$  — индуктивность главного (рабочего) магнитного потока АД;

$R_r$  — приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора, характеризует переменные потери на нагревание цепи ротора;

$R_r \frac{1-s}{s}$  характеризует передаваемую на ротор механическую мощность

Уравнения статических характеристик по Т-образной схеме замещения оказываются громоздкими. В большинстве инженерных задач, когда  $\omega_1 = 2\pi f_1$  не изменяется, исходят из эквивалентирования асинхронной машины Г-образной схемой замещения, в которой намагничивающий контур выносится на зажим фазы (рис. 2.30).

Преобразование Т-образной схемы в Г-образную схему замещения отражается на изменении параметров электрических цепей. Для их выражения через параметры Т-образной схемы замещения используют обычно упрощенное выражение коэффициента рассеяния

$\sigma \approx \left(1 + \frac{X_s}{X_m}\right)$ , который, строго говоря, является комплексным числом

$$\dot{\sigma} = \left(1 + \frac{X_s}{X_m}\right) - j \left(\frac{R_s}{R_m}\right) = \frac{U_s}{E_s},$$

где  $\dot{\sigma} = 1,005 \dots 1,1$  и увеличивается со снижением мощности АД (от сотен киловатт до единиц).

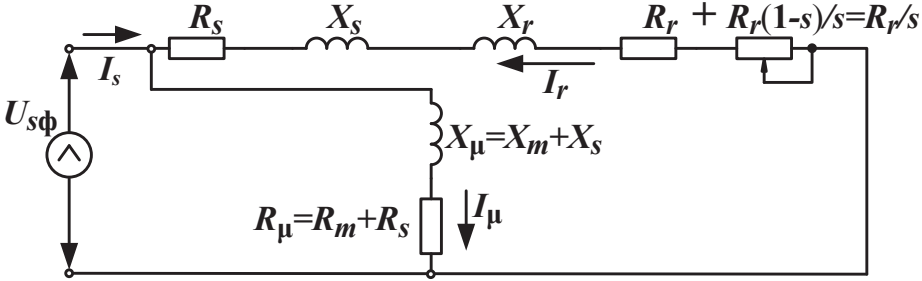


Рис. 2.30. Г-образная схема замещения АД

В результате преобразования, для Г-образной схемы получают новые параметры электрических цепей АД:

$R_s$  — активное сопротивление фазы статора, Ом,  $R_s = \sigma R_{s(T)}$ ;

$R_r$  — приведенное активное сопротивление фазы ротора, Ом,  $R_r = \sigma^2 R_{r(T)}$ ;

$X_s$  — индуктивное сопротивление фазы статора, Ом,  $X_s = \sigma X_{s(T)}$ ;

$X_r$  — приведенное индуктивное сопротивление фазы ротора, Ом, в которых индекс (Т) указывает на параметры Т-образной схемы замещения,  $X_r = \sigma X_{r(T)}$ .

Поскольку контур намагничивания в Г-образной схеме АД вынесен на зажимы фазного напряжения  $U_{сф}$ , его новые параметры определяются по формулам

$$R_{\mu} = R_m + R_s;$$

$$X_{\mu} = X_m + X_s.$$

Уравнения баланса напряжения и ЭДС получают упрощенные выражения в цепях:

статора 
$$\dot{U}_{сф} = (-\dot{E}_s) + R_s \cdot \dot{I}_s + jX_s \cdot \dot{I}_s;$$

ротора 
$$0 = \dot{E}_r - j \frac{R_r}{s} \cdot \dot{I}_r + jX_r \cdot \dot{I}_r;$$

контра намагничивания 
$$\dot{U}_{сф} = R_{\mu} \cdot \dot{I}_{\mu} + jX_{\mu} \cdot \dot{I}_{\mu}. \quad (2.8)$$

В задачах электропривода обычно не учитывают активное сопротивление намагничивающего контра, полагая  $R_{\mu} = 0$ , что упрощает уравнение (2.8)

$$\dot{U}_{\text{сф}} \approx jX_{\mu} \cdot \dot{I}_m,$$

и определение тока намагничивания

$$I_m = I_{\mu} \approx U_{\text{сф}} / X_{\mu}.$$

### 2.3.3. Математическое описание установившегося режима и особенности физических явлений в АД

Примем следующие допущения:

- учитывается только первая гармоника электромагнитного поля, то есть предполагается распределение магнитной индукции вдоль воздушного зазора по синусоидальному закону;
- не учитывается наличие пазов и зубцов, то есть воздушный зазор принят одинаковым по всей расточке статора;
- рассмотрение физических явлений производится в ориентации на Т-образную схему замещения, а для уравнений статических характеристик — на Г-образную. При этом все физические величины цепи ротора считаются приведенными к цепи статора.

Основным назначением АД (как и двигателей постоянного тока) является обеспечение РМ механической энергией для приведения в движение ее исполнительных органов и для совершения полезной механической работы. Для этого АД потребляет из сети переменного напряжения реактивную и активную электрические мощности.

Реактивная мощность  $Q_{1(\text{эл})}$  расходуется на создание среды энергопреобразования, обусловленной принципом работы АД,

$$Q_{1(\text{эл})} = 3 \cdot \dot{U}_{\text{сф}} \cdot \dot{I}_s \cdot \sin \varphi_1 = Q_m + Q_{s\sigma} + Q_{r\sigma},$$

где  $\varphi_1 < 90^\circ$ ,  $\sin \varphi_1 > 0$  в двигательном режиме;

$Q_m$  — основная часть  $Q_{1(\text{эл})}$ , расходуется на создание вращающегося магнитного поля АД,

$$Q_m = 3 \cdot \dot{E}_m \cdot \dot{I}_m = 3 \cdot \dot{I}_m^2 \cdot X_m.$$

Здесь  $\dot{E}_m$  — ЭДС контура намагничивания, обеспечивает протекание тока  $\dot{I}_m$ , создающего намагничивающую силу  $\dot{F}_m = \dot{I}_m \cdot w$  вращающегося магнитного поля,

$$\dot{E}_m = \frac{d\psi_m}{dt}.$$



$Q_{с\sigma}$  — реактивная мощность в полях рассеяния обмотки статора,

$$Q_{с\sigma} = 3 \cdot \dot{I}_s^2 \cdot X_s ;$$

$Q_{r\sigma}$  — реактивная мощность в полях рассеяния обмотки ротора,

$$Q_{r\sigma} = 3 \cdot \dot{I}_r^2 \cdot X_r . \quad (2.9)$$

Активная мощность  $P_{1(эл)}$  запишется как

$$P_{1(эл)} = 3 \dot{U}_{сф} \dot{I}_s \cos \varphi_1 = P_{эм} + \Delta P_{с.в} + \Delta P_{Fe.s} , \quad (2.10)$$

отчасти покрывает переменные потери на нагревание сопротивлений цепи обмотки статора

$$\Delta P_{с.в} = 3 I_s^2 R_s$$

и магнитные потери на нагревание стали магнитопровода статора, которые из-за малой величины обычно не учитываются

$$\Delta P_{Fe.s} = 3 I_m^2 R_m .$$

Основная же часть  $P_{1(эл)}$  преобразуется в электромагнитную мощность  $P_{эм}$ , которая посредством вращающегося магнитного поля  $\Phi_m$  передается со статора на ротор благодаря развиваемому вращающему электромагнитному моменту  $M_{эм}$  взаимодействия между ними

$$P_{эм} = M_{эм} \omega_0 = P_{мех} + \Delta P_{r.v} = M_{эм} \omega + 3 I_r^2 R_r . \quad (2.11)$$

На схемах замещения (рис. 2.29 и рис. 2.30)  $P_{эм}$  представлена мощностью, сосредоточенной в активном сопротивлении цепи ротора  $R_r/S$ ,

$$P_{эм} = 3 I_r^2 \frac{R_r}{S} = 3 I_r^2 R_r + 3 I_r^2 R_r \frac{1-s}{S} ,$$

где часть этой мощности расходуется на покрытие переменных потерь в активном сопротивлении цепи ротора

$$\Delta P_{r.v} = 3 I_r^2 R_r ,$$

а основная ее часть преобразуется в механическую мощность ротора  $P_{мех}$

$$P_{мех} = 3 I_r^2 R_r \frac{1-s}{S} = M_{эм} \omega = P_{2(в)} + \Delta P_{схх} , \quad (2.12)$$

которая выдается с вала и направляется РМ на совершение механической работы

$$P_{2(в)} = M_{в} \omega , \quad (2.13)$$

расходуется на покрытие постоянных потерь холостого хода

$$\Delta P_{c\text{xx}} = \Delta M_{\text{xx}} \omega = \Delta P_{\text{Fe},r} + \Delta P_{\text{тр}},$$

на перемагничивание и вихревые токи в магнитопроводе ротора, а также на трение в подшипниках и о воздух. Эти потери не зависят от нагрузки на валу, но могут быть функцией скорости.

Записанные уравнения соответствуют балансу активной мощности, изображенному на рис. 2.31.

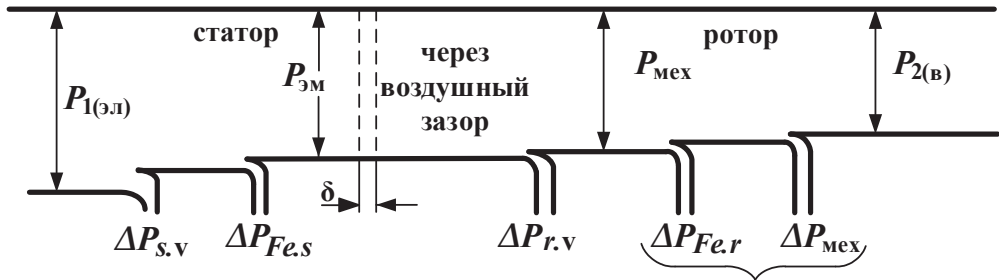


Рис. 2.31. Баланс активной мощности АД

Рассмотрим уравнения статических характеристик АД. Прежде всего, используя Г-образную схему замещения (рис. 2.30), определяют ток ротора  $I_r$ , А, через приложенное к фазе напряжение  $U_{сф}$  и модули полных сопротивлений  $z_s$  и  $z_r$  главной цепи

$$I_r = \frac{U_{сф}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2}}, \quad (2.14)$$

который отражает собой в обратном графическом представлении уравнение электромеханической характеристики роторной цепи  $s = f(I_r)$ .

Для получения уравнения механической характеристики  $M_{эм} = f(s)$  обращаются к формулам (2.11) и (2.13)

$$\Delta P_{r.v} = P_{эм} - P_{2(в)} = M_{эм} (\omega_0 - \omega) \frac{\omega_0}{\omega_0} = M_{эм} \omega_0 s = 3 I_r^2 R_r, \quad (2.15)$$

откуда получают выражение  $M_{эм} = \frac{3}{\omega_0} I_r^2 \frac{R_r}{s}$ , Н·м, в которое подставляют  $I_r$  из формулы (2.14)

$$\begin{aligned}
M_{\text{эм}} &= \frac{3}{\omega_0} \frac{U_{\text{сф}}^2 \frac{R_r}{s}}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2} = \frac{3p}{2\pi f_1} \frac{U_{\text{сф}}^2 \frac{R_r}{s}}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2} = \\
&= \frac{360}{2\pi n_0} \frac{U_{\text{сф}}^2 \frac{R_r}{s}}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2}, \quad (2.16)
\end{aligned}$$

где 3 и  $p$  — число фаз и пар полюсов, определяется из шифра типа машины (4 А112 МА-6, где 6 — число полюсов,  $6 = 2p$ , или  $p = 3$ );

$U_{\text{сф}}$  — действующее фазное значение напряжения, В;

$\omega_0$  и  $f_1$  — соответственно круговая частота, эл.рад/с, и циклическая частота, Гц, напряжения питающей сети.

Важное значение в асинхронном ЭП имеет знание выражений критического скольжения  $s_k$  и критического момента  $M_{\text{эмк}}$  [13, с. 57–58]:

$$s_k = \pm \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}}, \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}
M_{\text{эмк}} &= \frac{3p}{2\pi f_1} \frac{U_{\text{сф}}^2}{2 \left[ R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \right]} = \\
&= \frac{3 \cdot 60}{2\pi n_0} \frac{U_{\text{сф}}^2}{2 \left[ R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \right]}, \quad (2.18)
\end{aligned}$$

где знаки ( $\pm$ ) указывают на работу в двигательном режиме (+) или в режиме рекуперативного торможения (–), а  $M_{\text{эмк}} \equiv U_{\text{сф}}^2$  находится в прямой зависимости от квадрата величины питающего фазного напряжения и не зависит от активного сопротивления ротора  $R_r$ .

Для получения широко используемого в ЭП уравнения механической характеристики  $M_{\text{эм}} = f(s)$ , Н·м, в относительных единицах (формулы Клосса) берется отношение  $M_{\text{эм}}/M_{\text{эмк}}$ , выражения для которых берутся из уравнений (2.16) и (2.18), после преобразования которых получают

$$\frac{M_{\text{эм}}}{M_{\text{эмк}}} = \frac{\frac{R_r}{s_k} \cdot 2 \left[ R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \right]}{\left( R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_s + X_r)^2} = \frac{2(1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon},$$

откуда

$$M_{\text{эм}} = \frac{2M_{\text{эмк}}(1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon},$$

где  $\varepsilon = as_k$ ,  $a = R_s/R_r$ ,

откуда

$$\varepsilon = (R_s/R_r)s_k.$$

Значимой, особенно для АД КЗР, является электромеханическая характеристика  $s = f(I_s)$ , которая позволяет оценивать тепловое состояние изоляции проводников обмотки статора. Для ее расчета и построения можно воспользоваться уравнением [6, с. 65].

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + (I_{sN}^2 - I_0^2) \frac{M_{\text{эм}} \cdot s}{M_{\text{эмN}} \cdot s_N}},$$

где  $I_0$  — ток холостого хода АД, А, который в разных типах АД находится в пределах  $I_0 = (0,2 \dots 0,6) I_{sN}$  и определяется по формуле

$$I_0 = I_{sN} \left( \sin \phi_N - \frac{s_N}{s_k} \cos \phi_N \right).$$

Рассмотрим векторную диаграмму (рис. 2.32) и статические характеристики АД (рис. 2.33). Векторная диаграмма ориентирована на Т-образную схему замещения; представляет устойчивую работу в области скольжений  $s_{\text{xx}} < s_N < s_k$  в соответствии с уравнениями:

$$\dot{I}_m = \dot{I}_s + \dot{I}_r, \quad (2.19)$$

$$\dot{U}_s = (-\dot{E}_m) + jX_s \cdot \dot{I}_s + R_s \cdot \dot{I}_s,$$

$$0 = \dot{E}_m + jX_r \cdot \dot{I}_r + \frac{R_r}{s} \cdot \dot{I}_r,$$

$$\dot{E}_s = (-\dot{E}_m) + jX_s \cdot \dot{I}_s, \quad (2.20)$$

$$\dot{E}_r = \dot{E}_m + jX_r \cdot \dot{I}_r.$$



В диапазоне изменения скорости ротора от  $\omega = 0$  до  $\omega_0$  выделяют две зоны с различным соотношением поведения  $\omega(M_{3M})$  и токов  $\omega(I_r \text{ и } I_s)$ .

83

$M_{\text{дин}} = M_{\text{эм}} - M_{\text{с}}$ , характеризуется увеличением электромагнитного момента в пределах  $M_{\text{эмп}} \dots M_{\text{эмк}}$  и снижением модулей токов в пределах  $I_{rn} \dots I_{sn}$  до значений, соответствующих  $\omega_{\text{к}}$ :

- кратность пускового момента  $k_M = M_{\text{эмп}}/M_{\text{эмN}} \approx 0,7 \dots 1,8$  и более у машин с глубоким пазом и двойной беличьей клеткой;
- кратность пускового тока ротора  $k_I = I_{rn}/I_{rN} \approx 5,5 \dots 7,0$ .

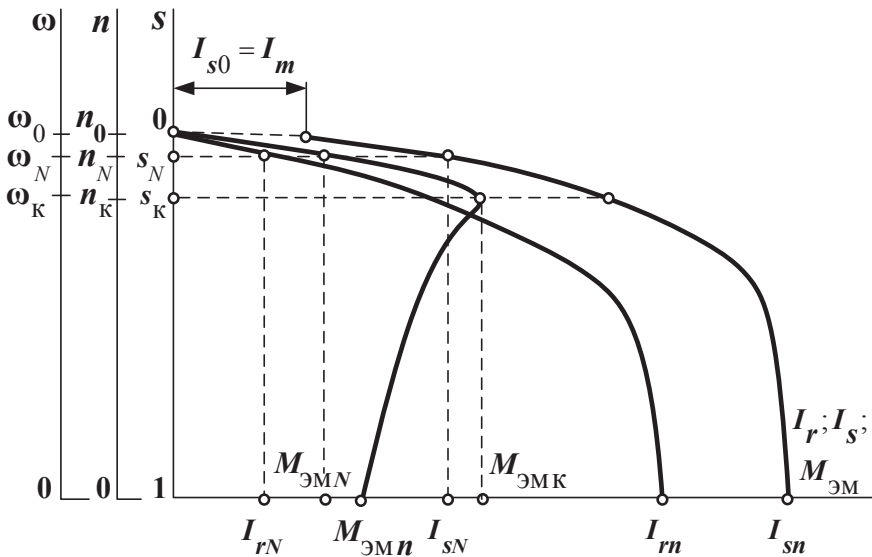


Рис. 2.33. Естественные статические характеристики АД

Вторая зона в АД КЗР ( $\omega_{\text{к}} \dots \omega_0$  или  $s_{\text{к}} > s > 0$ ) соответствует устойчивой и допустимой по тепловому состоянию работе при  $\omega_N$  и  $M_{\text{эмN}}$  на жестких характеристиках, на которых моменты и токи считаются пропорциональными, что характеризует нормальное электромагнитное состояние АД. Для этой зоны введено понятие перегрузочной способности

$$\lambda_M = M_{\text{эмк}}/M_{\text{эмN}} = 1,7 \dots 3,0;$$

при  $s_{\text{к}} = 0,06 \dots 0,15$ , где более высокие значения  $s_{\text{к}}$  у двигателей с малым значением числа пар полюсов  $p$ .

Вторая зона в АД ФР в общем идентична сказанному относительно АД КЗР. Однако при включении в цепь ротора добавочных сопротивлений  $R_r + R_{\text{доб}}$  обеспечиваются смягченные искусственные характеристики (рис. 2.34) с возможностью увеличения  $M_{\text{эмп}}$  вплоть до значения  $M_{\text{эмк}}$  на линейных участках, то есть свойства второй зоны распространяются и на первую, что используется в АД ФР для пуска и управления скоростью.

Стремясь проникнуть в сущность физических явлений в реальной асинхронной машине, обратим внимание, что при достижении скорости  $\omega = \omega_0$ , например, приложением к валу внешнего активного момента  $M_{\text{вхх}}$ , оказывается  $M_{\text{эм}} = 0$ , а ток в цепи статора  $\dot{I}_s = \dot{I}_{s0} = \dot{I}_m$  становится чисто индуктивным током холостого хода. При условии синхронного вращения ротора со скоростью  $\omega = \omega_0$ , проводники обмотки ротора не пересекаются магнитным полем и ток  $\dot{I}_r = 0$ , а ток в цепи статора представляет собой реактивную составляющую, которая возникает от пересечения неподвижных витков обмотки статора вращающимся магнитным полем (в результате индуцированной в обмотке статора ЭДС  $E_s$ ),

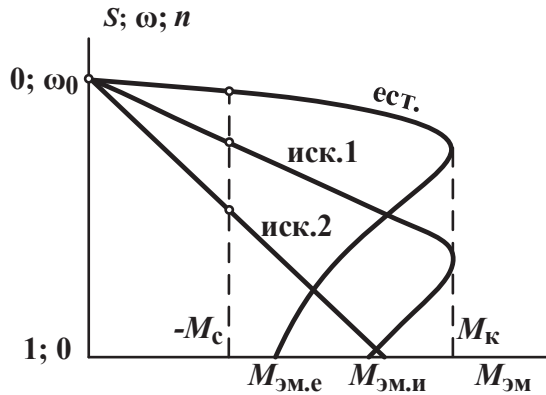


Рис. 2.34. Естественные и искусственные статические характеристики АД при изменении  $R_r$

$$\dot{I}_s|_{s=0} = \dot{I}_m = \frac{\dot{U}_{\text{сф}}}{X_{s(\sigma)} + X_{m(\sigma)}},$$

где  $X_{s(\sigma)}$  и  $X_{m(\sigma)}$  — модули индуктивных сопротивлений рассеяния силовой цепи и контура намагничивания обмотки статора, которые не зависят от  $s$ , следовательно,  $U_{\text{сф}} = \text{const}$ ;  $\omega_1 = 2\pi f_1 = \text{const}$ ;  $\dot{I}_m = \text{const}$ . Ток  $\dot{I}_m = \text{const}$  представляет собой исключительно индуктивную составляющую от  $\dot{I}_s$  двигательного режима работы, то есть

$$\dot{I}_{s0} = \dot{I}_m = (0,2 \dots 0,6) \cdot \dot{I}_{sN}.$$

Следует подчеркнуть, что в  $\dot{E}_s$  выполнение функции возбуждения ( $E_m$ ) уменьшается из-за исчезновения необходимости покрывать рассеяние в роторе ( $\dot{E}_{r\sigma} = jX_r \cdot \dot{I}_r = 0$ , где  $\dot{I}_r = 0$ ) и снижения величины  $\dot{I}_s$  до значения  $\dot{I}_{s0} = \dot{I}_m$ . При этом АД переходит в граничный режим идеального холостого хода, который характеризуется не только  $\omega = \omega_0$ , но и  $\varphi_1 = 90^\circ$  (в сравнении с обычным двигательным режимом, который представлен на векторной диаграмме рис. 2.32). Сокращается потребление реактивной мощности

$$Q_{1(\text{эл})} = 3\dot{U}_{\text{сф}} \cdot \dot{I}_{s0} \sin \varphi_1 = Q_{m0} + Q_{m\sigma 0} = 3X_m \cdot \dot{I}_{s0}^2 + 3X_s \cdot \dot{I}_{s0}^2,$$

а выражение  $\dot{E}_s$  принимает новый вид согласно рис. 2.32 и уравнению (2.20)

$$\dot{E}_{s0} = jX_m \cdot \dot{I}_{s0} \downarrow + jX_s \cdot \dot{I}_{s0} \downarrow.$$

В граничном режиме идеального холостого хода прекращается потребление из сети активной электрической мощности,  $P_{1(\text{эл})} = 0$ , хотя цепи статора и ротора при любых условиях обладают активными сопротивлениями  $R_s$  и  $R_r$ . Однако при  $s = 0$ , когда  $\omega = \omega_0$ , электромеханическое энергопреобразование отсутствует  $P_{\text{эм}} = 0$ ;  $P_{2(\text{м})} = 0$ ;  $M_{\text{эм}} = 0$ ; ток  $I_{s0}$  имеет исключительно реактивный характер;  $\dot{E}_r = 0$ ;  $\frac{R_r}{s} = \infty$ ;

$$R_r \frac{1-s}{s} = \infty \text{ и ток } \dot{I}_r = 0.$$

Из всего изложенного следует вывод, что вращающий электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$  создается только при наличии активной составляющей тока ротора

$$I_{ra} = \dot{I}_r \cdot \cos \psi_2,$$

которая в рассматриваемом случае равна нулю, так как  $\psi_2$  равно  $90^\circ$  — чисто формально, а по существу из-за  $\dot{E}_r = 0$  и  $\dot{I}_r = 0$ .

Другим граничным режимом является режим короткого замыкания КЗ, с которого начинается пуск АД в работу. Для этого режима характерным являются:

- $0 < \phi_1 < 90^\circ$  и  $\psi_2 \neq 0$ , что соответствует потреблению из сети реактивной мощности  $Q_{1(\text{эл})} > 0$  на обеспечение электромагнитного состояния АД и активной мощности  $P_{1(\text{эл})\text{к}} > P_{1(\text{эл})\text{КЗ}} > P_{1(\text{эл})\text{N}}$ , которая фактически всецело расходуется на покрытие тепловых потерь в статоре и роторе из-за значительных токов  $\dot{I}_{\text{сн}}$  и  $\dot{I}_m$  и отчасти на развитие электромагнитной мощности на статоре  $P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \omega_0$  с моментом взаимодействия  $M_{\text{эмп}}$  между статором и ротором;
- в предпусковое мгновение времени режим КЗ характеризуется параметрами  $\omega = 0$ ,  $s = 1$ , что указывает на одинаковую частоту пересечения неподвижных проводников обмоток статора и ротора вращающимся магнитным полем ( $f_{\text{перс}} = f_{\text{перр}}$ , об/с = Гц)



$$f_{\text{пер} s} = f_{\text{пер} r} = \frac{\omega_0 p}{2\pi} = n_0 p,$$

а значит, на максимальную частоту индуцированных в роторе ЭДС  $\dot{E}_r$  и тока  $\dot{I}_r$ , модули которых отличаются от соответствующих статорных в связи с неодинаковыми ЭДС рассеяния  $\dot{E}_{s\sigma}$  и  $\dot{E}_{r\sigma}$  в цепях обмоток статора и ротора.

Последующий разгон АД КЗР происходит в первой зоне пуска  $1 > s_n \geq s_k$  под действием увеличивающегося  $M_{\text{эм}} > M_{\text{эмп}}$  при уменьшающихся токах  $\dot{I}_r < \dot{I}_m$  и  $\dot{I}_s < \dot{I}_{sn}$  в направлении вращения магнитного поля. В этой связи снижается частота пересечения проводников ротора магнитным полем ( $\omega < \omega_0$ ). Частоты и модули индуцированных в роторе  $\dot{E}_r$  и  $\dot{I}_r$  становятся пропорциональными разности скоростей ( $\omega_0 - \omega$  или  $n_0 - n$ )  $f_r$ , Гц,

$$f_r = \frac{\omega_0 - \omega}{2\pi} p = (n_0 - n) p = \frac{s\omega_0 p}{2\pi} = sn_0 p = sf_1.$$

Миновав зону критического скольжения  $s_k$ , АД входит во вторую зону — зону  $s_k > s > s_{xx}$  устойчивой работы, для которой в каталогах указываются номинальные данные  $P_{2(B)N}$ ,  $n_N$ ,  $\lambda_M$  и определяются другие величины, необходимые при разработке ЭП [6, с. 53–67]. При номинальной нагрузке на валу скорость вращения ротора определяется

$$\omega_N = \omega_0 (1 - s_N), \text{ или } n = n_0 (1 - s_N), \quad (2.21)$$

а реальный холостой ход будет соответствовать  $M_{\text{эмхх}} = M_{\text{вхх}}$  при скольжении  $s_{xx}$ , обычно равном долям процента от номинального, то есть близком к нулю.

Для участков статических характеристик (соответствующих установившейся работе АД) характерно, что развиваемый момент  $M_{\text{эм}}$ , токи  $\dot{I}_s$  и  $\dot{I}_r$  практически пропорциональны между собой и рабочему магнитному потоку

$$\Phi_m = \frac{\dot{\Psi}_m}{p\omega_s} = f(\dot{I}_s + \dot{I}_r),$$

где  $\Phi_m$  выражен через первичный и вторичный магнитные потоки, которые относительно неподвижного статора и любой скорости вращения ротора  $\omega \neq \omega_0$  всегда вращаются синхронно со скоростью  $\omega_0$  и образуют (с учетом полей рассеяния, см. формулу (2.7) и рис. 2.25) единый главный (рабочий) магнитный поток  $\Phi_m$ ,  $\Phi_m = \Phi_s + \Phi_r$ .

Величина  $\dot{\Phi}_m$  характеризует электромагнитное состояние АД, которое можно увидеть в конфигурации статической характеристики  $s = f(M_{эм})$ , определяет ЭДС возбуждения АД

$$\dot{E}_m = 4,44 f_1 w_s k_{об.s} \dot{\Phi}_m,$$

представляя собой основополагающую составляющую в выражениях индуцированных ЭДС  $\dot{E}_s$  и  $\dot{E}_r$

$$\dot{E}_s = -4,44 f_1 w_s k_{об.s} \dot{\Phi}_m + jX_{s\sigma} \dot{I}_s,$$

$$\dot{E}_r = 4,44 f_1 w_r k_{об.s} \dot{\Phi}_m - jX_{r\sigma} \dot{I}_r.$$

### 2.3.4. Влияние параметров электрических цепей и источника напряжения на вид статических характеристик АД

Задача исследования влияния параметров возникает обычно при формировании выходных координат АД, к которым относятся  $M_{эм}$ ,  $\omega$ ,  $\alpha$  — угловой путь вала. Рассмотрим влияние отдельных параметров.

1. Влияние  $U_{сф}$  при  $f_{1N} = \text{const}$ . Уравнение (2.8), указывает на  $M_{эм} \equiv U_{сф}^2$ , то есть на резкое снижение момента при уменьшении величины действующего значения фазного напряжения. При этом перегрузочная способность  $\lambda \cong \frac{M_{эмк}}{M_{эмN}}$  значительно снижается, а электроме-

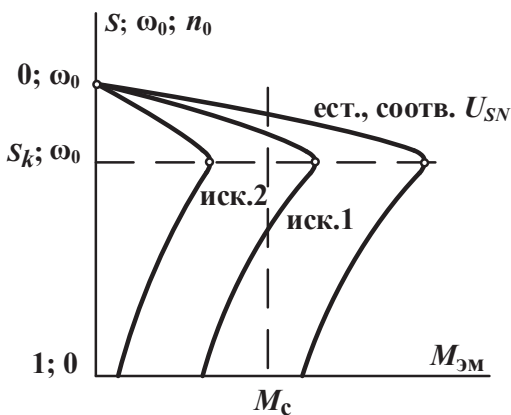


Рис. 2.35. Естественные и искусственные статические характеристики АД при изменении  $U_{сф}$

нические свойства АД ухудшаются (рис. 2.35).

Влияние  $U_{сф}$  находит практическое использование при так называемом «фазовом управлении» скоростью АД [10, с. 280], [14].

Воздействие на  $U_{сф}$  используют и при амплитудно-частотном управлении скоростью АД и СД.

2. Влияние  $R_{доб}$  широко используется в сетевых ЭП с АД ФР для управления скоростью «вниз» от естественной харак-

теристики. На такую возможность указывают уравнения (2.17) и (2.18), где  $s_k \equiv R_r + R_{\text{доб}}$ , а  $M_{\text{эмк}}$  от  $R_r + R_{\text{доб}}$  не зависит. При этом в соответствии с уравнением (2.21)  $n$ , об/мин,

$$n = n_0(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s).$$

При увеличении  $R_{\text{доб}}$  характеристики смягчаются,  $s_k$  увеличивается, а  $M_k$  остается неизменным, поскольку не зависит от  $R_r$ . С изменением скорости при той же нагрузке увеличиваются потери мощности на нагрев, что просто реализуется на практике ЭП, но этот способ неэкономичен [6, с. 73].

3. Для АД ФР большой мощности в настоящее время используют системы различных машинно-вентильных каскадов, полезно управляющих мощностью скольжения ротора  $\Delta P_r = P_{\text{эл}} \cdot s$ , которая либо отдается в питающую сеть, либо на вал АД [1, с. 628–644], [9, с. 241–248], [10, с. 328–358].

4. В целях формирования искусственных статических характеристик АД КЗР и АД ФР в 1950–1960-е гг. использовались так называемые искусственные схемы несимметричного включения статора на напряжение сети и несимметричного включения добавочных сопротивлений в цепи ротора. Эти схемы интересны с точки зрения электромеханических и энергетических процессов и относительной простоты их математических описаний, но со временем они утратили свою практическую актуальность, и к ним возвращаются лишь при анализе каких-либо аварийных ситуаций [1, с. 148].

5. Уравнения (2.16) и (2.18) прямо указывают, что на частоту вращения ротора можно непосредственно влиять путем изменения числа пар полюсов  $p$ . Этот способ используется в специальных многоскоростных двигателях с переключением  $p$ . Также рассматриваемый способ регулирования может быть реализован путем изменения частоты питающего напряжения  $f_1$ , что в настоящее время благодаря появлению статических преобразователей электроэнергии переменного напряжения (тока) открыло возможности реализовывать различные законы управления электроприводами, особенно с АД КЗ.

**Электромеханические свойства АД КЗР с переключением числа пар полюсов**

Процедура переключения числа пар полюсов наиболее просто производится в так называемых двухскоростных асинхронных коротко-

замкнутых двигателях. Для этого проводники каждой фазы статора укладываются в пазы таким образом, чтобы формировать ее по полуфазам с выводом средней точки. Такое конструктивное исполнение фаз позволяет в одной фазе реализовать следующие два варианта включения каждой полуфазы обмотки статора по отношению к действующему фазному напряжению  $U_{сф}$ , приложенному к АД.

Первый вариант представлен на рис. 2.36, где исходное число пар полюсов принято, например,  $p = 2$ . При последовательном включении на каждую полуфазу приходится половина фазного напряжения  $U_{нф} = U_{\phi}/2$ .

Второй вариант, соответствующий рис. 2.37, получается переключением полуфаз на встречно-параллельное включение. В результате число пар полюсов уменьшается в два раза  $p = 1$ , а на каждую полуфазу подводится полное фазное напряжение  $U_{нф} = U_{\phi}$ .

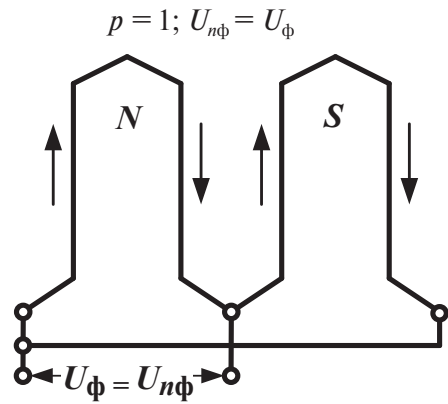
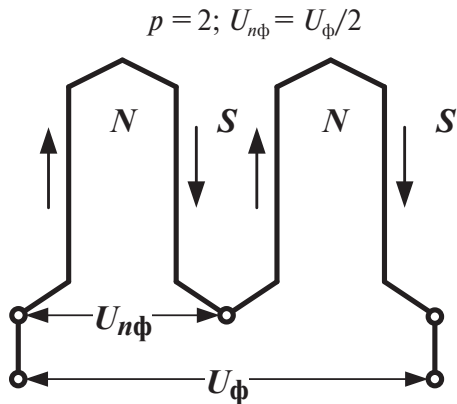


Рис. 2.36. Схема обмоток при  $p = 2$       Рис. 2.37. Схема обмоток при  $p = 1$

В трехфазной машине варианты переключения  $p$  и  $U_{нф}$  согласуются с выражениями переменных ее электромагнитных и механических цепей:

$$\Phi_m \equiv U_{сф} p;$$

$$I_r = \frac{U_{сф}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2}};$$

$$M_{\text{эм}} = \frac{3p}{2\pi f_1} \frac{U_{s\Phi}^2 \cdot \frac{R_r}{s}}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2} \equiv \Phi_m^2;$$

$$M_{\text{к}} = \frac{3p}{2\pi f_1} \frac{U_{s\Phi}^2}{2 \left[ R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2} \right]} \equiv \Phi_m^2.$$

При включении обмоток статора по схеме звезды, преобразование подключения полуфаз производится в соответствии с рис. 2.38, где показано преобразование схемы звезды в схему двойной звезды.

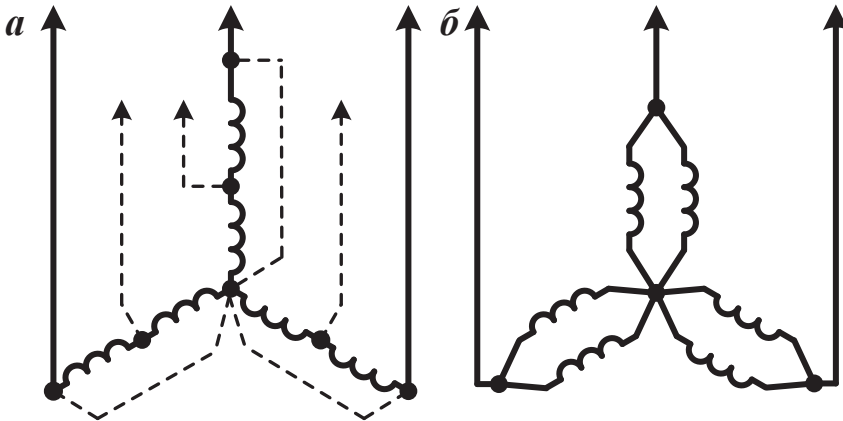


Рис. 2.38. Схема изменения числа пар полюсов при включении обмоток статора по схеме звезды:

*a* — до переключения; *б* — после переключения

Переключением  $\blacktriangledown/\blacktriangledown\blacktriangledown$  в два раза снижается число пар полюсов  $p$ , что приводит к увеличению в два раза частоты вращения  $n_0$ . Напряжение на полуфазу также возрастает в два раза, а магнитный поток  $\Phi_m$  не изменяется. Моменты критические остаются неизменными. Переключение  $\blacktriangledown/\blacktriangledown\blacktriangledown$  называют схемой сохранения постоянства моментов, где  $M_{\text{эм}} \equiv \Phi_m I_{\text{ракт}} = \text{const}$ . Механические  $n(M_{\text{эм}})$  и электромеханические  $n(I_r)$  характеристики показаны на рис. 2.39.

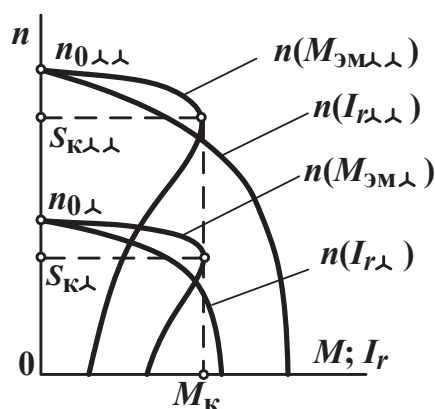


Рис. 2.39. Статические характеристики АД при переключении обмоток, при включении обмоток статора по схеме звезды

При включении обмоток статора по схеме  $\Delta$  преобразование подключения полуфаз производится в соответствии с рис. 2.40, где показано преобразование схемы треугольник  $\Delta$  в схему  $\text{Y-Y}$ , называемую двойной звездой.

