

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Судовое электрооборудование»

А. К. Пронина

О С Н О В Ы СУДОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Курс лекций
по дисциплине

для студентов специальности

26.05.07 – «Эксплуатация судового электрооборудования
и средств автоматики»
очной и заочной формы обучения

Севастополь
СевГУ
2021

УДК [629.5.03:621:313.13-83](076.5)

ББК 39.46:31.291-01я73

П81

Р е ц е н з е н т :

С.А. Конева – доцент кафедры «Судовое электрооборудование»,
канд. техн. наук, доцент

Пронина А.К.

П81 Основы судового электропривода: курс лекций / А.К. Пронина ;
Севастопольский государственный университет, Морской институт,
кафедра «Судовое электрооборудование». – Севастополь: СевГУ, 2021.
– 77 с. – Текст : электронный.

Курс лекций по дисциплине «Основы судового электропривода»
предназначен для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского
государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 —
Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики

УДК [629.5.03:621:313.13-83](076.5)

ББК 39.46:31.291-01я73

Рассмотрено и рекомендовано кафедрой «Судовое
электрооборудование» Морского института ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет» в качестве курса лекций по дисциплине
«Основы судового электропривода» для студентов специальности 26.05.07 —
Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики,
протокол заседания кафедры СЭО № 9 от 19 мая 2021 г.

© Пронина А.К., 2021
© ФГАОУ ВО Севастопольский
государственный университет», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕКЦИЯ № 1. Определение понятия «электропривод». Классификация электроприводов.....	4
ЛЕКЦИЯ № 2. Механика электропривода.....	7
ЛЕКЦИЯ № 3. Механические характеристики двигателя и исполнительного механизма.....	11
ЛЕКЦИЯ № 4. Совместная работа электрического двигателя и рабочего механизма.....	15
ЛЕКЦИЯ № 5. Основные соотношения в электроприводе с двигателем постоянного тока	19
ЛЕКЦИЯ № 6. Режимы работы электропривода с двигателем постоянного тока.....	22
ЛЕКЦИЯ № 7. Электропривод с асинхронным двигателем	31
ЛЕКЦИЯ № 8. Электромеханические и механические характеристики АД ..	39
Характерные точки на характеристике тока	39
ЛЕКЦИЯ № 9. Регулирование скорости электропривода с двигателями постоянного тока	47
ЛЕКЦИЯ № 10. Регулирование скорости электроприводов с асинхронными двигателями	54
ЛЕКЦИЯ № 11. Потери энергии при работе электропривода.....	60
ЛЕКЦИЯ № 12. Нагрев и охлаждение двигателя. Режимы работы двигателей в электроприводе	67
ЛЕКЦИЯ № 13. Выбор двигателя для повторно-кратковременного и кратковременного режимов нагрузки	73

ЛЕКЦИЯ № 1

Тема: Определение понятия «электропривод».

Классификация электроприводов

1.1. Термины и определения

Электрическим приводом называют электромеханическую систему, состоящую из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенную для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

Функциональные блоки обобщённой структуры электропривода (ЭП) показаны на рис. 1.1.

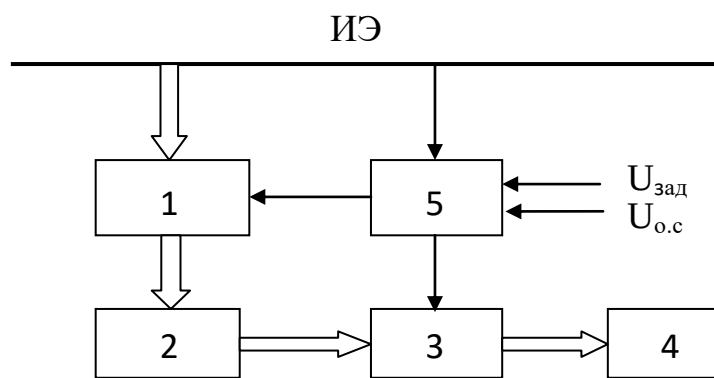


Рисунок 1.1 - Функциональная схема ЭП:
 ИЭ – источник электроэнергии (сеть питания);
 $U_{\text{зад}}$ – задающий сигнал; $U_{\text{о.с}}$ – сигналы обратных связей

По структуре электропривод является индивидуальным, то есть предназначен для обеспечения движения одного исполнительного органа рабочей машины (крылатки вентилятора, рабочего колеса центробежного насоса, поршней компрессора, гребного винта, коленчатого вала поршневого насоса, и т.п.). Есть еще групповой ЭП, взаимосвязанный или многодвигательный (например, для приведения в движение антенны радиолокатора).

Назначение функциональных блоков электрического привода:

1. Преобразовательное устройство: преобразование рода тока (переменный в постоянный, постоянный в переменный); частоты, числа фаз; уровня напряжения (тока).

2. Электродвигательное устройство. Преобразование электрической энергии в механическую и механической энергии в электрическую.

3. Передаточное устройство. Передача механической энергии от электродвигателя к исполнительному органу, преобразование вида движения, согласование скоростей, моментов.

4. Исполнительный орган. Осуществление производственных и технологических операций (обработка изделий, подъем и перемещение грузов и т.д.).

5. Управляющее устройство. Управление преобразовательным, электродвигательным и передаточными устройствами.

Примеры преобразовательных устройств (1): электромашинный агрегат (двигатель – генератор); управляемый выпрямитель; преобразователь частоты; тиристорный коммутатор.

Примеры двигательных устройств (2): трехфазный асинхронный двигатель, двигатель постоянного тока, синхронный двигатель, шаговый двигатель.

Примеры передаточных устройств: муфта, редуктор, ременная передача, электромагнитная муфта; пара винт – гайка, кривошипно-шатунный механизм.

Примеры исполнительных органов: барабан и трос грузоподъемного механизма, центрифуга, лента или цепь конвейера, рабочее колесо роторной машины.

Примеры управляющих устройств: релейно-контакторные схемы управления; регуляторы; усилители; управляющие вычислительные машины, микропроцессоры; контролируемые контроллеры.

1.2. Классификация электроприводов

- По характеру движения:

вращательный, электродвигательным устройством которого является вращающийся электродвигатель;

линейный, электродвигательным устройством которого является линейный электродвигатель.