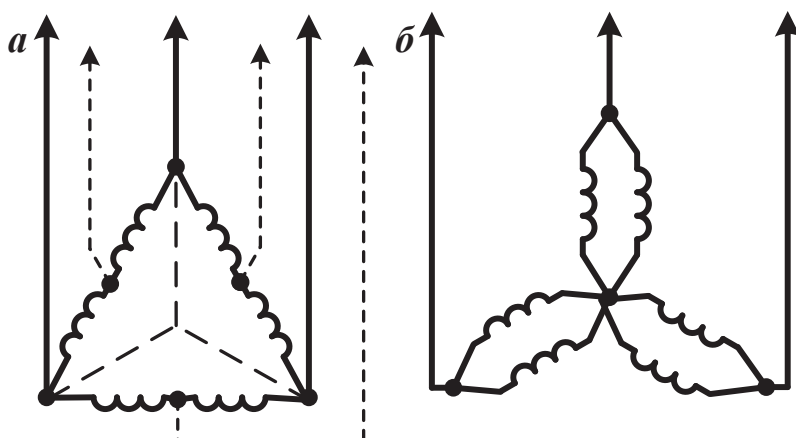


Рис. 2.40. Преобразование схемы треугольника в двойную звезду:  
а — до переключения; б — после переключения

Переключение  $\Delta/\text{Y-Y}$  также в два раза снижает число пар полюсов  $p$ , что в два раза увеличивает частоту вращения  $n_0$ . Однако, в связи с переключением статора со схемы треугольник на двойную звезду, по сравнению со схемой переключения  $\text{Y}/\text{Y-Y}$  увеличивается напря-

жение на полуфазу всего лишь на 15 %. Это объясняет выражение

$$U_{n\Phi \blacktriangle} = \frac{2}{\sqrt{3}} U_{n\Phi \Delta}. \text{ Магнитный поток при таком переключении не сохра-}$$

няется неизменным, что вызывает снижение развиваемых моментов, а электромагнитная мощность  $P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \omega_0 = M_{\text{эм}} n_0 2\pi/60$  остается примерно постоянной. Поэтому схему переключения  $\Delta/\blacktriangle\blacktriangle$  называют схемой постоянства мощности. Механические  $n(M_{\text{эм}})$  и электромеханические  $n(I_r)$  характеристики для этого способа показаны на рис. 2.41.

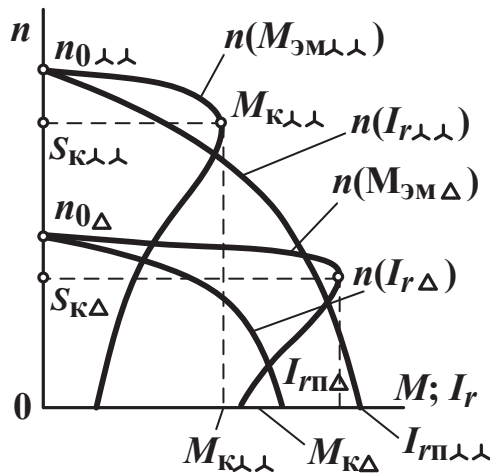


Рис. 2.41. Статические характеристики АД при переключении обмоток, при включении обмоток статора по схеме треугольника

В рассмотренных схемах (см. рис. 2.38, рис. 2.40) переход на пониженные скорости производится обратным переключением  $\blacktriangle\blacktriangle/\blacktriangle$  и  $\blacktriangle\blacktriangle/\Delta$ , что будет сопровождаться работой АД в режиме рекуперативного торможения. Создание АД КЗР с переключением  $p$  было направлено на их использование в металлообрабатывающих станках для исключения коробки скоростей, но это оказалось неэффективным. Однако многоскоростные АД КЗР получили использование в электроприводах лифтов с двух-, трехскоростными двигателями. В трехскоростных АД одна обмотка статора выполняется с переключением, например на  $n = 1500$  и  $3000$  об/мин, а другая — без переключения, на  $1000$  об/мин или  $750$  об/мин. Для четырехскоростных АД потребуется две обмотки с переключением  $p$ .

### Электромеханические свойства АД при частотном управлении

Благодаря распространению различных типов статических преобразователей электрической энергии переменного тока открываются широкие возможности по использованию различных законов частотно-го управления выходными координатами, в первую очередь АД КЗР и синхронных ЭД. Однако если только воздействовать на частоту питающего напряжения (тока) в соответствии с выражением  $\omega_0 = \omega_1/p = 2\pi f_1/p$  и не воздействовать на другие переменные энергопреобразования ( $U_{\text{сф}}$ ,  $I_{\text{сф}}$ ), которые являются функциями электромагнитного момента и нагрузки на валу, то желаемого эффекта не получится. Объясняется это следующим. При неизменном  $U_{\text{сф}}$  повышение  $f_1 > f_{1N}$  с целью увеличения  $\omega > \omega_N$  приводит к увеличению индуктивностей рассеяния  $L_{\text{сг}}$  и  $L_{\text{рл}}$ , снижению  $\Psi_m$  и  $I_r$ , то есть к ухудшению электромеханических

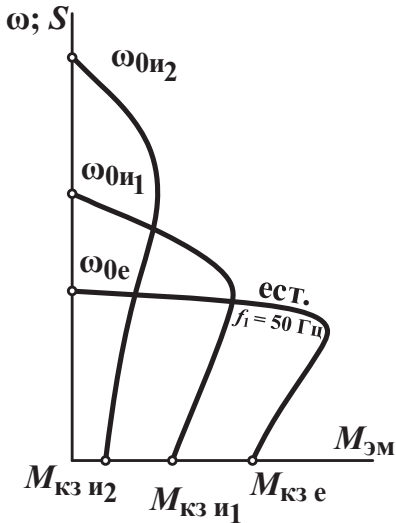


Рис. 2.42. Статические характеристики АД при частотном управлении

свойств и энергетики АД КЗР. Механическая характеристика смягчается из-за возрастания скольжения, перегрузочная способность  $\lambda$  падает (рис. 2.42). Например, при устремлении  $f_1 \rightarrow \infty$  ( $\omega_d \rightarrow \infty$ ) механическая характеристика вырождается в прямую по оси ординат.

В первой четверти прошлого столетия М. П. Костенко сформулировал законы частотного управления, обратив внимание на зависимость фазного напряжения  $U_{\text{сф}}$ , подводимого к статору, от частоты и нагрузки на валу. В 1960-е гг. А. А. Булгаков обобщил этот закон на любой способ управления скоростью вращения двигателей. Общая ориентация частотного управления на Т-образную эквивалентную схему замещения АД с выводом урав-

нений соответствующих статических характеристик была выполнена А. А. Булгаковым (Частотное управление асинхронными электродвигателями. М. : Наука, 1966 и М. : Энергоиздат, 1982), а также А. С. Сандлером и Р. С. Сарбатовым (Частотное управление асинхронными электродвигателями. М. : Энергия, 1966. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М. : Энергия, 1974). Тогда же



было предложено удобное для частотного управления АД представление в относительных единицах следующих физических величин:

$\gamma$  — относительное напряжение фазы статора,  $\gamma = \frac{U_{s\Phi}}{U_{s\Phi N}}$ ;

$\alpha$  — относительная циклическая и круговая частоты питающего напряжения,  $\alpha = \frac{f_1}{f_{1N}} = \frac{\omega_0}{\omega_{0N}} = \frac{2\pi f_1/p}{2\pi f_{1N}/p}$ ;

$\beta$  — абсолютное скольжение,  $\beta = \frac{s}{s_N} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{0N}} = \frac{\Delta n}{n_{0N}}$ ;

$\nu$  — относительная скорость ротора,  $\nu = \frac{\omega_r}{\omega_{0N}} = \frac{n_r}{n_{0N}}$ .

При этом оказывается, что  $\omega_r$  может быть выражена

$$\omega_r = \omega_{0N}(\alpha - \beta), \text{ или } \nu = (\alpha - \beta). \quad (2.22)$$

В современных частотно-управляемых разомкнутых и замкнутых системах электроприводов АД может быть использовано более двух десятков различных законов управления, которые подразделяются на законы скалярного и законы векторного частотного управления. Их целью является выработка необходимых управляющих воздействий на переменные энергопреобразования через управляемый преобразователь для обеспечения требуемых выходных координат электропривода.

В качественном отношении скалярное управление менее совершенно, поскольку управляющее воздействие на АД формируется посредством различных соотношений между действующими фазными напряжениями  $U_{s\Phi}$  и частотой  $f_1$ . Смысл же термина «скалярный» указывает на воздействие на значение физической величины  $|U_{s\Phi}|$  без воздействия на ее аргумент, хотя амплитудное и действующее значение напряжения и его частоты взаимно связаны. Если скалярное управление дает достаточно удовлетворяющие результаты в разомкнутых системах, ориентированных на обеспечение статических характеристик, то есть в квазиустановившихся режимах, то для электроприводов механизмов с высокими требованиями к динамике и быстродействию его нельзя признать удовлетворительным.

Законы векторного частотного управления подразделяются на законы прямого и косвенного управления и ориентированы на формирование выходных координат ЭП через потокосцепление ( $\Psi_s$ ,  $\Psi_m$  или

$\Psi_r$ ), в котором задается не только модуль, но и аргумент. Принципиальное отличие между прямым и косвенным векторными законами частотного управления заключается в различных способах ориентации систем координат, привязанной к конкретному потокоцеплению, что используется в замкнутых системах ЭП, позволяющих оптимизировать энергетические показатели асинхронного электропривода (потребляемую мощность, потери, коэффициент мощности) в динамике и при изменении нагрузки на валу.

Законы прямого векторного управления с прямой ориентацией по полю строятся на основе прямого измерения потокоцепления, например, с помощью датчика Холла.

При использовании законов косвенного векторного управления с косвенной ориентацией по полю вычисляют  $\Psi_r$  через измерение  $\omega_d$  и  $I_{sf}$ . При этом берется за основу наиболее точная математическая модель двигателя переменного тока, предложенная доктором технических наук, профессором Р. Т. Шрейнером.

Рассмотрим законы скалярного частотного управления АД КЗР.

1. Самым простым законом управления частотой является закон поддержания постоянства отношения модуля напряжения к частоте

$$U_{sf}/f_1 = \text{const},$$

что обеспечивает удобства, когда нагрузка на валу неизменная  $M_c = \text{const}$ . На рис. 2.43 условно показана схема раздельного управления  $\gamma$  и  $\alpha$ , а на рис. 2.44 — статические характеристики при данном способе управления.

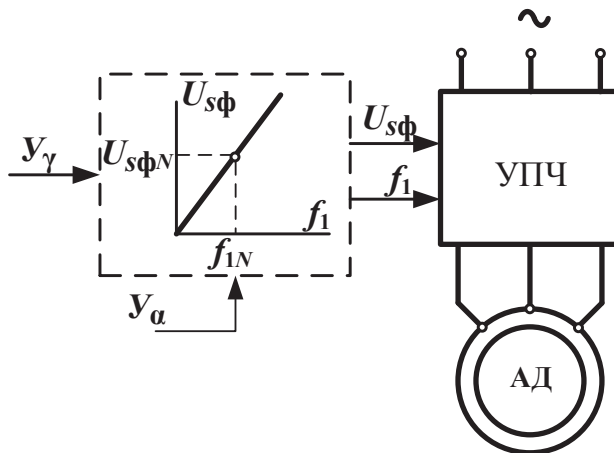


Рис. 2.43. Схема раздельного управления  $\gamma$  и  $\alpha$

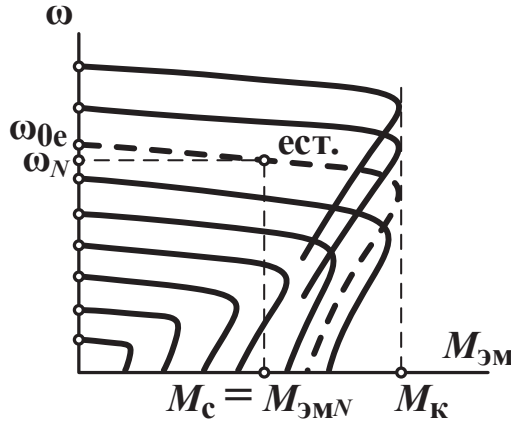


Рис. 2.44. Статические характеристики при раздельном управлении

При управлении «вверх» от  $f_{1N}$  повышение  $U_{сф}$  (не беспредельно) позволяет сохранить магнитный поток машины, что обеспечивает постоянство электромагнитного состояния и перегрузочной способности АД КЗР  $\Phi_m \cong \text{const}$ ,  $\lambda \cong \text{const}$ . Но при управлении скоростью «вниз» от номинальной, особенно когда  $f_1$  и  $U_{сф}$  устремляются к нулю, из-за возрастающего отрицательного влияния падения напряжения на активном сопротивлении цепи статора, механическая характеристика вырождается в точку начала системы координат. Это иллюстрирует выражение главного магнитного потока  $\Phi_m$ , которое можно получить из эквивалентной схемы замещения АД

$$\begin{aligned} \Phi_m &= \frac{U_{сфN} \gamma}{c_1 f_{1N} \alpha} - \frac{I_s Z_\Phi}{c_1 f_{1N} \alpha} = \\ &= \frac{U_{сфN} \gamma}{c_1 f_{1N} \alpha} - \frac{I_s}{c_1 f_{1N}} \sqrt{\left(\frac{R_s}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{X_s \alpha}{\alpha}\right)^2}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Для компенсации влияния  $R_s$  при управлении скоростью «вниз» используют законы 2 или 3.

2. В области частот  $f_1 < 50$  Гц можно перейти от пропорционального закона к параболическому, чтобы обеспечить траекторию замедленного снижения напряжения до некоторого конечного значения  $U_{сфк}$ , при котором  $f_1$  стремится к нулю. Уравнение параболы  $y = ax^2 + bx + c$  позволяет выбрать промежуточную точку, например  $f_1 = 0,5 f_{1N}$ , и задать промежуточное значение напряжения  $U_{сфн}$ . Координаты точек 2 и 3 за-

даются в соответствии с устраивающим решением задачи управления законом (рис. 2.45) замедленного снижения напряжения.

Запишем координаты точек в относительных единицах, используя в качестве базовых номинальные значения  $U_{сфN}$  и  $f_{1N}$ :

- точка 1 (1; 1) — точка номинального режима работы;
- точка 2 (0,7; 0,5) — промежуточная точка;
- точка 3 (0,5; 0) — конечная точка параболической траектории.

Для указанных координат записываем соответствующие уравнения параболы, совместное решение которых позволяет определить коэффициенты  $a = 0,2$ ;  $b = 0,3$ ;  $c = 0,5$ . В результате получаем искомое уравнение параболической траектории  $U_{сф} = f(f_1)$  в относительных единицах

$$U_{сф} = 0,2 f_1^2 + 0,3 f_1 + 0,5.$$

Механические характеристики в зоне  $f_1 < f_{1N}$  становятся более жесткими и сохраняют перегрузочную способность АД,  $\lambda = \text{const}$  (рис. 2.46).

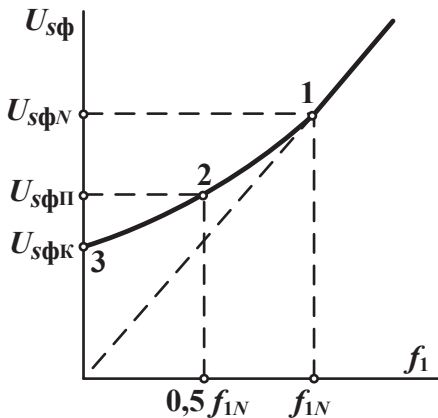


Рис. 2.45. Соотношение напряжение — частота при частотном управлении

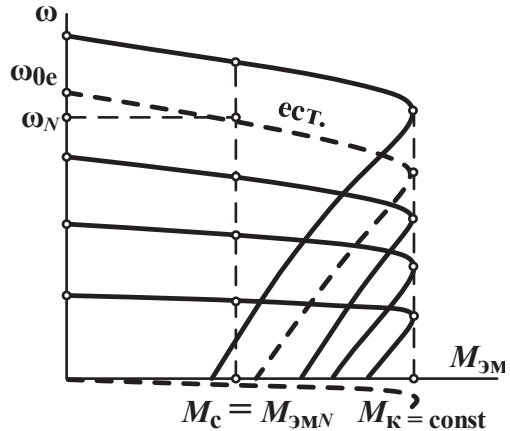


Рис. 2.46. Механические характеристики АД при частотном управлении

### 3. Закон поддержания

$$\frac{E_{сф}}{f_1} = \text{const}$$

эквивалентен  $\Psi_s = \text{const}$ , что обеспечивает компенсацию падения напряжения на  $R_s$  за счет увеличения модуля  $U_{сф}$

$$\frac{\dot{U}_{сф} \uparrow - R_s \cdot \dot{I}_{сф}}{f_1 \downarrow} = \text{const}.$$

Это можно пояснить при помощи следующей записи:  $U_{сф} \cdot \gamma \uparrow = E_s + I_s R_s$ , где  $E_s \equiv f_1$ ,  $M_c \equiv I_s R_s$ , при этом  $\alpha \downarrow$ ,  $\beta \downarrow$ . Рассматриваемый закон допускает повышенную нагрузку на валу и способствует улучшению электромагнитного состояния, а также увеличению  $\lambda$  по сравнению с естественной механической характеристикой АД — рис. 2.47 и рис. 2.48.

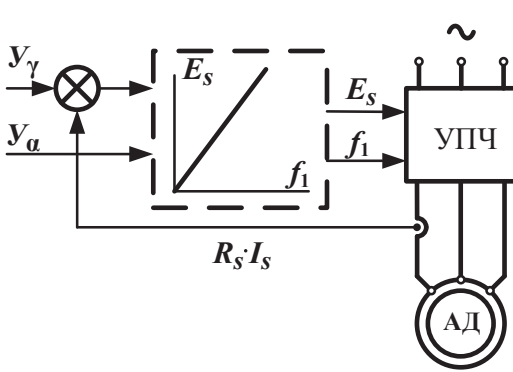


Рис. 2.47. Частотное управление при компенсации падения напряжения на  $R_s$

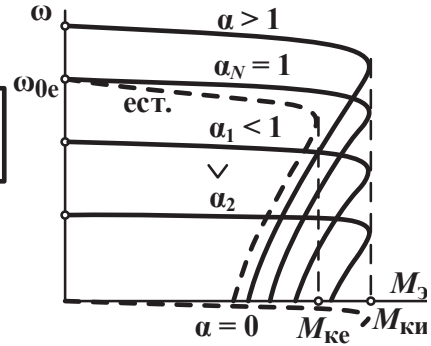


Рис. 2.48. Механические характеристики АД при частотном управлении, при компенсации падения напряжения на  $R_s$

#### 4. Закон поддержания

$$E_{сф}/f_1 = \text{const}$$

эквивалентен  $\Psi_m = \text{const}$ , что обеспечивает компенсацию влияния  $R_s$  и индуктивного сопротивления рассеяния  $X_s$  за счет еще большего увеличения модуля  $U_{сф}$

$$\frac{\dot{U}_{сф} \uparrow \uparrow - (R_s + jX_s) \cdot \dot{I}_{сф}}{f_1 \downarrow} = \text{const}.$$

На рис. 2.49 условно показана электрическая схема организации рассматриваемого закона. Рис. 2.50 иллюстрирует значительное увеличение перегрузочной способности, усиление электромагнитного состояния АД КЗР и увеличение  $\lambda$ .

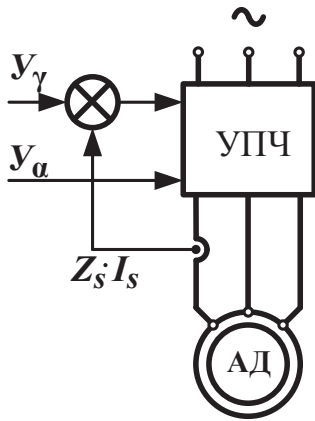


Рис. 2.49. Частотное управление при компенсации падения напряжения на  $R_s$  и индуктивного сопротивления рассеяния  $X_s$

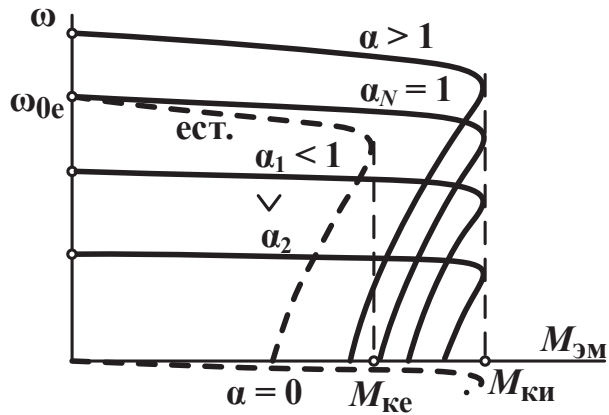


Рис. 2.50. Механические характеристики АД при частотном управлении, при компенсации падения напряжения на  $R_s$  и индуктивного сопротивления рассеяния  $X_s$

## 5. Закон поддержания

$$E_{\text{эф}}/f_1 = \text{const}$$

эквивалентен  $\Psi_r = \text{const}$  и обеспечивает компенсацию влияния  $R_s$  и индуктивных сопротивлений рассеяния  $X_s$  и  $X_r$ , что заставляет еще больше увеличивать модуль  $U_{\text{эф}}$

$$\frac{\dot{U}_{\text{эф}} \uparrow \uparrow \uparrow - (R_s + jX_s) \cdot \dot{I}_{\text{эф}} - jX_r \cdot \dot{I}_{\text{эф}}}{f_1 \downarrow} = \text{const}.$$

Рассматриваемый закон позволяет увеличить  $M_c$  на валу по сравнению с работой на естественной статической характеристике АД с учетом его допустимого теплового состояния (поэтому частотно-управляемые АД изготавливаются с изоляцией обмоток класса  $F$ ). Условная электрическая схема реализации рассматриваемого закона приведена на рис. 2.51.

На рис. 2.52 иллюстрируется не только значительное увеличение перегрузочной способности за счет усиления электромагнитного состояния АД, но и фактически указывается на придание АД КЗР при данном законе частотного управления электромеханических свойств ДПТ с независимым возбуждением. В частотно-управляемом АД КЗР

имеются различные возможности формирования электромагнитного состояния, адекватного другим типам ЭД постоянного и переменного тока.

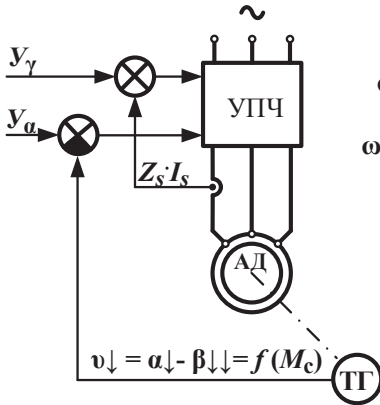


Рис. 2.51. Частотное управление при компенсации падения напряжения на  $R_s$  и индуктивного сопротивления рассеяния  $X_s$  и  $X_r$

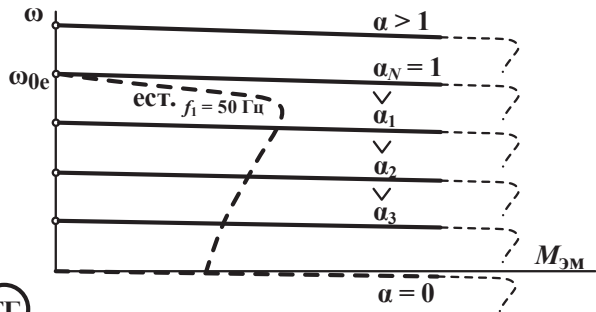


Рис. 2.52. Механические характеристики АД при частотном управлении, при компенсации падения напряжения на  $R_s$  и сопротивлений рассеяния  $X_s$  и  $X_r$

6. Закон частотного управления, обеспечивающий АД КЗР электро-механические свойства ДПТ последовательного возбуждения.

Для решения такой задачи должна формироваться достаточно мягкая нелинейная искусственная статическая механическая характеристика АД КЗР (в допустимом по тепловому состоянию диапазоне изменения нагрузки на валу, когда  $M_c = \text{var}$ ), поэтому закон частотного управления требует обеспечения следующих условий:

- $\beta$  — абсолютное скольжение сохраняется неизменным во всем

$$\text{диапазоне изменения нагрузки, } \beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{0N}} = \text{const};$$

- $\gamma$  — во всем диапазоне формируемой  $\omega = f(M_{эм})$ ,  $\gamma = \frac{U_{сф}}{U_{сфN}} = \text{const}$ .

Параметры  $\beta$  и  $\gamma$  задаются;  $\alpha = \beta + \nu = \text{var}$  при  $\beta = \text{const}$ , а  $\nu \downarrow = \text{var}$  при  $M_c \uparrow$ , что поясняет уравнение (2.23):  $\Phi_m = \frac{U_{сф}^3}{c_1 f_1 \alpha} \uparrow - \frac{I_{сф} Z_s}{c_1 f_1 \alpha} \uparrow = \text{const}$ , то есть электромагнитное состояние АД не изменяется.

Условная электрическая схема организации рассматриваемого закона приведена на рис. 2.53. На рис. 2.54 приведены искусственные статические характеристик частотно-управляемого АД КЗР при реализации рассматриваемого закона. С изменением задания на скорость в виде задания  $Y_\gamma$  при  $Y_\beta = \text{const}$  изменяется жесткость регулировочной характеристики АД и крутизна формируемой механической характеристики, соответствующей ДПТ ПВ.

С увеличением статической нагрузки  $M_c$  жесткость регулировочных характеристик АД увеличивается, каждая из которых соответствует определенному значению  $\alpha = \text{var}$ . Так, в частотно-управляемом АД КЗР формируется электромагнитное состояние, адекватное ДПТ ПВ, и соответствующие ДПТ ПВ электромеханические свойства.

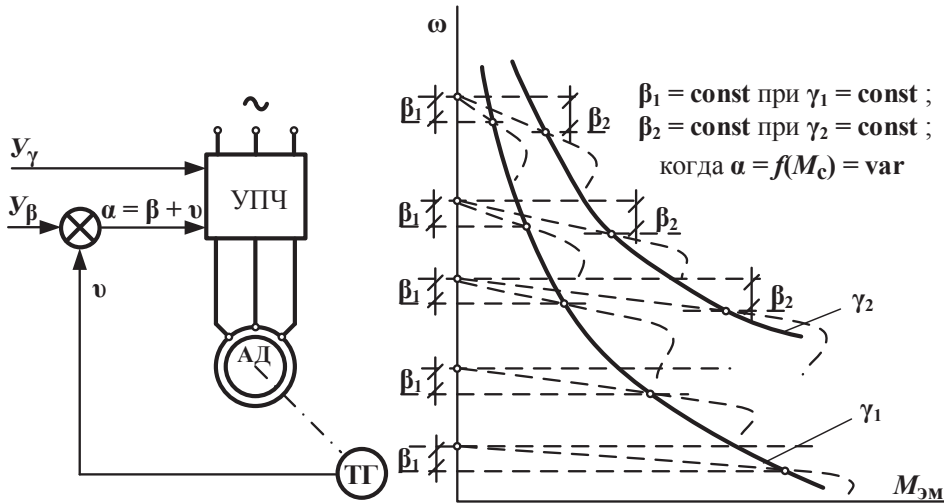


Рис. 2.53. Схема АД КЗР при частотном управлении

Рис. 2.54. Механические характеристики АД при частотном управлении, обеспечивающем АД КЗР электромеханические свойства ДПТ ПВ

7. Закон частотного управления, обеспечивающий АД КЗР электро-механические свойства трехфазного синхронного двигателя. В отличие от предыдущего закона (6), должна быть сформирована абсолютно жесткая статическая механическая характеристика. Такой закон частотного управления требует обеспечения следующих условий:



- $\beta$  — абсолютное скольжение сохраняется неизменным во всем диапазоне изменения нагрузки,  $\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{0N}} = \text{const}$  ;
- $\Delta\omega \cdot (M_c) = \text{const}$  ;
- $\alpha$  — во всем диапазоне формируемой  $\omega = f(M_{эм})$ ,  $\alpha = \frac{f_1}{f_{1N}} = \text{const}$  .

Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  задаются,  $\gamma = \text{var}$ , что поясняет уравнение (2.23):

$$\Phi_m = \frac{U_{сф}^3}{c_1 f_1 \alpha} \uparrow - \frac{I_{сф} Z_s}{c_1 f_1 \alpha} \uparrow = \text{const} , \text{ то есть электромагнитное состояние АД}$$

не изменяется.

Условная электрическая схема организации рассматриваемого закона приведена на рис. 2.55. Рис. 2.56 иллюстрирует решение поставленной задачи с помощью искусственных регулировочных статических характеристик частотно-управляемого АД КЗР. Абсолютно жесткая характеристика, соответствующая синхронной машине, обеспечивается сохранением постоянства электромагнитного состояния. С увеличением статической нагрузки жесткость регулировочных характеристик АД увеличивается, а заданное абсолютное скольжение сохраняется неизменным при различных вариантах задания  $Y_\beta$  и  $Y_\alpha$ . При  $\alpha$  и  $\beta = \text{const}$ ,  $v = \alpha - \beta = f(M_c)$ .

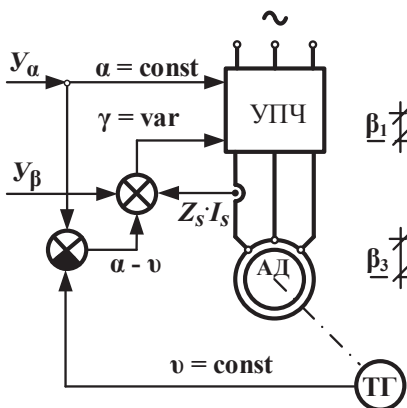


Рис. 2.55. Схема при частотном управлении, обеспечивающем АД КЗР электромеханические свойства трехфазного СД

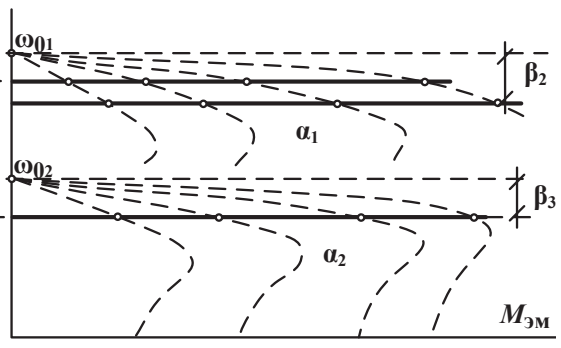


Рис. 2.56. Механические характеристики АД при частотном управлении, обеспечивающем АД КЗР электромеханические свойства трехфазного СД

8. Закон поддержания  $\frac{U_{сф}}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$  обеспечивает постоянство мощ-

ности на валу АД при заданных скоростях вращения  $P_{2(в)} = M_c \uparrow \downarrow \cdot \omega \downarrow \uparrow$ . Такой закон обычно используется в электроприводах механизмов, требующих обеспечения постоянства линейной скорости намотки (или сматывания) материала при сохранении его натяжения. К таким механизмам относятся различные моталки и сматыватели в полосопрокатном производстве металлургических предприятий, а также в бумажной и текстильной промышленности, когда скорость электропривода должна плавно и непрерывно изменяться в функции изменения радиуса наматывания или сматывания материала. Заданная технология и промежуточные механические характеристики АД показаны на рис. 2.57. Здесь же может быть использован закон  $\beta = \text{var}$ , когда  $\Delta\omega = f(M_c) = \text{var}$ , или задается  $\beta = \text{const}$ , как показано в рассмотренных законах 6 и 7.

9. Закон поддержания  $\frac{U_{сф}}{f_1^2} = \text{const}$  используется в электроприводах

механизмов с так называемой «вентиляторной нагрузкой», в частности мощных асинхронных электроприводов, обеспечивающих управление напором и производительностью насосов в водопроводных и тепловых сетях. Заданная технологическим процессом регулировочная характеристика и промежуточные характеристики частотно-управляемого АД показаны на рис. 2.58. Как и в предыдущем законе (8), реализация может быть выполнена как при  $\beta = \text{var}$ , так и при  $\beta = \text{const}$ .

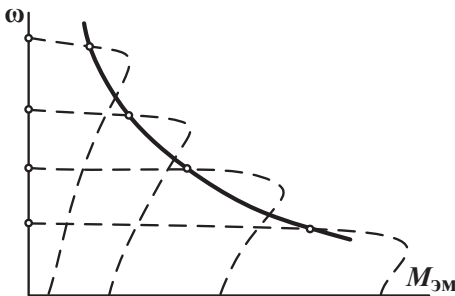


Рис. 2.57. Механические характеристики АД при частотном управлении, обеспечивающем постоянство мощности на валу

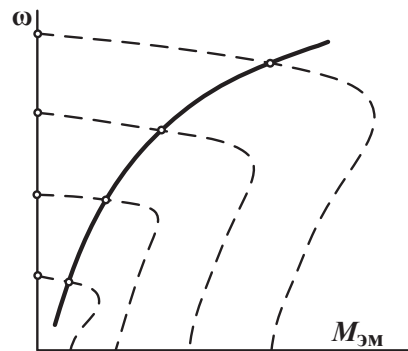


Рис. 2.58. Механические характеристики АД при частотном управлении в электроприводах механизмов с «вентиляторной нагрузкой»

## 2.4. Трехфазные синхронные электроприводы

### 2.4.1. Принцип работы и электромеханические свойства СД

Принцип работы трехфазного СД основан на электромагнитном взаимодействии между вращающимся магнитным полем статора, создаваемого системой переменных трехфазных токов (аналогично АД), и постоянным магнитным полем, либо создаваемым обмоткой возбуждения, которая является одноосной, располагается на роторе и через систему двух контактных колец и графитометаллических щеток подключена к источнику электроэнергии постоянного напряжения, либо создаваемым постоянными магнитами на роторе.

В отличие от АД, в синхронном двигателе не возникает проблемы из-за рассогласования угловых скоростей вращения электромагнитного поля статора  $\omega_0$  и вращения ротора  $\omega_r$ . Взаимное ориентирование разноименных полюсов электромагнитных полей статора и ротора обеспечивает синхронное вращение ротора с вращающимся электромагнитным полем обмотки статора, то есть  $\omega_0 = \omega_r$ ; именно в этом заключается основание называть такую машину синхронной.

Синхронная машина отличается от асинхронной конструкцией ротора (с явно выраженными полюсами или полнополюсными), который также называют якорем, поскольку его обмотка получает электроэнергию от источника постоянного напряжения и создает постоянное магнитное поле ротора. Благодаря этому дополнительному магнитному полю СД обладает более благоприятным (по сравнению с АД) электромагнитным состоянием в функции нагрузки на валу, а также не столь жесткими оказываются требования к величине воздушного зазора. Из-за наличия двух источников электрической энергии, переменного и постоянного тока, СД называют машиной двойного питания.

Электрическая схема СД показана на рис. 2.59, где внешняя окружность обозначает трехфазную обмотку статора, внутренняя окружность — пусковую короткозамкнутую обмотку ротора, внутри нее показана обмотка постоянного тока ротора, которая через щеточно-кольцевые контакты подключается к источнику постоянного напряжения и по которой протекает постоянный ток возбуждения, для изменения его величины используется  $R_{f\text{доб}}$ . Асинхронная пусковая

и абсолютно жесткая статическая механическая характеристики СД представлены на рис. 2.60.

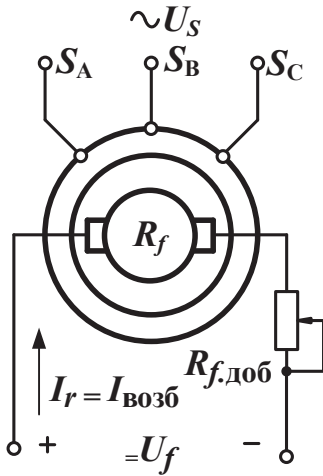


Рис. 2.59. Электрическая схема СД

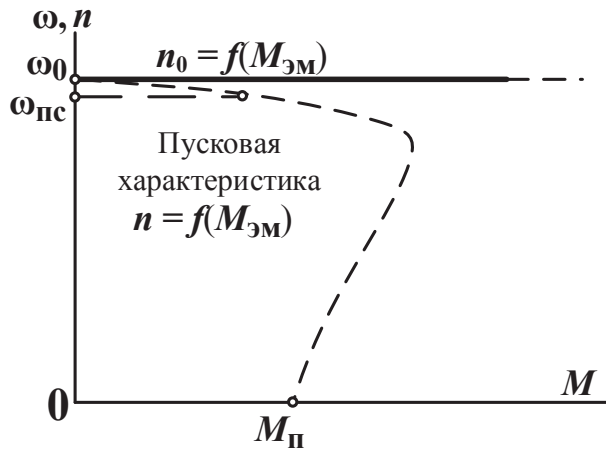


Рис. 2.60. Асинхронная пусковая и абсолютно жесткая статическая механические характеристики СД

Для пуска СД необходимо его ротор разогнать до подсинхронной скорости, затем подать постоянное напряжение на обмотку ротора: разноименные полюсы вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора взаимно притягиваются, и ротор втянется в синхронное вращение со скоростью  $\omega_0 = \omega_r = 2\pi f_1/p$ . Обычно разгон ротора до подсинхронной скорости производится так называемым асинхронным пуском. С этой целью в полюсах ротора закладывается легкая, не рассчитанная на длительный ток, короткозамкнутая пусковая обмотка, которая перед пуском отключена от источника напряжения и замкнута на 3–4-кратное по сравнению с  $R_f$  добавочное сопротивление  $R_{f,доб}$ . Пуск производится включением обмотки статора на трехфазное напряжение. При достижении ротором подсинхронной скорости  $\omega_{пс} \approx 0,95\omega_0$  по специальной схеме (на рис. 2.59 не показана)  $R_{f,доб}$  отключается от источника напряжения  $U_f$  и на обмотку ротора подается постоянное напряжение возбуждения. После вхождения СД в синхронизм пусковая короткозамкнутая обмотка перестает пересекаться вращающимся полем статора, в ней прекращает индуцироваться ЭДС и протекать индукционный ток, то есть она физически исключается из работы.

Работа СД описывается механической  $M_{эм} = f(\omega_0)$  и угловой характеристикой  $M_{эм} = f(\Theta)$ , Н·м, которые определяются по одному и тому же математическому выражению

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\dot{E}_0} = \frac{3}{\dot{E}_0} \left[ \frac{U_s E_s}{x_d} \sin \Theta + \frac{U_s^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta \right], \quad (2.24)$$

где  $E_s$  — индуцированная в обмотке статора ЭДС, вызванная пересечением проводников фаз неподвижного статора вращающимся магнитным потоком;

$x_d$  и  $x_q$  — индуктивные сопротивления СД по оси  $d$  и  $q$ .

Векторная диаграмма и угловая характеристика СД представлены на рис. 2.61 и 2.62. Как показано на рис. 2.61, в двигательном режиме СД  $\dot{I}_s$  отстает от  $\dot{U}_s$  на угол  $\varphi$ , а  $\dot{E}_s$  отстает от  $\dot{U}_s$  на угол  $\Theta$ , что указывает на потребление статором из сети реактивной мощности  $Q_s$  для создания вращающегося магнитного поля и активной мощности  $P_s$  на покрытие тепловых потерь  $\Delta P_{sv}$  и преобразование в механическую мощность на валу для совершения СД полезной механической работы.

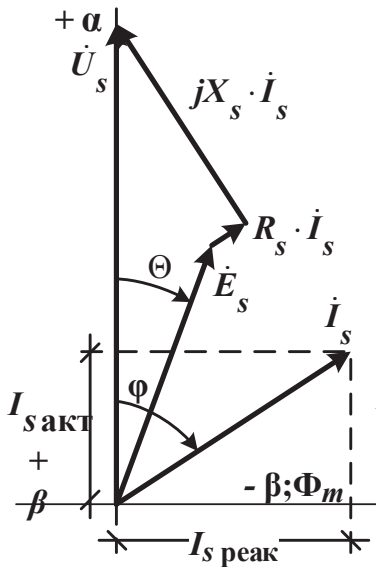


Рис. 2.61. Векторная диаграмма СД

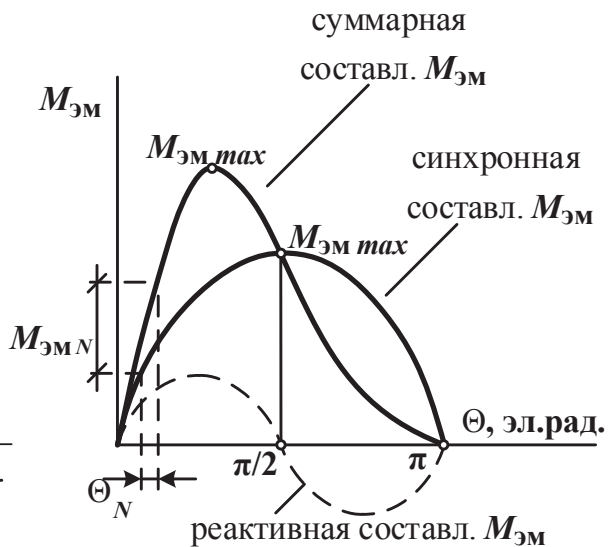


Рис. 2.62. Угловая характеристика СД

Угловая характеристика на рис. 2.62 соответствует СД с явно выраженными полюсами. Синхронные двигатели обычно выпускаются полнополюсными на большие скорости вращения, для расчета которых в уравнении (2.24) реактивная составляющая момента исключается и  $M_{эм}$  выражается только синхронной составляющей ( $M_{эм\max}$  будет отражать  $\Theta = 90$  эл.град). Номинальный  $M_{эмN}$  обычно соответствует  $\Theta = 20...30$  эл. град, что позволяет определить перегрузочную способность СД

$$\lambda = \frac{M_{эм\max}}{M_{эмN}} = \frac{\sin 90}{\sin(20...30)} \approx 3...2.$$

Синхронные двигатели выпускались (10–15 лет назад) средней и большой мощности обычно в высоковольтном исполнении, поскольку использовались в режиме нагрузки  $S_1$  в неуправляемых по скорости электроприводах насосов, воздуходувок, компрессоров с редким отключением.

С появлением управляемых преобразователей частоты трехфазного переменного тока, расширяются возможности построения экономичных синхронных электроприводов по системе «УПЧ — СД», управляемых по скорости в широком диапазоне с различными законами управления. Естественно возникает необходимость выпуска СД на небольшие мощности (единицы и десятки киловатт), для которых может существенно упроститься конструкция ротора путем замены электромагнитного возбуждения на возбуждение от постоянных магнитов с исключением асинхронной пусковой обмотки. Наконец, возможно выполнение неподвижного статора с трехфазной обмоткой на внутреннем элементе СД, вращающийся ротор — на наружном с преобразованием его к конструктивному построению двигателя-колеса (например для электромобиля со всеми ведущими колесам).

#### **2.4.2. Работа СД как генератора реактивной мощности при недогрузке на валу**

Электроприводами с синхронными двигателями всегда оснащались механизмы средней и большой мощности с редкими пусковыми включениями. Если в работе таких электрифицированных механизмов по условиям технологического процесса имеются периоды со значительной недогрузкой на валу, то оказывается экономически целесо-



Если  $M_c = \text{const} < M_N$ , то  $P_{2(в)} = P_c = M_c \omega_0 = \text{const}$ , что будет соответствовать недогрузке на валу, поэтому должна сохраняться величина  $I_{\text{закт}} = \text{const}$ , гарантирующая недоиспользование двигателя по нагреву.

Со стороны сети переменного тока можно записать, что  $P_{1(эл)} = 3 U_s I_s \cos \varphi_1 = \text{const}$ , где  $U_s = \text{const}$ ;  $I_{\text{закт}} = I_s \cos \varphi_1 = \text{const}$ ; при этом  $\text{Abs } \dot{I}_s = \text{var}$ ;  $\text{Arg} \varphi_1 = \text{var}$ ;  $P_{1(эл)} < P_{1N}$ .

Выясним, каким должен быть закон изменения  $E_s = f(I_f)$ , чтобы удовлетворялось требование постоянства мощности  $P_{1(эл)}$  и  $P_{2(в)}$ , то есть постоянства активной мощности СД.

Чтобы активный ток оставался постоянным, то есть

$$I_{\text{закт}} = I_s \cos \varphi_1 = \text{const},$$

необходимо обеспечить постоянство и реактивной составляющей, индуктируемой в статоре ЭДС  $E_{\text{зрeакт}}$ , что вытекает из подобия прямоугольных треугольников:  $\Delta oke$  и  $\Delta abc$

$$\cos \varphi_1 = \frac{\overline{ok}}{\overline{oe}} \Big|_{\Delta oke} = \frac{\overline{ab}}{\overline{ac}} \Big|_{\Delta abc},$$

откуда  $\overline{ok} \cdot m_I = I_s \cos \varphi_1$ , где  $\overline{ok} = \text{const}$  по условию;

$$\overline{ab} \cdot m_I = x_s I_s \cos \varphi_1 = \text{const}; \quad \overline{ab} \cdot m_E = E_s I_s \sin \Theta = \text{const};$$

$$E_s \sin \Theta = \frac{\overline{ab} \cdot m_E}{x_s} = \text{const},$$

где  $m_I, m_E$  — масштабы по току и ЭДС соответственно.

Поскольку  $x_s$  является неизменным, отрезок  $\overline{ab}$  в процессе изменения возбуждения также должен оставаться неизменным.

Таким образом, в процессе перевозбуждения СД конец вектора тока статора  $\dot{I}_s$  скользит по прямой  $n - n$ , параллельной оси абсцисс, и является годографом тока  $\dot{I}_s$ , а конец вектора  $\dot{E}_s$  скользит по оси  $m - m$  (перпендикулярной  $n - n$ ), которая является годографом ЭДС  $\dot{E}_s$ .

Как видим из векторных диаграмм, в перевозбужденном состоянии недогруженный СД, преодолевая небольшую статическую нагрузку на валу в виде  $P_2 = M_{\text{хх}} \omega_0$ , работает генератором реактивной мощности, которую отдает в сеть переменного тока. Это состояние определяется емкостным характером тока в цепи статора при сохранении знака его активной составляющей и изменении знака его реактивной со-



ставляющей, что указывает на потребление от сети переменного тока активной мощности и на отдачу в сеть реактивной мощности. Однако на двойственность рассматриваемого режима указывает и тот факт, что ток опережает напряжение, а ЭДС по-прежнему отстает от напряжения, хотя по модулю его превышает.

Отдача реактивной энергии в сеть переменного тока осуществляется за счет источника постоянного тока, питающего цепь обмотки возбуждения синхронного двигателя. Рассмотрим рациональность использования СД в перевозбужденном режиме.

Запишем отношение полной мощности синхронного двигателя к его активной мощности

$$\frac{S_s}{P_{1(\text{эл})}} = \frac{\sqrt{P_{1(\text{эл})}^2 + Q_s^2}}{P_{1(\text{эл})}} = \sqrt{1 + \frac{Q_s^2}{P_{1(\text{эл})}^2}}.$$

Если задаваться отношением реактивной мощности к активной, полагая активную мощность  $P_{1(\text{эл})}$  постоянной, но меньшей по сравнению с  $P_{1(\text{эл})N}$ , то это отношение будет характеризовать процент использования синхронного двигателя как генератора реактивной энергии.

$Q_s / P_1 \cdot 100\%$  ..... 0 ..... 10 ..... 20 ..... 30 ..... 40 ..... 50

$\Delta(S_s / P_1) \cdot 100\%$  ..... 0 ..... 0,5 ..... 2 ..... 4,5 ..... 8 ..... 12

Если СД на 30 % использовать как генератор реактивной энергии, то его полная мощность  $S_1$  возрастет лишь на 4,5 %; а если его использовать на 50 %, то  $S_1$  возрастет на 12 %.

---

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Тормозные режимы работы электроприводов

---

### 3.1. Общая характеристика тормозных режимов ЭП

---

**В** тормозных режимах процесс электромеханического преобразования энергии происходит в обратном направлении относительно бывшего двигательного режима работы. За счет подводимой к валу механической (или запасенной в инерционных массах системы кинетической) энергии происходит покрытие потерь холостого хода, а основная ее часть преобразуется электромагнитным путем в электрическую. Дальнейший баланс энергии в соответствии с принципом обратимости электрических машин предопределяется способом осуществления конкретного тормозного режима и условиями его существования. В такой связи различают следующие тормозные режимы:

- рекуперативное торможение (РТ);
- торможение противовключением (ТПВ);
- динамическое торможение с независимым возбуждением (ДТ НВ) или самовозбуждением (ДТ СВ).

Во всех тормозных режимах электрическая машина работает генератором электрической энергии:

- в рекуперативном — на электрическую сеть параллельно с другими источниками электрической энергии;
- при противовключении последовательно с другими источниками электрической энергии в общей питающей сети;

- при динамическом торможении на индивидуальную нагрузку собственной рабочей электрической цепи.

Тормозные режимы широко используются в промышленных электроприводах как в установившихся режимах для ограничения скорости движения системы «ЭП — РМ», так и в переходных режимах движения, когда возникает необходимость быстро или постепенно изменить скорость движения системы, либо произвести остановку, либо осуществить реверс, то есть изменить направление движения исполнительному органу РМ.

### 3.2. Рекуперативное торможение в ЭП постоянного и переменного тока

Энергетический баланс мощности РТ всех типов машин раскрывает mnemonic-схема рис. 3.1. Электрическая схема получения режима РТ аналогична двигательному режиму работы.

Область существования РТ располагается во II квадранте механической характеристики (относительно двигательного I квадранта) или в IV квадранте (относительно двигательного III квадранта), находится выше скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  в асинхронной машине, а в синхронной машине  $\omega_{0\text{РТ}} = \omega_0 = \text{const}$ . Необходимо заметить, что в машине постоянного тока (МПТ) последовательного возбуждения (ПВ) режим РТ исключен из-за  $\omega_0 = \infty$  в естественной схеме включения.

В установившемся режиме движения РТ представляет обычный режим электрического генератора, когда главная цепь (якоря МПТ, статора машин переменного тока) работает на электрическую сеть с конкретной величиной действующего напряжения. Скорость вращения  $\omega_{\text{в}}$  обеспечивается приложенным к валу активным механическим моментом со стороны РМ

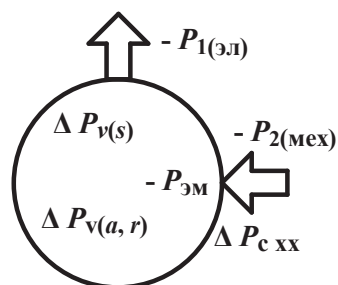


Рис. 3.1. Энергетический баланс мощности режима РТ

$$M_{\text{ва}} = \frac{P_{2(\text{мех})}}{\omega_{\text{в}}} . \quad (3.1)$$

В переходных режимах РТ используется ранее запасенная в системе кинетическая энергия движения

$$W_{\text{кин}} = \int P_{\text{дин}} dt = \int M_{\text{дин}} \omega_{\text{в}} dt , \quad (3.2)$$

за счет которой развивается динамическая мощность на валу  $P_{\text{дин}}$  и противодействующий движению динамический момент  $M_{\text{дин}}$ , обеспечивающий изменение скорости движения системы «ЭП — РМ»,

$$M_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{дин}}}{\omega_{\text{в}}} = \frac{1}{\omega_{\text{в}}} \frac{dW_{\text{кин}}}{dt} = J_{\Sigma} \frac{d\omega_{\text{в}}}{dt} = M_{\text{эм}} + M_{\text{с}} , \quad (3.3)$$

где все переменные представлены мгновенными значениями:

$\omega_{\text{в}}$  — скорость вращения вала;

$M_{\text{эм}}$  — электромагнитный тормозной момент;

$M_{\text{с}}$  — статический момент, в который входит и момент потерь холостого хода  $\Delta M_{\text{с.хх}}$ ,  $M_{\text{с}} = M_{2(\text{мех})} + \Delta M_{\text{с.хх}}$ .

Подведенная к валу тем или иным способом механическая мощность  $P_{2(\text{мех})}$  (рис. 3.1) отчасти покрывает потери холостого хода  $\Delta P_{\text{с.хх}}$ , а основная ее часть электромагнитным путем  $P_{\text{эм}}$  преобразуется в электрическую, которая покрывает переменные потери в главной цепи и рекупируется (отдается) в электрическую сеть.

### 3.2.1. Режим РТ в ЭП постоянного тока

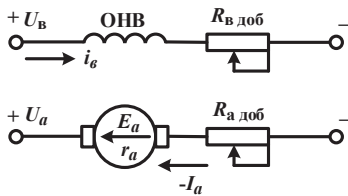


Рис. 3.2. Схема цепей якоря и возбуждения в режиме РТ

1. В МПТ НВ режим РТ соответствует схеме двигательного режима (рис. 3.2).

А. Для установившегося движения в положительном направлении (II квадрант) (рис. 3.3) в области  $\omega_{\text{в}} > \omega_0$  характер приложенного к валу внешнего актив-

ного момента  $M_{\text{ва}}$  должен быть изменен на движущий.

В таком случае, при изменении параметров цепи ЭП ( $U_a$ ,  $R_a$ ,  $\Phi_m$ ), всегда будет сохраняться превышение по модулю ЭДС вращения  $E_a = c \Phi_m \omega_i$  над приложенным к цепи якоря напряжением  $U_a = c \Phi_m \omega_{0i}$ , где  $\omega_i > \omega_{0i}$ . В результате этого ток в цепи якоря  $I_a$  изменяет знак и может быть описан

$$-I_a = \frac{E_a - U_a}{R_a}.$$

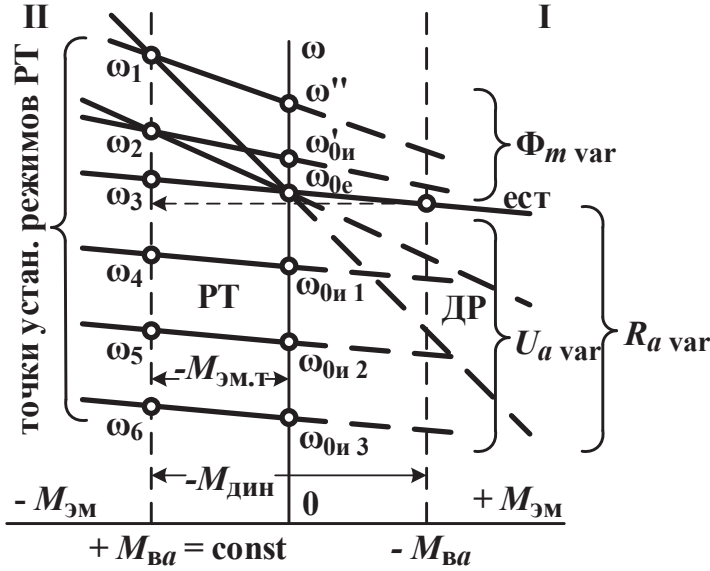


Рис. 3.3. Механические характеристики в режиме РТ

Электромагнитный момент с изменением знака становится тормозным

$$-M_{эм} = c\Phi_m(-I_a).$$

Под действием электромагнитного момента ограничивается скорость  $\omega_i$  движения системы «ЭП — РМ». Скорость вращения системы задается внешним активным движущим моментом  $M_{ба}$  со стороны РМ и параметрами электрических цепей электропривода ( $U_a$ ,  $R_a$ ,  $\Phi_m$ ) (рис. 3.3).

Б. В переходных режимах движения режим РТ связан с развиваемым динамическим моментом

$$-M_{дин} = |M_{эмТ}| + |M_{вс}| = \frac{P_{дин}}{\omega_B},$$

который обусловлен запасом кинетической энергии движущихся инерционных масс в системе «ЭП — РМ» и параметрами электрических це-

пей ЭП  $(U_a, R_a, \Phi_m)$ , называемых ВУВ — внешними управляющими воздействиями,

$$P_{\text{дин}} = \left. \frac{dW_{\text{кин}}}{dt} \right|_{J_{\Sigma} = \text{const}} = J_{\Sigma} \omega_{\text{в}} \frac{d\omega_{\text{в}}}{dt}, \text{ где } W_{\text{кин}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{в}}^2}{2}.$$

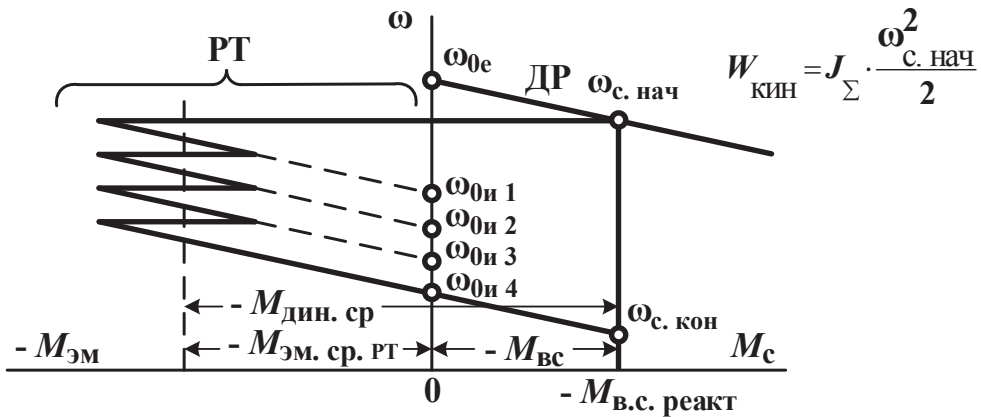


Рис. 3.4. Механические характеристики переходного режима РТ при ступенчатом изменении подводимого к якорю напряжения

На рис. 3.4 приведен пример переходного режима РТ при ступенчатом изменении подводимого к якору напряжения, предположим, при наличии отдельных сетей или УПЭЭ, с последующей точной остановкой электромагнитным тормозом или в режиме динамического торможения. Перед включением в РТ ЭП обладает при  $\omega_{с.нач}$  запасом энергии  $W_{кин} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{с.нач}^2}{2}$ , а по окончании РТ запас энергии  $W_{кин} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0и4}^2}{2}$

значительно снижен за счет покрытия переменных потерь и рекуперации. В рассматриваемом примере на рис. 3.4 выделены средние значения динамического  $M_{\text{дин.ср}}$  и электромагнитного  $M_{\text{эм.ср}}$  моментов.

В ЭП по системе управляемый тиристорный преобразователь (УТП) — ДПТ НВ. Используя задатчик интенсивности, обеспечивают  $d\omega/dt = \text{const}$  при непрерывном изменении  $U_a$ , что приводит к постоянству динамического  $M_{\text{дин}} = \text{const}$  и электромагнитного  $M_{\text{эм.РТ}}$  моментов при РТ.

Уравнения статических характеристик в режиме РТ получают из уравнения баланса электромагнитной мощности

$$-P_{эм} = E_a(-I_a) = c\Phi_m\omega(-I_a) = U_a(-I_a) + I_a^2 R_a,$$

после деления которого на  $I_a$  его переписывают относительно  $\omega$  и получают уравнение электромеханической характеристики  $\omega = f(I_a)$

$$\omega = \frac{U_a}{c\Phi_m} + I_a \frac{R_a}{c\Phi_m} = \omega_0 + \Delta\omega_I;$$

учитывая, что  $M_{эм} = c\Phi_m(-I_a)$ , записывают уравнение механической характеристики  $\omega = f(M_{эм})$

$$\omega = \frac{U_a}{c\Phi_m} + M_{эм} \frac{R_a}{c^2\Phi_m^2} = \omega_0 + \Delta\omega_M.$$

2. Уравнения статических характеристик МПТ СВ и ПВ внешне будут выглядеть аналогично. Однако, учитывая зависимость  $c\Phi_m = f(I_a)$  этих машин, когда  $I_a$  изменяет знак, в обычных схемах включения для них режим РТ исключен.

В МПТ СВ приходится шунтировать обмотку последовательного возбуждения (ОПВ), то есть превращать ее в машину с независимым возбуждением при ослабленном магнитном потоке (рис. 3.5).

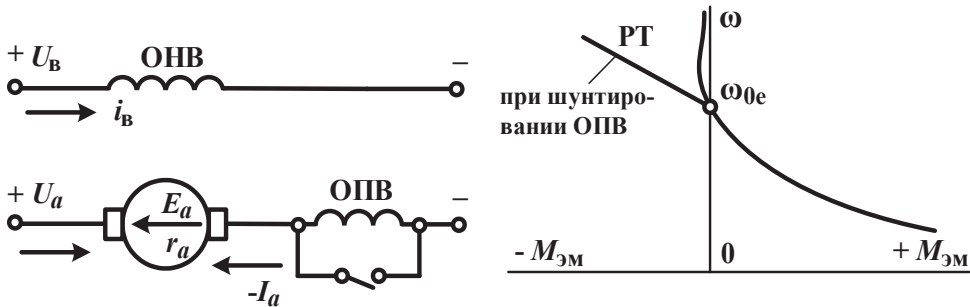


Рис. 3.5. Схема и механические характеристики МПТ СВ в режиме РТ

Для машин с последовательным возбуждением режим РТ исключен, так как  $\omega_0 = \infty$ . Хотя использование МПТ ПВ в искусственных схемах включения (схема IV — шунтирование якоря с внесением обмотки возбуждения в шунтирующую цепь [13, рис. 1.27 при  $n > n_{0e}$ ]) позволяет участвовать в режиме РТ, хотя, строго говоря, теряется смысл называть ее машиной последовательного возбуждения относительно цепи якоря.

### 3.2.2. Режим РТ в ЭП переменного тока

1. Режим РТ в асинхронных машинах (АМ КЗ и АМ ФР) получают с помощью схем, идентичных схемам в двигательном режиме. Установившийся режим РТ обеспечивается приложением к валу АМ движущего активного момента со стороны РМ, под действием которого скорость вращения ротора  $\omega_r$ , геом. рад/с, становится больше скорости вращения главного поля машины

$$\omega_r > \omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = \text{const} . \quad (3.4)$$

АМ переходит на установившуюся работу в области отрицательных скольжений  $0 > -s_{\text{РТ}} > -s_{\text{крРТ}}$ , где  $-s_{\text{крРТ}}$  указывает на критическое скольжение в режиме РТ (см. уравнения (2.9) и (2.10)), то есть на продолжение механической характеристики  $M_{\text{эм}} = f(s)$  из двигательного режима I квадранта во II квадрант режима РТ в пределах указанных скольжений.

По названной причине ротор продолжает вращаться в прежнем положительном направлении, а проводники обмотки ротора пересекаются силовыми линиями главного магнитного поля в обратном направлении по сравнению с былым двигательным режимом работы.

При любом режиме работы и направлении вращения ротора АМ относительно вращения главного магнитного поля  $\Phi_m$ , угловая скорость  $\omega_r$  ротора определяется величиной и знаком скольжения  $s$

$$\omega_r = (1 - s)\omega_0 . \quad (3.5)$$

В таком случае частота пересечения главным магнитным полем  $\omega_0$  проводников ротора  $\omega_r$ , а значит, и частота индуцированных в роторе ЭДС  $E_r$  и тока  $I_r$  будут пропорциональны разности скоростей  $(\omega_0 - \omega_r)$

$$f_r = \frac{p(\omega_0 - \omega_r)}{2\pi} = s \frac{p\omega_0}{2\pi} = sf_1 ,$$

или произведению скольжения на циклическую частоту напряжения питающей сети.

Скорость вращения индуцированного магнитного поля ротора  $\omega_{\text{мп}r}$  относительно скорости вращающегося поля статора в соответствии с выражениями (3.4) и (3.5) определится

$$\omega_{\text{мп}r} = \omega_0 + \omega_r = (1 - s)\omega_0 + s\omega_0 = \omega_0 ,$$



то есть при любой скорости вращения ротора  $\omega_r$ , магнитные поля статора и ротора всегда вращаются синхронно и образуют единое рабочее магнитное поле  $\Phi_m$  АМ. Разобраться в рассматриваемой физической ситуации позволяет определение отношения  $M_{\text{эмкРТ}}/M_{\text{эмкД}}$

$$\frac{|M_{\text{эмкРТ}}|}{|M_{\text{эмкД}}|} = \frac{2 \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{(-s_{\text{кРТ}})}{s_{\text{кД}}} + \frac{s_{\text{кД}}}{(-s_{\text{кРТ}})} + 2\varepsilon} = \frac{2 \cdot (1 + \varepsilon)}{-1 - 1 + 2\varepsilon},$$

откуда для различных типов асинхронных машин

$$(-M_{\text{эмкРТ}}) = M_{\text{эмкД}} \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon} \approx 1, 2 \dots 1, 5.$$

Электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$  в любом режиме АМ создается активной составляющей тока ротора  $I_{ra} = \dot{I}_r \cdot \cos \psi_2$ , в двигательном режиме — вращающий, а в тормозных — противодействующий движению  $|M_{\text{эм}}| \equiv P_{\text{эм}} \equiv \dot{\Phi}_m$ .

Некоторое превышение значения  $M_{\text{эм}}$  по сравнению с  $|M_{\text{эмкД}}|$  указывает на усиление главного магнитного потока  $\Phi_m$  в режиме РТ, а значит, и на увеличение  $E_{r\text{РТ}}$  по сравнению с  $E_{r\text{Д}}$  в двигательном режиме, поскольку  $E_r \equiv \Phi_m$  при  $f_1 = \omega_0 p / (2\pi) = \text{const}$ ,

$$\dot{E}_r = c f_1 \cdot \dot{\Phi}_m,$$

где  $C$  — конструктивный коэффициент,  $c = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot k_{\text{об}} w = 4,44 k_{\text{об}} w$ .

Здесь  $k_{\text{об}}$  — обмоточный коэффициент;  $w$  — число витков обмотки.

Наглядное представление о сравнении режима РТ и двигательного режима дает сопоставление векторных диаграмм. На рис. 3.6 показаны упрощенные векторные диаграммы, которые построены при одинаковых значениях критических скольжений в режимах РТ и ДР асинхронной машины (АМ) металлургического исполнения типа МТКФ-012-6 с паспортными данными  $P_{2N} = 3$  кВт,  $n = 840$  об/мин,  $U_{\text{сфN}} = 220$  В,  $I_{\text{сN}} = 7,3$  А по уравнениям

$$\dot{I}_m = \dot{I}_s + \dot{I}_r;$$

$$\dot{U}_s = (-\dot{E}_m) + jX_s \cdot \dot{I}_s + R_s \cdot \dot{I}_s,$$

где  $(-\dot{E}_m) + jX_s \cdot \dot{I}_s = \dot{E}_s$ .

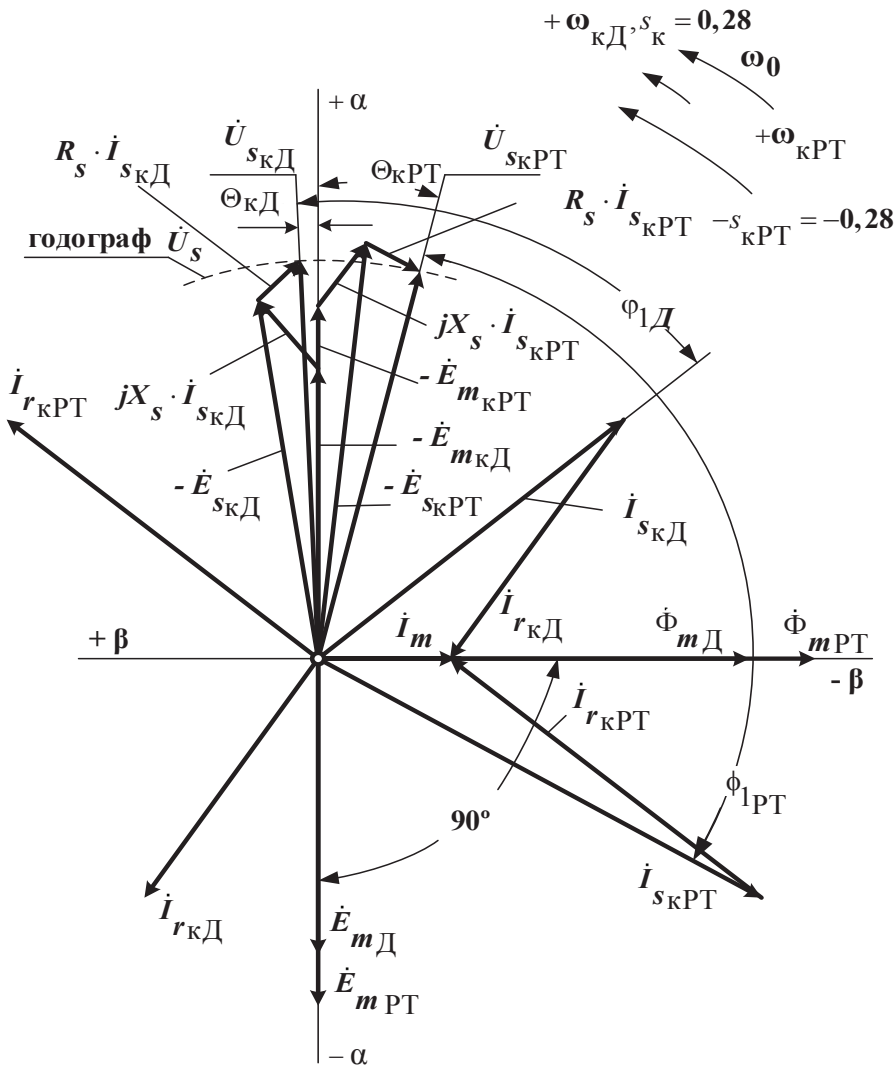


Рис. 3.6. Векторные диаграммы режима РТ и двигательного режима АМ металлургического исполнения типа МТКФ-012-6

Как вытекает из сопоставления режимов двигательного и рекуперативного при критических скольжениях АМ, включенной на переменное трехфазное номинальное напряжение  $U_{сфN}$  источника бесконечно большой мощности (см. эквивалентные схемы рис. 2.29 и 2.30), из-за увеличения частоты  $f_{рТ}$  ЭДС  $E_{рТ}$  и тока  $I_{рТ}$  увеличивается модуль  $|E_{рТ}|$  по сравнению с  $|E_{рД}|$ . По сумме векторов  $(-\dot{E}_m) + jX_s \cdot \dot{I}_s + R_s \cdot \dot{I}_s$

в РТ определяют увеличение модуля  $|E_{rPT}|$ , сравнивая  $|E_{rD}|$ , что и указывает на работу асинхронной машины в режиме генератора, параллельно включенным на напряжение сети.

Углубить понимание физических явлений в режиме РТ при сопоставлении с двигательным режимом как при номинальной нагрузке ( $M_{эмN}$ ,  $s = \pm s_N$ ), так и при максимально допустимой нагрузке ( $M_{эмк}$ ,  $s = \pm s_N$ ) позволяет построение круговой диаграммы той же АМ металлургического исполнения. На рис. 3.7 представлена упрощенная круговая диаграмма, которая в пределах изменения скольжения  $\pm\infty$  соответствует рис. 3.6 и позволяет оценить не только качественное, но и количественное соотношение электромеханических и энергетических переменных в режимах ДР и РТ, а также охарактеризовать состояние АМ в области значений  $s$ , устремленных к  $\pm\infty$ .

Если двигательный режим (рис. 3.7) находится в области углов  $\phi_1 = 90^\circ$  и положительного скольжения в пределах  $s = 0 \dots 1$  — между реальным холостым ходом ( $s_{xx}$ ) и режимом короткого замыкания («КЗ»,  $s = 1$ ), то рекуперативное торможение располагается в области углов  $\phi_1 > 90^\circ$  и отрицательных скольжений (точки «01»,  $s = 0$ ; «Г1»,  $s = -s_{PTN}$ ; «Г2»,  $s = -s_{PTK}$ ; «03»,  $|s| > |s_{PTK}|$ ). Область режима РТ между точками «01» — «Г2» — «Г3» соответствует устойчивой работе АМ, а дальнейшее увеличение скорости вращения ротора — область  $|s| > |s_{PTK}|$  вызывает ослабление электромагнитного состояния АМ ( $\Phi_m \downarrow$ ) (аналогично двигательному режиму при  $s > s_{Дк}$ , область точек «Д2» — «КЗ»), которые соответствуют участкам неустойчивой работы. Ослабление  $\Phi_m$  приводит к снижению активных составляющих токов  $I_r$  и  $I_s$ , уменьшению тормозного электромагнитного момента  $M_{эм}$ .

На рис. 3.7 построены также вспомогательные линии, позволяющие количественно оценить ДР и РТ. Прежде всего с такой целью строится «шкала скольжений», для чего через точку «Т» ( $s = \pm\infty$ ) и «КЗ» ( $s = 1$ ) проводится линия за пределы круговой диаграммы ДР; через точку «Т» ( $s = \pm\infty$ ) и «02» строится линия радиуса круговой диаграммы; перпендикулярно этому радиусу проводят линию «шкалы скольжения» до пересечения с линией «Т» — «КЗ». Точка их пересечения соответствует скольжению  $s = 1$ . Участок «шкалы скольжения» от названных точек их пересечения до линии  $P_{эм} = 0$  (точка  $s = 0$ ) делится, например, на 10 равных частей и получают цену деления шкалы  $s = 0,10$ . В области отрицательных скольжений используют полученный масштаб.

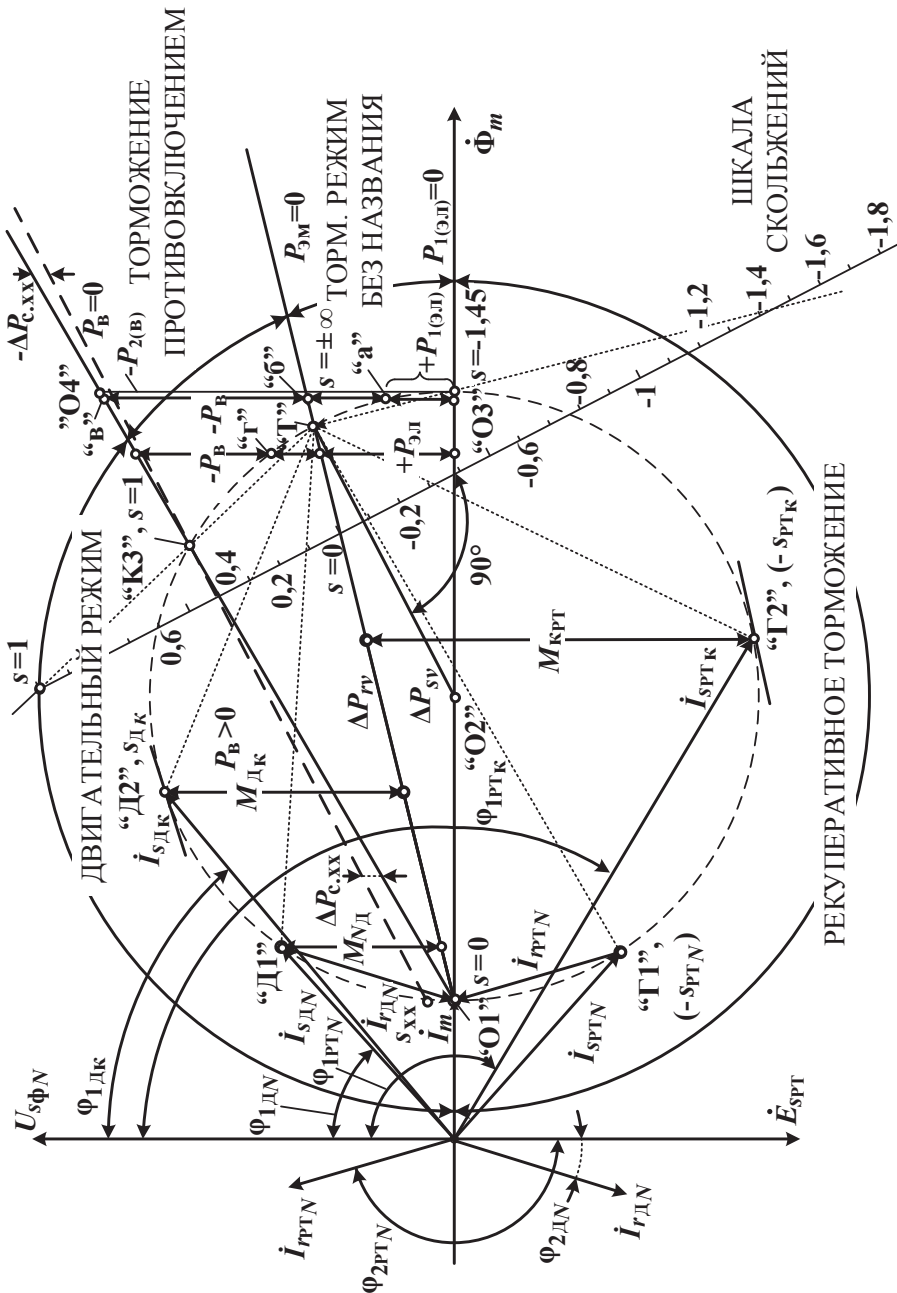


Рис. 3.7. Упрощенная круговая диаграмма для векторной диаграммы рис. 3.6

Для определения скольжений в интересующих точках их соединяют линиями с точкой «Т» ( $s = \pm\infty$ ), которые пересекают «шкалу скольжений» и дают результат, например:

точка «Д1»	$S_{ДН} \approx +0,1;$	«03»	$S_{гр} \approx -1,45;$
«Д2»	$S_{Дк} \approx +0,28;$	«а»	$S_{р.б.н} \approx -2,0;$
«Г1»	$S_{РТН} \approx -0,1;$	«Г»	$S_{ТПВ} \approx +2,3.$
«Г2»	$S_{РТк} \approx -0,28;$		

Определенный интерес представляет пусть несколько упрощенное объяснение физических явлений в точке «03» ( $s_{гр}$ ), соответствующей скольжению порядка  $(-1,45)$ , находящейся на линии  $P_{1(эл)} = 0$ . В этой точке прекращается режим РТ; токи  $\dot{I}_r$  и  $\dot{I}_s$  достигают своего максимума и приобретают исключительно индуктивный характер, угол  $\phi_1 = 90^\circ$ :

- $P_{1(эл)} = 3 \cdot \dot{U}_{сф} \cdot \dot{I}_s \cdot \cos \phi_1 = 0$ , следовательно, активная мощность не отдается в сеть и из сети не потребляется;
- $Q = 3 \cdot \dot{U}_{сф} \cdot \dot{I}_{сф} \cdot \sin \phi_1 > 0$  указывает на потребление реактивной мощности из сети на создание вращающегося магнитного поля и увеличение запаса электромагнитной энергии  $W_{эм}$  в полях рассеивания обмоток статора и ротора, что вызывает дальнейшее ослабление  $\Phi_m$  из-за роста индуктивного характера тока  $\dot{I}_r$ , ослабляющего величину  $\dot{I}_m$  (на рис. 3.7 результирующий процесс размагничивания АМ не показан);
- $P_{2в}$  — активная механическая мощность от РМ, раскручивающая ротор (на рис. 3.7 — отрезок перпендикуляра, восстановленного из точки «03» до точки «04» пересечения с осью  $P_{в} = 0$ ), преобразуется внутри АМ в электромагнитную и расходуется на покрытие потерь  $\Delta P_{с.хх}$ ,  $\Delta P_{rv}$  и статоре  $\Delta P_{sv}$ , а также на поддержание скорости ротора  $\omega_r$  (рис. 3.7)

$$-P_{2.в} = (-M_{2.в})\omega_r = -P_{эм},$$

при этом покрываются постоянные потери  $\Delta P_{с.хх}$  в системе «АМ — РМ» и происходит преобразование механической мощности в электромагнитную, численно равную сумме переменных потерь в роторе  $\Delta P_{rv}$  и статоре  $\Delta P_{sv}$ .