- По направлению вращения электродвигательного устройства:

реверсивный, обеспечивающий движение электродвигательного устройства в противоположных направлениях;

нереверсивный, имеющий только одно направление движения электродвигательного устройства.

- По роду тока:

постоянного тока, имеющей электродвигатель постоянного тока;

переменного тока, имеющей электродвигатель переменного тока.

- По виду первичного источника электрической энергии:

автономный, потребляющий энергию от автономного источника; например, от аккумуляторной батареи;

дизель-электрический или турбоэлектрический, являющиеся только электрическими приводами, источником энергии которых является дизель-генератор или турбогенератор.

- По характеру изменения параметров:

регулируемый, параметры которого могут изменяться под воздействием управляющего устройства;

нерегулируемый, параметры которого изменяются только в результате возмущающих воздействий.

- По виду преобразовательного устройства (УП):

вентильный, в преобразовательном устройстве которого применен вентильный управляющий преобразователь (УП);

тиристорный, в силовых цепях УП которого применены тиристоры;

транзисторный, представляющий собой п/п ЭП, в силовых цепях УП которого применены транзисторы;

система, «управляемый выпрямитель-двигатель», являющийся вентильным ЭП постоянного тока, в УП которого применен регулируемый выпрямитель;

система «преобразователь частоты-двигатель», являющийся вентильным ЭП переменного тока, в УП которого применен регулируемый преобразователь частоты;

система «генератор-двигатель», представляющий собой регулируемый ЭП, в преобразовательном устройстве которого применен электромашинный преобразовательный агрегат.

- По выполняемым операциям (функциям):

неавтоматизированный и автоматизированный с автоматическим регулированием параметров.

Автоматизированный ЭП делится:

программно управляемый;

следящий, который отрабатывает перемещение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;

позиционный, предназначенный для регулирования положения исполнительного органа рабочей машины;

адаптивный, автоматически избирающий структуру или параметры системы регулирования при изменении условий работы.

По виду связи с исполнительным органом рабочей машины:

редукторный, передаточное устройство которого содержит редуктор (в том числе и встроенный);

безредукторный, в передаточном устройстве которого отсутствует редуктор;

маховиковый, в состав которого входит маховик;

электрогидравлический привод, имеющий гидравлическое передаточное устройство.

ЛЕКЦИЯ № 2

Тема: Механика электропривода

2.1. Расчетные схемы механической части

Механическую часть ЭП образуют движущиеся части электродвигательного устройства, передаточное устройство и исполнительный орган. В общем случае механическая часть может представлять собой сложную систему элемента конечной жесткости с различными массами и скоростями движения, на которые воздействуют силы и моменты.

Для анализа движения механической части ЭП осуществляется переход от реальной кинематической схемы к расчетной, в которой массы и моменты инерции движущихся элементов и их жесткости, а также силы и моменты, действующие на эти элементы, заменены эквивалентными величинами, приведенные к одной и той же скорости.

Условия соответствия получаемой расчетной схемы реальной механической части ЭП является выполнение закона сохранения энергии (баланса мощности).

Процесс перехода к расчетным схемам обычно называют приведением, а сами величины – приведенными. Обычно оказывается удобным и целесообразным осуществлять приведение к скорости электродвигателя (к валу двигателя).

2.2. Приведение моментов инерции и масс элементов к валу двигателя

Обычно двигатель приводит в действие производственный механизм через систему передач, поэтому отдельные элементы движутся с различными скоростями. Примерная кинематическая схема электропривода подъемника представлена на рис. 2.1

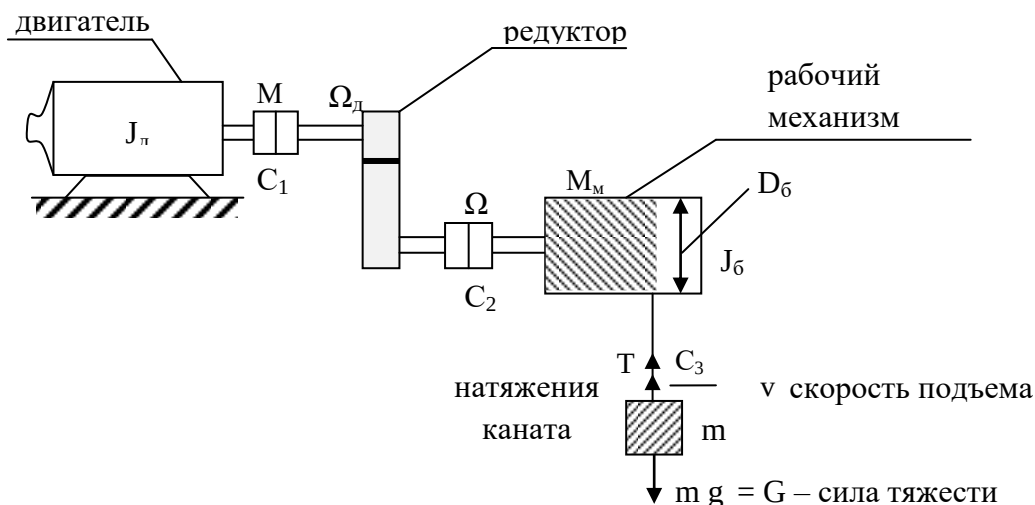


Рисунок 2.1 - Кинематическая схема привода подъемника

На схеме:

- M_d, Ω_d, J_d - момент, угловая скорость и момент инерции двигателя [$H \cdot m$; $рад/с$; $кг \cdot м^2$];
- M_m, Ω_m, J_δ – то же, рабочего механизма [$H \cdot m$; $рад/с$; $кг \cdot м^2$];
 $i_{пер} = \Omega_d / \Omega_m$ – коэффициент передачи редуктора;
- C_1 и C_2 – коэффициент жесткости соединительных муфт; C_3 – то же, каната, поддерживающего груз массы m [$кг$].

Для упругих элементов в пределах закона Гука справедливы соотношения

$$M_\phi = C \Delta \phi; \quad G_l = m \cdot g \cdot \Delta l.$$

Приведение моментов инерции и масс элементов осуществляется с помощью формул:

$$J_{бд} = J_\phi / i_{пер}^2; \quad J_{мд} = m \left(\frac{V}{\Omega_d} \right)^2.$$

Приведение моментов и сил, приложенных к элементам передачи и исполнительного механизма, к валу двигателя производится по формулам баланса мощностей (Вт):

$$M_d \cdot \Omega_d = M_m \cdot \Omega_m / \eta_{пер},$$

где $M_d \cdot \Omega_d$ – мощность на валу двигателя; $M_m \cdot \Omega_m$ – то же, на барабане; $\eta_{пер}$ – КПД передачи.