Рассмотрим интервал круговой диаграммы по дуге между точками «03», «а» и «Т» ( $s = \pm\infty$ ), то есть между линиями  $P_{1(эл)} = 0$  и  $P_{эм} = 0$  в зоне «тормозного режима без названия», не имеющего отношения к РТ. Для этого интервала быстро увеличивающихся отрицательных скольжений,

вплоть до величины  $(-\infty)$ , характерно увеличение скорости вращения ротора до  $\omega_r = \infty$ . Понятно, что такая область не используется в практике ЭП, хотя в нее возможно попадание многоскоростных АМ с переключением  $p$  при переходе на пониженную скорость вращения ротора.

На рис. 3.8 показаны естественные механические  $\omega(M_{эм})$  и электро-механические  $\omega(I_r)$ ,  $\omega(I_s)$  статические характеристики АМ, на которых видна определенная тенденция поведения переменных при  $s \rightarrow \pm\infty$ :  $M_{эм}$  стремится к нулю в режимах РТ и ТПВ (из-за размагничивания контура намагничивания,  $I_m \rightarrow 0$ ,  $\Phi_m \rightarrow 0$ ), а токи  $I_r$  и  $I_s$ , достигнув максимума (точка «03», рис. 3.7), устремлены к своим асимптотам (благодаря подводимой к ротору активной механической мощности  $P_{2(м)}$ ).

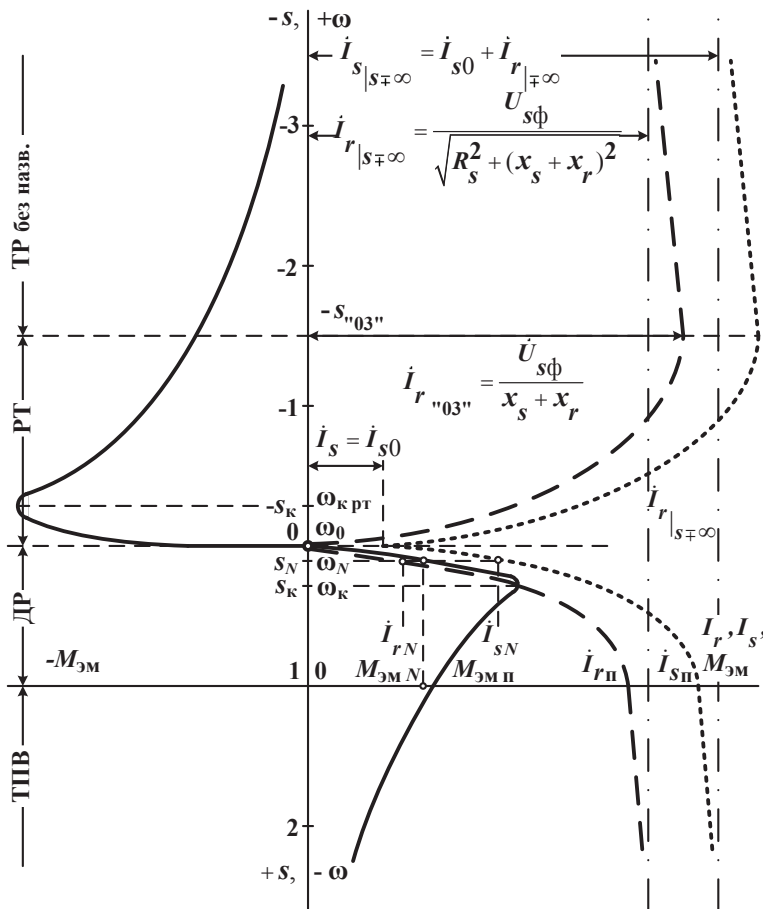


Рис. 3.8. Естественные механические  $\omega(M_{эм})$  и электро-механические  $\omega(I_r)$ ,  $\omega(I_s)$  статические характеристики АМ

Переходные режимы РТ могут иметь место в АМ КЗ и ФР при изменении скорости вращения ЭП. При этом анализируется: накопленный запас кинетической энергии в системе «ЭП — РМ», изменение величины активного механического момента  $M_{ca}$  со стороны РМ, а также влияние параметров электрических цепей АМ, то есть ВВВ и ВУВ — внешних возмущающих и управляющих воздействий на ЭП. В настоящее время наиболее целесообразным для управления скоростью АМ является использование различных систем «УПЧ — АМ» с автономными инверторами напряжения (АИН) или тока (АИТ) [12, с. 212] с реализацией законов частотного управления «вверх» и «вниз».

На рис. 3.9 показаны фрагменты механических характеристик в режиме РТ частотно-управляемого АД КЗ, а также АМ ФР, когда значительные скорости в РТ получают на искусственных статических характеристиках путем включения добавочных сопротивлений  $R_{r\text{доб}}$  в цепь ротора.

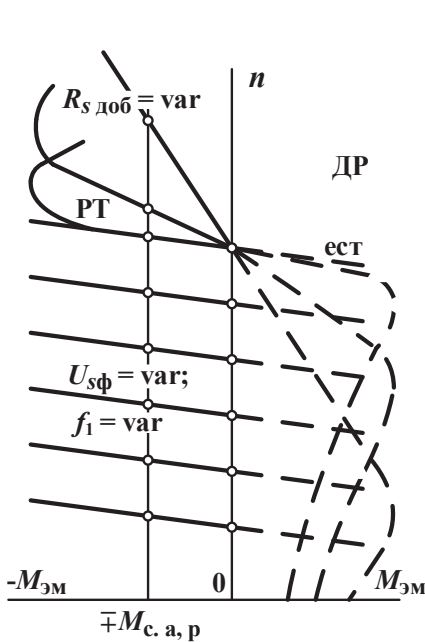


Рис. 3.9. Фрагменты механических характеристик в режиме РТ частотно-управляемого АД КЗР

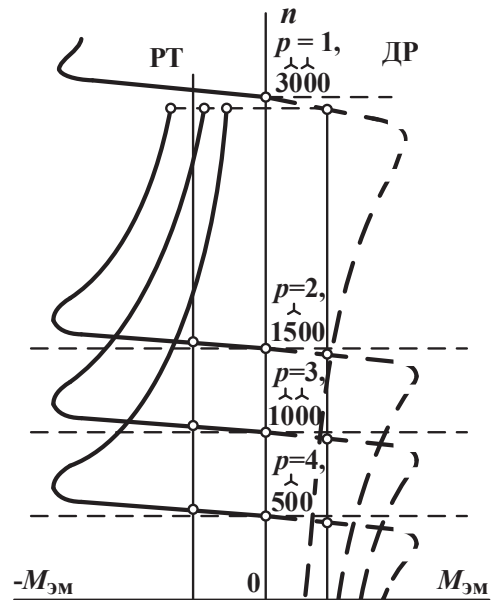


Рис. 3.10. Механические характеристики четырехскоростной АМ с переключением числа пар полюсов  $p$

На рис. 3.10 представлены механические характеристики четырех-скоростной АМ с переключением числа пар полюсов  $p$ . Для обеспечения эффективного торможения в режиме РТ снижение скорости вращения выполняется в следующей последовательности переключения числа пар полюсов:  $p = 1, 2, 3$  и 4.

2. В синхронных машинах (СМ) режим РТ, как ранее говорилось, — это обычный режим синхронного генератора, в котором СМ работает на абсолютно жесткой механической характеристике  $\omega(M_{эм})$ , то есть на продолжении ее из I квадранта двигательного режима во II квадрант РТ при той же скорости вращения  $\omega = \omega_0 = 2\pi f_1/p$ .

В задачах электропривода обычно СМ эксплуатируются как неререверсивные в продолжительных режимах нагрузки  $S1$  при средней и большой (сотни и тысячи киловатт) мощности на валу, не требуют управления скоростью и в РТ не участвуют.

С появлением управляемых преобразователей частоты и их использованием в асинхронных электроприводах, возникла возможность построения управляемых по скорости электроприводов с СМ и их разработки на небольшие мощности (единицы и десятки киловатт). Это позволяет значительно упростить конструкцию самой СМ: заменить электромагнитное возбуждение обмотки ротора от источника постоянного напряжения на возбуждение от постоянных магнитов и исключить асинхронную пусковую обмотку, контактно-щеточное устройство; пуск и управление скоростью СМ осуществлять по системе «УПЧ — СМ»; при снижении скорости использовать режим РТ (рис. 3.11, а, б).

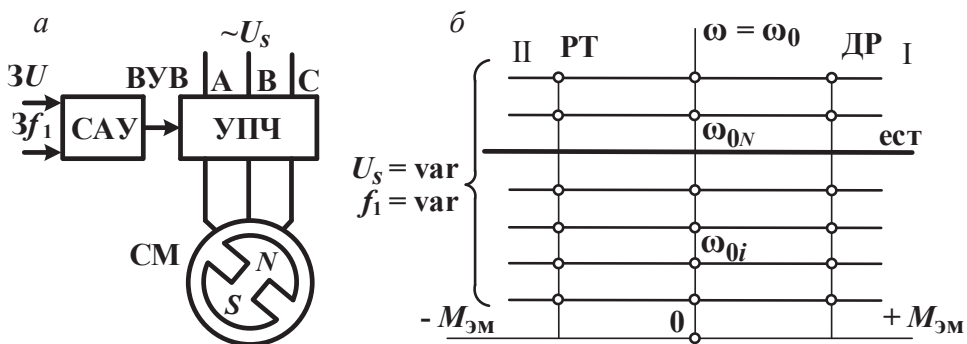


Рис. 3.11. Упрощенная схема СМ (а), статические механические характеристики частотно-управляемой СМ (б)



На рис. 3.11, а показана упрощенная схема СМ, включенной в сеть трехфазного переменного напряжения  $U_s$  через УПЧ. САУ ЭП, в соответствии с заданием по амплитуде и частоте, формирует ВУВ. На рис. 3.11, б представлены статические механические характеристики частотно-управляемой СМ, которые при конкретном законе управления связаны с плавным изменением  $U_s$  и  $f_1$ .

В системе «УПЧ — СМ» получают динамические механические характеристики, соответствующие постоянному динамическому  $M_{\text{дин}}$  и электромагнитному  $M_{\text{эм}}$  моментам как при пуске или регулировании скорости, так и в переходном режиме РТ. Плавное изменение амплитуды и частоты напряжения, подводимого к статорной обмотке СМ, обеспечивает фактически  $\omega_r = \omega_0 = 0$  взаимную ориентацию разноименных полюсов постоянных магнитов ротора относительно вращающегося магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, и ротор сразу начинает вращаться синхронно.

### 3.3. Торможение противовключением в ЭП постоянного и переменного тока

Энергетический баланс мощности ТПВ всех типов машин раскрывает мнемоническая схема рис. 3.12.

Под режимом ТПВ понимают сложный режим работы ЭП, когда в установившемся режиме движения используют подводимую к валу активную механическую мощность — см. уравнение (3.1) — либо в переходных режимах движения используют запасенную в инерционных массах системы «ЭМ — РМ» кинетическую энергию — см. уравнения (3.2) и (3.3). Этим арсеналом механической мощности, как и в других тормозных режимах, покрываются потери холостого хода  $\Delta P_{\text{с. хх}}$ , а основная ее часть претерпевает электромагнитное преобразование  $P_{\text{эм}}$  в электрическую, которая по-

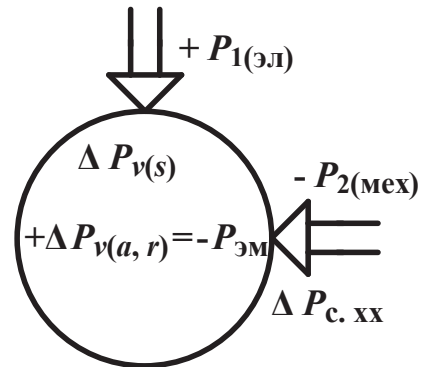


Рис. 3.12. Энергетический баланс мощности ТПВ

крывает переменные потери  $\Delta P_{rv}$ . В отличие от других тормозных режимов, в ТПВ потребляемая из сети электрическая мощность полностью идет на покрытие переменных потерь  $\Delta P_{sv}$  в машине. Такая специфика и указывает на работу машины в ТПВ как генератора, последовательно работающего с источниками электрической энергии сети.

В энергетическом отношении режим ТПВ, когда подводимая мощность к валу ЭМ и потребляемая из электрической сети расходуются на нагревание сопротивлений главной цепи  $I^2 R = \Delta P_{rv}$ , является самым невыгодным, но простым и удобным в эксплуатации, особенно в подъемно-транспортных установках.

Область существования ТПВ находится в области механических характеристиках прямого и обратного направлений движения ЭП, в области начала режима «КЗ», в сторону увеличения скорости  $\omega = \pm \infty$ .

### 3.3.1. Режим ТПВ в ЭП постоянного тока

В машинах постоянного тока НВ, СВ или ПВ, в зависимости от их использования в установившемся или переходном режиме движения, режим работы в ТПВ обеспечивается двумя вариантами схемных решений. Продемонстрировать это удобно на схеме МПТ СВ, на которой мысленно можно исключить ту или иную обмотку возбуждения, и оперировать схемой конкретного типа машины.

Схему рис. 3.13 обычно применяют для обеспечения установившегося движения при тормозном опускании тяжелых грузов. Здесь в цепи якоря (с добавочным сопротивлением  $R_{a \text{ доб}}$ ), включенной на направление вращения «вверх», приложенным к валу активным статическим моментом  $M_{\text{вс}} = \frac{GV_{\text{рм}}}{\omega_{\text{д}}}$  является причиной вращения в обратном на-

правлении. Установление необходимой скорости ДПТ производится путем выбора величины добавочного сопротивления пускорегулирующего резистора со ступенями ТПВ «П» в цепи якоря, которое определяется из условий допустимого тока  $I_a$  и развиваемого электромагнитного момента  $M_{\text{эм}} = M_{\text{вс}}$ .

На рис. 3.14 можно увидеть механические характеристики и переходный процесс, вызванный изменением величины сопротивления  $R_{a \text{ доб}}$  для управления скоростью опускания груза. Режим ТПВ расположен ниже точки режима «КЗ» в отрицательном направлении скорости вращения, обусловленной движущим активным моментом  $M_{\text{вс}}$  и противодействующим движению электромагнитным моментом  $M_{\text{эм}}$ .

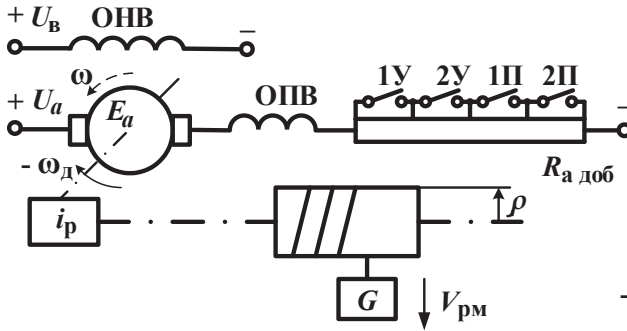


Рис. 3.13. Схема для обеспечения установившегося движения при тормозном опускании тяжелых грузов

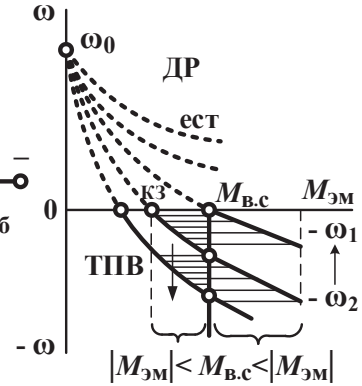


Рис. 3.14. Механические характеристики на примере МПТ СВ

При равномерном движении активная постоянная величина  $M_{bc} = \text{const}$  уравнивается

$$-M_{bc} = -M_{эм} \pm J \frac{d(-\omega)}{dt}.$$

Хотя в системе координат рис. 3.14  $M_{эм}$  формально является положительным, в области IV квадранта механической характеристики при отрицательном направлении движения  $M_{эм}$  является противодействующим движению в этом направлении, то есть тормозным.

В области  $|M_{bc}| > |M_{эм}|$  движение соответствует разгону в отрицательном направлении движения

$$-M_{bc} + M_{эм} = M_{дин} = J_{\Sigma} \left( -\frac{d(-\omega)}{dt} \right) > 0;$$

в области же  $|M_{bc}| < |M_{эм}|$ , когда противодействующий движению  $M_{эм}$  превалирует над движущим активным моментом  $M_{bc}$ , движение замедляется

$$-M_{bc} + M_{эм} = -M_{дин} = J_{\Sigma} \left( +\frac{d(-\omega)}{dt} \right) < 0.$$

В точках установившегося движения  $(-\omega_1)$  и  $(-\omega_2)$   $|M_{bc}| = |M_{эм}|$ ,  $M_{дин} = 0$  и  $\frac{d(-\omega)}{dt} = 0$  машина работает в установившемся режиме ТПВ.

Схема рис. 3.15 используется для осуществления ТПВ в переходных режимах движения, когда требуется быстро снизить скорость или произвести реверс системы «ЭП — РМ». В таком случае используется запасенная в системе кинетическая энергия (см. уравнения (3.2) и (3.3)) и пояснения к ним.

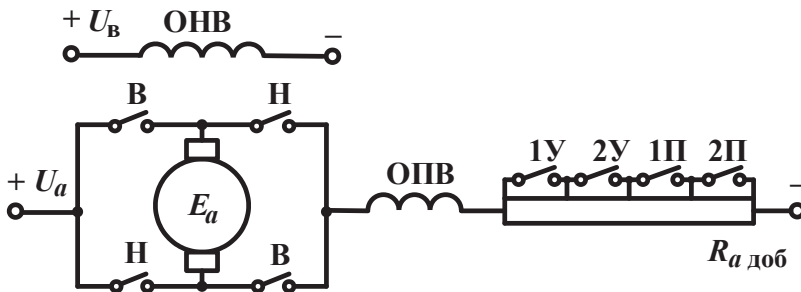


Рис. 3.15. Схема для осуществления ТПВ в переходных режимах движения (когда требуется быстро снизить скорость или произвести реверс системы «ЭП — РМ»)

Режим ТПВ в рассматриваемой схеме получают путем изменения полярности прикладываемого к якорю напряжения. Аналогичный эффект можно получить изменением полярности напряжения на обмотке возбуждения, но это стараются не использовать во избежание разрыва, пусть на мгновение, цепи возбуждения, когда  $\Phi_m \rightarrow 0$ . Ограничение бросков тока  $I_a$  и электромагнитных моментов  $M_{эм}$  до допустимых значений в соответствии с  $|M_{эм}| + |M_{ср}| = \left| J \frac{d(\pm\omega)}{dt} \right|$  производится выбором величины  $R_{a \text{ доб}}$ .

На рис. 3.16 показаны статические характеристики механического переходного движения в ТПВ реверсивного ЭП.

Уравнения статических характеристик в режиме ТПВ, как и в других режимах работы, получают из баланса энергии, от которого через деление на  $I_a$  переходят к балансу напряжения на якоре  $U_a$  и ЭДС  $E_a$ . Если в двигательном режиме ток  $I_a$  протекает под действием  $U_a > E_a$

$$U_a - E_a = I_a R_a,$$

→   ←   →

то в ТПВ ток в цепи якоря  $I_a$  протекает под действием суммы в разных схемах включения

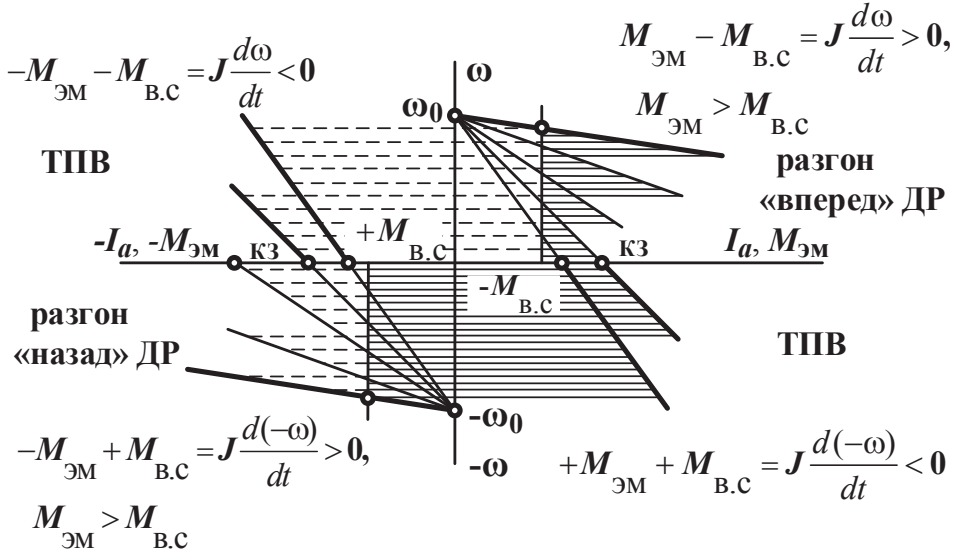


Рис. 3.16. Статические характеристики механического переходного движения в ТПВ реверсивного ЭП на примере МПТ с НВ

Учитывая, что  $E_a = c \Phi_m \omega$  и  $I_a = \frac{M_{\text{эм}}}{c \Phi_m}$ , получают уравнения статических характеристик (рис. 3.16).

При  $I_a > 0$

$$-\omega = \frac{U_a}{c \Phi_m} - I_a \frac{R_a}{c \Phi_m} = \omega_0 - \Delta \omega_{\text{сI}};$$

$$-\omega = \frac{U_a}{c \Phi_m} - M_{\text{эм}} \frac{R_a}{c \Phi_m} = \omega_0 - \Delta \omega_{\text{сМ}}.$$

При  $I_a < 0$

$$\omega = -\frac{U_a}{c \Phi_m} + I_a \frac{R_a}{c \Phi_m} = -\omega_0 + \Delta \omega_{\text{сI}};$$

$$\omega = -\frac{U_a}{c \Phi_m} + M_{\text{эм}} \frac{R_a}{c \Phi_m} = -\omega_0 + \Delta \omega_{\text{сМ}}.$$

Общий вид электромеханических и механических статических характеристик различных типов МПТ в режиме ТПВ представлен на

рис. 3.17, а, б, в. Реверс обычно выполняют путем изменения полярности  $U_a$ .

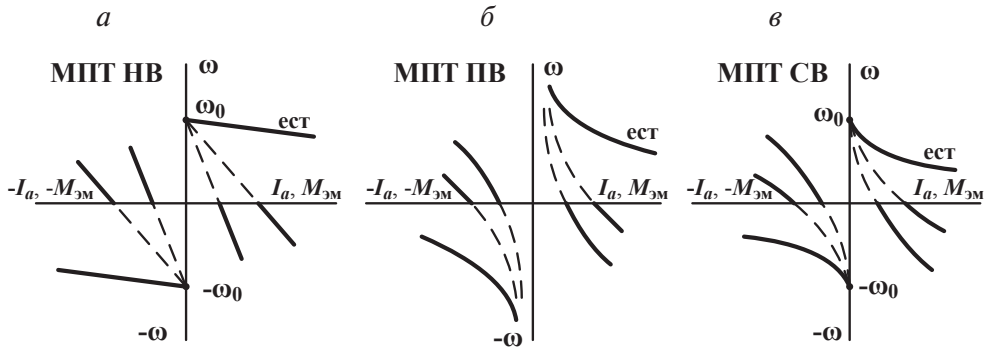


Рис. 3.17. Общий вид электромеханических и механических статических характеристик различных типов МПТ в режиме ТПВ:

а — МПТ НВ; б — МПТ ПВ; в — МПТ СВ

С точки зрения энергетики режим ТПВ является крайне неэкономичным, но простота его получения, особенно в реверсивных электроприводах, привела к широкому его использованию в сетевых ЭП производственных установок. Следует отметить, что вся подводимая к валу механическая и потребленная из сети электрическая мощность идет на покрытие тепловых потерь нагревания сопротивлений в цепи якоря. Поскольку в ТПВ для ограничения токов и моментов в якорную цепь включаются добавочные сопротивления резисторов, которые значительно превышают собственное сопротивление обмотки якоря  $R_{a, \text{доб}} \gg r_{\text{я}}$ , постольку тепловые потери  $\Delta P_{av}$  выделяются вне машины. Например, при реверсе машины энергия потерь  $\Delta W_{av} \approx 3J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2}$

определяется как тройной запас кинетической энергии. Таким образом, в интенсивно работающих реверсивных электроприводах оказывается целесообразным использовать вместо ТПВ режим динамического торможения (ДТ).

### 3.3.2. Режим ТПВ в ЭП переменного тока

1. В асинхронных машинах режим ТПВ используют в установившихся (для опускания тяжелых грузов обычно в ЭП с АМ ФР) и переходных режимах движения (для реверса или быстрой остановки

АМ ФР и КЗР в разомкнутых системах сетевых ЭП). С этой целью используют один из вариантов получения ТПВ:

- в первом варианте обеспечивают работу АМ ФР на устойчивом участке искусственной статической характеристики с внешним  $R_{г. доб}$  за счет приложения к валу активного механического момента  $M_{вс}$  со стороны РМ, разворачивающего ротор в обратном направлении движения ( $-\omega_r$ ) относительно вращения магнитного поля  $\omega_0$ , то есть против положительного направления вращения, соответствующего схеме включения в двигательный режим; так получают установившийся режим ТПВ ( $-\omega_r = \text{const}$ ); здесь же возможен переходный режим ТПВ при управлении скоростью ротора ( $-\omega_r = \text{var}$ ), при изменении величины  $R_{г. доб}$  (рис. 3.18, IV квадрант механической характеристики);
- во втором варианте реверсируют вращение магнитного поля АМ ( $-\omega_0$ ) путем переключения чередования фаз питающего статор АМ напряжения (две фазы меняют местами), при этом АМ КЗР работает в переходном режиме на продолжении естественной характеристики, а для АМ ФР используют работу на продолжении искусственных характеристик после переключения  $R_{г. доб}$ ; здесь режим ТПВ противопоставлен движению по инерции за счет ранее накопленного (в двигательном режиме) запаса кинетической энергии, который в переходном процессе снижения скорости движения системы в режиме ТПВ быстро преобразуется в покрываемую энергию потерь  $\Delta W_r$  и  $\Delta W_s$ .

Область существования режима ТПВ в АМ теоретически располагается от точки «КЗ» ( $s=1$ ) до точки «Т» ( $s=\infty$ ), что представлено на круговой диаграмме (см. рис. 3.7) и отчасти на статических характеристиках (см. рис. 3.8), то есть в области больших скоростей вращения ротора  $\omega_r$ . Как правило, режим ТПВ обычно используется в диапазоне скольжений  $1 < s_{ТПВ} \leq 2$ , когда в АМ КЗР еще сохраняется определенная величина  $M_{эм} < M_{эмп}$  (рис. 3.19), хотя токи статора  $I_s$  и ротора  $I_r$  значительно превышают пусковые; в АД ФР эта область переходного режима снижения скорости реализуется с сопротивлением  $R_{г. доб}$ , позволяющим использовать участки характеристик, близкие к линейным, а также подбирать  $R_{г. доб опт}$ , позволяющее добиваться минимального времени снижения скорости до остановки при среднем  $M_{эм max}$  (рис. 3.18).

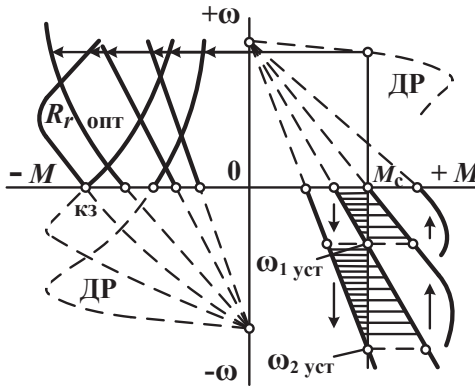


Рис. 3.18. Характеристики АД ФР с сопротивлением  $R_{r,доб}$ , позволяющим использовать участки характеристик, близкие к линейным

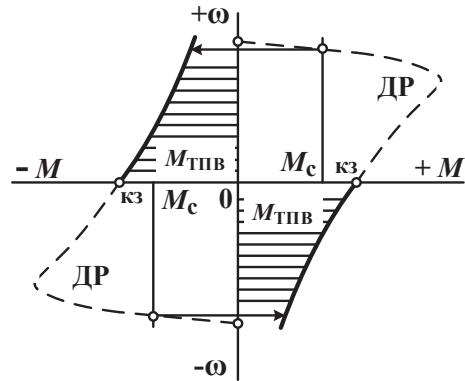


Рис. 3.19. Характеристики АМ КЗР в диапазоне скольжений  $1 < s_{ТПВ} \leq 2$ , когда  $M_{эм} < M_{эмп}$

Как видим, при любом варианте получения режима ТПВ, направление вращения ротора противоположно вращению магнитного поля  $\Phi_m$ . В режиме ТПВ частота пересечения  $f_{пер}$  главным магнитным полем проводников обмотки ротора остается пропорциональной разности скоростей  $(\omega_0 - \omega_r)$ , определяется по знаку и величине скольжения  $f_{пер} = sf_1$  при частоте питающего напряжения  $f_1$ .

Режим ТПВ отделен от ДР граничным режимом КЗ и располагается в области больших положительных скольжений  $s > 1$ , вплоть до  $s = +\infty$  — см. круговую диаграмму рис. 3.7. С увеличением скольжения  $s$  в этой области  $\Phi_{1ТПВ} \gg \Phi_{1нд}$  из сети продолжают потребляться активная  $P_{1(эл)}$  и реактивная  $Q_{1(эл)}$  мощности, но их направленность отличается от двигательного режима работы:

- $P_{1(эл)}$  все больше расходуется на покрытие переменных (тепловых) потерь  $\Delta P_{rv}$  в сопротивлениях цепи ротора, а развиваемый тормозной  $M_{эм}$  уменьшается;
- $Q_{1(эл)}$  все меньше расходуется на энергию вращающегося рабочего магнитного поля  $\Phi_m$  и в большей степени расходуется на увеличение запаса электромагнитной энергии в полях рассеивания электрических цепей статора и ротора.

С увеличением  $|\omega_r|$  значительно возрастает частота пересечения проводников обмотки ротора вращающимся в противоположном направлении магнитным полем  $\Phi_m$ , а также растут частоты индуцированных ЭДС  $E_m$ ,  $E_r$  и тока  $I_r$ . При этом, по сравнению с двигательным



режимом, модуль  $E_m$  уменьшается, а модуль  $I_r$  увеличивается, что объясняется насыщением магнитной системы АМ, которое приходится учитывать как в цепи намагничивания (возбуждения), так и в цепях рассеивания обмоток статора и ротора, а также увеличение модулей токов  $I_r$  и  $I_s$ , которые в значительной степени приобретают индуктивный характер, модуль  $E_m$  снижается.

Векторная диаграмма режима ТПВ рис. 3.20 построена для точки г,  $s_{\text{ТПВ}} \approx +2,3$ , которая выделена на круговой диаграмме рис. 3.7. Сопоставление рис. 3.20 (ТПВ) с рис. 3.7 (при критических скольжениях  $s_k$  (ДР, точка «Д2»,  $s_{\text{ДК}} \approx +0,28$  и РТ точка «Г2»,  $s_{\text{РТК}} \approx -0,28$ )) указывает на ухудшение электромагнитного состояния АМ. Полагая АМ включенной на трехфазное напряжение сети бесконечно большой мощности, необходимо отметить, что модуль  $U_{\text{ТПВ}}$  остается неизменным и отстает от действительной оси  $\alpha$  в ТПВ, несмотря на превышение скольжения (почти на порядок  $|s_{\text{ТПВ}}| > |s_{\text{РТК}}|$  по сравнению с критическим в РТ), угол отставания  $U_s$  по фазе меньше  $\theta_{\text{ТПВ}} < \theta_{\text{РТ}}$ , хотя в том и другом режимах  $U_s$  отстает от вектора  $E_s$ , что указывает на работу АМ в ТПВ, последовательно включенной с другими источниками энергии (в отличие от РТ при  $(-s_{\text{РТК}})$ ).

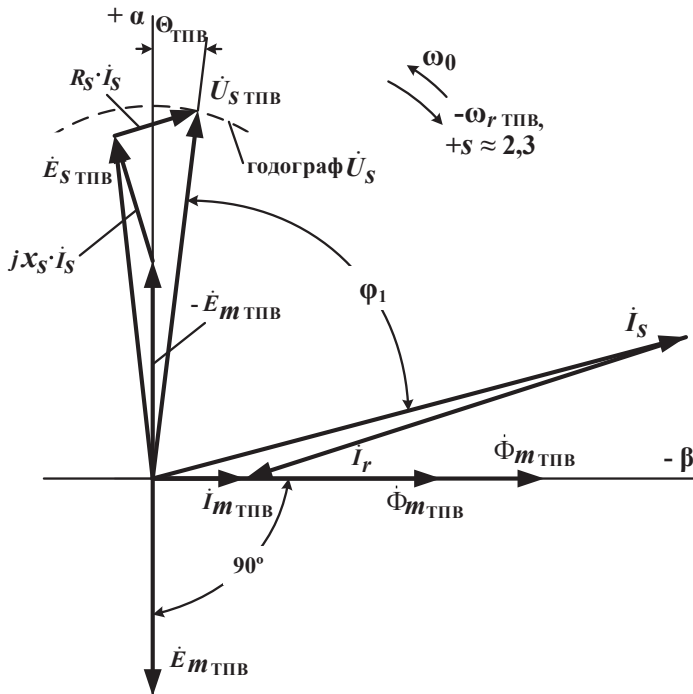


Рис. 3.20. Векторная диаграмма режима ТПВ

Уравнения статических характеристик в режиме ТПВ аналогичны уравнениям в двигательном режиме с учетом величины скольжения  $s$  и знака скорости  $\omega$  при реверсе.

2. В синхронных машинах с электромагнитным возбуждением ротора и с асинхронным пуском режим ТПВ исключен для практического использования из-за неизбежности работы на короткозамкнутой асинхронной характеристике, которая не рассчитана на работу при больших токах. Обычно СМ и не используют в реверсивных ЭП, а если возникает необходимость пуска в обратном направлении, то на статоре неподвижной машины изменяют чередование фаз и производят пуск в обратном направлении.

### 3.4. Динамическое торможение в ЭП постоянного и переменного тока

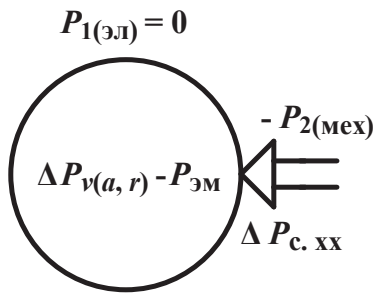


Рис. 3.21. Баланс мощности в режиме ДТ

Баланс мощности в режиме ДТ всех типов ЭМ представляет мнемоническая схема рис. 3.21, на которой главная электрическая цепь энергопреобразования отключается от источника электроэнергии. При этом среда энергопреобразования ( $\Phi_m$ ) обеспечивается независимо (от другого источника энергии) либо самовозбуждением ЭМ. В такой связи различают ДТ с независимым возбуждением и самовозбуждением. В энергетическом отношении ДТ также работает генератором электрической нагрузки, но таковой является собственная главная силовая цепь (в ДПТ цепь якоря, в АД цепь статора и ротора, в СД цепь статора). Подводимая к валу механическая мощность  $P_{2(мех)} = M_b \omega$  или накопленная в инерционных массах системы «ЭП — РМ» кинетическая энергия  $W_{кин} = J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2}$  отчасти покрывает потери холостого хода  $\Delta P_{с.хх}$ , а основная ее часть электромагнитным путем  $P_{эм}$  преобразуется в электрическую  $\Delta P_v = I^2 R$  и полностью идет на покрытие мощности переменных потерь в сопротивлениях главных цепей машины.

Режим ДТ может использоваться и как установившийся режим движения, и как переходный для быстрой остановки системы, в том числе в заданном положении исполнительного органа РМ, а также в возможных аварийных ситуациях.

### 3.4.1. ЭП постоянного тока с независимым возбуждением

Чтобы получить ДТ МПТ с НВ, якорную цепь МПТ отключают от источника электроэнергии ( $U_a = 0$ ) и включают на добавочное (в общем случае изменяемое) сопротивление; при этом обеспечивается электрическая цепь независимого возбуждения — рис. 3.22 и 3.23. Схема рис. 3.22 используется для МПТ НВ и СВ, в которой ОПВ из работы исключается.

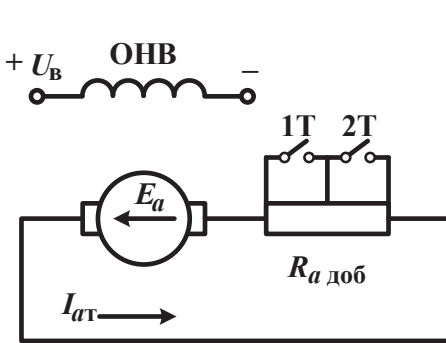


Рис. 3.22. Схема для МПТ НВ и СВ (ОПВ из работы исключается)

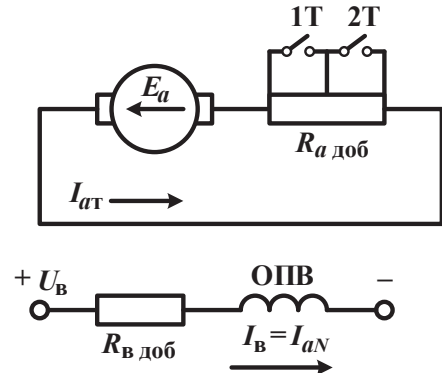


Рис. 3.23. Схема ДТ МПТ с НВ независимого возбуждения

Схему рис. 3.23 применяют в МПТ ПВ. Здесь ОПВ, для обеспечения  $I_B = I_{aN}$ , включается независимо через добавочное сопротивление  $R_{B \text{ доб}}$ . Ток в цепи якоря  $I_{aT}$  в ДТ, протекающий под действием  $E_a = c \Phi_m \omega$ , ограничивают подбором  $R_{a \text{ доб}}$ , которые в двигательном режиме используются как пускорегулировочные.

В соответствии с балансом мощности ДТ с НВ

$$U_a = 0 = E_a + I_a R_a,$$

причем  $\frac{U_a}{c \Phi_{mN}} = \omega_0 = 0$  и статические характеристики всех ДПТ линейны, проходят через начало координат — рис. 3.24;

$$\omega = \pm \frac{I_a R_a}{c \Phi_{mN}} = \pm \Delta \omega_I ; \quad (3.6)$$

$$\omega = \pm \frac{M_{эм} R_a}{c^2 \Phi_{mN}^2} = \pm \Delta \omega_M . \quad (3.7)$$

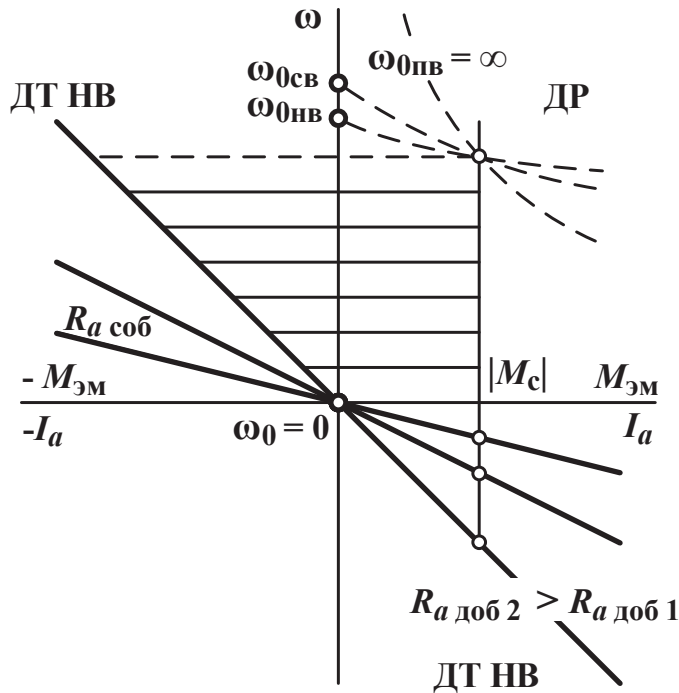


Рис. 3.24. Характеристики ДТ МПТ с НВ независимого возбуждения

Область существования режима ДТ с НВ располагается от  $\omega = \omega_0 = 0$  в направлениях  $\omega = \pm \infty$ .

При ослаблении магнитного потока  $\Phi_m$  крутизна характеристик увеличивается аналогично введению в цепь якоря  $R_{a \text{ доб}}$ .

### 3.4.2. ЭП постоянного тока с самовозбуждением

Для получения режима ДТ с СВ необходима гарантированная намагниченность магнитопровода МПТ, например, от предшествующей работы в двигательном режиме. От напряжения питающей сети ДПТ отключается, а его обмотка возбуждения переключается на последова-

тельное соединение с якорем так, чтобы ток возбуждения не изменял своего направления относительно двигательного режима. В ДТ с СВ ток в цепи якоря, вращающегося в прежнем направлении, протекает под действием ЭДС  $E_a$ , то есть относительно бывшего двигательного режима меняет знак и создает тормозной  $M_{эм}$ . Наиболее просто рассматриваемый режим получают в МПТ с НВ, рис. 3.25, где ток  $I_a$  в цепи якоря разделяется на параллельные цепи возбуждения  $I_B$  и торможения  $I_T$  в обратной пропорциональности их сопротивлений.

На рис. 3.26 показана схема включения МПТ ПВ в ДТ с СВ, в которой для сохранения прежнего направления тока  $I_B = I_{aT}$  по ОПВ меняют местами начало и конец обмотки.

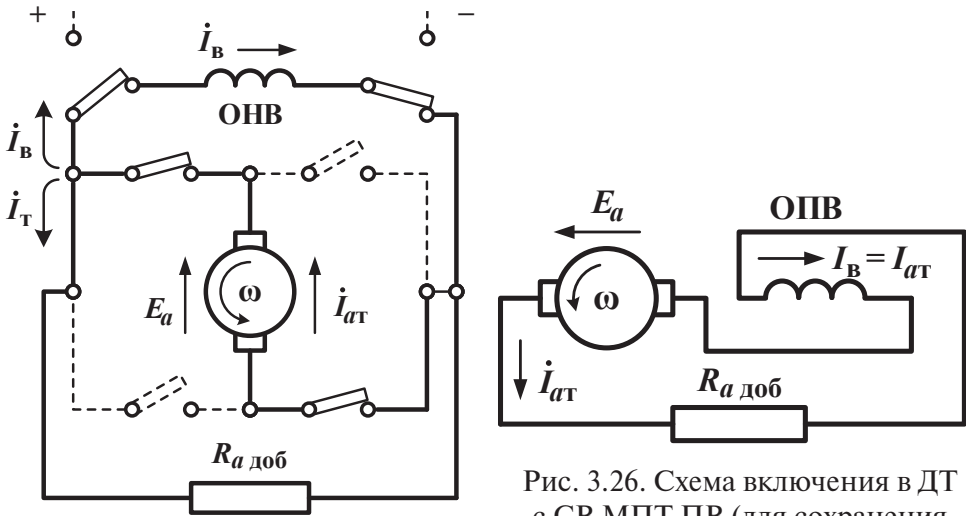


Рис. 3.25. Схема ДТ МПТ с НВ с самовозбуждением

Рис. 3.26. Схема включения в ДТ с СВ МПТ ПВ (для сохранения прежнего направления тока  $I_B = I_{aT}$  по ОПВ меняют местами начало и конец обмотки)

Обычно ДТ с СВ применяют для экстренного снижения скорости работающего ЭП в аварийных ситуациях, например, при исчезновении напряжения в питающей цепи, что организуется автоматически.

Физические процессы в режиме ДТ с СВ объясняются при помощи вольт-амперных характеристик, которые представляют зависимость  $E_a = f(I_B)$  при различных скоростях вращения МПТ с учетом остаточного намагничивания. С вольт-амперной характеристикой совмещают характеристику электрической нагрузки  $I_a R_a = f(I_B)$ .

Процесс самовозбуждения с последующим затуханием ДТ с СВ по мере снижения скорости представлен на рис. 3.27.

Допустим, что включению в ДТ с СВ (после двигательного режима) реально предшествует разрыв цепи обмотки возбуждения. В течение этого мгновения времени, пока  $I_g = 0$ , магнитный поток  $\Phi_m$  спадает до значения  $\Phi_{m\text{ост}}$ ,  $E_{a\text{ост}} = c \Phi_{m\text{ост}} \omega_{\text{нач}}$ , а скорость привода по инерции еще сохраняется на уровне  $\omega_{\text{нач}}$ .

При включении МПТ по схемам рис. 3.25 или 3.26 начинается развитие от точки  $E_{a\text{ост}}$  (рис. 3.27) электромагнитного переходного процесса самовозбуждения ДТ с СВ (он условно показан пунктирными ступенями). В точке А процесс самовозбуждения устанавливается, машина развивает электромагнитный тормозной момент  $M_{\text{эм}} = c \Phi_m I_a$ ; под его действием начинается электромеханический переходный процесс снижения скорости ( $\omega_{\text{нач}} > \omega_1 > \omega_2 \dots$ ), который приводит к новому электромагнитному переходному процессу в цепи последовательного возбуждения и к снижению  $E_a$ ,  $\Phi_m$  и  $M_{\text{эм}}$  в соответствии с характеристикой нагрузки  $I_a 1R_a = f(I_B)$ , определяемой величиной  $1R_a$ . Интенсивность торможения падает. Увеличение интенсивности торможения на определенном интервале снижения  $\omega$  обеспечивается уменьшением значения величины сопротивления нагрузки  $2R_a < 1R_a$ , то есть переходом из точки Б в точку В с последующим затуханием электромагнитного и электромеханического переходных процессов.

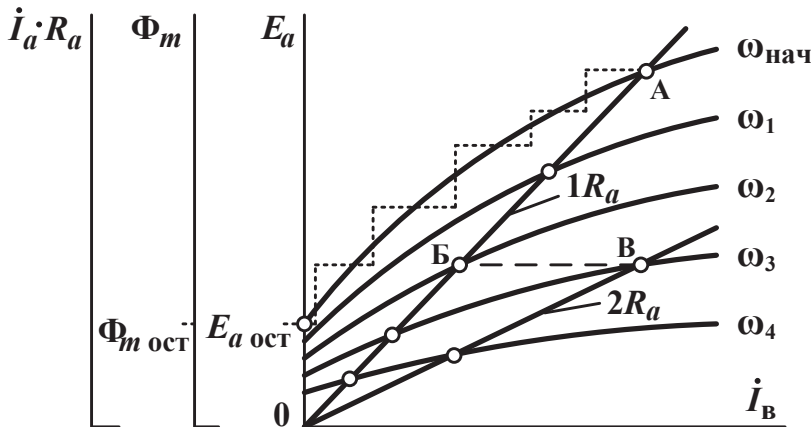


Рис. 3.27. Характеристики электромагнитного переходного процесса самовозбуждения ДТ с СВ

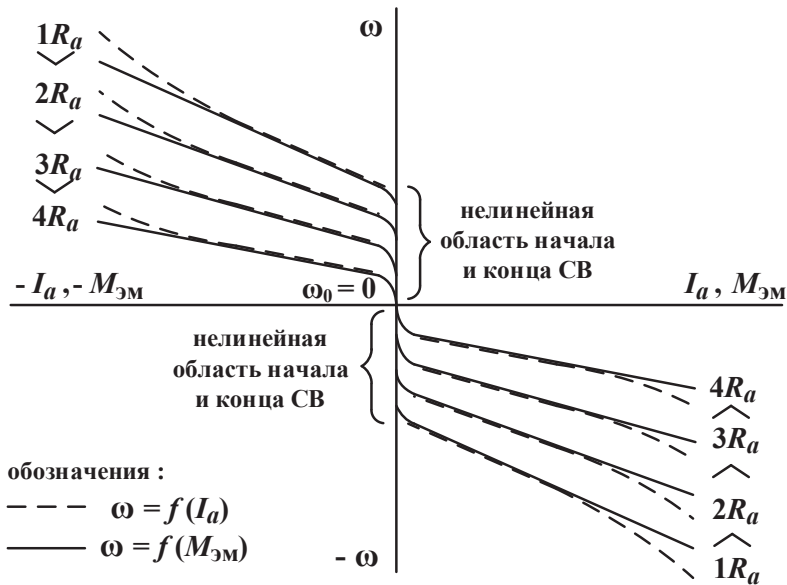


Рис. 3.28. Статические характеристики ДТ с СВ при различных сопротивлениях цепи якоря

Статические характеристики ДТ с СВ при различных сопротивлениях цепи якоря  $R_a$  представлены на рис. 3.28. При больших сопротивлениях цепи якоря характеристики более мягкие, механические, особенно в насыщенной зоне, преобладают по жесткости электромеханические. Это можно объяснить, используя рис. 3.27, на котором с уменьшением  $I_b$  при той или иной скорости вращения  $\omega$  снижение  $E_a(I_b)$  происходит в меньшем темпе по сравнению с темпом снижения нагрузки  $I_a \cdot R_a(I_b)$ .

Уравнения статических характеристик ДТ с СВ в сущности идентичны уравнениям (3.6) и (3.7), но отличаются своей нелинейностью, особенно в области начала и конца самовозбуждения, хотя при всех значениях сопротивлений цепи якоря характеристики проходят через начало координат  $\omega_0 = 0$ .

### 3.4.3. ЭП переменного тока с независимым возбуждением

**Электрическая схема и физические процессы асинхронной машины в режиме ДТ с НВ**

Получение режима ДТ с НВ АМ полностью соответствует балансу мощности, представленному мнемонической схемой рис. 3.21. Но на круговой диаграмме асинхронной машины в пределах скольжений  $s = \pm\infty$

(см. рис. 3.7), когда АМ включена на переменное трехфазное напряжение сети бесконечно большой мощности, режим ДТ не обнаруживается. Обусловлено это тем, что для получения режима ДТ с НВ обмотка статора АМ отключается от источника переменного напряжения, а к двум ее фазам подается пониженное постоянное напряжение, поскольку цепь статора представляет чисто активное сопротивление  $R_s \ll x_s$  двигательного режима. Протекающий по цепи статора постоянный ток  $I_n$  создает магнитное поле обмотки статора  $\Phi_m$ , постоянное по величине и неподвижное в пространстве магнитопровода АМ,  $\omega_0 = 0$  — рис. 3.29.

Если ротор неподвижен, то в его цепи ЭДС не наводится и ток  $I_r = 0$ . При приложении к валу внешнего активного момента в проводниках обмотки ротора, пересекаемых неподвижным полем статора  $\Phi_{ms}$ , индуцируется ЭДС скольжения  $E_r$ . При замкнутой цепи ротора начнет протекать индукционный трехфазный переменный ток  $I_r$ , создающий круговое переменное магнитное поле  $\Phi_{mr}$ , вращающееся в противоположном направлении относительно вращения ротора, что представлено на рис. 3.30, где АМ имеет одну пару полюсов,  $p = 1$ .

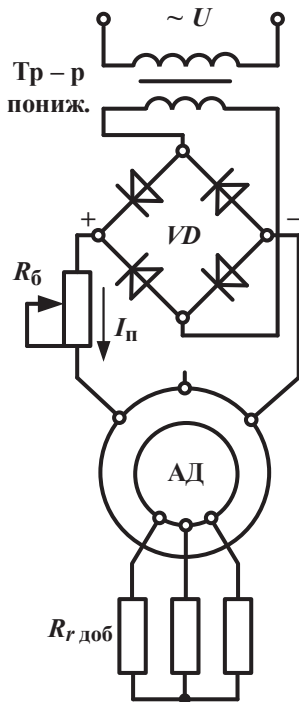


Рис. 3.29. Схема режима ДТ с НВ АМ

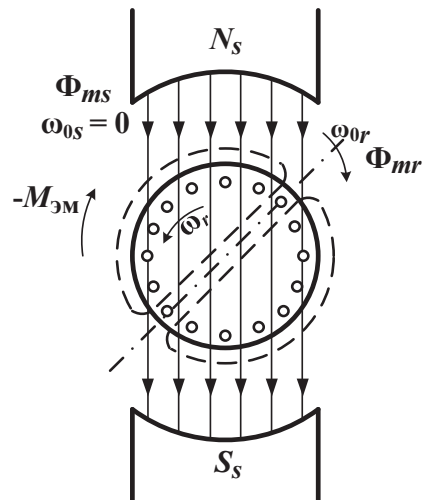


Рис. 3.30. Магнитное поле в режиме ДТ с НВ АМ



Результирующее рабочее магнитное поле  $\Phi_{m\Sigma}$  АМ относительно магнитных осей статора остается неподвижным и распределенным вдоль воздушного зазора по синусоидальному закону.

По физической сущности АМ в режиме ДТ с НВ представляет собой полнополюсный синхронный генератор, нагрузкой которого является сопротивление цепи ротора, где частота тока ротора пропорциональна угловой скорости вращения ротора.

В результате электромагнитного взаимодействия между неподвижным магнитным полем статора  $\Phi_{ms}$  и индуцированными токами в проводниках ротора, создающих вращающееся магнитное поле ротора  $\Phi_{mr}$ , возникает тормозной электромагнитный момент  $M_{эм}$ , направленный против вращения ротора.

Подключение трехфазной обмотки статора к источнику постоянного тока производится по одной из схем, приведенных на рис. 3.31. Могут быть предложены и другие схемы, но критерием выбора является обеспечение достаточно сильного магнитного потока  $\Phi_{ms}$  и относительно простое переключение фаз статора.

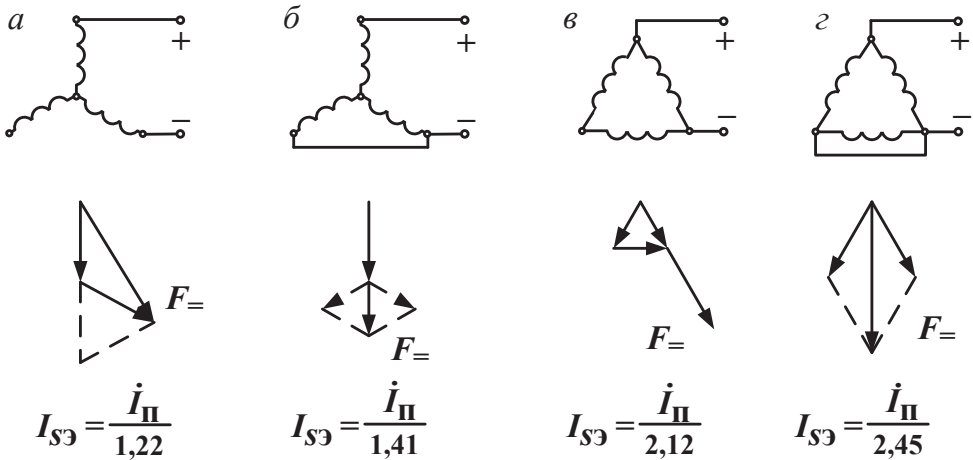


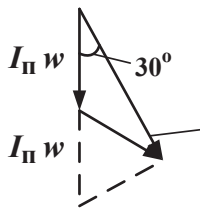
Рис. 3.31. Схемы подключения трехфазной обмотки статора к источнику постоянного тока по схемам:

*a* — неполной звезды; *б* — полной звезды;  
*в* — неполного треугольника; *г* — полного треугольника

Для выяснения количественных соотношений, характеризующих электромеханические свойства АМ в ДТ с НВ, статорную цепь, ре-

ально обтекаемую постоянным током  $I_{\pi}$  с неизменным значением, эквивалентно представляют трехфазной цепью с переменным током  $I_{сз}$ . Такое представление основывается на равенстве намагничивающих сил (НС) статора, которые создаются токами  $I_{\pi}$  и  $I_{сз}$ , умноженными на число витков  $w$ .

Количественно эквивалентное выражение переменного тока  $I_{сз}$  через реальный постоянный ток зависит от схемы включения фаз обмотки статора. Покажем это на примере схемы рис. 3.31, *a* и рис. 3.32.



$$F_{\Sigma} = 2 \dot{I}_{\pi} \cdot w \cos 30^{\circ} = 2 \dot{I}_{\pi} \cdot w \cdot \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$F_{\Sigma} = F_{\sim} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot \dot{I}_{сз} \cdot w = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{\pi} \cdot w,$$

$$\text{откуда } \dot{I}_{сз} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \dot{I}_{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \dot{I}_{\pi} = \frac{\dot{I}_{\pi}}{1,22},$$

Рис. 3.32. Векторная диаграмма для схемы рис. 3.31, *a*

где  $F_{\Sigma}$  — результирующая намагничивающая сила, обусловленная реальным постоянным током  $I_{\pi}$  в рассматриваемой схеме включения рис. 3.31, *a*;

$w$  — число витков фазы статора;

$F_{\sim}$  — амплитудное значение намагничивающей силы трехфазной обмотки статора, обусловленное действующим значением эквивалентного переменного тока  $I_{сз}$ ;

$3/2$  — учитывает увеличение амплитуды в трехфазной симметричной схеме по отношению к ее фазному значению;

коэффициент схемы включения фаз статора  $\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 1,22$ . Как показано

на рис. 3.31, для разных схем  $k_{сх}$  различны, что позволяет выбрать наиболее удобную схему;

$\sqrt{2}$  — соотношение между амплитудным и действующим значением эквивалентного тока  $I_{сз}$ .

Эквивалентное выражение реального постоянного тока  $I_{\pi}$  через фиктивный переменный ток  $I_{сз}$  в фазе не отражается на цепи ротора и в целом не искажает представления о физических процессах, протекающих в ДТ с НВ АМ. Вместе с тем эквивалентное представление статорной цепи в виде симметричной трехфазной обмотки, обтекаемой системой трех фиктивных переменных фазных токов  $I_{сз}$  с часто-

той  $f_1$  и сдвинутых во времени на  $2/3\pi$  эл. рад, не должно отразиться на картине магнитного состояния  $\Phi_{m\Sigma}$ , то есть на реальной неподвижности поля относительно осей обмотки статора. Последнее интерпретируют следующим образом: поскольку поле, образуемое системой переменных токов  $I_{сз}$ , является вращающимся с угловой частотой  $\omega_0 = 2\pi f_{1N}/p$ , постольку статор полагают вращающимся с той же скоростью в обратном направлении. Это и создает эффект неподвижности поля относительно магнитных осей статора, а индуцированное поле проводников обмотки ротора (как в реальных условиях, так и в эквивалентном представлении статорной цепи) вращается относительно ротора с угловой скоростью  $-\omega_0$ . В результате реального вращения ротора относительно статора со скоростью  $\omega$ , индуцированное поле ротора остается неподвижным относительно статора, что и имеет место при реальных значениях протекающего в цепях обмотки статора постоянного тока  $I_\Pi$ .

Однако реальный постоянный ток  $I_\Pi$  всецело определяется напряжением источника постоянного тока и величиной активного сопротивления цепи статора. Роторная цепь при любой угловой скорости вращения  $\omega$ , не оказывает влияния на ток  $I_\Pi$ . Поэтому, при эквивалентном выражении реального постоянного тока через фиктивный переменный ток  $I_{сз} = I_\Pi/k_{сх}$ , АМ представляют адекватной трансформатору тока, включенному в цепь источника тока бесконечно большой мощности — рис. 3.33, а.

Указанная адекватность асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с независимым возбуждением не лишена реального смысла. Например, в частотно-управляемом асинхронном электроприводе при снижении частоты питающего напряжения до нуля получают в цепи статора постоянный ток, который следует понимать как частный случай переменного тока с частотой  $f_1 = 0$ . При этом преобразователь частоты приобретает свойства источника тока.

Эквивалентная схема замещения АМ в режиме ДТ с НВ представлена на рис. 3.33, б. Она представляет собой Т-образную схему замещения, параметры статора в которой отнесены к источнику тока бесконечно большой мощности, а управляющее воздействие на систему асинхронного электропривода в рассматриваемом режиме выражается эквивалентным переменным током  $I_{сз}$ , частота которого задается источником тока и не зависит от скорости вращения ротора. Фактически же под  $I_{сз}$  подразумевается реальный постоянный ток  $I_\Pi$  и схе-

ма включения фаз обмотки статора, которые представляют собой реальное внешнее управляющее воздействие ВУВ наряду с ВВВ, которое следует характеризовать величиной  $\omega_r = f(M_{\text{с акт}})$ .

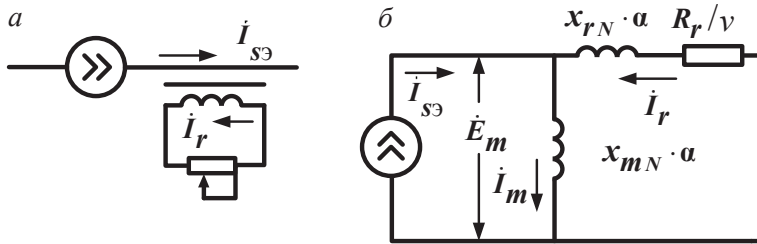


Рис. 3.33. Эквивалентная схема замещения АМ в режиме ДТ с НВ

На частоту тока ротора  $I_r$  оказывает влияние частота индуцируемой в роторе ЭДС  $E_r$ , которая всецело определяется угловой скоростью вращения ротора

$$E_r = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot w_r k_{\text{обр}} \Phi_{mr} f_r,$$

где  $w_r$  — число витков на полюс фазы ротора;

$\Phi_{mr}$  — вращающийся магнитный поток ротора;

$f_r$  — частота  $E_r$  и  $I_r$ , индуцируемых в обмотке ротора при его угловой скорости вращения  $\omega_r$ ,  $f_r = p \omega_r / (2\pi)$ .

В схемах замещения АД, при нестандартной частоте питающего напряжения  $U_s$  или тока  $I_s$ , частота тока ротора учитывается введением параметра относительной частоты  $\alpha = \frac{f_r}{f_N} = \frac{2\pi f_1}{2\pi f_N} \frac{p}{p} = \frac{\omega_0}{\omega_{0N}}$  — см. урав-

нение (2.22). Вместе с тем, как и в частотно-управляемых ЭП, поскольку в режиме ДТ  $\omega_0 = 0$ , используется понятие относительной скорости вращения ротора  $\nu = \omega_r / \omega_{0N}$ . Введение указанного параметра объясняется рациональным стремлением иметь в схеме замещения вполне определенные параметры, соответствующие стандартной частоте тока  $f_{1N} = 50$  Гц.

Ток ротора  $I_r$  и результирующий ток намагничивания  $I_m$  (согласно схеме замещения — рис. 3.33, б в приведенном виде к виткам обмотки статора) имеют частоту  $f_r$ , пропорциональную  $\omega_r$ . Поэтому параметры схемы замещения  $x_{rN} \cdot \alpha$  и  $x_{mN} \cdot \alpha$  являются функциями частоты индукционного тока ротора  $I_r$ , обусловленного угловой скоростью вращения ротора.

В любом режиме работы АМ, магнитный поток  $\Phi_{m\Sigma}$  обеспечивается результирующей намагничивающей силой (НС), которая обусловлена суммой комплексов намагничивающих сил токов статора  $I_s$  и ротора  $I_r$ ,

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{I}_s \cdot w + \dot{I}_r \cdot w}{w} = \dot{I}_s + \dot{I}_r.$$

В таком представлении ранее анализировались режимы двигательный, РТ и ТПВ, в которых АМ была адекватна трансформатору напряжения и изменение угловой скорости вращения ротора не оказывало существенного влияния в рабочей области на намагничивающий ток  $\dot{I}_m \approx \text{const}$  и рабочий магнитный поток  $\Phi_{m\Sigma}$ . При представлении же АМ, адекватной трансформатору тока (что соответствует динамическому торможению с независимым возбуждением), намагничивающий ток  $I_m$  и магнитный поток  $\Phi_m$  изменяются при изменении скорости вращения ротора, так как результирующая НС здесь складывается из неизменной НС статора, обусловленной постоянным током  $I_n$  (который выражается комплексным числом с мнимой частью равной нулю) и меняющейся НС индуктированного тока ротора  $I_r = f(\omega_r)$

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{I}_n \cdot w + \dot{I}_r \cdot w}{w} = \dot{I}_n + \dot{I}_r.$$

Если же использовать фиктивный эквивалентный переменный ток  $I_{сэ}$  и приведенный к виткам обмотки статора ток ротора, получают выражение

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{I}_{сэ} \cdot w + \dot{I}_r \cdot w}{w} = \dot{I}_{сэ} + \dot{I}_r,$$

где  $I_m$  — результирующий ток намагничивания, определяемый суммарным  $\Phi_{m\Sigma} = \Phi_{mr} + \Phi_{ms}$ ;

$I_{сэ}$  — комплексное выражение эквивалентного переменного тока статора, модуль которого не меняет своего значения, а аргумент изменяется в функции относительной угловой скорости вращения ротора  $v$ ;

$I_r$  — индуцированный ток ротора — непосредственно по модулю и аргументу определяется скоростью ротора  $v$ .

Векторная диаграмма токов АМ в ДТ с НВ показана на рис. 3.34. При неподвижном роторе ( $v = 0$ ) ЭДС  $E_r = 0$ ,  $I_r = 0$ , а  $I_m$  уравновешен  $I_{сэ}$ . Если приложить к валу активный момент  $M_{с\text{акт}}$  и придать ротору определенную относительную скорость  $v > 0$ , то, в результате пересечения движущимися проводниками ротора силовых линий неподвижного

магнитного поля статора, индуцируется ЭДС  $E_r > 0$  и с увеличением  $v$  увеличивается индукционный ток  $I_r$ .

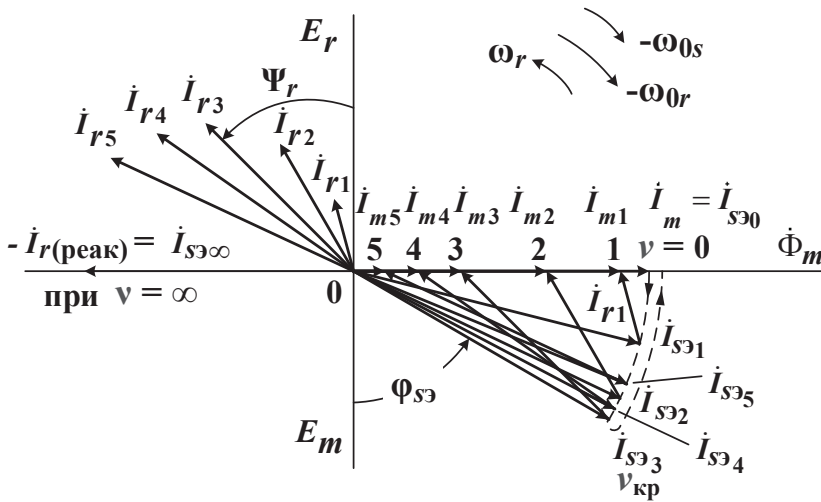


Рис. 3.34. Векторная диаграмма токов АМ в ДТ с НВ

Появление тока в цепи ротора начинается сказываться на электромагнитном состоянии машины: в результате уменьшения величины результирующего тока намагничивания  $I_m$  снижается рабочий магнитный поток  $\Phi_m$ . При этом, как ранее отмечалось, появление тока в цепи ротора не отражается на величине постоянного тока в цепи обмотки статора. В рассматриваемом режиме работы размагничивающее действие тока ротора АМ оказывается подобным реакции якоря машин постоянного тока с независимым возбуждением. Дальнейшее увеличение  $\nu > \nu_{кр}$  будет сопровождаться все большим отклонением тока ротора от оси ЭДС  $E_r$  — рис. 3.34. Увеличение угла  $\psi_r$  вызывает снижение  $\cos\psi$  и активной составляющей тока ротора. Модуль тока  $|I_r|$  продолжает расти, что усиливает его размагничивающее действие, направленное на дальнейшее снижение намагничивающего тока  $I_m$  и рабочего магнитного потока  $\Phi_m$ . Все это вместе взятое резко снижает электромагнитный тормозной момент АМ. В пределе, когда  $\nu \rightarrow \infty$ ,  $I_r$  полностью размагнитит машину ( $I_m \rightarrow \infty$ ) и его индуктивный характер уравновесит собой ток  $I_{с3}$ . Годографом тока  $I_{с3}$  является дуга окружности неизменного радиуса, равного  $I_{с3}$ .

Для вывода уравнений механической и электромеханической статических характеристик ДТ с НВ удобно воспользоваться схемой замещения (см. рис. 3.33, б) и фрагментом векторной диаграммы (рис. 3.35).

Используя векторную диаграмму токов (треугольник ОАВ на рис. 3.35), согласно теореме косинусов можно получить выражение

$$\dot{I}_{s\varnothing}^2 = \dot{I}_m^2 + \dot{I}_r^2 + 2\dot{I}_m\dot{I}_r \sin \psi, \quad (3.8)$$

где  $\sin \psi = \cos (90 + \psi)$ . Значение  $\sin \psi$  можно выразить из треугольника сопротивлений, к которому можно перейти от треугольника токов АВС через треугольник проводимостей, откуда получить

$$\sin \psi = \frac{x_r}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + x_r^2}}.$$

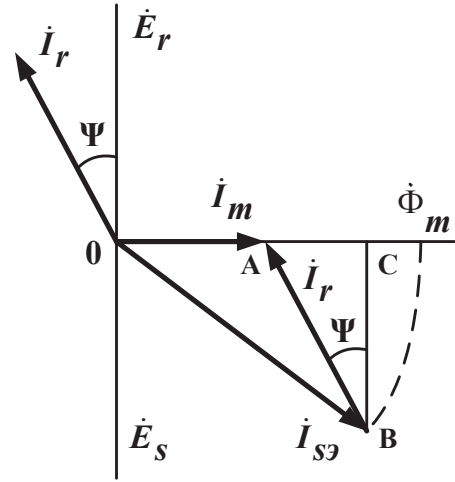


Рис. 3.35. Фрагмент векторной диаграммы АМ в ДТ с НВ

Из схемы замещения (рис. 3.33, б) определяют  $E_m = I_m x_m$ ;

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{E}_m}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + x_r^2}}, \text{ откуда } \dot{I}_m = \frac{\dot{I}_r \cdot \sqrt{\left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + x_r^2}}{x_m}.$$

Полученные выражения подставляют в формулу (3.8)

$$\begin{aligned} I_{s\varnothing}^2 &= \left[ \frac{\dot{I}_r \sqrt{\left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + x_r^2}}{x_m} \right]^2 + \dot{I}_r^2 + \frac{2\dot{I}_r\dot{I}_r \sqrt{\left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + x_r^2}}{x_m} \frac{x_r}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + x_r^2}} = \\ &= \frac{\dot{I}_r^2 \left[ \left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + x_r^2 \right] + \dot{I}_r^2 x_m^2 + 2\dot{I}_r^2 x_r x_m}{x_m^2}; \\ I_{s\varnothing}^2 x_m^2 &= \dot{I}_r^2 \left[ \left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + x_r^2 + 2x_r x_m + x_m^2 \right] = \dot{I}_r^2 \left[ \left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + (x_r + x_m)^2 \right]. \end{aligned}$$

Полученное выражение переписывают относительно  $I_r$  и получают уравнение электромеханической характеристики  $I_r = f(v)$

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{I}_{s\Delta} \cdot x_m}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{v}\right)^2 + (x_r + x_m)^2}}. \quad (3.9)$$

Для вывода уравнения механической характеристики используют уравнение энергетического баланса режима динамического торможения. Подводимая к валу механическая мощность  $-P_{\text{вд}}$  отчасти расходуется на покрытие постоянных потерь холостого хода  $\Delta P_{\text{с.хх}}$ , а в остальном электромагнитным путем преобразуется в электрическую, которая полностью идет на покрытие переменных тепловых потерь в сопротивлениях роторной цепи  $-(P_{2(\text{в})} - P_{\text{с.хх}}) = -P_{\text{мех}} = -P_{\text{эм}} = +\Delta P_{rv}$ , откуда

$$P_{\text{эм}} = \Delta P_{rv} = M_{\text{эм}} \omega_{0r} = 3I_r^2 R_r / v, \quad (3.10)$$

$$v = \omega_r / \omega_{0N} = \omega_{0r} / \omega_{0N}.$$

Электромагнитный момент ДТ с НВ определяется через электрические потери  $\Delta P_{rv}$  в цепи ротора. Уравнение механической характеристики  $M_{\text{эм}} = f(v)$  в рассматриваемом режиме получают подстановкой уравнения (3.9) в уравнение (3.10)

$$-M_{\text{эмДТ}} = \frac{3}{\omega_{0r}} \cdot \dot{I}_r^2 \cdot \frac{R_r}{v} = \frac{3I_{s\Delta}^2 \cdot x_m^2 \cdot \frac{R_r}{v}}{\omega_{0r} \left[ \left( \frac{R_r}{v} \right)^2 + (x_r + x_m)^2 \right]}. \quad (3.11)$$

В ДТ с НВ уравнение  $M_{\text{эм}}(v)$  напоминает структуру двигательного режима, но здесь функцию напряжения  $U_s^2$  выполняет произведение  $I_s^2 \cdot x_m^2$ .

Если производную  $dM_{\text{эм}}/dv$  приравнять к нулю, то можно определить выражения критического тормозного момента и ему соответствующую критическую относительную скорость  $v_{\text{к}}$  ротора. Полагая  $R_r$  собственным активным сопротивлением обмотки ротора, приведенным к виткам обмотки статора, получают

$$-M_{\text{эмк}} = \frac{3I_{s\Delta}^2 \cdot x_m^2}{2\omega_{0r} (x_r + x_m)}; \quad (3.12)$$

$$v_{\text{к}} = \frac{R_r}{x_r + x_m}.$$



Через отношение уравнений (3.11) и (3.12) получают упрощенную формулу Клосса режима ДТ с НВ АМ

$$\frac{M_{\text{эмДТ}}}{M_{\text{эмК}}} = \frac{2}{\frac{v}{v_k} + \frac{v_k}{v}}.$$

На рис. 3.36 представлены статические характеристики АМ в режиме ДТ с НВ  $v = f(I_r)$ ;  $v = f(I_{r \text{ акт}})$ ;  $v = f(M_{\text{эмДТ}})$  и  $v = f(I_m)$  в сопоставлении с естественной двигательного режима  $s = f(M_{\text{эмД}})$ .

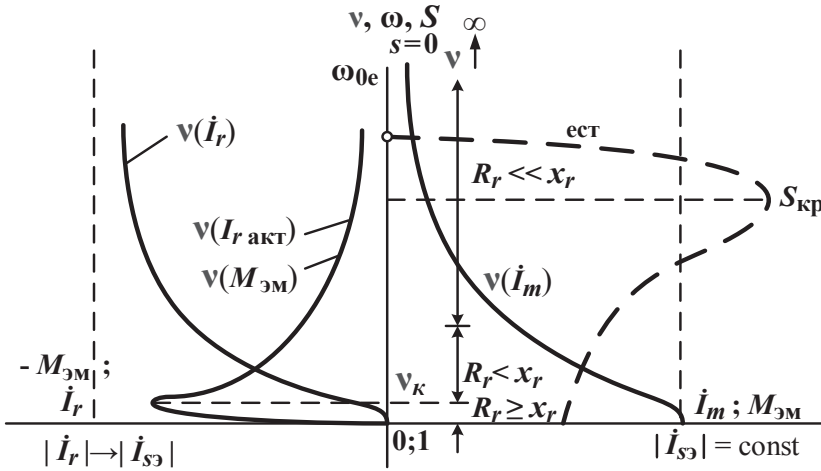


Рис. 3.36. Статические характеристики АМ в режиме ДТ с НВ

Все характеристики режима ДТ с НВ исходят из начала координат;  $v = 0$ , когда  $I_m$  имеет максимальное значение и уравнивает  $I_{s3}$ . При малых значениях  $v$  начинается электромагнитный переходный процесс, вызванный в обмотке ротора появлением индуцированного тока  $I_r$  при быстром возрастании его активной составляющей  $I_{r \text{ акт}}$  благодаря тому, что в интервале  $v = 0 \dots v_k$ , из-за небольшой частоты пересечения проводников ротора неподвижным магнитным потоком  $\Phi_{ms}$  статора,  $R_r \geq x_r$ , а  $\cos \psi_r$  близок к единице. В результате этого тормозной момент АМ быстро возрастает вплоть до  $M_{\text{эмК}}$

$$-M_{\text{эмДТ}} = k \cdot \dot{\Phi}_{ms} \cdot \dot{I}_r \cdot \cos \psi_r = k \cdot \dot{\Phi}_{ms} \cdot \dot{I}_{r \text{ акт}}.$$

Необходимо отметить, что  $v_k \ll s_k$  почти на порядок, что объясняется значительным отличием соответствующих величин  $E_m$  при  $M_{\text{эмК}}$ .

С увеличением  $v$  путем воздействия внешнего активного механического момента  $M_b$  на ротор АМ, ее электромагнитное состояние ухуд-

шается  $R_r < x_r$ ; быстро снижается  $I_m$  и  $I_{r\text{акт}}$ , а полный ток  $I_r$  приобретает все больше индуктивный характер;  $\cos \psi_r \rightarrow 0$ ,  $I_m \rightarrow 0$ ,  $M_{\text{эм ДТ}} \rightarrow 0$  при  $v \rightarrow \infty$ , а  $I_r$  устремлен к уравниванию  $I_{\text{сэ}}$ .

На вид статической механической характеристики АМ в режиме ДТ с НВ может повлиять не только вид выбранной схемы включения фаз статора, но и величина тока  $\dot{I}_n \equiv |\dot{I}_{\text{сэ}}| \equiv M_{\text{эмк}}$ . Вместе с тем не следует пытаться увеличить  $M_{\text{эмк}}$  в ДТ путем увеличения  $I_{\text{п}}$ , поскольку это может вызвать насыщение магнитопровода, снижение  $x_m = E_m/I_m$  и обратный эффект, изображенный пунктиром на рис. 3.37. Чтобы избежать эффекта насыщения, определяют  $|\dot{I}_{\text{сэ}}| = \dot{I}_{\text{п}} / k_{\text{сх}} \leq (2...3) \dot{I}_{\text{с0}}$  через ток идеального холостого хода двигательного режима АД.

В АМ с ФР на вид характеристики влияют путем включения в цепь ротора внешнего добавочного сопротивления, что изменяет жесткость механической характеристики и увеличивает  $v_{\text{к}}$ , как показано на рис. 3.38. Характеристика с собственным сопротивлением  $R_r$  жесткая, а при добавочных сопротивлениях она смягчается и не влияет на величину  $R_{\text{сдоб}}$ . Характеристика, соответствующая  $R_{\text{рдоб1}}$ , обеспечивает наибольший средний тормозной момент в диапазоне скоростей  $\omega_0...0$  и наименьшее время остановки ЭП, поэтому  $R_{\text{рдоб1}}$  называют оптимальным сопротивлением, которое используют для экстренной остановки ЭП.