Момент на валу исполнительного механизма [$H \cdot м$]

$$M_m = mg \cdot D_\delta / 2.$$

С помощью приведенных к валу двигателя параметров схемы ЭП производится определение:

- режимы установившегося движения ЭП;
- устойчивости установившегося движения;
- протекание переходных (динамических) режимов движения.

Дополнительно должны быть установлены для решения этих задач механические характеристики двигателей и исполнительных механизмов.

Задача 2.1. Грузоподъемная лебедка, имеющая кинематическую схему, показанную на рис. 2.1, поднимает груз массой 1000 кг. Максимальная скорость подъема груза 1.0 м/с; ускорение и замедление при достижении максимальной скорости и снижение ее до нуля – $0,25$ м/с². Момент инерции барабана 80 кг·м², момент инерции ротора двигателя $1,5$ кг·м², момент инерции ведущей и ведомой шестерни редуктора соответственно $0,1$ кг·м² и $5,0$ кг·м². Максимальная (номинальная) скорость вращения двигателя – 600 об/мин. КПД редуктора $\eta_p = 0,9$. Высота подъема груза – 24 м. Радиус барабана $R_\delta = 0,25$ м.

Построить диаграмму изменения скорости и момента на валу эл. двигателя за время подъема груза.

Решение.

1. Время ускорения и замедления груза при подъеме,

$$t_1 - t_3 = \frac{V_m}{a} = \frac{1.0}{0.25} = 4$$

2. Путь, проходимый грузом за время разгона, м

$$L_1 = \frac{at^2}{2} = \frac{0.25 \cdot 16}{2} = 2$$

3. Время движения с максимальной скоростью, с

$$t_2 = \frac{H - (L_1 + L_2)}{U_m} = \frac{24 - (2 + 2)}{1} = 20$$

4. Максимальная скорость вращения двигателя, 1/с

$$\Omega_{m.g} = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 600}{60} = 62.8$$

5. Максимальная скорость вращения барабана, рад/с

$$\Omega_{m.б} = \frac{V_m}{R_б} = \frac{1.0}{0.25} = 4$$

6. Передаточное отношение редуктора

$$i = \frac{\Omega_{m.д}}{\Omega_{m.б}} = \frac{62.8}{4} = 15.7$$

7. Статистический момент на валу барабана, Н·м

$$M_{c.б} = m \cdot g \cdot R_б = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.25 = 2452$$

8. Статистический момент сопротивления механической системы, приведенный к валу двигателя, Н·м

$$M_c = \frac{M_{c.б}}{i \eta_p} = \frac{2452}{15.7 \cdot 0.9} = 174$$

9. Суммарный момент инерции механической системы, приведенный к валу двигателя, кг·м²

$$J = J_p + J_{3.1} + \frac{J_{3.2} + J_б + m \cdot R_б^2}{i^2} = 1.5 + 0.1 + \frac{5 + 80 + 1000 \cdot 0.25^2}{15.7^2} = 2.2$$

10. Момент на валу двигателя на этапе разгона, Н·м

$$M = M_c + J \frac{d\Omega}{at} = 174 + 2.2 \cdot \frac{62.8}{4} = 211$$

11. Момент на валу двигателя с установившейся скоростью, Н·м

$$M = M_c = 174$$

12. Момент на валу двигателя в период торможения, Н·м

$$M = M_c - J \frac{d\Omega}{dt} = 174 - 0.2 \cdot \frac{62.8}{4} = 139.4$$

Диаграммы скорости и момента двигателя приведены на рис. 2.2.

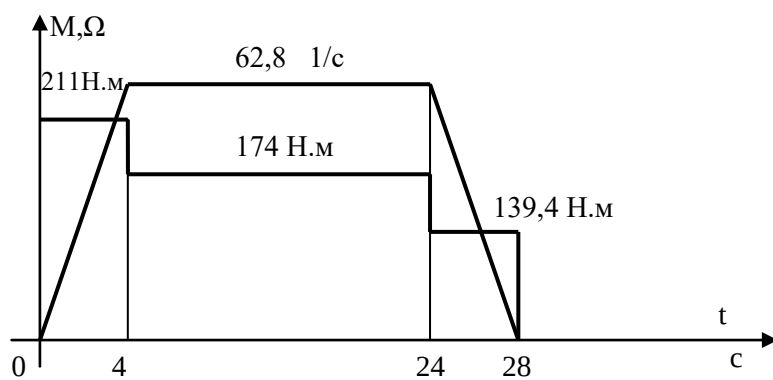


Рисунок 2.2 - Диаграмма скорости и момента на валу двигателя

ЛЕКЦИЯ № 3

Тема: Механические характеристики двигателя и исполнительного механизма

3.1. Понятие механические характеристики

Различают механические характеристики двигателей и исполнительных механизмов.

Примем за основу простую схему ЭП без передаточного редуктора, которая изображена на рис. 3.1.

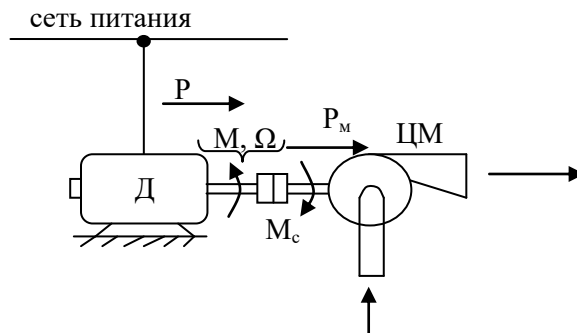


Рисунок 3.1 - Схема эл. привода центробежного механизма (ЦМ)

Двигатель (Д) приводит во вращение со скоростью Ω центробежный механизм (ЦМ), развивая момент M . В установившемся режиме $M = M_c$, или $M - M_c = 0$, скорость двигателя постоянна $\Omega = const$. Мощность двигателя [Вт] на валу определяется по формуле

$$P = M \cdot \Omega > 0,$$

где момент M [Н·м], скорость Ω [1/с].