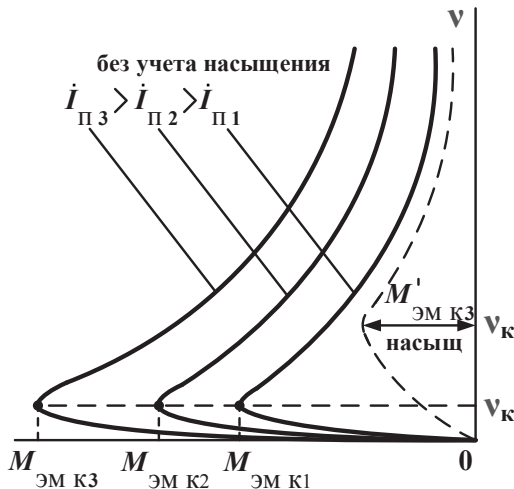


Рис. 3.37. Статические механические характеристики АМ в режиме ДТ с НВ с (без) учетом насыщения

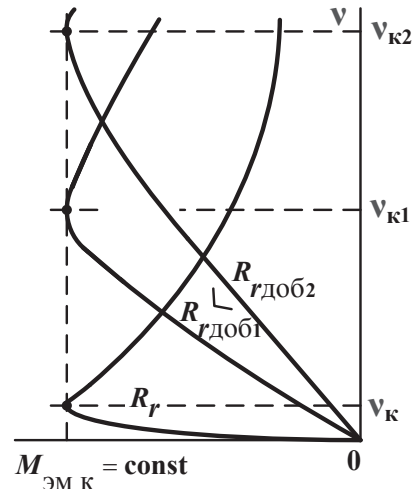


Рис. 3.38. Статические механические характеристики АМ с ФР с включением в цепь ротора добавочного сопротивления

### Динамическое торможение с независимым возбуждением в синхронном ЭП

В синхронной машине с электромагнитным возбуждением имеются все необходимые условия для осуществления ДТ с НВ. Для его получения трехфазная цепь обмотки статора отключается от сети переменного тока и все фазы соединяются звездой обычно через добавочные внешние резисторы  $R_{s\text{доб}}$ , как представлено на рис. 3.39.

Ротор (якорь) СМ при ДТ с НВ приводится в движение активным моментом  $M_{\text{в}}$ , приложенным к валу, или вращается по инерции.

Трехфазная цепь статора неподвижна.

Благодаря пересечению ее проводников постоянным магнитным полем  $\Phi_{mr}$ , образованным током возбуждения  $I_{nf}$ , в фазах статора индуцируется ЭДС  $E_s$ , под действием которой создается трехфазная система индукционных переменных токов  $I_s$ , которые образуют вращающееся в противоположном ротору направлении магнитное поле статора  $\Phi_{ms}$ . Получается обратная физическая картина по сравнению с ДТ НВ АД. Электромагнитным взаимодействием потоков  $\Phi_{ms}$  и  $\Phi_{mr}$  создается тормозной электромагнитный момент ( $-M_{\text{эмДТ}}$ ).

Механические характеристики будут аналогичны рассмотренным АМ в ДТ НВ. Путем изменения  $I_{nf}$  влияют на величину  $|M_{\text{эм}}|$  при неизменном  $v_k$ , что представлено на рис. 3.37. Путем воздействия на величину  $R_{s\text{доб}}$  влияют на жесткость механической характеристики при  $|M_{\text{эмкл}}| = \text{const}$  и  $v_k = \text{var}$  — см. рис. 3.38. Для быстрой остановки ЭП и здесь используется понятие оптимального сопротивления (добавочного  $R_{s\text{доб}}$  в цепи статора).

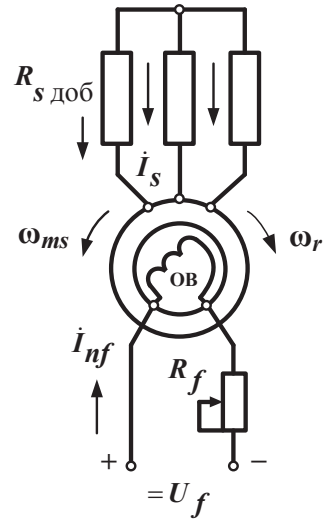


Рис. 3.39. Схема режима ДТ с НВ СМ

#### 3.4.4. Динамическое торможение с самовозбуждением в ЭП переменного тока

Режим ДТ с СВ возможен и в ЭП переменного тока: чаще в АМ КЗР для экстренного снижения скорости с последующей остановкой, а в СМ, хотя он возможен, обычно не используется в связи со спецификой эксплуатации СМ.

Как и в ЭП постоянного тока, прежде всего требуется создание условий самовозбуждения.

В асинхронных ЭП организация ДТ с СВ производится следующим образом: обмотка статора отключается от сети переменного тока и подключается по каждой фазе к батарее электростатических конденсаторов  $C_3$  в схему  $\star$  или  $\Delta$ , как показано на рис. 3.40, а. Поскольку цепь фаз вращающегося по инерции ротора остается замкнутой, в ней протекает электромагнитный процесс затухания фазных токов  $I_r$ . Полученная таким образом эквивалентная схема замещения АМ представлена на рис. 3.40, б.

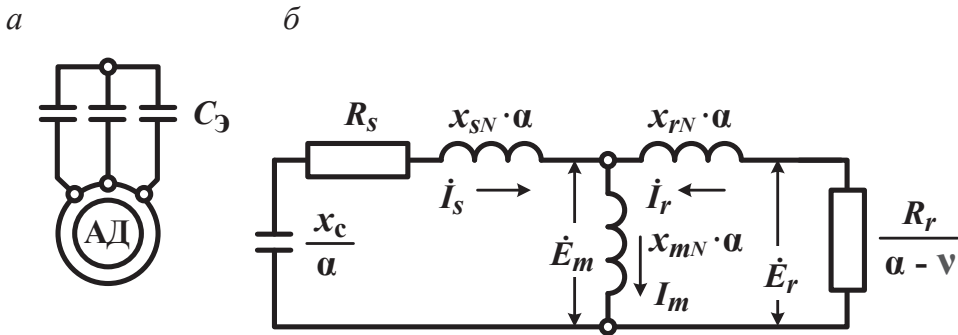


Рис. 3.40. Схемы принципиальная (а) и замещения (б) динамического торможения с самовозбуждением в ЭП переменного тока

В отличие от ранее рассматриваемых эквивалентных схем замещения АМ, здесь отсутствует приложенное напряжение источника электроэнергии, а цепь статора замкнута через реактивное емкостное сопротивление  $x_c$ . Электромагнитная цепь АМ в ДТ с СВ представлена контуром « $C_3 - L - R$ », который по физической основе не исключает возникновения резонансных явлений. Толчком к развитию самовозбуждения является остаточное намагничивание магнитной системы АМ, которое отражает кривая намагничивания  $E_m = f(I_m)$  и опережающий характер емкостного тока в цепи статора при вращающемся роторе со скоростью, соответствующей  $E_m = f(I_m)$ . Электрическую нагрузку цепи статора выражает характеристика падения напряжения на емкости  $\Delta U_c = \frac{\dot{I}_c}{\alpha \omega_{1N} C_3} = f(I_m)$ , что представлено на рис. 3.41.

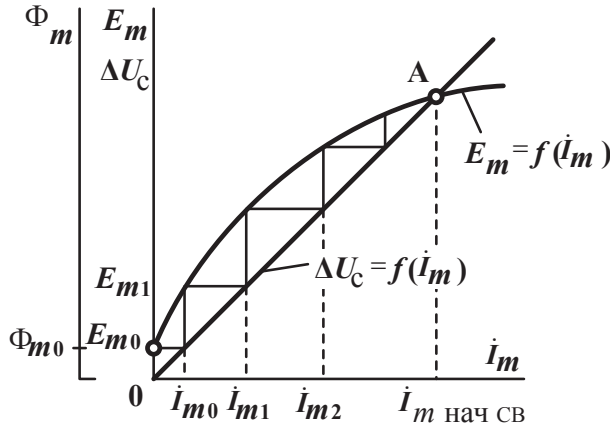


Рис. 3.41. Отображение электрической нагрузки цепи статора

Для развития процесса самовозбуждения необходимо превышение  $E_{m0} = f(i_m)$  над  $\Delta U_c = f(i_m)$ , что достигается путем значительного увеличения величины емкости конденсаторов при определенной скорости вращения ротора. Если  $E_{m0}$  превышает падение напряжения на конденсаторе  $E_{m0} > \Delta U_c$ , то это обеспечивает протекание по обмоткам неподвижного статора емкостного тока  $I_c = I_s = I_m = f(\alpha - \nu)$  при жесткой механической характеристике. По мере увеличения тока  $I_m$  протекает электромагнитный переходный процесс установления самовозбуждения, который наступает в точке А рис. 3.41 и соответствует идеальному холостому ходу асинхронного генератора или началу режима ДТ АМ с СВ, который часто называют конденсаторным торможением.

Как и в ранее рассматриваемых режимах, в том числе при ДТ АМ с НВ, здесь следует учитывать влияние частоты токов, ЭДС, а также скорости вращения ротора на параметры цепей схемы замещения — рис. 3.40, б.

Для реактивных сопротивлений Т-образной схемы замещения параметры выражают через номинальную частоту  $f_{1N} = 50$  Гц с поправкой на относительный параметр  $\alpha$

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1N}} = \frac{f_1}{50} = \frac{2\pi f_1}{2\pi f_{1N}} = \frac{\omega_1}{\omega_{1N}} \frac{p}{p} = \frac{\omega_0}{\omega_{0N}},$$

что позволяет выражать параметры при любой частоте

$$x_s = 2\pi f_1 L_{s\sigma} = 2\pi f_{1N} \cdot \alpha L_{s\sigma} = \omega_{1N} \cdot \alpha L_{s\sigma} = x_{sN} \cdot \alpha;$$

$$x_m = 2\pi f_1 L_m = 2\pi f_{1N} \cdot \alpha L_m = \omega_{1N} \cdot \alpha L_m = x_{mN} \cdot \alpha;$$

$$x_r = 2\pi f_1 L_{r\sigma} = 2\pi f_{1N} \cdot \alpha L_{r\sigma} = \omega_{1N} \cdot \alpha L_{r\sigma} = x_{rN} \cdot \alpha ;$$

$$x_c = \frac{1}{2\pi f_1 C_\gamma} = \frac{1}{2\pi f_{1N} \cdot \alpha C_\gamma} = \frac{1}{\omega_{1N} \cdot \alpha C_\gamma} = \frac{x_c}{\alpha} .$$

Активное сопротивление ротора, как известно, непосредственно характеризующее развитие электромагнитного момента (см. уравнения (2.11) и (2.12)), можно выразить с учетом относительных единиц — см. уравнение (2.22)

$$\frac{R_r}{s} = \frac{R_r}{\beta} = \frac{R_r}{\alpha - v} ,$$

где  $s$  — скольжение;

$\beta$  — абсолютное скольжение;

$v$  — относительная скорость ротора.

Выясним связь между условиями самовозбуждения АМ при ДТ с СВ и угловой скоростью вращения ротора. Под действием  $E_m$  в точке А устанавливается величина тока намагничивания  $I_m$  (см. рис. 3.41), создающего в цепи трехфазного статора вращающееся магнитное поле  $\Phi_m$ , направленное в сторону вращения ротора ( $\omega_r > \omega_{0s}$ ). Началу ДТ СВ соответствует скорость ротора  $\omega_r = \omega_{\text{начСВ}} = \omega_{0s}$  (см. на механической характеристике ДТ с СВ рис. 3.42);  $I_r = 0$ ,  $I_s = I_{s0} = I_{m \text{ начСВ}}$ . Уравнение баланса ЭДС контура возбуждения АМ запишется

$$\dot{E}_m = \dot{I}_s \sqrt{R_s^2 + \left( x_{sN} \cdot \alpha_{\text{нач}} - \frac{x_{cN}}{\alpha_{\text{нач}}} \right)^2} = \dot{I}_m \cdot x_{mN} \cdot \alpha_{\text{нач}} . \quad (3.13)$$

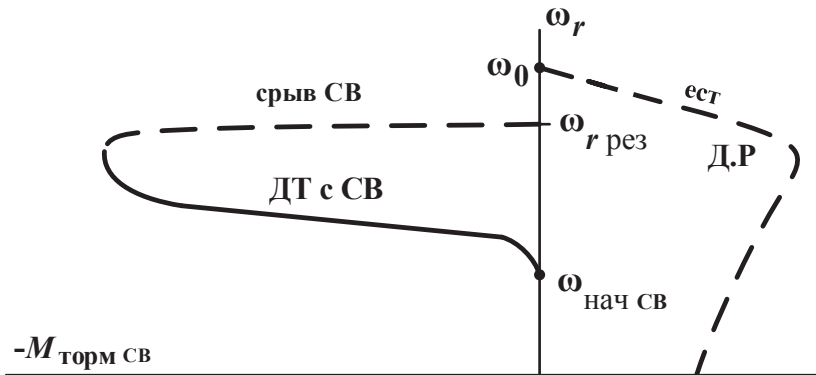


Рис. 3.42. Характеристики АМ ДТ СВ при увеличении емкости батареи конденсаторов

Поскольку ток намагничивания выражается комплексной суммой токов статора и ротора  $I_m = I_s + I_r$ , в рассматриваемом случае  $I_r = 0$ ,  $I_m = I_s$  и токи в уравнении (3.13) сокращаются. Получается запись

$$R_s^2 + \left( x_{sN} \cdot \alpha_{\text{нач}} - \frac{x_{cN}}{\alpha_{\text{нач}}} \right)^2 = x_{mN}^2 \cdot \alpha_{\text{нач}}^2, \text{ в которой по сравнению с } x_m \text{ прене-}$$

брегают значениями  $R_s \approx 0$  и  $x_s \approx 0$ , что не вносит существенной ошибки, освобождает от решения биквадратного уравнения и позволяет определить относительную частоту начала самовозбуждения через основополагающие параметры

$$\frac{x_{cN}^2}{\alpha_{\text{нач}}^2} = x_{mN}^2 \cdot \alpha_{\text{нач}}^2, \text{ откуда } \alpha_{\text{нач}} = \sqrt{\frac{x_{cN}}{x_{mN}}}. \quad (3.14)$$

Полученное выражение (3.14) позволяет определить скорость ротора при начале самовозбуждения, равную скорости вращения магнитного поля  $\Phi_m$ , создаваемого обмоткой статора,

$$\alpha_{\text{нач}} = \sqrt{\frac{x_{cN}}{x_{mN}}} = \frac{\omega_{0\text{нач}}}{\omega_{0N}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi f_{1N} \cdot C_{\text{э}} x_{mN}}} = \sqrt{\frac{1}{100\pi C_{\text{э}} x_{mN}}}, \quad (3.15)$$

откуда

$$\omega_{0\text{нач}} = \omega_{r\text{нач}} = \omega_{0\_50\text{Гц}} \cdot \sqrt{\frac{1}{100\pi C_{\text{э}} x_{mN}}}.$$

При стремлении снизить начальную угловую скорость ротора, при условии обеспечения самовозбуждения, необходимо значительно увеличить емкость, а значит, и габариты, батареи конденсаторов.

Для развития режима ДТ с СВ АМ необходимо увеличить скорость вращения ротора  $\omega_r > \omega_{r\text{нач}}$ , например, путем приложения активного механического момента  $M_{\text{в акт}}$ . Это вызывает увеличение относительной частоты  $\alpha$ , что приводит к увеличению ЭДС  $E_m$ , тока  $I_m$ , и индуктивных сопротивлений  $x_{mN} \cdot \alpha$ ,  $x_{sN} \cdot \alpha$  и  $x_{rN} \cdot \alpha$ , при этом емкостное сопротивление  $\frac{x_c}{\alpha}$  уменьшится. Появляется ток в цепи ротора  $I_r$  как

комплексная величина слева от оси  $E_r$ , точка 1 на рис. 3.43, с тенденцией поворота против часовой стрелки.

Согласно уравнению  $I_m = I_s + I_r$  увеличивается комплексное значение тока статора  $I_s$ , которое получает тенденцию поворота по часовой

стрелке относительно оси  $E_m$ . Дальнейшее повышение скорости ротора (точки 1, 2, 3 рис. 3.43) увеличивает  $\alpha$ , повышая значения  $I_r$ ,  $I_s$  и  $I_m$ , характеризует увеличение электромагнитного тормозного момента и преобразование подводимой к валу механической энергии в электрическую. Последняя в форме тепловых потерь на сопротивлениях статора и ротора рассеивается в окружающую среду.

Расположение комплексов токов на векторной диаграмме ДТ с СВ (как и при ДТ с НВ, если сравнить с рис. 3.34) в общих чертах напоминает векторную диаграмму рекуперативного торможения асинхронной машины, относящейся к области отрицательных скольжений. Но здесь имеются и определенные отличия.

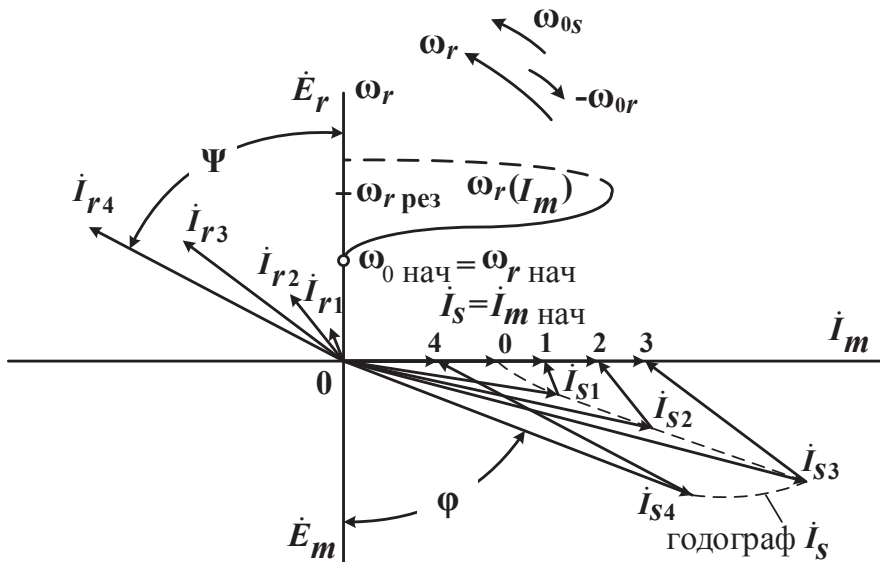


Рис. 3.43. Характеристики режима ДТ с СВ АМ

Во-первых, здесь годографом тока статора является кривая изменяющегося радиуса, показана пунктиром, что объясняет комплексная сумма  $|I_m| = |I_s| + |I_r|$ , в которой с изменением частоты  $\alpha$  и скорости ротора  $\omega_r$  ни один из токов не сохраняет своего модуля. Во-вторых, по тем же причинам происходит перераспределение падений напряжения на сопротивлениях контура возбуждения: на емкостном сопротивлении  $\frac{x_c}{\alpha}$  с увеличением  $\alpha$ , падение напряжения уменьшается,



а на индуктивных — увеличивается как за счет изменения самих сопротивлений, так и за счет возрастания токов статора  $I_s$  и ротора  $I_r$  из-за их индукционной связи.

Дальнейшее увеличение  $\omega_r$  (точка 4, рис. 3.42) продолжает поворот комплексов токов  $I_r$  и  $I_s$  в направлении к их противофазе. В результате этого резко снижается ток  $I_m$  — см. на рис. 3.42 зависимость  $\omega_r(I_m)$ , АМ размагничивается, падает магнитный поток  $\Phi_m$ , а значит, развиваемый тормозной электромагнитный момент  $M_{эмт}$ , то есть  $I_m \rightarrow 0$ ;  $\Phi_m \rightarrow 0$ ;  $M_{эм} \rightarrow 0$ , а  $|I_s| \rightarrow |I_r|$ . Основной контур намагничивания выпадает из участия в энергетическом преобразовании, поэтому преобразование активной энергии прекращается. Остается лишь обмен реактивной энергии между полями индуктивностей рассеяния обмоток статора АД и электростатическими полями конденсаторов. Последовательное включение индуктивных и емкостных сопротивлений приводит к резонансу напряжений и окончательному срыву самовозбуждения.

Наступлению резонанса соответствует равенство последовательно включенных индуктивных и емкостных сопротивлений

$$x_{sN} \cdot \alpha_{рез} + x_{rN} \cdot \alpha_{рез} \approx \frac{x_{cN}}{\alpha_{рез}},$$

откуда относительный параметр частоты  $\alpha_{рез}$ , соответствующий срыву самовозбуждения из-за резонанса, определится

$$\alpha_{рез} = \sqrt{\frac{x_{cN}}{x_{sN} + x_{rN}}}. \quad (3.16)$$

На векторной диаграмме токов резонансу должно отвечать равенство тангенсов углов  $\psi$  и  $\varphi$

$$\frac{x_{sN} \cdot \alpha_{рез} - \frac{x_{cN}}{\alpha_{рез}}}{R_s} = \frac{x_{rN} \cdot \alpha_{рез}}{\frac{R_r}{v_{рез}}}. \quad (3.17)$$

Выражение (3.16) подставляется в уравнение (3.17) и преобразовывается относительно  $v_{рез}$ . В результате получают

$$v_{рез} = \frac{R_r}{R_s} \frac{(x_{sN} \cdot x_{cN} - x_{sN} \cdot x_{cN} - x_{rN} \cdot x_{cN})(x_{sN} + x_{rN})}{(x_{sN} + x_{rN})x_{rN} \cdot x_{cN}} = -\frac{R_r}{R_s}.$$

Таким образом, верхняя граница скольжения, соответствующая существованию режима динамического торможения с самовозбуждением (в области отрицательных скольжений) оказывается такой же, как в других тормозных режимах, когда  $\omega$  устремлена к  $\infty$  (например, при рекуперативном торможении), и равной отношению активных сопротивлений ротора и статора. Максимальная угловая скорость вращения ротора, соответствующая срыву самовозбуждения, определится

$$\begin{aligned}\omega_{r\text{рез}} &= \omega_{0\text{рез}} (1 - v_{\text{рез}}) = \omega_{0N} \cdot \alpha_{\text{рез}} \left(1 + \frac{R_r}{R_s}\right) = \\ &= \omega_{0N} \cdot \sqrt{\frac{x_{cN}}{x_{sN} + x_{rN}}} \left(1 + \frac{R_r}{R_s}\right) = \\ &= \omega_{0N} \cdot \sqrt{\frac{1}{100\pi C_{\vartheta} (x_{sN} + x_{rN})}} \left(1 + \frac{R_r}{R_s}\right).\end{aligned}\quad (3.18)$$

Выражение (3.18) позволяет заключить, что срыв самовозбуждения из-за резонанса с повышением емкости  $C_{\vartheta}$  будет происходить при меньших угловых скоростях вращения ротора. Сопоставив выражения (3.18) и (3.15), представим их отношение

$$\begin{aligned}\frac{\omega_{r\text{рез}}}{\omega_{\text{начСВ}}} &= \frac{\omega_{0N} \cdot \sqrt{\frac{1}{100\pi C_{\vartheta} (x_{sN} + x_{rN})}} \left(1 + \frac{R_r}{R_s}\right)}{\omega_{0N} \cdot \sqrt{\frac{1}{100\pi C_{\vartheta} x_{mN}}}} = \\ &= \sqrt{\frac{x_{mN}}{x_{sN} + x_{rN}}} \left(1 + \frac{R_r}{R_s}\right).\end{aligned}\quad (3.19)$$

Согласно выражению (3.19) можно сделать вывод, что, с увеличением емкости батареи конденсаторов, зона ДТ СВ перемещается в область пониженных скоростей ротора. Эта зона определяется как отношение реактивных индуктивных сопротивлений цепей машины и активных сопротивлений ротора и статора. Для практически приемлемых габаритах батареи конденсаторов принимают  $\omega_{\text{начСВ}}$ , которое составляет  $(1/3 \dots 1/2)\omega_{0N}$  по сравнению с двигательным режимом при 50 Гц. Примерный вид механической характеристики показан на рис. 3.42.

---

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Обобщенные энергетические характеристики электроприводов

---

### 4.1. Составляющие энергетического баланса

---

**В** предшествующих главах, при рассмотрении электрической машины как электромеханического преобразователя энергии (при двигательном и различных тормозных режимах), было показано, что любое направление энергопреобразования неизбежно сопровождается потерей части энергии, нагревающей ЭМ, которая от ее корпуса рассеивается в окружающую среду. Потери энергии в установившихся и переходных режимах движения являются важным показателем экономической оценки работы ЭП, позволяющим определять, количественно и качественно разрешать проблемы энергосбережения на производственных объектах. От величины потерь энергии зависит КПД. По значениям КПД (и  $\cos\phi$  в установках переменного тока) оценивают степень загрузки ЭД, рациональность используемого типа ЭП, его электрической схемы, режима работы, способа управления скоростью и другими выходными координатами.

Определение потерь электроэнергии в ЭП, особенно в переходных режимах движения, представляет во многих случаях довольно сложную инженерную задачу. Потери электроэнергии в ЭП подразделяют на следующие:

- $\Delta W_c$  — постоянные потери в магнитопроводе на перемагничивание, вихревые токи, на трение в кинематике, подшипниках, а также о воздух (вентиляционные), которые считаются неза-

висящими от нагрузки, но часто являются функцией скорости,  
 $\Delta W_c = \Delta W_{c.Fe} + \Delta W_{c.тр} = f(\omega)$ ;

- $\Delta W_v$  — переменные потери в главных цепях ЭП в функции совершаемой механической работы на валу по преодолению статической  $A_c$  и динамической  $\Delta A_{дин}$  нагрузки  

$$\Delta W_v = \int_t I^2 R \cdot dt = f(A_c; \Delta A_{дин}).$$

Статическая нагрузка  $A_c = \int_t M_b \omega \cdot dt = \int_\alpha M_b \cdot d\alpha$  обусловлена преодо-

лением на валу момента  $M_b = M_c + \Delta M_{c.хх}$ , когда совершается полезная механическая работа  $A_c$  как при установившейся скорости движения  $\omega = \text{const}$ , так и в переходных режимах движения при  $\omega = \text{var}$ . При  $\omega = 0$  и  $M_b \neq 0$  наблюдается режим КЗ, а при  $\omega = \omega_0$  и  $M_b = 0$  — режим холостого хода, механическая работа со стороны системы «ЭП — РМ» не совершается.

Динамическая нагрузка  $\Delta A_{дин} = \Delta W_{кин} = \int J_\Sigma \omega \frac{d\omega}{dt} \cdot dt = J_\Sigma \frac{\omega^2}{2} \Big|_{J_\Sigma = \text{const}}$

обусловлена деятельностью со стороны системы «ЭП — РМ» по накоплению или использованию изменяющегося запаса кинетической энергии  $\pm \Delta W_{кин}$  в системе, которая проявляет себя только в переходных режимах движения, когда  $\omega = \text{var}$ .

Таким образом,  $A_{мех} = A_c + \Delta A_{дин}$  представляет в сумме полезную статическую и необходимо возникающую динамическую нагрузки при совершении механической работы как в установившихся ( $\omega = \omega_{уст} = \text{const}$ ), так и в переходных ( $\omega = \text{var}$ ) режимах движения.  $A_{мех}$  — это необходимо совершаемая механическая работа в переходных режимах движения в целях изменения скорости движения  $\omega(t)$ , то есть для обеспечения движения системе «ЭП — РМ» с ускорением. В переходных режимах движения ( $\omega = \text{var}$ ) может происходить и выполнение полезной статической механической работы  $A_c$ , если  $M_c \neq 0$ , а главное — всегда совершается необходимая динамическая работа  $\Delta A_{дин}$  по осуществлению пуска, разгона, замедления и прочего в целях изменения скорости движения ( $\pm \omega = \text{var}$ ), а значит, и изменения запаса кинетической энергии ( $\pm \Delta W_{кин}$ ) в системе «ЭП — РМ».

При условии положительного направления движения ЭП общий баланс потребляемой активной энергии ДПТ НВ или АД ФР при со-

вершении механической работы  $A_{\text{мех}} = \pm A_{\text{с}} \pm \Delta A_{\text{дин}}$  по преодолению статической и динамической нагрузки будет

$$\pm W_{1(\text{эл})} = \Delta W_{\text{с.хх}} + \Delta W_{\text{sv}} + \Delta W_{2v} \pm A_{\text{с}} \pm \Delta A_{\text{дин}},$$

где  $\pm \Delta W_{1(\text{эл})}$  — электроэнергия,  $\pm \Delta W_{1(\text{эл})} \equiv UI$ : «+» — потребляемая из сети при ДР и ТПВ; «-» — рекуперлируемая в сеть при РТ;  $W_{1(\text{эл})} = 0$  при ДТ;

$\Delta W_{\text{с.хх}}$  — энергия постоянных потерь,  $\Delta W_{\text{с.хх}} = \Delta W_{\text{с.Фе}} + \Delta W_{\text{с.тр}}$ ;

$\Delta W_{\text{sv}}$  — переменные потери в трехфазной цепи обмотки статора АД (и СД), которая является силовой, рабочей,  $\Delta W_{\text{sv}} = 3I_s^2 \cdot R_s$ ;

$\Delta W_{2v}$  — переменные потери для АД в трехфазной цепи обмотки ротора АД, которая индукционно связана с обмоткой статора (как в трансформаторе),  $\Delta W_{2v} = 3I_r^2 \cdot R_r$ ; для ДПТ в цепи якоря ДПТ,  $\Delta W_{2v} = 3I_a^2 \cdot R_a$ ;

$\pm A_{\text{с}}$  — работа по преодолению развиваемым со стороны ЭП движущим моментом  $M_{\text{в}}$  реактивной статической нагрузки на валу (+); (-) — работа приложенного к валу активного движущего МВ со стороны РМ, обычно в тормозных режимах работы ЭП,  $\pm A_{\text{с}} = M_{\Sigma\text{с}} \cdot \omega = -M_{\text{в}}\omega$ ;

$\pm \Delta A_{\text{дин}}$  — динамическая работа по преодолению механической инерционности  $J_{\Sigma}$ , обусловленная накоплением запаса или расходом ранее запасенной кинетической энергии  $\Delta W_{\text{кин}}$  в системе «ЭП — РМ» при непрерывном изменении скорости ее движения,  $\pm \Delta A_{\text{дин}} = \pm \Delta W_{\text{кин}}$ .

## 4.2. Энергетика ДПТ в установившемся режиме движения

В двигательном режиме установившегося движения потребляемая из сети электроэнергия  $W_{1(\text{эл})a}$  всецело обусловлена преодолеваемой статической нагрузкой на валу и необходимостью покрытия постоянных и переменных потерь. Это удобно проиллюстрировать на примере статической характеристики сетевого ЭП с ДПТ НВ, рис. 4.1, где представлены естественная и искусственная (с  $R_{a\text{доб}}$ ) характеристики [6, с. 12–18], на которых отмечены точки номинальной нагрузки на валу.

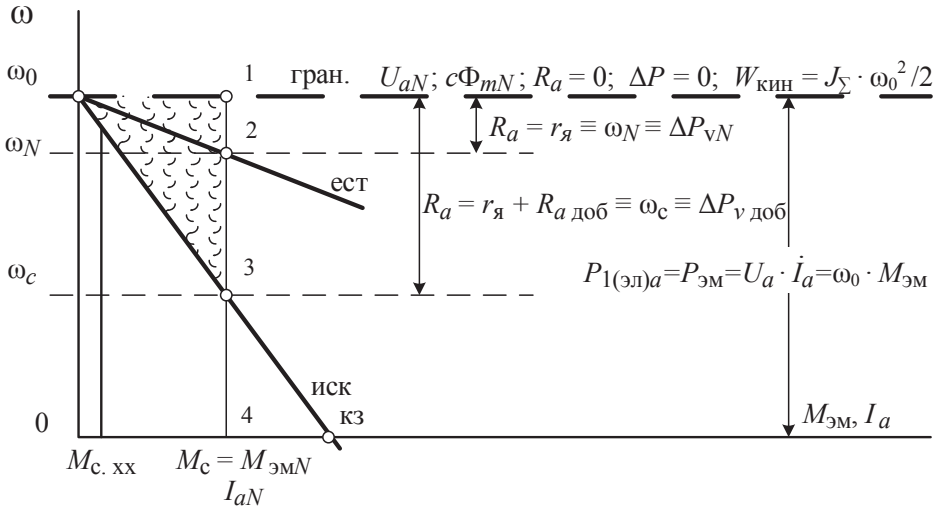


Рис. 4.1. Статические характеристики сетевого ЭП с ДПТ НВ

Потребляемая из сети якорной цепью электрическая мощность  $P_{1(эл)aN} = U_{aN} \cdot I_{aN} = \omega_0 M_{эмN}$  при работе ЭП на естественной характеристике (точка 2,  $\omega = \omega_N$ ) соответствует площади прямоугольника  $0 - \omega_0 - 1 - 4 - 0$ , которая свидетельствует о потреблении из сети номинальной электрической мощности, предельно допустимой по тепловому состоянию ЭД. На рис. 4.1 показано, что эта площадь включает в себя площади двух прямоугольников:  $0 - \omega_N - 2 - 4 - 0$ , отражающего совершаемую полезную механическую работу  $A_c = \int M_c \omega_N \cdot dt$ , и  $\omega_N - \omega_0 - 1 - 2 - \omega_N$ , покрываемые потери  $\Delta P_\Sigma = \Delta P_{c. xx} + \Delta P_{av}$ .

При работе ЭП на пониженной скорости (точка 3,  $\omega = \omega_c$ ) искусственной характеристики, которая получена путем включения в цепь якоря внешнего добавочного сопротивления  $R_a = r_я + R_{a доб}$  при том же  $M_c = M_{эмN}$ , потребление электрической мощности остается прежним: ордината совершаемой механической работы  $3 - 4$  уменьшается, а ордината покрываемых потерь  $3 - 1$  увеличивается. Поскольку  $r_я < R_{a доб}$ , в обмотке якоря потери  $\Delta P_{av} = I_{av}^2 \cdot r_я$  по-прежнему будут оставаться номинальными (ордината  $2 - 1$ ), а увеличившиеся потери в якорной цепи (ордината  $1 - 2 - 3$ ) будут выделяться вне ЭД на внешнем  $R_{a доб}$  (ордината  $2 - 3$ ).

Если имеет место недогрузка на валу ( $M_c < M_{эмN}$ ), вплоть до холостого хода ( $M_c = M_{c. xx}$ ), или принимается  $M_{c. xx} = 0$ , то рабочие точки 2 или

3 ординат сдвигаются вверх, а точка 4 по оси абсцисс — к началу координатной системы. В идеальных условиях, когда  $\omega_c \rightarrow \omega_0$ , а  $M_{эм} \rightarrow 0$ , потребление электрической мощности  $P_{1(эл)}$  будет сокращаться до нуля.

Изменение статической нагрузки  $M_c = \text{var}$  вызывает изменение скорости движения, то есть появление ускорения  $\pm \varepsilon = d\omega/dt$  в системе, которое свидетельствует о необходимости преодолевать или использовать еще и динамическую нагрузку  $\pm M_{дин} = \pm J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \Big|_{J_{\Sigma}=\text{const}}$ .

### 4.3. Энергетика пуска ДПТ при постоянном статическом моменте

Рассмотрим энергетику пуска ДПТ с НВ, не учитывая потребление электроэнергии цепью независимого возбуждения ввиду ее малости. Рассмотрим только силовую цепь — цепь якоря. Также примем, что источник питания достаточно большой мощности и пусковые токи  $I_a$  не вызовут посадки напряжения, то есть не окажут влияния на величину пуска в цепи  $I_b$  обмотки параллельного возбуждения, а значит, на  $\Phi_{mN}$  ОВ.

Пуск ДПТ НВ в сетевом ЭП производится по реостатной характеристике с большим  $R_{а доб} \gg r_{я}$ . Пусковой момент определяется из условий нормальной коммутации на коллекторе и выбирается двух-трехкратным от  $M_{эмN}$ . Величина  $M_c$  ограничивает  $M_{дин}$  относительно  $M_{эм.кз.доп}$ , что снижает темп переходного процесса разгона.

Потребляемая цепью якоря электроэнергия в соответствии с уравнениями (1.13)–(1.15) запишется

$$W_{1(эл)} = \int_t U_a I_a \cdot dt = \int_t \omega_0 M_{эм} \cdot dt = A_{мех} + \Delta W_{\Sigma v, c},$$

где

$$A_{мех} = \int_t M_{эм} \omega \cdot dt = \int_t M_{\Sigma c.xx} \omega \cdot dt + \int_t J_{\Sigma} \omega \frac{d\omega}{dt} \cdot dt = A_c + \Delta A_{дин}.$$

Как показано на рис. 4.2, пуск начинается с режима КЗ. В начальный момент времени, когда якорь подключается на напряжение  $U_a$ , потребляется  $W_{1(эл)} = W_{эм}$ , которая всецело расходуется на покрытие

потерь  $\Delta W_{\Sigma\nu}$ , равных площади « $0 - \omega_0 - \Pi - M_{\text{эм КЗ}} - 0$ ». Такое потребление  $W_{\text{I(эл)}}$  сохраняется неизменным на всем интервале разгона при меняющемся соотношении в балансе ее составляющих. Пока ЭД достигает скорости  $\omega_c$ , потребляемая энергия все больше расходуется на динамическую и статическую нагрузки и меньше на покрытие потерь, которые снижаются по мере увеличения в системе запаса  $\Delta W_{\text{кин}}$ . С установлением  $\omega = \omega_c$  заканчивается приращение запаса  $\Delta W_{\text{кин}}$ , которое достигает значения  $W_{\text{кин}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_c^2}{2} \Big|_{J_{\Sigma} = \text{const}}$ . Динамическая работа ЭД

прекращается,  $\Delta A_{\text{дин}} = 0$ , а  $W_{1(\text{эл})}$  расходится только на совершение полезной работы по преодолению  $M_c$  и покрытие потерь  $\Delta W_{\text{ав.с.хх}}$ . Мощности, соответствующие названным затратам энергии, отмечены на рис. 4.2. Отметим, что  $\Delta P_{\text{дин}}$  при разгоне, а также связанные с ней потери  $\Delta P_{\text{ав}}$  в несколько раз превышают развиваемую  $P_c$  в установившемся движении ЭП.