Мощность на валу механизма

$$P_m = M_c \cdot \Omega = -M \cdot \Omega < 0.$$

Таким образом: $P + (P_m) = 0$, то есть в установившемся режиме имеем на валу баланс мощности и баланс моментов (взаимное «уравновешивание»).

Для того, чтобы определить величину скорости Ω установившегося режима, и оценить устойчивость режима, необходимо иметь механические характеристики двигателя и исполнительного механизма.

Зависимость момента двигателя M от скорости вращения вала двигателя Ω , называется механической характеристикой двигателя.

$$M = f(\Omega).$$

Зависимость момента сопротивления механизма M_c от скорости Ω , называется механической характеристикой механизма.

На рис. 3.2 в координатных осях (Ω , M) представлены графики механических характеристик двигателей ДПТ и АД.

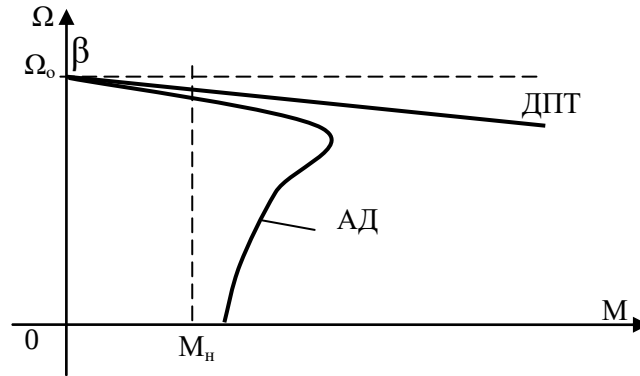


Рисунок 3.2 - Механические характеристики ДПТ и АД

Прямолинейный наклонный участок характеристики называется рабочим участком.

Основным параметром механической характеристики на рабочем участке является ее жесткость, определяемая как

$$\beta = \frac{dM}{d\Omega} < 0. \quad (3.1)$$

Жесткость характеристик двигателя постоянного тока и асинхронного двигателя β - отрицательная величина, синхронного двигателя (СД) равна бесконечности $\beta = \infty$.

Величина, обратная жёсткости $1/\beta$, называется статизмом характеристики. Для СД статизм равен нулю.

На рис. 3.3 представлены механические характеристики некоторых исполнительных механизмов: 1 – подъемников; 2 – вентиляторов центробежных механизмов, гребных винтов; 3 – горизонтальных конвейеров и транспортеров.

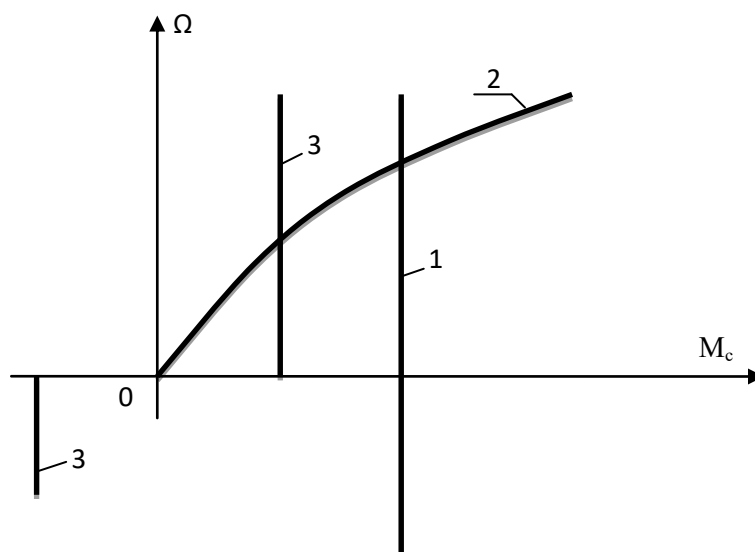


Рисунок 3.3 - Механические характеристики исполнительных механизмов

3.2. Уравнение движения электропривода

Уравнение описывает движение подвижной части двигательного и исполнительного устройств, осуществляемого под действием сил и моментов, действующих в системе. В простейшем случае непосредственного соединения вращающихся частей двигателя и исполнительного механизма уравнение движения имеет вид

$$M - M_c = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (3.2)$$

где M – вращающий момент двигателя; M_c – момент сопротивления рабочего механизма; $J \frac{d\Omega}{dt}$ – динамический момент, где $J = J_d + J_{мх}$, $\frac{d\Omega}{dt}$ – угловое ускорение.

Уравнение (3.2) называют уравнением моментов. Умножив его на Ω получим уравнение баланса мощностей

$$M \cdot \Omega - M_c \cdot \Omega = J \Omega \frac{d\Omega}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{J \Omega^2}{2} \right). \quad (3.3)$$

Здесь $M \cdot \Omega = P$ – мощность, развиваемая на валу двигателя; $M_c \cdot \Omega = P_c$ – полезная мощность, затрачиваемая на совершение работы механизмом.

Разность $P - P_c = P_{изб}$ – называется избыточной мощностью, которая идет на изменение запаса кинетической энергии вращающихся частей двигателя и механизма:

$$P - P_c = \frac{dW_k}{dt}, \quad (3.4)$$

где $W_k = \frac{J \Omega^2}{2}$ – кинетическая энергия, запасенная в движущихся массах с приведенным моментом инерции J и приведенной скоростью Ω .

3.3. Анализ уравнения движения

Из предыдущего следует, что момент двигателя M и момент сопротивления механизма M_c зависят от скорости, что определяется их механическими характеристиками $M(\Omega)$ и $M_c(\Omega)$. При этом возможны различные соотношения M и M_c . Рассмотрим условие при $M - M_c = 0$. В этом случае динамический момент, см. (3.2) также равен нулю

$$J \frac{d\Omega}{dt} = 0, \quad (3.5)$$

и, следовательно, $d\Omega/dt = 0$. Последнее равенство означает, что скорость постоянна, т.е. $\Omega = \text{const}$. Проверка этого условия ($M - M_c = 0$) осуществляется с помощью механических характеристик двигателя и исполнительного механизма.

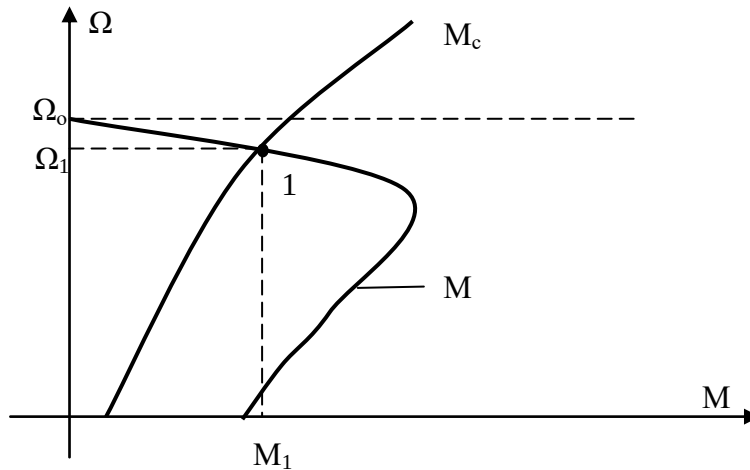


Рисунок 3.4 - Совмещенные механические характеристики двигателя М и механизма М_с

Для этого характеристики совмещаются на координатной плоскости (M, Ω) , будучи представлены в одном масштабе. На рис. 3.4 показаны совмещенные характеристики АД и центробежного механизма.

Точка пересечения характеристик 1 соответствует равновесному режиму, а координаты точки Ω_1 и M_1 определяют сам установившийся режим. Установившееся движение будет устойчивым при условии

$$\frac{dM}{d\Omega} - \frac{dM_c}{d\Omega} < 0. \quad (3.6)$$

В данном случае движение, определяемое точкой 1, будет устойчивым. Покажем пример неустойчивого движения.

На рис. 3.5 изображена характеристика АД при статической (независящей от скорости) нагрузке $M_c = \text{const}$. Используя критерий (3.6) находим, что в точке 1 имеет место устойчивое установившееся движение, а в точке 2 – неустойчивое установившееся движение.

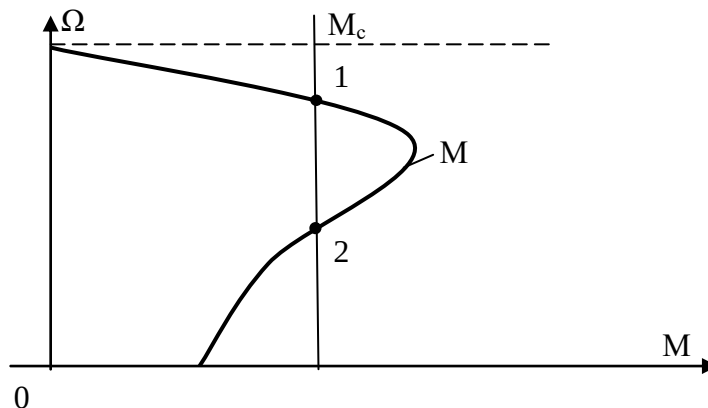


Рисунок 3.5 - Определение установившегося механического движения

ЛЕКЦИЯ № 4

Тема: Совместная работа электрического двигателя и рабочего механизма

4.1. Анализ устойчивости совместной работы электродвигателя и рабочего механизма

Для введения ЭП в работу электродвигатель включается в сеть, в результате чего двигатель разгоняется до некоторого установившегося значения скорости.

Условие разгона определяется соотношением

$$M > M_c,$$

а сам процесс нарастания скорости - уравнением движения

$$M - M_c = J \frac{d\Omega}{dt}. \quad (4.1)$$

Анализ (4.1) позволяет видеть три режима работы электропривода:

- 1) $M - M_c = J \frac{d\Omega}{dt} > 0$ - разгон двигателя, или режим ускорения;
- 2) $M - M_c = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$ - режим установившегося равновесного движения с постоянной скоростью;
- 3) $M - M_c = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$ - режим уменьшения скорости, режим отрицательного ускорения.

Графически все три режима можно наблюдать при совмещении графиков механических характеристик двигателя и механизма.

Так, на рис. 4.1 в координатах (M, Ω) в одном масштабе изображены механические характеристики асинхронного двигателя (1) и центробежного механизма (2).

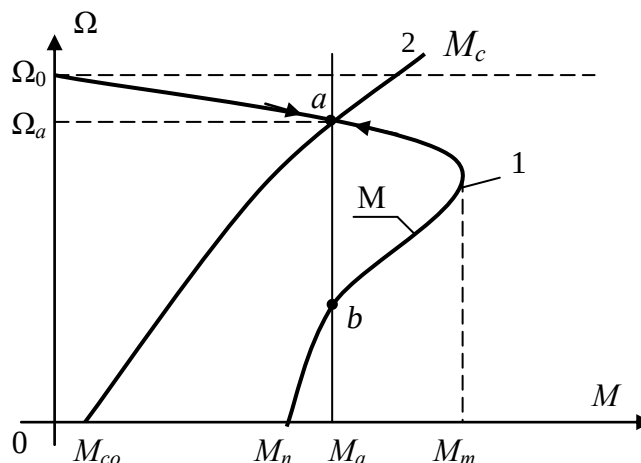


Рисунок 4.1 - Совмещенные характеристики АД (1) и ЦМ (2)

Точка пересечения характеристик «а» при скорости Ω_a и моменте двигателя $M_a = M_{ca}$ определяет установившийся режим, как показано выше.

На интервале скоростей $[0, \Omega_a]$ выполняется первое условие $M - M_c > 0$, то есть $J \cdot d\Omega / dt > 0$, следовательно, имеем положительное ускорение, а значит и увеличение скорости.

На интервале скоростей $[\Omega_a, \Omega_0]$ выполняется третье условие $M - M_c < 0$, следовательно $J \cdot d\Omega / dt < 0$, то есть будет иметь место отрицательное ускорение и скорость будет падать.

Условие 1 и 3 будет создаваться и при малых отклонения скорости вверх $(+\Delta\Omega)$ и вниз $(-\Delta\Omega)$ от скорости Ω_a . Таким образом система электропривода «сама» стремится к установившемуся режиму в точке «а». При таких условиях установившийся режим в точке «а» является устойчивым.