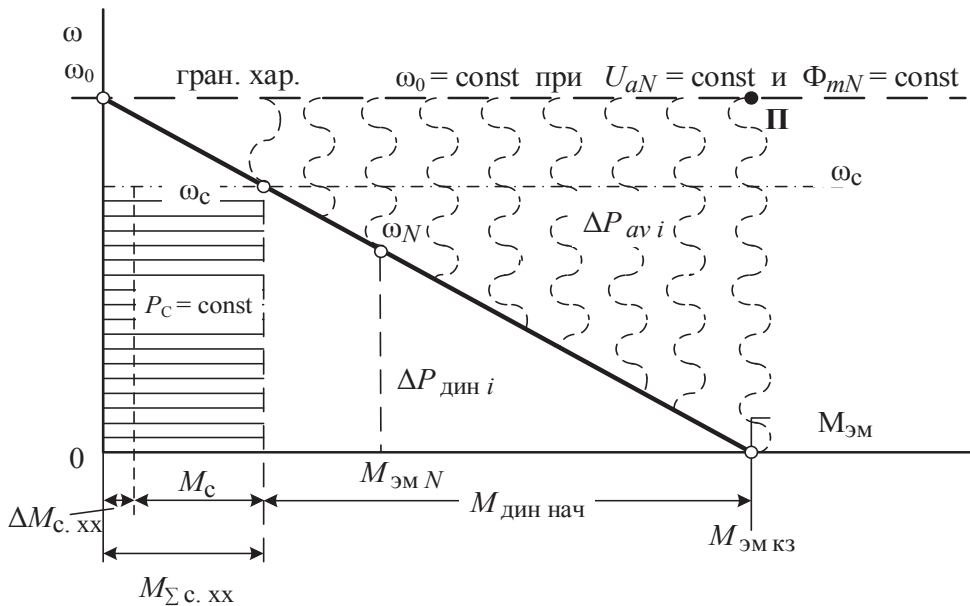


Рис. 4.2. Баланс мощностей ЭП с ДПТ НВ

#### 4.3.1. Сопоставление разгона ДПТ НВ и ПВ

Механическая характеристика ДПТ ПВ отличается нелинейностью из-за непостоянства электромагнитного состояния в функции нагруз-



ки на валу, которую отражает рабочий ток якоря, одновременно выполняющий функцию тока возбуждения  $\Phi_m = f(I_a = I_B)$ . Сравнивая характеристики одинаковых по номинальным данным машин, можно сказать, что  $\Phi_{mN}$  в ДПТ НВ и ПВ соответствует точке номинальной нагрузки. С увеличением нагрузки на валу (статической или динамической)  $\Phi_m$  в ДПТ ПВ усиливается, что отражает граничная характеристика, проходящая достаточно жестко при низких значениях  $\omega$  и больших  $M_c$ .

Усиление  $\Phi_m > \Phi_{mN}$  в ЭП с ДПТ ПВ изменяет баланс напряжения  $U_a = \uparrow E_a + \downarrow I_a \cdot R_a$  и потребляемой мощности  $P_{1(эл)} = \uparrow P_{эм} + \downarrow I_a^2 \cdot R_a$ , в котором снижаются ее затраты на покрытие потерь  $\Delta P_{ав}$  и усиливается электромагнитная мощность на преодоление статической и динамической нагрузки на валу за счет усиления электромагнитного состояния. Принципиальные отличия в энергетике ДПТ НВ и ПВ представлены на рис. 4.3 при одинаковых значениях  $M_{пуск} = M_{эм КЗ}$ .

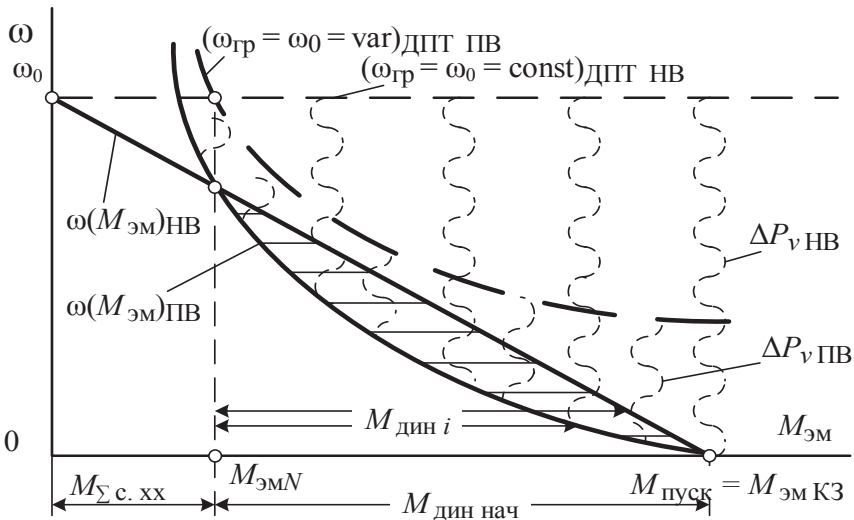


Рис. 4.3. Энергетика ЭП с ДПТ НВ и ПВ

Соотношение выделенных площадей, соответствующих различным потерям мощности, свидетельствует о более экономичной работе ДПТ ПВ ( $W_{1(эл)ПВ} < W_{1(эл)НВ}$ ) в процессе преодоления перегрузки при пуске и разгоне

$$\Delta P_{ав \text{ ДПТ ПВ}} = (P_{1(эл)} - P_{мех}) < \Delta P_{ав \text{ ДПТ НВ}},$$

что объясняется более сильными электромагнитными возможностями и состоянием ДПТ с ПВ на интервале перегрузки (см. с. 64–65).

Однако развиваемые ДПТ НВ и ПВ динамические моменты  $M_{\text{дин}}(\omega)$  в процессе разгона (см. рис. 4.3) не будут одинаковыми, что отразится на времени разгона сравниваемых ЭД.

Энергетическая оценка разгона ДПТ СВ является промежуточной по сравнению с рассмотренными.

#### 4.3.2. Сопоставление разгона ДПТ НВ и АД ФР

Математическое описание энергопреобразования ДПТ НВ и АД ФР указывает на различия в балансах потребляемой электроэнергии. Для большей наглядности рассмотрим энергетику преодоления только динамической нагрузки. Для этого абстрагируемся от совершения электроприводами полезной механической работы, приняв допущение, что  $M_c = \Delta M_{c, \text{хх}} = 0$ , полагая на интервале времени «пуск — разгон» работу ДПТ НВ и АД ФР при совпадающих искусственных механических характеристиках (рис. 4.4), связанную только с преодолением механической инерционности  $J_{\Sigma} = \text{const}$ . Такие условия можно обеспечить с помощью выбора соответствующих паспортных данных машин и внешнего сопротивления  $R_a, r_{\text{доб}}$ .

Динамическая нагрузка характеризуется выполняемой работой  $\Delta A_{\text{дин}}$  в процессе движения по преодолению механической инерционности (которую представляет момент инерции  $J_{\Sigma} = m\rho^2$ , отражающий все инерционные массы  $m$ , приведенные к валу ЭД, [12, с. 112] и приращению запаса  $\Delta W_{\text{кин}}$  в системе «ЭП — РМ».

Учтем, что баланс потребляемой электроэнергии  $W_{1(\text{эл})}$  в рассматриваемых ЭД отличается физическими принципами их работы, конструктивно заложенными в организацию электромагнитного взаимодействия между статором и якорем (ротором) ЭД. Это позволит выявить общность и различие электромеханических и энергетических факторов в названных ЭП.

Сначала представим движение ДПТ НВ или АД ФР в установившемся режиме идеального холостого хода в точке  $\omega_0, M_{\text{эм}} = 0$ , что теоретически возможно по двум причинам:

- при пуске без нагрузки с последующим разгоном от  $\omega_{\text{нач}}$  до  $\omega_{\text{кон}} = \omega_0$ ;
- при торможении без нагрузки от  $\omega_{\text{кон}} > \omega_0$  до  $\omega_{\text{кон}} = \omega_0$ .

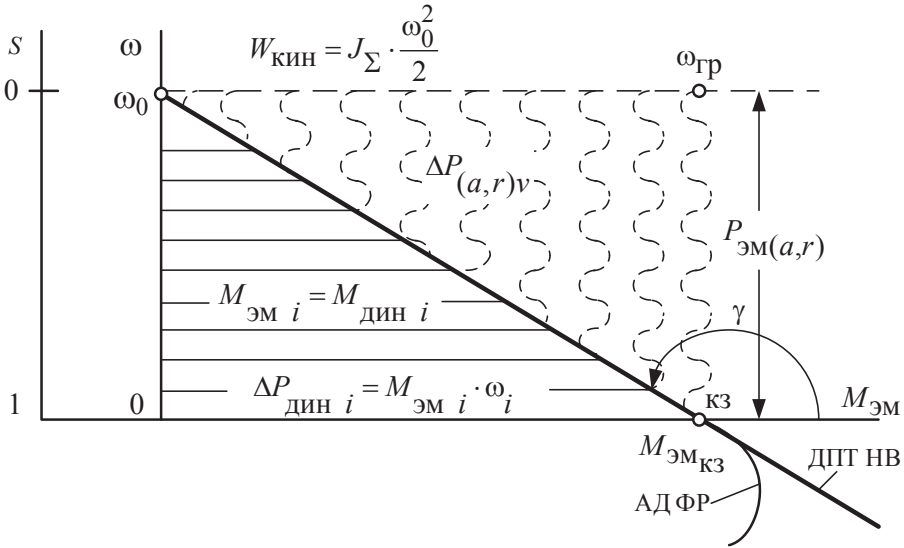


Рис. 4.4. Энергетика ЭП с ДПТ НВ и АД ФР

Движение в установившемся режиме идеального холостого хода может произойти в результате принудительного внешнего воздействия ВУВ или ВВВ изменения скорости системы «ЭП — РМ», сопровождаемого изменением запаса кинетической энергии

$$\pm \Delta W_{\text{кин}} = \int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega_{\text{кон}}} J_{\Sigma} \omega \cdot d\omega = J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{кон}}^2 - \omega_{\text{нач}}^2}{2}.$$

Приняв  $\omega_{\text{кон}} = \omega_0$ , получим

$$\begin{aligned} \pm \Delta W_{\text{кин}} &= J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2 - \omega_{\text{нач}}^2}{2} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 + \omega_{\text{нач}}}{2} (\omega_0 - \omega_{\text{нач}}) \frac{\omega}{\omega} = \\ &= J_{\Sigma} \cdot \omega_0 s \frac{\omega_0 + \omega_{\text{нач}}}{2}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где  $\omega_0 s$  — относительное падение скорости под действием не только статической, но и динамической нагрузки,  $\omega_0 s = \omega_0 - \omega_{\text{нач}} = \Delta\omega$ ;

$s$  — скольжение;

$J_{\Sigma} \cdot \omega_0$  — момент сообщаемого количества движения — § 4.4.3.

Потребляемая из сети активная электроэнергия  $W_{1(\text{эл})}$  или активная механическая энергия со стороны РМ ( $-W_{\text{мех}}$ ) преобразуется в кинетическую энергию при изменении скорости движения в процессе преодоления инерционности  $J_{\Sigma}$ .

Рассмотрим отличия в физических процессах возникновения электромагнитного взаимодействия между статором и якорем ДПТ НВ и статором и ротором АД ФР.

1. В ЭП с ДПТ НВ ведущую роль в электромагнитном взаимодействии между статором и якорем выполняет специальная обмотка независимого возбуждения (ОНВ, см. рис. 2.12). Эта обмотка располагается на полюсах статора и создает в магнитопроводе ЭД электромагнитную среду энергопреобразования, которая характеризуется постоянным во времени и неподвижным в пространстве магнитным потоком  $\Phi_m$ . Обычно ОНВ получает электроэнергию от независимого источника постоянного напряжения  $U_B$ .

Электрическая цепь якоря ДПТ НВ является рабочей, выполняющей силовую функцию в электромеханическом процессе энергопреобразования; для этой цели потребляется электроэнергия от более мощного источника при напряжении  $U_a$ . В проводниках обмотки якоря, включенной через коллекторно-щеточное устройство (механический инвертор) на постоянное напряжение  $U_a$ , протекает переменный ток, концентрические поля которого вступают в электромагнитное взаимодействие с полем потока возбуждения, — см. рис. 2.8. В результате такого взаимодействия магнитных полей создается электромагнитный момент  $M_{эм}$  и противоЭДС  $E_a$ .

Между статором и якорем возникает не только электромагнитное взаимодействие, но и электромеханическое, и энергетическое, которые обусловлены приведением в движение якоря ЭД. Это взаимодействие описывается следующими параметрами:

- рабочая угловая скорость  $\omega = \frac{E_a}{c\Phi_m}$ ;
- угловая скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = \frac{U_a}{c\Phi_m}$ ;
- электромагнитный момент  $M_{эм} = I_a \cdot c\Phi_m$ .

В балансе потребляемой якорем электроэнергии, при принятом выше допущении ( $M_c = \Delta M_{с.хх} = 0$ ), в сравнении с уравнением (1.17) исчезают соответствующие слагаемые; в целом его запись сосредотачивает внимание на развиваемой  $W_{дин}$  и покрытии  $\Delta W_{ав}$

$$W_{лэл} = \int_t U_a \cdot I_a \cdot dt = W_{эм} = \int_t P_{эм} \cdot dt = \int_t P_{мех} \cdot dt + \int_t \Delta P_{ав} \cdot dt,$$

где  $P_{эм} = P_{л(эл)} = U_a I_a = \omega_0 M_{эм} = P_{мех} + \Delta P_{ав}$ .

Здесь  $\Delta P_{av}$  — мощность переменных потерь, покрываемых за счет  $P_{эм} = P_{1(эл)}$ ,  $\Delta P_{av} = I_a^2 R_a$ .

$P_{мех}$  — механическая мощность, которая в рассматриваемых условиях всецело расходуется на преодоление динамической нагрузки,

$$P_{мех} = M_{мех} \omega = J_{\Sigma} \omega \frac{d\omega}{dt} = M_{дин} \omega = P_{дин}.$$

Потребляемая якорем из сети электроэнергия  $W_{1(эл)} = W_{эм}$  на всем интервале энергопреобразования остается неизменной, изменяются лишь величины составляющих в ее балансе, соответствующие мощности  $\frac{dW_{1(эл)}}{dt} = P_{1(эл)} = P_{эм}$ , которые на рис. 4.4 выделены точками

и представлены как площадь  $S_{\Sigma} = 0 - КЗ - \omega_{гр} - \omega_0 - 0$ . Эта площадь включает в себя площади двух одинаковых, но по-разному заштрихованных прямоугольных треугольников:

- нижний треугольник имеет площадь  $S_1 = 1/2$  («0— $\omega_0$ »·« $M_{эм КЗ}$ ») и соответствует динамической мощности  $\Delta P_{дин}$ , которая расходуется на преодоление механической инерционности  $J_{\Sigma}$  в системе «ЭП — РМ» в процессе изменения скорости движения от  $\omega_{нач} = 0$  до  $\omega_{кон} = \omega_0$ ;
- площадь верхнего треугольника  $S_2 = 1/2$  («КЗ— $\omega_{гр}$ »·« $M_{эм КЗ}$ ») в рассматриваемом переходном режиме движения соответствует мощности потерь в цепи якоря  $\Delta P_{ави}$ .

Работа ЭП начинается с режима короткого замыкания (точка КЗ,  $\omega_{нач} = 0$ ;  $M_{эм нач} = M_{эм КЗ}$ ), когда вся энергия  $W_{1(эм)} = W_{эм} = \Delta W_{ав}$  расходуется на покрытие потерь в цепи якоря. По мере разгона, с увеличением  $\omega_i$ , снижается  $M_{дин i} = M_{эм i}$  и все большая часть потребляемой электроэнергии  $W_{1(эм)}$  расходуется на динамическую работу  $\Delta P_{дин}$  преодоления инерционности  $J_{\Sigma}$  в системе путем увеличения запаса  $\Delta W_{кин}$  и уменьшения потерь  $\Delta W_{ав}$ .

По окончании разгона ( $\omega_{кон} = 0$ ,  $M_{дин.кон} = M_{эм КЗ} = 0$ ) устанавливается запас  $W_{кин} = J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2}$ , прекращается потребление электроэнергии ( $W_{1(эм)} = 0$ ), а значит, изменение запаса  $\Delta W_{кин} = 0$ , покрытие  $\Delta W_{ав} = 0$  и совершение  $\Delta W_{мех} = 0$ . Такое идеальное завершение разгона ДПТ НВ физически объясняется тем, что при скорости  $\omega_0 = \frac{E_a}{c\Phi_{mN}} = \frac{U_a}{c\Phi_{mN}}$ ,

когда противоЭДС  $E_a$  уравнивает  $U_a$  ( $E_a = U_a$ ), ток в цепи якоря  $I_a = 0$  и электромагнитный момент  $M_{эм}$  равен нулю. Механический переходный процесс завершен, выполненная механическая работа оценивается КПД  $\eta = 0,5$ . При принятом допущении ЭД имеет  $\omega = \omega_0$  за счет запаса  $W_{кин}$ .

2. В ЭП с АД ФР иной принцип построения электромагнитной связи статора с ротором. Здесь электромагнитное взаимодействие обеспечивается индукционным способом на основе эффекта вращения магнитного потока  $\Phi_{ms}$ , создаваемого трехфазной обмоткой статора. Вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора, в которых индуцируется ЭДС  $E_r$ , обеспечивающая протекание в проводниках ротора индукционного тока  $I_r$ , создающего магнитное поле ротора  $\Phi_{mr}$ , которое вращается в том же направлении. Так создается в АД результирующий магнитный поток  $\Phi_{ms}$ , вращающийся с угловой частотой приложенного напряжения  $\omega_0 = 2\pi f_V/p$ . Обмотки статора и ротора одновременно выполняют функции возбуждения и рабочих обмоток, обеспечивающих электромеханический процесс энергопреобразования. Баланс потребляемой цепью статора электроэнергии при принятых допущениях ( $P_c = \Delta P_{с.хх} = 0$ ) отличается от уравнений (1.16) и (1.17)

$$\begin{aligned} W_{1эл} &= W_{эм} + \Delta W_{sv} = \int_t P_{эм} \cdot dt + \int_t \Delta P_{sv} \cdot dt = \\ &= \int_t P_{мех} \cdot dt + \int_t \Delta P_{rv} \cdot dt + \int_t \Delta P_{sv} \cdot dt, \end{aligned}$$

где  $W_{1(эл)} > W_{эм}$ , а  $W_{эм}$  — индукционно передаваемая от статора к ротору электромагнитная энергия; раскрывается аналогично записанному выше для ДПТ НВ с поправкой на обозначение индекса цепи

$$W_{эм} = \int_t P_{эм} \cdot dt = \int_t P_{мех} \cdot dt + \int_t \Delta P_{rv} \cdot dt;$$

$\Delta P_{sv}$  — мощность потерь в цепи статора,  $\Delta P_{sv} = 3I_s^2 \cdot R_s$ ;

$P_{мех}$  — механическая мощность, как и в ДПТ НВ, расходуется только на преодоление динамической нагрузки,

$$P_{мех} = M_{мех} \omega = M_B \omega = J_{\Sigma} \omega \frac{d\omega}{dt} = M_{дин} \omega = P_{дин};$$

$\Delta P_{rv}$  — мощность переменных потерь в цепи ротора, которая соответствует уравнению (2.15),  $\Delta P_{rv} = 3I_r^2 \cdot R_r = M_{эм} \cdot \omega_0 s$ .

Пуск АД ФР начинается с режима КЗ, в котором  $W_{\text{эм}}$  полностью идет на покрытие потерь в сопротивлении цепи ротора  $\Delta W_{rv}$ . На интервале разгона  $W_{\text{эм}}$  расходуется на совершение динамической работы и покрытие сокращающихся потерь  $\Delta W_{rv}$ . По достижении ротором угловой скорости  $\omega = \omega_0$  система имеет запас  $W_{\text{кин}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2}$ , а приращение  $\Delta W_{\text{кин}}$  прекращается. При этом прекращается потребление активной электроэнергии  $W_{l(\text{эл})}$  и передача  $W_{\text{эм}}$  на ротор,  $\Delta P_{rv} = 0$ . При идеализированном равенстве  $\omega = \omega_0$  проводники ротора перестают пересекаться вращающимся магнитным потоком;  $E_r = 0$  и  $I_r = 0$ , что и поясняет энергетику режима идеального холостого хода АД. Однако, для оценки энергетики АД, необходимо учитывать потери и в цепи статора  $\Delta W_{sv}$  (см. § 4.4.4, п. 4 и 5), которые приводят к значению КПД менее  $\eta = 0,5$ .

## 4.4. Динамика переходных режимов движения

### 4.4.1. Принятые допущения

В данной главе ограничимся лишь упрощенным представлением так называемого механического переходного процесса, приняв следующие допущения:

- рассматриваем переходные процессы с использованием статических характеристик, полагая моменты, токи и скорости представленными мгновенными значениями (без учета электромагнитной инерционности в электрических цепях);
- в целях раскрытия принципиальных особенностей динамической нагрузки, несколько абстрагируемся от реальных условий в том, что не будем учитывать статическую нагрузку, полагая  $P_c = \Delta P_{c.xx} = 0$  или  $M_c = \Delta M_{c.xx} = 0$ ;
- поскольку записанные выше балансы электромагнитной энергии в ДПТ НВ и АД ФР идентичны, в дальнейшем будем использовать единую объединяющую их запись для цепей якоря и ротора

$$W_{\text{эм}(a,r)} = \int_t P_{\text{эм}(a,r)} \cdot dt = \int_t \Delta P_{\text{мех}} \cdot dt + \int_t \Delta P_{(a,r)v} \cdot dt. \quad (4.2)$$

Необходимо сказать, что, в механическом переходном процессе разгона (или замедления) движения ЭП с линейной механической характеристикой, непрерывное изменение переменных энергопреобразования  $M_{\text{эм}}(t)$  и  $\omega(t)$  происходит по экспоненциальному закону. На основе неоднородного (с правой частью) линейного дифференциального уравнения первого порядка  $T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{\text{уст}}$  запишем его ре-

шение:  $\omega = \omega_{\text{уст}} + Ce^{-\frac{t}{T_m}}$ , где  $C$  — постоянная интегрирования, определяется из начальных условий,  $C = \omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}}$ . Окончательно решение принимает вид

$$\omega(t) = \omega_{\text{уст}} + (\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{уст}})e^{-\frac{t}{T_m}} = \omega_{\text{уст}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + \omega_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (4.3)$$

Поскольку  $M_{\text{эм}}$  и  $\omega$  в координатах  $\omega = f(M_{\text{эм}})$  связаны между собой линейно, решение для момента будет аналогично

$$\begin{aligned} M_{\text{эм}}(t) &= M_{\text{эмуст}} + (M_{\text{эмнач}} - M_{\text{эмуст}})e^{-\frac{t}{T_m}} = \\ &= M_{\text{эмуст}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + M_{\text{эмнач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где  $T_m$  — электромеханическая постоянная времени механической инерции,  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Ом}}{\text{В}} = \frac{\text{В}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{с}^3}{\text{В}^2 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{А}} = \text{с}$ ,  $T_m = J_{\Sigma} \cdot \frac{1}{\beta} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dM_{\text{эм}}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{(a,r)}}{(c\Phi_m)_2}$ .

Здесь  $\beta$  — жесткость механической характеристики ЭП,  $\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ , —

см. уравнение (1.10),  $\beta = \frac{\Delta M_{\text{эм}}}{\Delta \omega} = \frac{dM_{\text{эм}}}{d\omega}$ .

#### 4.4.2. Физико-математическое описание энергетики и динамики разгона ЭП

Продолжим сопоставление движения ДПТ НВ и АД ФР (см. рис. 4.4) на искусственных механических характеристиках, принятых совпадающими и линейными,  $\beta = \text{const}$ . Параметры ЭП полагаем величинами постоянными:  $J_{\Sigma} = \text{const}$ ,  $R_{\Sigma(a,r)} = \text{const}$  и  $\Phi_{mN} = \text{const}$ .



Переменные энергопреобразования  $M_{\text{эм}}(t)$  и  $\omega(t)$ , представленные в уравнениях (4.3) и (4.4), опишем и определим в соответствии с начальными и идеализированными конечными условиями переходного процесса, вызванного включением ЭД на напряжение источника электроэнергии.

1. В точке  $t = 0$ , когда  $e^{-\frac{t}{T_m}} = 1$ , в сетевом ЭП происходит включение ЭД на полное напряжение сети  $U_a$ . Для убедительности используем здесь, при условии заранее поданного возбуждения, более простые физические выражения, относящиеся к ДПТ НВ, которые приводят к идентичным заключениям и по АД ФР.

Ведущую функцию в процессе энергопреобразования берет на себя электромагнитный момент

$$M_{\text{эм}}(t) = c\Phi_{mN} \cdot \dot{I}_{a\_пус} = M_{\text{эмнач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} = M_{\text{эмКЗ}} \Big|_{t=0},$$

а поведение скорости становится ведомым

$$\omega(t) = \omega_{\text{уст}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + \omega_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} = 0 + 0,$$

где  $I_{a\_пус}$  — ток якоря в режиме КЗ,  $I_{a\_пус} = \frac{U_a - E_{a\_нач}}{R_a} = I_{\text{КЗ}}$ ;

$E_{a\_нач}$  — начальная противоЭДС,  $E_{a\_нач} = c\Phi_{m\omega_{\text{нач}}}$ .

Безусловно, подача напряжения на ЭД сопровождается определенным переходным процессом в электрической цепи с проявлением коммутационных и тепловых флуктуаций, физическая природа которых заключена в дискретности электрических зарядов.

Полагая бесконечно большую мощность источника электроэнергии, пренебрегаем незначительным кратковременным падением напряжения при включении ЭД. Имеет место весьма кратковременное протекание режима КЗ, в котором вся потребляемая якорем (ротором) электромагнитная энергия, в отличие от уравнения (4.2), покрывает потери на нагревание названных цепей

$$W_{\text{эм}(a,r)} = \int P_{(a,r)v} \cdot dt. \quad (4.5)$$

2. На интервале времени от  $t = (+)0$  до  $t = \infty$ , когда совершаются пуск и разгон, ведущая функция в энергопреобразовании постепенно переходит к  $\omega(t)$ . Происходит это в момент включения сетевого

ЭП на постоянное напряжение:  $U_a$  в ДПТ НВ, при заранее поданном возбуждении или  $U_s$  при  $f_1$  в АД ФР. В результате потребления якорем (или ротором) электромагнитной энергии  $W_{эм} = W_{эл} = U I_{КЗ}$  (еще при  $\omega = 0$ ), ток  $I_{КЗ}$  является обусловленным конкретными параметрами электрических цепей ЭП:  $\Phi_m$  и  $R_{m(a,r)}$ . Поэтому уже в режиме КЗ возникает электродинамическое взаимодействие между статором и якорем (ротором).

В связи с воздействием магнитного потока статора на ток КЗ создается электромагнитный момент  $M_{эм} = \Phi_m I_{КЗ}$ :

$$M_{эм} = M_{эм КЗ} = M_{дин} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \bigg|_{J_{\Sigma} = \text{const}}, \quad (4.6)$$

который при  $\omega = 0$  указывает на возможность развития ускорения. Подтверждают это и производные переменных энергопреобразования:

$$\frac{dM_{эм}}{dt} = \dot{M}_{эм}(0) \text{ и } \frac{d\omega}{dt} = \dot{\omega}(0),$$

которые при  $t = (+)0$ , если  $M_c = \Delta M_{c.xx} = 0$  имеют максимальные значения.

Под действием  $M_{дин} = M_{эм КЗ}$  в соответствии с уравнением (4.6) начинается увеличение скорости  $\omega(t)$ . Конкретизируются и выражения экспоненциального закона изменения переменных энергопреобразования

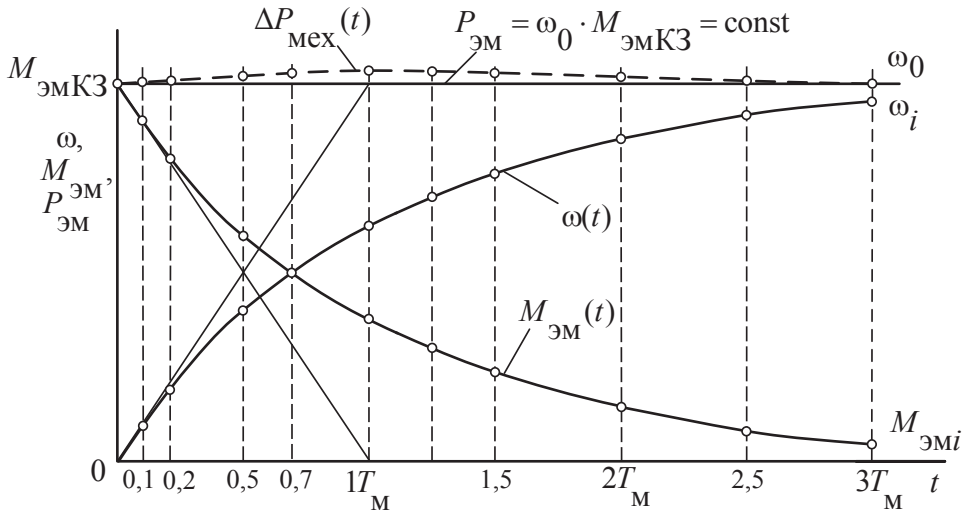
$$\omega(t) = \omega_{уст} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + \omega_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (4.7)$$

где в рассматриваемых условиях  $\omega_{нач} = 0$ , а  $\omega_{уст} = \omega_0$ ;

$$M_{эм}(t) = M_{эм КЗ} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (4.8)$$

где  $M_{эм КЗ} = M_{эм нач}$ , а  $M_{эм кон} = 0$ .

На рис. 4.5 изображены зависимости  $M_{эм}(t)$  и  $\omega(t)$  во времени кратном  $T_m$ , что обеспечивает удобство построения экспонент. Например, при  $t = T_m$ ,  $\omega(t)$  еще не достигает значения  $\omega_0$  на 36,8 %, при  $t = 2T_m$  — на 13,5 %, а при  $t = 3T_m$  — всего на 5 %. Аналогично снижаются значения  $M_{эм}(t)$  от  $M_{эм КЗ}$  до нуля. Время установления переменных энергопреобразования с достаточной для практики точностью считают  $t_{уст} = (3...5)T_m \approx \infty$ , когда физическая величина на 5 % и менее еще не достигает своего установившегося значения.


 Рис. 4.5. Зависимости  $M_{эм}(t)$  и  $\omega(t)$  во времени кратном  $T_M$ 

Максимальные значения экспоненты при построении приняты базовыми, равными  $\omega_0 = M_{эм\text{ КЗ}} = 1$ , взятыми за 100 %. Текущие мгновенные значения  $\omega_i$  и  $M_{эми}$  представлены относительными величинами от соответствующих базовых.

Построенные экспоненты убеждают, что значения физических величин во времени асимптотически приближаются к своим пределам:  $M_{эми}$  устремлен к нулю, а  $\omega_i$  — к  $\omega_0$ .

Произведение уравнений (4.7) и (4.8) выражает математическое описание изменения на интервале времени от  $t = 0$  до  $t = \infty$  механической мощности  $\Delta P_{мех}$ . В энергетическом смысле это означает процесс изменения баланса потребляемой якорем (ротором) электроэнергии  $W_{эм(a, r)}$ , то есть процесс перехода от теплоэлектрического баланса режима КЗ (4.5), к теплоэлектромеханическому (4.2).

Развиваемая на валу ЭП  $\Delta P_{мех}$  активно вытесняет энергетику режима КЗ, преобразуя ее в энергетику электромеханического энергопреобразования. При условии  $P_c = \Delta P_{с. хх} = 0$ ,  $\Delta P_{мех}$  представляет собой

$\Delta P_{динi} = J_{\Sigma} \omega_i \frac{d\omega}{dt}$  с физической направленностью на преодоление ме-

ханической инерционности  $J_{\Sigma}$  и на приращение запаса  $\Delta W_{кин}$  в системе «ЭП — РМ». Представим сказанное в виде произведения уравнений (4.7) и (4.8)

$$\begin{aligned}
\Delta W_{\text{мех}i}(t) &= \Delta W_{\text{дин}i}(t) = \Delta W_{\text{кин}i}(t) = \int_{t=0}^{\infty} \Delta P_{\text{дин}i} \cdot dt = \\
&= \int_{t=0}^{\infty} \omega_i(t) \cdot dt \cdot \int_{t=0}^{\infty} M_{\text{эм}i}(t) \cdot dt = \\
&= \int_{t=0}^{\infty} \left[ \omega_{\text{уст}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) M_{\text{эмнач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} \right] \cdot dt = \\
&= \int_{t=0}^{\infty} \left[ \omega_{\text{уст}} \cdot M_{\text{эмнач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} - \omega_{\text{уст}} \cdot M_{\text{эмнач}} \cdot \left( e^{-\frac{t}{T_m}} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} \right) \right] \cdot dt = \\
&= \int_{t=0}^{\infty} \left[ \omega_0 M_{\text{эмКЗ}} \cdot \left( e^{-\frac{t}{T_m}} - e^{-\frac{2t}{T_m}} \right) \right] \cdot dt, \tag{4.9}
\end{aligned}$$

в котором обнаруживается, что  $\Delta W_{\text{мех}i}(t)$  представляет собой некоторую долю потребляемой якорем (ротором) электроэнергии  $W_{\text{эм}(a, r)i}$ , выраженную через разность экспонент, в два раза отличающихся постоянными  $T_m$  и  $T_m/2$ . Чтобы выполнить количественную и качественную оценку выявленного различия, необходимо определить мгновенные значения  $\Delta P_{\text{дин}i}(t)$  как долю от потребляемой  $P_{\text{эм}} = \omega_0 M_{\text{эмКЗ}} \equiv W_{\text{эм}(a, r)}$ . Для этого воспользуемся рис. 4.5, на котором представлены вычисленные мгновенные значения переменных  $\omega_i(t)$  и  $M_{\text{эм}i}(t)$ , позволяющие определить их произведения, равные  $\Delta P_{\text{дин}i}(t)$ . Результаты сведены в табл. 2.

Произведение  $\omega_i(T_m)$  на  $M_{\text{эм}i}(T_m)$ , равное  $\Delta P_{\text{мех}i}(T_m)$ , показано на рис. 4.5 как относительное приращение  $\Delta P_{\text{мех}}$  к  $P_{\text{эм}(a, r)\text{КЗ}} = \omega_0 M_{\text{эмКЗ}} \equiv W_{\text{эмКЗ}}$  от  $t = (+)0$  до  $t = \infty$ , которое происходит относительно постепенно; при  $t = 0,7T_m$  достигает максимума в 2,5 % от  $P_{\text{эм}}$ , что свидетельствует о незначительном увеличении потребления электроэнергии от источника.

Таблица 2

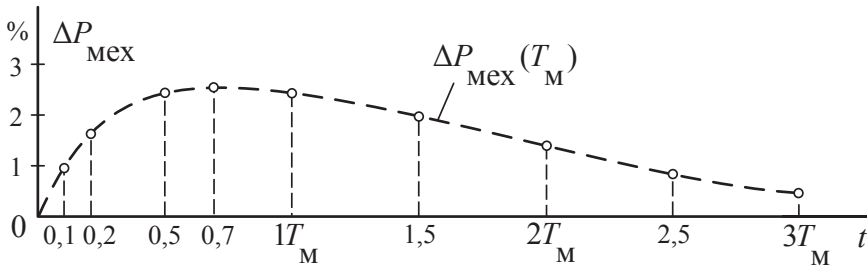
**Зависимости скорости, момента и мощности  
от электромеханической постоянной времени**

Энергетические величины	$T_m$ , о. е.							
	0,1	0,2	0,7	1	1,5	2	2,5	3
$\omega_0 \cdot M_{\text{эмКЗ}}$	1	1	1	1	1	1	1	1
$\omega_i(T_m)$	0,09	0,18	0,5	0,638	0,78	0,865	0,92	0,95

Окончание табл. 2

Энергетические величины	$T_M, \text{о.е.}$							
	0,1	0,2	0,7	1	1,5	2	2,5	3
$M_{эм}(T_M)$	0,91	0,82	0,5	0,362	0,22	0,135	0,08	0,05
$\Delta P_{мех}(T_M)$	0,08	0,15	0,25	0,23	0,17	0,12	0,074	0,048

Для качественной оценки результата на рис. 4.6 показано увеличение в 10 раз изменения  $\Delta P_{мех}(T_M)$ . На интервале времени от  $t = (+)0$  до  $t = (3...5)T_M$  выявлен всплеск  $\Delta P_{мех}$  с последующим его затуханием, который математически характеризует флуктуацию физической величины, обусловленную разностью экспонент (4.9), различающихся постоянными времени инерции. Этот всплеск  $\Delta P_{мех}$  из-за своей незначительности практически не оказывает влияния на установленное еще в режиме КЗ потребление якорем (ротором) электроэнергии, поэтому принято считать  $P_{эм(a, r)} = \omega_0 M_{эм КЗ} = W_{эм} = \text{const.}$

Рис. 4.6. Зависимость  $\Delta P_{мех}(T_M)$ 

В целях углубления понимания сущности рассматриваемых физических явлений используем уравнение (4.9):

- при  $t < 0$  ЭД еще не включен на источник электроэнергии,  $U = 0$ ,  $\omega = 0$  и  $W_{эм} = 0$ , то есть не потребляется;
- при  $t = 0$  происходит подача напряжения  $U_a$  в ДПТ НВ при  $\omega_a = 0$  или  $U_s$  с частотой  $f_1$  при  $\omega_r = 0$  в АД ФР; благодаря отсутствию каких-либо учитываемых инерционностей и постоянству параметров электрических цепей, мгновенно устанавливается потребление якорем или ротором электромагнитной энергии  $W_{эм} = \omega_0 M_{эм КЗ}$ , пропорциональной  $\Delta P_{(a, r) \nu}$ , — см. баланс урав-

нения (4.5). Отметим, что входящий в выражение  $W_{\text{эм}}$  множитель  $\omega_0$  не только символизирует факт включения ЭД на определенный источник электроэнергии ( $\omega_0 = \frac{U_a}{c\Phi_m}$  в ДПТ НВ или  $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$

в АД ФР), но и одновременно предсказывает возможное развитие процесса дальнейшего энергопреобразования — см. § 4.4.3;

- при  $t = {}_{(+)}0$  протекающий ток  $I_{\text{кз}(a, r)}$  вступает в электромагнитное взаимодействие с магнитным потоком статора  $\Phi_m$ ; возникает электромагнитный момент, равный динамическому

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{дин}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot d\omega}{dt}, \text{ указывающему на ускорение, которое при-}$$

водит к возникновению и развитию динамической мощности

$$\Delta P_{\text{мех}} = \omega_i M_{\text{эм}i} = \Delta P_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} \text{ — новой и весьма активной со-}$$

ставляющей в балансе  $W_{\text{эм}}$  (4.2). Появление динамической мощности равноценно изменению характера процесса энергопреобразования от теплоэлектрического к теплоэлектро механическому. При неизменной жесткости механических характеристик  $\omega(M_{\text{эм}})$  ЭД на интервале переходного процесса, который сопровождается уменьшением во времени величин производных от переменных энергопреобразования  $d\omega/dt(t)$  и  $dM_{\text{эм}}/dt(t)$ , когда сами переменные изменяются во времени по экспоненциальному закону (скорость  $\omega$  устремлена к значению  $\omega_0$ , а  $M_{\text{эм}} = M_{\text{дин}}$  стремится к нулю), происходят количественные и качественные перемены в составляющих электромагнитной энергии при

$$W_{\text{эм}} = \text{const} = \uparrow \Delta W_{\text{кин}} + \downarrow \Delta W_{(a, r)v};$$

- при  $t$  на интервале от  $t = {}_{(+)}0$  до  $t = (3...5)T_m$  интенсивно возрастает совершение в системе «ЭП — РМ» динамической работы по преодолению механической инерционности  $J_{\Sigma}$  и увеличению запаса  $\Delta W_{\text{кин}}$  за счет сокращения энергии на покрытие тепловых потерь  $\Delta W_{(a, r)v}$ , что ранее иллюстрировалось на рис. 4.4. В итоге приращение запаса кинетической энергии  $\Delta W_{\text{кин}}$  происходит по линейному закону с постоянным ускорением, представленным на рис. 4.7.