Сформулируем критерий устойчивости в виде отношения

$$\frac{dM_c}{d\Omega} > \frac{dM}{d\Omega} \quad (4.2)$$

Предположим, что двигатель работает в точке «а» при другом характере нагрузки $M_c = M_a = \text{const}$. Анализ по (4.2) показывает, что в данном случае режим в точке «а» также является устойчивым.

Однако есть еще одна точка установившегося режима - точка «в», в которой $M = M_c$, но эта точка, в соответствии с (4.2), оказывается неустойчивой.

4.2. Энергетические соотношения установившегося режима работы двигателя

Совмещение механических характеристик двигателя и механизма позволяет оценить энергетическое состояние установившегося режима, определяемого точкой пересечения характеристик.

На рис. 4.2 изображены те же механические характеристики АД и ЦМ.

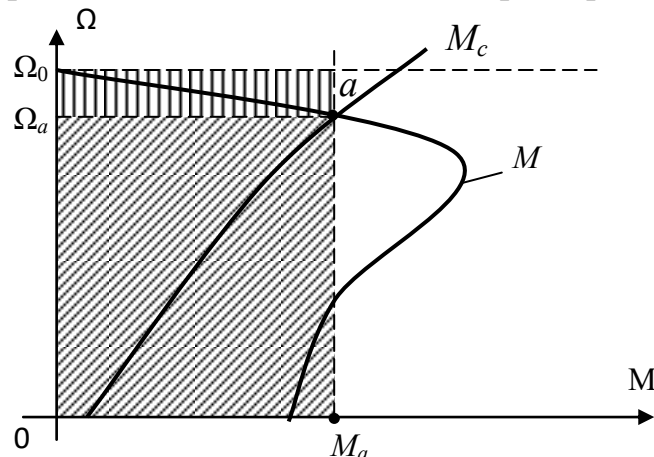


Рисунок 4.2 - К определению соотношений мощности в установившемся режиме работы двигателя под нагрузкой

Для установившегося режима двигателя под нагрузкой, рабочая точка «а», можно записать:

- электромагнитная мощность, передаваемая от статора вращающемуся ротору

$$P_{12a} = M_a \cdot \Omega_o \quad (4.3)$$

- механическая мощность, развиваемая на валу двигателя (развиваемая ротором)

$$P_{2a} = M_a \cdot \Omega_a \quad (4.4)$$

- мощность потерь в роторе можно найти как разность:

$$\Delta P_{2a} = P_{12a} - P_{2a} = M_a \cdot \Omega_o \left(\frac{\Omega_o - \Omega_a}{\Omega_o} \right), \quad (4.5)$$

или

$$\Delta P_{2a} = M_a \cdot \Omega_o \cdot s_a, \quad (4.6)$$

где $s_a = (\Omega_o - \Omega_a) / \Omega_o$ – скольжение ротора.

На рис. 4.2 мощность на валу двигателя P_{2a} согласно (4.4), представлена площадью прямоугольника с косой штриховкой, а мощность потерь в роторе – площадкой с вертикальной штриховкой.

Физическая природа потери мощности в роторе определяется тепловыми потерями на нагрев обмотки ротора при протекании по ней тока I'_2 . Это так называемые джоулевы потери, которые можно представить, как

$$\Delta P_2 = 3I'^2_2 \cdot r'_2 = M_a \cdot \Omega_o \cdot s_a. \quad (4.7)$$

В (4.7) I'_2 – ток фазы ротора, приведенный к параметрам обмотки статора (штрих); r'_2 – сопротивление ротора, приведенное к статору.

Все параметры относятся к одной фазе. В симметричном режиме параметры фаз одинаковы, поэтому в (4.7) появляется число фаз $m = 3$.

Часто двигатели проектируют таким образом, что сопротивление r_1 первичной обмотки (статора), равно сопротивлению r'_2 вторичной обмотки (ротора), но это не всегда. Что же касается токов статора I_1 и ротора I'_2 , то без больших погрешностей для любого асинхронного двигателя можно записать

$$I'_2 \approx I_1. \quad (4.8)$$

Поэтому формулу полных электрических потерь мощности под нагрузкой можно представить в виде

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = 3I_1^2(r_1 + r_2^1). \quad (4.9)$$

Заметим, что часто принимается одно важное соотношение, которое используется при расчетах потерь мощности: в номинальном режиме нагрузки электродвигателя постоянные потери (т.е. не зависящие от нагрузки

двигателя) равны переменным потерям (то есть зависящим от нагрузки двигателя или джоулевым потерям):

$$\Delta P_{\text{пост}} \approx \Delta P_{\text{пер}} \quad (4.10)$$

Это позволяет найти переменные потери для номинального режима нагрузки двигателя используя КПД η_n .

Пример. Имеем номинальные данные асинхронного двигателя: P_{2n} ; U_{1n} ; n_n ; $\cos \varphi_n$; η_n .

По этим данным находим:

1. потребляемую двигателем из сети полную мощность в режиме номинальной нагрузки

$$S_{1n} = \frac{P_{2n}}{\eta_n \cdot \cos \varphi_n};$$

2. номинальный ток статора

$$I_{1n} = \frac{S_{1n}}{\sqrt{3} U_{1n}};$$

3. номинальное скольжение

$$s_n = \frac{n_o - n_n}{n_o};$$

4. электрические потери в роторе

$$\Delta P_{2n} = M_n \cdot \Omega_o \cdot s_n$$

при этом:

$$\Omega_o = \frac{2\pi \cdot n_o}{60}; \quad \Omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60}; \quad M_n = \frac{P_n}{\Omega_n}.$$

5. По формуле потерь в роторе

$$\Delta P_{2n} = 3I_2' \cdot r_2' \approx 3I_{1n}^2 \cdot r_2'$$

6. находим приведенное сопротивление ротора r_2' :

$$r_2' = \frac{M_n \cdot \Omega_o \cdot s_n}{3I_{1n}^2}.$$

7. Далее находим полные электрические переменные потери в двигателе в номинальном режиме нагрузки:

$$\Delta P_{1n} + \Delta P_{2n} = 3I_{1n}^2 (r_1 + r_2').$$

Если известны сопротивления $r_1 + r_2' = r_n$ (r_n – сопротивление короткого замыкания) можно определить электрические потери для любого режима нагрузки двигателя, отличного от номинального, если известен ток нагрузочного режима.