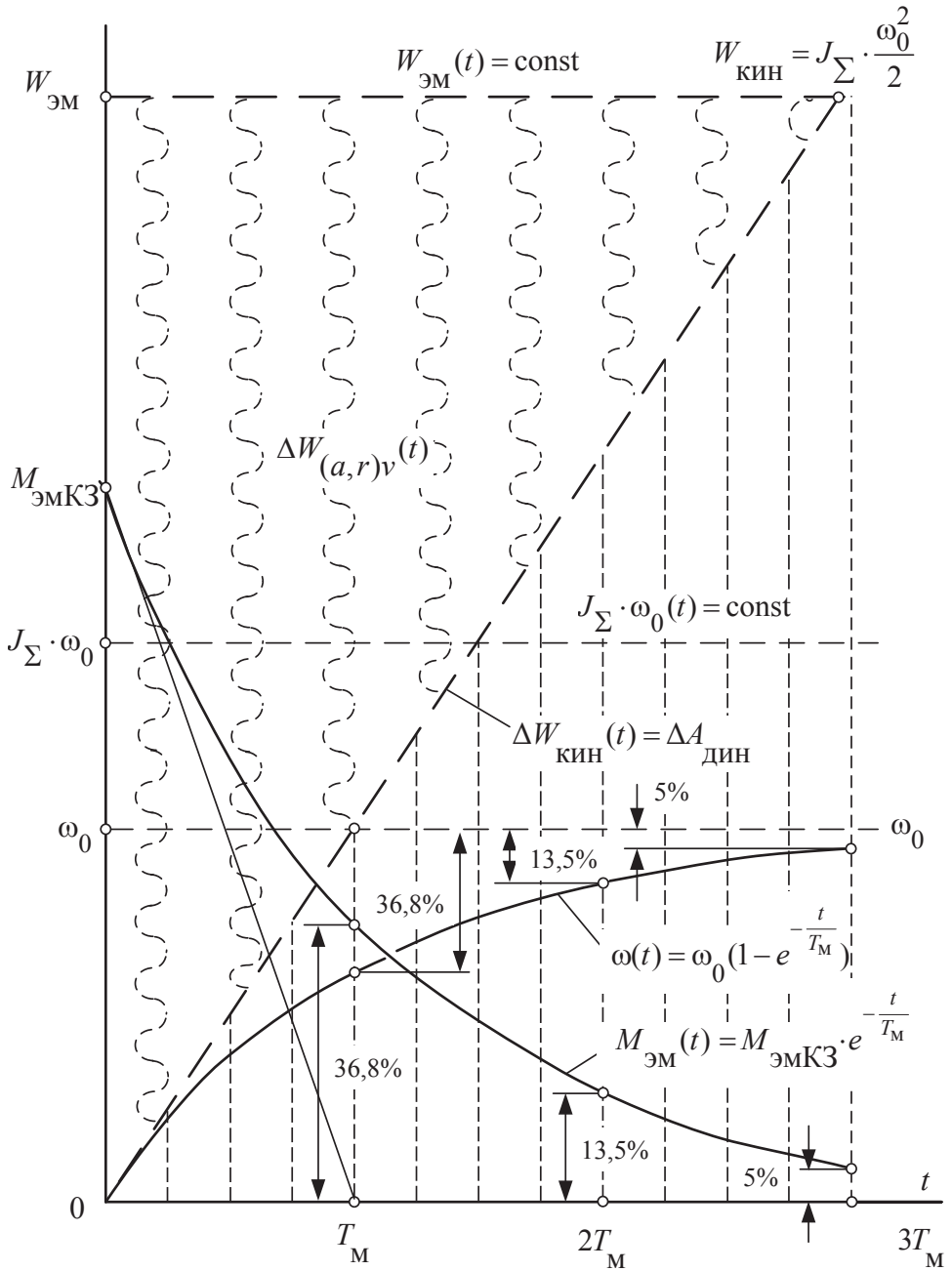


Рис. 4.7. Интерпретация электромеханического процесса энергопреобразования

Отметим, что сопоставление пуска и разгона ДПТ НВ и АД ФР, рассмотренное в § 4.3.2 на совпадающих статических характеристиках  $\omega = f(M_{\text{эм}})$  (см. рис. 4.4) и в § 4.4.2 с помощью нагрузочных диаграмм  $\omega = f(t)$  и  $M_{\text{эм}} = f(t)$  (рис. 4.7), дает адекватное физическое толкование электромеханического процесса энергопреобразования.

В заключение отметим: при  $t = \infty$ , когда  $e^{-\frac{\infty}{T_m}} = 0$  и устанавливаются значения  $\omega = \omega_0$  и  $M_{\text{эм}} = 0$ , прекращается приращение запаса  $\Delta W_{\text{кин}}$  ( $W_{\text{кин}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2}$ ) и потребление от источника  $P_{\text{эм}} = \omega_0 M_{\text{эм}} = 0$ . Формально это обусловлено режимом идеального холостого хода при  $E_a = U_a$  в ДПТ НВ и  $E_r = 0$  в АД ФР в соответствии с принятыми допущениями.

Не могут быть равными нулю  $\Delta P_{\text{с.хх}}$  и  $\Delta M_{\text{с.хх}}$  даже при  $P_c = 0$ . Значит,  $M_{\text{эм}} = \Delta M_{\text{с.хх}}$  обеспечивает установившееся движение со скоростью  $\omega_{\text{хх}} < \omega_0$ , но близкой к ней, когда  $E_a < U_a$  (или  $E_r > 0$  в АД), имеется в системе запас  $W_{\text{кин}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{хх}}^2}{2}$  и  $W_{\text{эм}}$  потребляется на покрытие потерь холостого хода  $W_{(a,r)v} = \Delta W_{(a,r)v} \equiv \Delta P_{\text{хх}} = \Delta M_{\text{хх}} \cdot \omega_{\text{хх}}$ .

#### 4.4.3. Момент количества движения

Раскроем физическое понятие момента количества движения, существующее прежде всего сетевым электроприводам с ДПТ НВ и АД ФР, включенным на полное напряжение источника электроэнергии. Численно момент количества движения (импульс или удар) определяется производной от достигнутого запаса  $W_{\text{кин}}$  по установившейся угловой скорости  $\omega_{\text{уст}}$ .

Полагая  $J_{\Sigma} = \text{const}$ , можно записать,  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$ ,

$$\frac{dW_{\text{кин}}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{уст}}^2}{2} \right) = J_{\Sigma} \omega_{\text{уст}},$$

где  $\omega_{\text{уст}} = \omega_{\text{с}}$ , либо  $\omega_{\text{уст}} = \omega_{\text{хх}}$  при  $P_c = 0$ , либо  $\omega_{\text{уст}} = \omega_0$  при идеализации ( $P_c = \Delta P_{\text{с.хх}} = 0$ ).

В общем случае величина  $J_{\Sigma} \omega_{\text{уст}}$  совершенно не зависит от способа сообщения запаса  $W_{\text{кин}}$  любой механической системе. Объясняется это тем, что механическая система всегда содержит в себе инер-



ционные массы  $m$ , которые могут быть приведены к одному валу [12, с. 112] и выражены суммарным моментом инерции  $J_{\Sigma} = m \rho^2$ , где  $\rho$  — радиус инерции, на котором от оси вала сосредоточены центры тяжести масс. Поэтому  $J_{\Sigma}$  непосредственно отражает механическую инерционность системы, которую приходится преодолевать в переходных режимах движения путем сообщения извне определенного количества энергии. Величина  $J_{\Sigma}\omega_{\text{уст}}$  не только не зависит от способа сообщения энергии и ее источника, но и от энергетических свойств любого типа используемого двигателя.

В электроприводах (особенно сетевых) с ДПТ НВ и АД ФР процесс энергопреобразования всегда заранее обусловлен предстоящей динамической нагрузкой на валу и количеством потребляемой электроэнергии именно через информацию, содержащуюся в моменте количества движения. Названная обусловленность оказывается заложенной в систему еще в мгновение времени включения ЭД на определенное напряжение источника электроэнергии при известном  $J_{\Sigma}$ , а именно — в значение момента количества движения  $J_{\Sigma}\omega_0$  в идеальном его воплощении:

- в ЭП с ДПТ НВ  $J_{\Sigma}\omega_0$  всецело зависит от величины приложенного к якорию постоянного напряжения  $U_a$ , которое определяет

$$\omega_0 = \frac{U_a}{c\Phi_{mN}};$$

- в АД ФР  $J_{\Sigma}\omega_0$  определяется приложенным к обмотке статора трехфазным напряжением и его частотой  $f_1$ , от которой зависит угловая скорость вращающегося магнитного поля  $\omega_0 = 2f_1/p$ .

Таким образом, момент количества движения своевременно аккумулирует в себе информацию на перспективу развития динамики переходного движения в процессе преодоления механической инерционности, а также информацию о необходимом запасе кинетической энергии, которая потребуется для этой цели.

Время переходного процесса для достижения скорости установившегося значения  $\omega_{\text{кон}} = \omega_{\text{уст}} = \omega_0$  не зависит от  $J_{\Sigma}\omega$ . Продолжительность переходного процесса всецело определяется электромеханическими свойствами ЭД. Развиваемый электромагнитный момент определяется электромагнитным состоянием ЭД и параметрами его электрических цепей. При  $M_c = 0$ , когда  $M_{\text{эм}} = M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}$  и предопределяет

величину углового ускорения  $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ , то есть интенсивность переходного движения, время переходного процесса определяется

$$t_{\text{пп}} = \int_{\omega_{\text{нач}}}^{\omega_{\text{кон}}} \frac{J_{\Sigma}}{M_{\text{эмдин}}} d\omega = \frac{J_{\Sigma}}{M_{\text{эмдин}}} (\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}),$$

которое будет тем меньше, чем больше величина развиваемого  $M_{\text{эм}}$  со стороны ЭП.

Сосредоточим внимание на размерности производных от  $M_{\text{эм}}$ ,  $\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$ , и  $W_{\text{кин}}$ ,  $\frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{рад}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$ , по скорости

$$\frac{dW_{\text{кин}}}{d\omega} = J_{\Sigma} \omega_0,$$

что соответствует  $\frac{dM_{\text{эм}}}{d\omega} = \frac{dM_{\text{дин}}}{d\omega}$ .

Одинаковая размерность производных указывает на непосредственную взаимосвязь процесса энергопреобразования и электромеханической самоорганизации в системе «ЭП — РМ». Перспектива неизменного потребления электроэнергии  $W_{\text{I(эл)}}$  была задана фактором включения ЭД на полное неизменное напряжение источника электроэнергии и параметрами электромеханических цепей. Неизменное потребление электроэнергии обусловило неизменный момент количества движения  $J_{\Sigma} \omega = \frac{dW_{\text{кин}}}{d\omega}$  с перспективной реализацией преодо-

ления инерционности  $J_{\Sigma}$  и создания запаса  $W_{\text{кин}}$  в системе «ЭП — РМ».

Производная  $\frac{dM_{\text{эм}}}{d\omega}$  характеризует электромеханические процессы

в электроприводе и его энергетику в соответствии с электромагнитным состоянием ЭД и электрическими параметрами его силовых цепей.

Отметим, что не всегда  $J_{\Sigma} \omega_{\text{уст}} = J_{\Sigma} \omega_0$  остается неизменным. В управляемых по скорости ЭП изменение скорости может быть ступенчатым или плавным. Например, в резисторных ЭП с ДПТ НВ обычно используют ступенчатое изменение  $\Phi_m$  и  $R_a$ ; в ДПТ ПВ и СВ  $\Phi_m$  изменяется с изменением нагрузки на валу; в многоскоростных АД КЗ ступенчато изменяют число пар полюсов  $p$  — все это вызывает изменение  $\omega_0$ . Если в соста-

ве ЭП имеется УПЭЭ, то управление скоростью производится плавно: в системе «Г — ДПТ НВ» по экспоненциальному закону изменяются  $U_a$  и  $\omega_0$ ; в системе с полупроводниковым «ПЭЭ — ДПТ НВ» с задатчиком интенсивности реализуют линейный закон управления  $U_a$  и  $\omega_0$ ; в частотно-управляемых АД и СД по системе «УПЧ — Д» может быть обеспечен любой закон изменения  $U_s, f_1$  и  $\omega_0$ . Во всех перечисленных случаях момент количества движения не остается величиной постоянной.

#### 4.4.4. Уравнения составляющих баланса потребляемой энергии

Рассмотрим отдельно каждую составляющую баланса электрической энергии.

1. Чтобы определить приращение запаса кинетической энергии  $\Delta W_{\text{кин}}$ , используем выражение динамической мощности, которая при принятых допущениях запишется  $P_{\Sigma} = P_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \omega \cdot d\omega/dt$ .

При рассмотрении механического переходного процесса по преодолению механической инерционности  $J_{\Sigma}$  в системе «ЭП — РМ» с линейной механической характеристикой (к которой относим ДПТ НВ и АД ФР), прежде всего обратим внимание на законы поведения во времени энергетических величин  $\Delta W_{\text{кин}}(t)$ ,  $W_{\text{эм}}(t)$  и  $\Delta W_{(a, r)v}(t)$ .

Приращение кинетической энергии  $\Delta W_{\text{кин}}$  определяется через общность записи динамической мощности, которая выражается как разность  $P_{\text{эм}}$  и потерь  $\Delta P_{(a, r)v}$

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{эм}} - \Delta P_{(a, r)v} = M_{\text{эм}} \omega_0 + M_{\text{эм}} \omega_0 s = M_{\text{эм}} \omega_0 (1 - s).$$

Потребление цепью якоря (ротора) электромагнитной энергии  $W_{\text{эм}}$  можно записать через интеграл  $W_{\text{эм}}(t)$  с учетом произведения его составляющих  $M_{\text{эм}}(t)$  и  $\omega(t)$  по законам уравнений (4.7) и (4.8), отражающих их непрерывное изменение от начальных значений до установившихся. Поскольку  $P_{\text{дин}}$  непосредственно связана с непрерывным изменением скорости, рационально ее мгновенное значение выразить через ее относительное изменение в процессе преодоления динамической нагрузки  $\Delta\omega = (\omega_0 - \omega_{\text{нач}}) = \omega_0 s$ , которое получено в уравнении (4.1),

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{кин}} &= \int_t \Delta P_{\text{дин}} \cdot dt = \int_{\Delta\omega_{\text{нач}}}^{\Delta\omega_{\text{кон}}} J_{\Sigma} \cdot \Delta\omega \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \cdot dt = \\ &= \int_{s_{\text{нач}}}^{s_{\text{кон}}} J_{\Sigma} \omega_0^2 \cdot s \cdot ds = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} (s_{\text{кон}}^2 - s_{\text{нач}}^2). \end{aligned} \quad (4.10)$$

В полученном решении представлены и момент количества движения, и запас кинетической энергии по окончании переходного процесса.

2. При определении переменных потерь электроэнергии  $W_{(a,r)v}$  исходят из выражения потерь мощности  $\Delta P_{(a,r)v} = M_{эм} \omega_0 s$  в соответствии с уравнением (2.15), справедливым и для ДПТ НВ. Здесь удобно представить  $M_{эм} = M_{дин} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}$  и записать мгновенное значение скорости (как и в п. 1) через  $\omega = \omega_0 s$ , то есть выразить относительное изменение скорости

$$\begin{aligned} \Delta W_{(a,r)v} &= \int_t \Delta P_{(a,r)v} \cdot dt = \int_t M_{эм} \omega_0 s \cdot dt = \\ &= \int_t J_{\Sigma} \omega_0 s \frac{d\omega}{dt} \cdot dt = \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} J_{\Sigma} \omega_0 s \cdot d(\omega_0 s) = \\ &= \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} J_{\Sigma} \omega_0^2 \cdot s \cdot ds = \frac{J_{\Sigma} \omega_0^2}{2} (s_{кон}^2 - s_{нач}^2). \end{aligned} \quad (4.11)$$

Получено совпадение уравнений (4.10) и (4.11), которое свидетельствует о равенстве приращения запаса  $\Delta W_{кин}$  в системе снижения энергии потерь  $\Delta W_{(a,r)v}$  на интервале переходного процесса — см. рис. 4.4 и рис. 4.7.

3. Потребленная якорем (ротором) электромагнитная энергия будет

$$W_{эм} = \Delta W_{кин} + \Delta W_{(a,r)v} = J_{\Sigma} \omega_0 \frac{d\omega}{dt} (s_{кон}^2 - s_{нач}^2),$$

то есть в два раза больше по сравнению с расходуемой на совершение динамической работы  $\Delta A_{дин}$  или на покрытие переменных потерь, которые равны между собой.

Аналогичное решение можно получить непосредственно через выражение электромагнитной мощности  $P_{эм} = M_{эм} \omega_0$ , которая расходуется на преодоление якорем (ротором) динамической нагрузки  $\Delta P_{дин}$  и на покрытие в названных цепях потерь  $\Delta P_{(a,r)v}$ , используя те же (как в п. 1 и п. 2) подстановки

$$\begin{aligned} W_{эм} &= \int_t P_{эм} \cdot dt = \int_t \Delta P_{дин} \cdot dt + \int_t \Delta P_{(a,r)v} \cdot dt = \\ &= \int_t J_{\Sigma} \omega \frac{d\omega}{dt} \cdot dt + \int_t J_{\Sigma} \omega_0 s \frac{d\omega}{dt} \cdot dt = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{\Delta\omega_{\text{нач}}}^{\Delta\omega_{\text{кон}}} J_{\Sigma} \Delta\omega \cdot d(\Delta\omega) + \int_{s_{\text{нач}}}^{s_{\text{кон}}} J_{\Sigma} \omega_0 s \cdot d(\omega_0 s) = \\
&= J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{кон}}^2 - s_{\text{нач}}^2) + J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{кон}}^2 - s_{\text{нач}}^2) = \\
&= J_{\Sigma} \omega_0^2 (s_{\text{кон}}^2 - s_{\text{нач}}^2).
\end{aligned}$$

4. В ЭП с АД ФР для оценки энергетики требуется определить потери электроэнергии не только в цепи ротора, но и в цепи статора, которые различаются по величине токов  $I_s$  и  $I_r$  и параметров  $R_s$  и  $R_r$

$$\Delta W_{sv} = \int_t \Delta P_{sv} \cdot dt \equiv 3 I_s^2 R_s; \quad (4.12)$$

$$\Delta W_{rv} = \int_t \Delta P_{rv} \cdot dt \equiv 3 I_r^2 R_r. \quad (4.13)$$

Если не учитывать, что потребляемая электроэнергия АД ФР расходуется не только на процесс силового энергопреобразования, но и на создание вращающегося магнитного поля, то есть положить из-за малости  $R_m = 0$  и считать  $I_m$  чисто индуктивным в уравнении (2.19), то активная составляющая тока статора  $I_s$  всецело определится активной составляющей тока ротора  $I_r$  (приведенного к виткам обмотки статора), характеризующего нагрузку на валу. Взяв отношение выражений (4.12) и (4.13), запишем

$$\Delta W_{sv} = \Delta W_{rv} \frac{R_s}{R_r} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{кон}}^2 - s_{\text{нач}}^2) \frac{R_s}{R_r},$$

откуда следует, что потери электроэнергии в цепи обмотки статора определяются через потери в роторе, умноженные на отношение активных сопротивлений статорных и роторных цепей.

5. Полные переменные потери в АД определяются как сумма

$$\Delta W_{\Sigma\text{АД}} = \Delta W_{sv} + \Delta W_{rv} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_s}{R_r} \right) (s_{\text{кон}}^2 - s_{\text{нач}}^2).$$

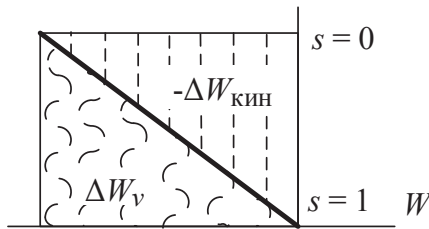
Потребляемая АД электроэнергия из сети, учитывающая затраты на совершение динамической работы ( $A_c = 0$ ), запишется

$$\Delta W_{\Sigma(\text{эл})} = \Delta W_{\text{кин}} + \Delta W_{\Sigma\text{АД}(r.s)v} = J_{\Sigma} \omega_0^2 \left( 1 + \frac{R_s}{R_r} \right) (s_{\text{кон}}^2 - s_{\text{нач}}^2).$$

Покажем, что, подставляя в полученные уравнения соответствующие значения скольжений, получают выражения  $\Delta W_{\text{кин}}$ ,  $\Delta W_{(a,r)v}$  и  $\Delta W_{\text{эм}}$  не только для двигательного, но и тормозных режимов работы. Отметим, что при увеличении скорости, когда  $|\omega_{\text{кон}}| > |\omega_{\text{нач}}|$  и  $\Delta W_{\text{кин}} > 0$ , инерционные массы в системе «ЭП — РМ» накапливают запас  $\Delta W_{\text{кин}}$ . При уменьшении скорости, когда  $|\omega_{\text{кон}}| < |\omega_{\text{нач}}|$  и  $\Delta W_{\text{кин}} < 0$ , инерционные массы расходуют ранее накопленную  $\Delta W_{\text{кин}}$ . Проиллюстрируем на конкретных примерах ( $M_c = 0$ ) в координатах  $s = f(W)$  при  $M_c = \Delta M_{c.xx} = 0$ :

- динамическое торможение с НВ — рис. 4.8

$$(\omega_{\text{нач}} = \omega_0, \omega_{\text{кон}} = 0, s_{\text{нач}} = 0, s_{\text{кон}} = 1):$$



$$-\Delta W_{\text{кин}} = J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta W_{(a,r)} = J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2};$$

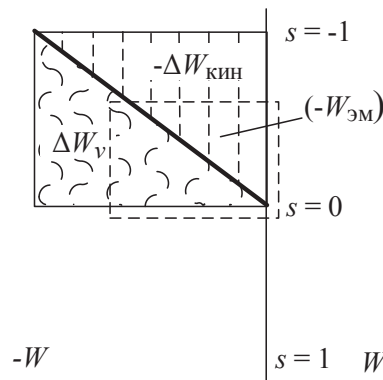
$$\Delta W_{\text{эм}} = 0.$$

Рис. 4.8. Потери при динамическом торможении с НВ

Таким образом, за счет снижения скорости высвобождается ранее накопленный запас  $\Delta W_{\text{кин}}$ , который идет на покрытие потерь  $\Delta W_{(a,r)}$ ; от источника электроэнергии не потребляется;

- рекуперативное торможение — рис. 4.9

$$(\omega_{\text{нач}} = 2\omega_0, \omega_{\text{кон}} = \omega_0, s_{\text{нач}} = -1, s_{\text{кон}} = 0):$$



$$-\Delta W_{\text{кин}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta W_{(a,r)} \approx \frac{1}{2} J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$-\Delta W_{\text{эм}} \approx \frac{1}{2} J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} -$$

возвращается к источнику, что определяется в соответствии с параметрами;

Рис. 4.9. Потери при рекуперативном торможении

- пуск и разгон двигателя ( $\omega_{\text{нач}} = 0, \omega_{\text{кон}} = \omega_0, s_{\text{нач}} = 1, s_{\text{кон}} = 0$ ) — рис. 4.10:

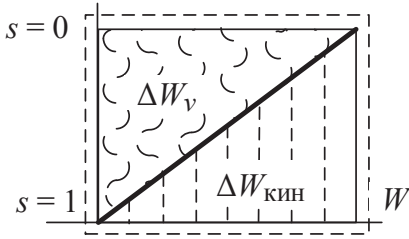


Рис. 4.10. Потери при пуске и разгоне двигателя

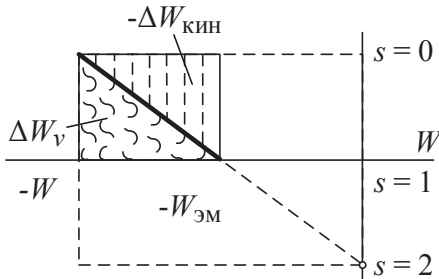
$$\Delta W_{\text{кин}} = J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta W_{(a,r)} = J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta W_{\text{эм}} = 2J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2};$$

- торможение противовключением до полной остановки (II кв.) — рис. 4.11, с изменением чередования фаз

$$(\omega_{\text{нач}} = \omega_0, \omega_{\text{кон}} = 1, s_{\text{нач}} = 0, s_{\text{кон}} = 1):$$



$$-\Delta W_{\text{кин}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2};$$

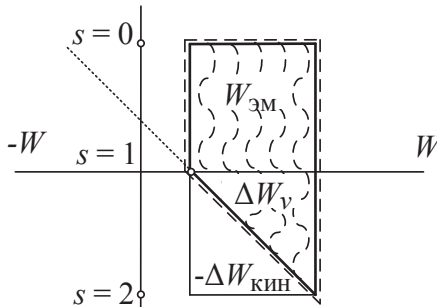
$$\Delta W_{(a,r)v} \approx 3J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta W_{\text{эм}} = 3J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2};$$

Рис. 4.11. Потери при торможении противовключением до полной остановки (II кв.)

- торможение противовключением при опускании груза (IV кв.) — рис. 4.12, с использованием  $M_{\text{с. акт}}$

$$(\omega_{\text{нач}} = -\omega_0, \omega_{\text{кон}} = 0, s_{\text{нач}} = 2, s_{\text{кон}} = 1):$$



$$-\Delta W_{\text{кин}} = J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta W_{(a,r)v} = J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta W_{\text{эм}} = 2J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2};$$

Рис. 4.12. Потери при торможении противовключением при опускании груза (IV кв.)

- реверс двигателя (II–IV кв.) — рис. 4.13

$$(\omega_{\text{нач}} = \omega_0, \omega_{\text{кон}} = -\omega_0, s_{\text{нач}} = 0, s_{\text{кон}} = 2):$$

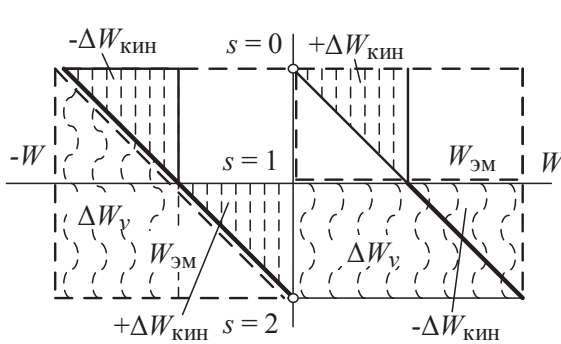


Рис. 4.13. Потери при реверсе двигателя

$$\pm \Delta W_{\text{кин}} = J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2} \text{ происхо-}$$

дит дважды;

$$\Delta W_{(a,r)} = 3J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2};$$

$$\Delta W_{\text{эм}} = 4J_{\text{кин}} \frac{\omega_0^2}{2}, \text{ произво-}$$

дится путем изменения полярности  $U_a$  или чередования фаз  $U_s$ ;

- повторный реверс двигателя (IV–I кв.)

$$(\omega_{\text{нач}} = \omega_0, \omega_{\text{кон}} = -\omega_0, s_{\text{нач}} = 2, s_{\text{кон}} = 0).$$

При двойном реверсировании все энергетические величины удваиваются по сравнению с простым реверсом двигателя.

## 4.5. Пути повышения энергетических показателей электроприводов

Необходимость повышения энергетических показателей электроприводов особенно касается электроприводов, у которых переходные процессы занимают значительное время в рабочем цикле, когда совершаемая динамическая работа на интервале изменения скорости больше, чем затрачиваемая на преодоление статической нагрузки при установившемся движении. При этом значительно увеличивается потребление электроэнергии  $W_{1(\text{эл})}$  и снижается КПД.

В ДПТ НВ и АД ФР реостатное управление скоростью «вниз» не позволяет снизить потребление  $W_{1(\text{эл})}$ . Путем вынесения потерь на внешнее добавочное сопротивление  $R_{\text{доб}} > R_{\text{собств}}$  при  $I_{a,r} > I_N$  тепловое состояние ЭД удастся лишь приблизить к номинальному.



Основным способом уменьшения потерь  $W_v$  является постепенное (например, ступенчатое) изменение задания скорости идеального холостого хода  $\omega_{0i}$  в переходном процессе, что при нормальном электромагнитном состоянии ЭД будет соответствовать определенному напряжению и частоте источника электроэнергии или ступенчатому заданию конкретного момента количества движения  $J_\Sigma \omega_{0i}$  по каждой ступени  $\omega_0 = \text{var}$ . Например, в ЭП с двухскоростным АД КЗР при переключении  $p$  в схеме  $\Delta/\text{▲▲}$  потери при пуске снижаются примерно в два раза (см. рис. 2.41).

В ЭП с ДПТ НВ разгон путем ступенчатого увеличения  $\omega_{0i} = \frac{U_{ai}}{c\Phi_{mN}}$

обеспечивает ступенчатое задание на каждом  $i$ -м интервале нового момента количества движения  $J_\Sigma \omega_{0i} = \text{const}$ . Например, разгон в две ступени, при использовании сети с  $U_a = U_{aN}/2 = 220$  В, с последующим переключением на  $U_{aN} = 440$  В основной сети, снижает потери в два раза (рис. 4.14). При том же приращении запаса  $\Delta W_{\text{кин}}$  снижается и потребление  $W_{\text{эм}}$ .

Увеличение числа ступеней  $n$  подводимого напряжения  $U_a$  дает существенную экономию в потреблении электроэнергии за счет значительного снижения ее потерь. Однако это потребует установки ЭП, включающего в свой состав автоматически управляемый преобразователь электроэнергии (ПЭЭ). Экономия на эксплуатационных расходах приводит к увеличению капитальных затрат, которые со временем окупаются.

Переход к непрерывному управлению напряжением (и  $\omega_0$ ) обеспечивает и непрерывное задание момента количества движения системе  $J_\Sigma \omega_0$ . В системе «Г — Д» непрерывное задание момента количества движения соответствует экспоненциальному закону  $\omega_0(t)$ , а в системе ТП-Д — по линейному закону отработки заданного  $J_\Sigma \omega_0$ . В электроприводах переменного тока, что особенно удобно в АД КЗ и СД, используют частотно-управляемые системы «УПЧ — Д», в которых подводимое трехфазное напряжение  $U_s$  изменяют по частоте  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ , что также обеспечивает реализацию любого закона непрерывного задания момента количества движения  $J_\Sigma \omega_0$ . Непрерывное изменение числа ступеней  $n \rightarrow \infty$  практически устремляет  $\Delta W_{(a, r)v}$  к нулю в процессе преодоления динамической нагрузки  $\Delta A_{\text{дин}}$ .

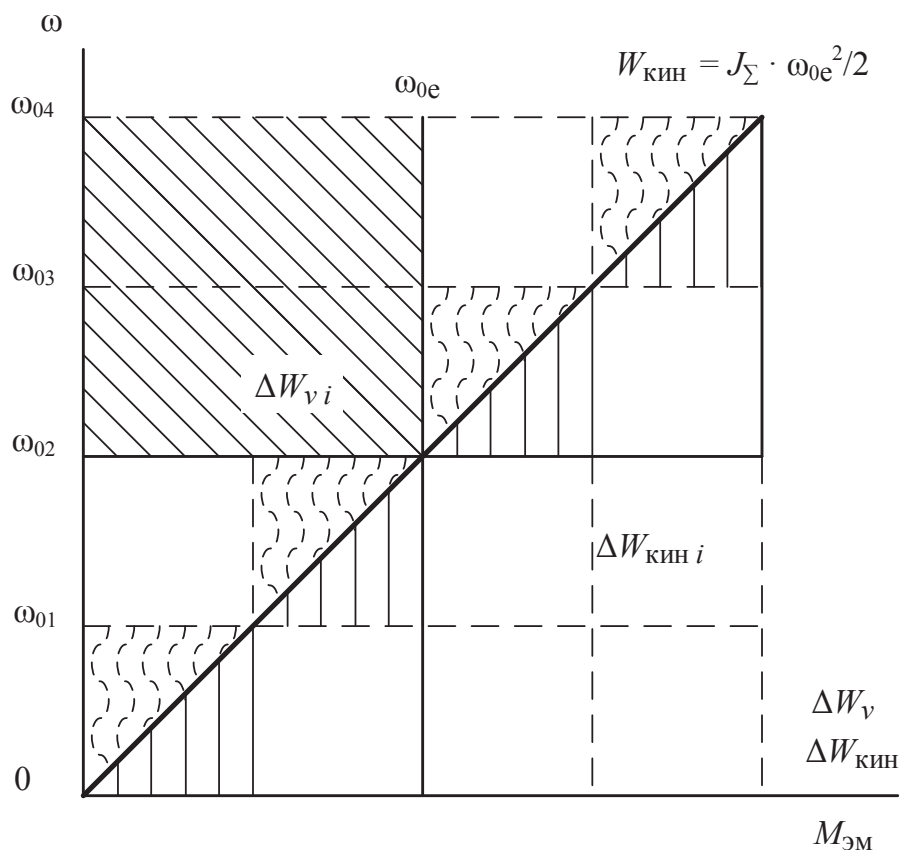


Рис. 4.14. Потери при разгоне в две ступени при использовании сети с  $U_a = U_{aN}/2 = 220$  В с последующим переключением на  $U_{aN} = 440$  В основной сети

К изложенному следует добавить, что особое внимание необходимо уделять снижению инерционности  $J_{\Sigma}$  в системе «ЭП — РМ»: специалистам технологам и машиностроителям путем конструктивных решений при создании соответствующих РМ; специалистам по электроприводу путем использования многодвигательных систем ЭП. Например, применение двухдвигательного ЭП требуемой 100 %-й суммарной мощностью на общем валу позволяет снизить примерно на 20 % суммарный момент инерции  $J_{\Sigma}$ , что важно при наличии понижающего редуктора.

---

## Библиографический список

---

1. Андреев В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1956. 448 с. ; 1963. 772 с.
2. Браславский И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И. Я. Браславский. Москва : Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
3. Голован А. Т. Основы электропривода / А. Т. Голован. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1948, 1959. 344 с.
4. Ильинский Н. Ф. Общий курс электропривода : учебник для вузов / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. Москва : Энергоатомиздат, 1992. 544 с.
5. Ильинский Н. Ф. Основы электропривода / Н. Ф. Ильинский. Москва : Изд-во МЭИ, 2003. 224 с.
6. Исследование статических характеристик электроприводов : учебное пособие / Н. И. Томашевский [и др.]. Екатеринбург : Изд-во РГППУ, 2006. 132 с.
7. Ключев В. И. Теория электропривода : учебник для вузов / В. И. Ключев. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 560 с. ; 1998. 704 с.
8. Ковчин С. А. Теория электропривода : учебник для вузов / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. Санкт Петербург : Энергоатомиздат, 1994. 496 с.
9. Москаленко В. В. Автоматизированный электропривод : учебник для вузов / В. В. Москаленко. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 416 с.
10. Основы автоматизированного электропривода : учебное пособие / М. Г. Чиликин [и др.]. Москва : Энергия, 1974. 568 с.
11. Попов В. К. Основы электропривода / В. К. Попов. Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1951. 292 с.

12. Разработка электроприводов производственных механизмов : учебное пособие / Н. И. Томашевский [и др.]. Екатеринбург : Изд-во РГППУ, 2006. 229 с.

13. Томашевский Н. И. Электромеханические свойства и энергетика электроприводов : учебно- методическое пособие / Н. И. Томашевский, Д. Н. Томашевский, А. А. Емельянов. Екатеринбург : Изд-во РГППУ, 2007. 242 с.

14. Фираго Б. И. Теория электропривода : учебное пособие для вузов / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск : ЗАО Техноперспектива, 2004. 527 с.

---

# Оглавление

---

Список сокращений.....	3
Предисловие.....	5
Глава первая. Основные положения и понятия ЭП .....	7
1.1. Электропривод и электрифицированная рабочая машина (механизм).....	7
1.2. Режимы работы электропривода .....	10
1.3. Режимы движения электропривода .....	10
1.4. Статические характеристики электродвигателей и рабочих машин.....	15
1.4.1. Статические характеристики ЭД .....	15
1.4.2. Статические характеристики РМ .....	18
1.4.3. Установившийся режим движения системы «ЭП — РМ» .....	21
1.5. Номинальные режимы нагрузки электродвигателей.....	22
1.6. Выходные координаты электропривода.....	23
1.6.1. Математическое описание энергопреобразования в ЭП с ДПТ НВ .....	24
1.6.2. Математическое описание энергопреобразования в ЭП с АД ФР .....	27
1.7. Управление выходными координатами ЭД .....	29
1.8. Требования к выходным координатам и их производным, показатели, оценка управления скоростью ЭП .....	33
1.9. Многодвигательные электроприводы .....	41

Глава вторая. Двигательный режим работы электроприводов .....	44
2.1. Определение двигательного режима работы.....	44
2.2. Электроприводы с двигателями постоянного тока .....	47
2.2.1. Конструктивные особенности машин постоянного тока .....	47
2.2.2. Принцип работы ДПТ .....	55
2.2.3. Электрические схемы включения, энергетический баланс цепи якоря и статические характеристики ДПТ .....	59
2.3. Трехфазные асинхронные электроприводы.....	68
2.3.1. Конструктивные особенности и принцип работы АД ....	68
2.3.2. Электрические и эквивалентные схемы замещения АД .....	75
2.3.3. Математическое описание установившегося режима и особенности физических явлений в АД .....	78
2.3.4. Влияние параметров электрических цепей и источника напряжения на вид статических характеристик АД .....	88
2.4. Трехфазные синхронные электроприводы .....	105
2.4.1. Принцип работы и электромеханические свойства СД .....	105
2.4.2. Работа СД как генератора реактивной мощности при недогрузке на валу .....	108
Глава третья. Тормозные режимы работы электроприводов .....	112
3.1. Общая характеристика тормозных режимов ЭП .....	112
3.2. Рекуперативное торможение в ЭП постоянного и переменного тока.....	113
3.2.1. Режим РТ в ЭП постоянного тока .....	114
3.2.2. Режим РТ в ЭП переменного тока .....	118
3.3. Торможение противовключением в ЭП постоянного и переменного тока.....	127
3.3.1. Режим ТПВ в ЭП постоянного тока .....	128
3.3.2. Режим ТПВ в ЭП переменного тока .....	132
3.4. Динамическое торможение в ЭП постоянного и переменного тока.....	136
3.4.1. ЭП постоянного тока с независимым возбуждением ....	137
3.4.2. ЭП постоянного тока с самовозбуждением .....	138

3.4.3. ЭП переменного тока с независимым возбуждением .....	141
3.4.4. Динамическое торможение с самовозбуждением в ЭП переменного тока .....	153
Глава четвертая. Обобщенные энергетические характеристики электроприводов .....	161
4.1. Составляющие энергетического баланса .....	161
4.2. Энергетика ДПТ в установившемся режиме движения .....	163
4.3. Энергетика пуска ДПТ при постоянном статическом моменте .....	165
4.3.1. Сопоставление разгона ДПТ НВ и ПВ .....	166
4.3.2. Сопоставление разгона ДПТ НВ и АД ФР .....	168
4.4. Динамика переходных режимов движения .....	173
4.4.1. Принятые допущения .....	173
4.4.2. Физико-математическое описание энергетики и динамики разгона ЭП .....	174
4.4.3. Момент количества движения .....	182
4.4.4. Уравнения составляющих баланса потребляемой энергии .....	185
4.5. Пути повышения энергетических показателей электроприводов .....	190
Библиографический список .....	193

*Учебное издание*

**Томашевский** Николай Иосифович  
**Томашевский** Дмитрий Николаевич  
**Миронов** Станислав Евгеньевич

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Редактор И. В. Меркурьева  
Верстка Е. В. Ровнушкиной



Подписано в печать 07.11.2018. Формат 70×100 1/16.  
Бумага писчая. Цифровая печать. Усл. печ. л. 16,13.  
Уч.-изд. л. 10,75. Тираж 40 экз. Заказ 283.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13  
Факс: 8 (343) 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>

*Для заметок*