ЛЕКЦИЯ № 5

Тема: Основные соотношения в электроприводе с двигателем постоянного тока

5.1. Схема включения ДПТ и основные уравнения

Основная схема включения приведена на рис. 5.1.

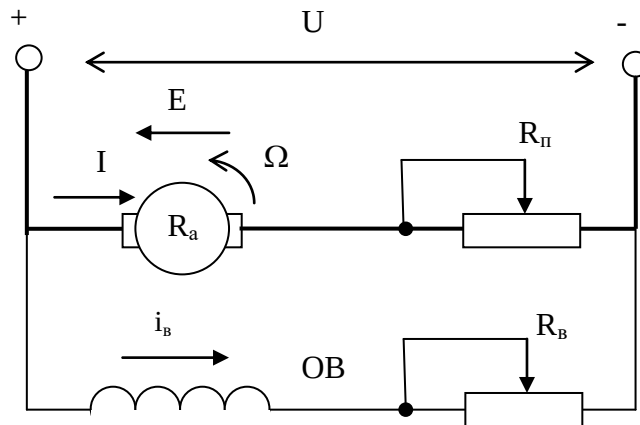


Рисунок 5.1 - Схема включения ДПТ в сеть

где U – напряжение сети; OB – обмотка возбуждения; R_a – внутреннее сопротивление якорной цепи; R_n – последовательное сопротивление в цепи якоря; $R_с$ – регулировочное сопротивление в цепи возбуждения; I , $i_с$ – токи в цепях якоря и возбуждения.

Номинальным режимом является режим при $R_n = 0$ и $R_с = 0$. При этом магнитный поток машины максимальный $\Phi = \Phi_{max}$ и имеет постоянное значение $\Phi = const$.

По второму закону Кирхгофа для цепи якоря запишем:

$$\begin{aligned} U &= E + I(R_a + R_n); \\ E &= k\Omega. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Ток якоря в установившемся режиме нагрузки, в соответствии с формулой (5.1), будет зависеть от скорости Ω :

$$I = \frac{U - k\Phi\Omega}{R_a + R_n}. \quad (5.2)$$

Решая (5.1) и (5.2) относительно скорости Ω получаем уравнение электромеханической характеристики ДПТ

$$\Omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_a + R_n}{k\Phi} I, \quad (5.3)$$

где $k = p \cdot N / 2\pi \cdot a$ - конструктивный коэффициент. Значение $(k\Phi)$ непосредственно может быть найдено из формулы эл. магнитного момента

$$M = k\Phi I \quad (5.4)$$

При известных номинальном моменте M_n и номинальном токе I_n находим:

$$k\Phi = \frac{M_n}{I_n}.$$

Учитывая связь между моментом и током в виде равенства $M = k\Phi I$, определим уравнение механической характеристики

$$\Omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{(R_a + R_n)}{(k\Phi)^2} \cdot M \quad (5.5)$$

На рис. 5.2 изображена механическая характеристика для случая, когда в цепи якоря включено сопротивление R_n . Там же показана характеристика при $R_n = 0$.

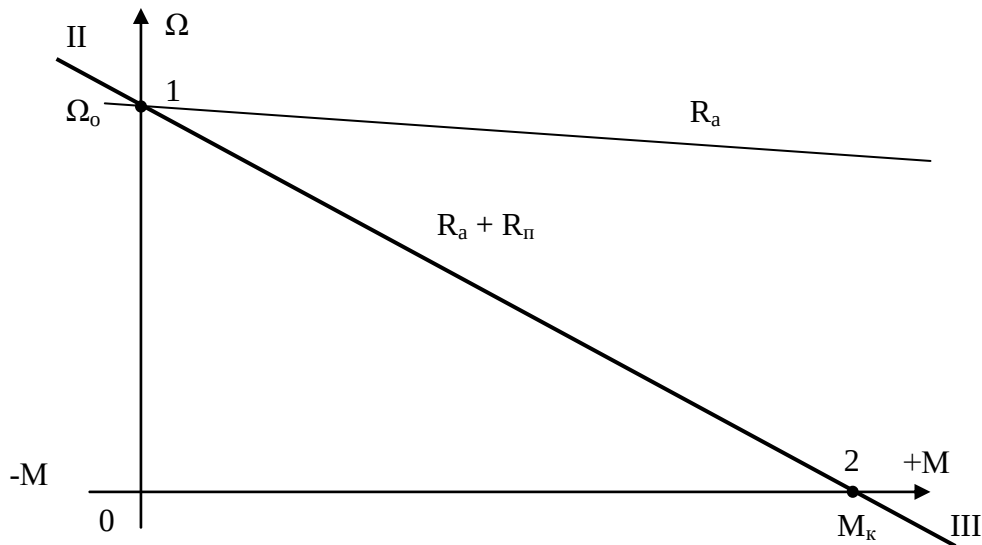


Рисунок 5.2 - Механическая характеристика ДПТ

При работе ДПТ могут возникнуть следующие энергетические режимы работы:

- участок 1-2, $M > 0$; $\Omega > 0$ - двигательный режим; на этом участке: точка 1: $M = 0$; $\Omega_0 = U / k\Phi$ – точка идеального холостого хода (х.х); точка 2: $M = M_k$; $\Omega < 0$ – режим короткого замыкания (КЗ) или режим стоянки;
- участок II, $M < 0$; $\Omega > \Omega_0$ – генераторный режим по отношению к питающей сети (режим рекуперативного торможения);
- участок III, $M > M_k$; $\Omega < 0$ – режим торможения противовключением.

Точка короткого замыкания 2, при которой двигатель неподвижен ($\Omega = 0$) определяет момент двигателя при неподвижном якоре (роторе), т.е. при токе стоянки. При наличии сопротивления R_n ток и момент стоянки будут ограничены. Исходя из формулы

$$M_{\kappa} = k\Phi \cdot I_{\kappa} = k\Phi \frac{U}{R_o + R_n}, \quad (5.6)$$

или момент стоянки (момент) короткого замыкания

$$M_{\kappa} = \frac{M_n}{I_n} \cdot I_{\kappa},$$

где ток короткого замыкания

$$I_{\kappa} = \frac{U}{R_a + R_n}$$

Если не включать R_n то ток короткого замыкания I_{κ} оказывается недопустимо большим. R_n используют для ограничения тока при пуске. Обычно, ток при пуске не должен превышать значений

$$I_n = I_{\kappa} \leq (2,5 + 3,0) \cdot I_n.$$

Используя формулы (5.6) можно определить необходимую величину R_n

$$R_n = \frac{U_n}{(2,5 + 3,0)I_n} - R_a \quad (5.7)$$

Однако, в установившемся режиме при $\Omega \approx \Omega_n$ сопротивление R_n обычно шунтируют. При зашунтированном R_n , номинальном напряжении $U = U_n$, и максимальном магнитном потоке $\Phi = \Phi_{max}$ имеем естественную механическую характеристику, рис. 5.3.

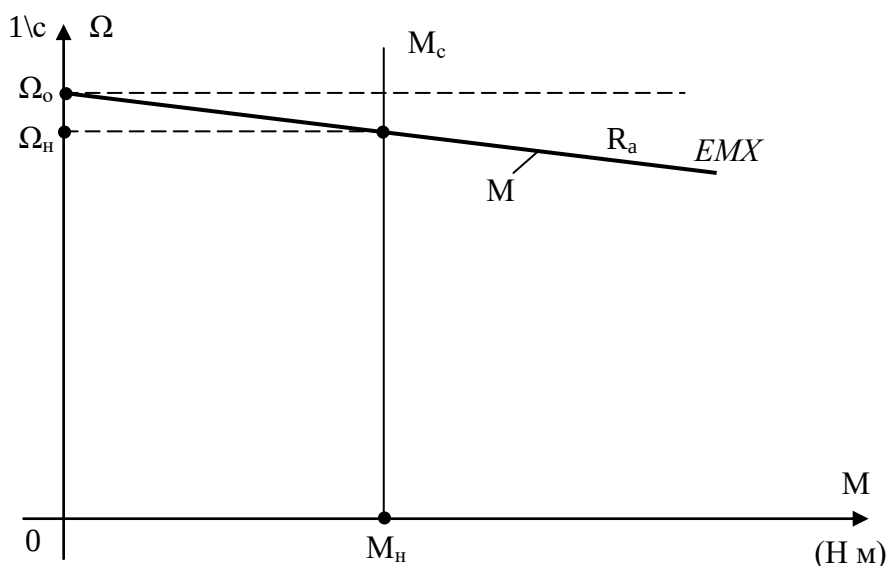


Рисунок 5.3 - Естественная механическая характеристика (EMX) двигателя параллельного возбуждения ($\Phi = \Phi_m = \text{const}$)

ЛЕКЦИЯ № 6

Тема: Режимы работы электропривода с двигателем постоянного тока

6.1. Координатная плоскость для определения режима двигателя представлена в осях (Ω , M).

Режим электрической машины может быть двигательным, или тормозным.

Если момент двигателя совпадает с направлением вращения, то режим определяется как двигательный, если их направления противоположны – то как тормозной.

Положительным направление вращения двигателя считается такое, когда оно происходит встречно движению часовой стрелки ($\Omega > 0$), отрицательное – при направлении по часовой стрелке ($\Omega < 0$). Положительные и отрицательные направления вращающего электромагнитного момента двигателя, определяются по тому же правилу.

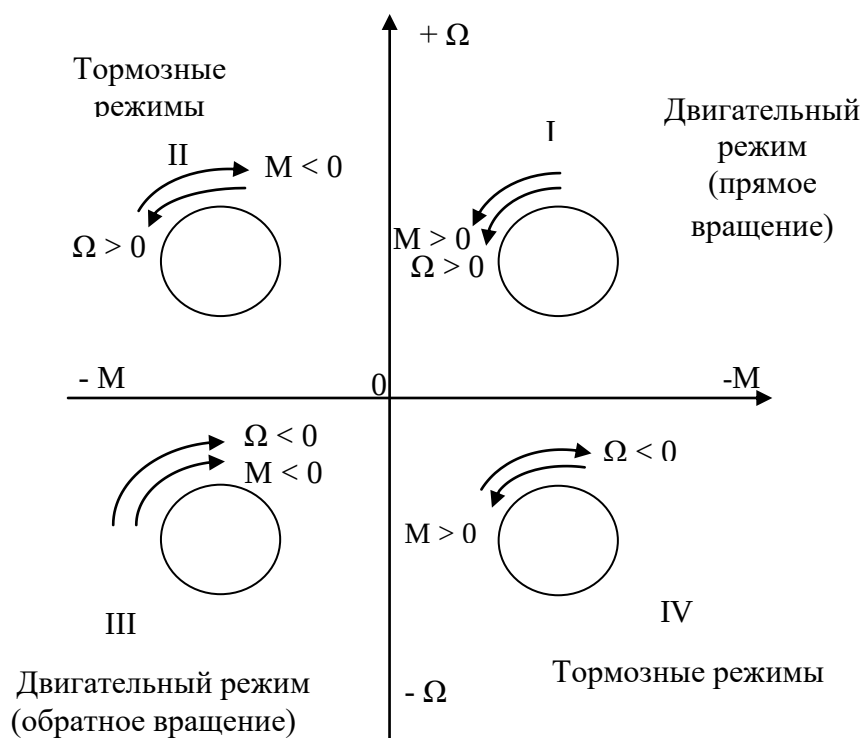


Рисунок 6.1 - Квадранты координатной плоскости для определения двигательного I, III и тормозного II, IV режимов электрической машины

На координатной плоскости (Ω , M), рис. 6.1, двигательным режимам соответствуют квадраты I и III, а тормозным – II и IV.

Мощность, развиваемая на валу двигательном режиме положительна (знаки M и Ω – совпадают):

$$P = M \cdot \Omega > 0, \quad (6.1)$$

а в тормозном режиме – отрицательна:

$$P = (-M \cdot \Omega) = [M \cdot (-\Omega)] < 0. \quad (6.2)$$

Выражения (6.1) и (6.2) относятся к мощности на валу двигателя: в двигательном режиме $P > 0$, то есть мощность на валу передается рабочему механизму (электромагнитный момент способствует вращению (движению)); в тормозном режиме $P < 0$, мощность на валу передается от рабочего механизма к двигателю, при этом двигатель переходит в режим генератора. В генераторном режиме электромагнитный момент машины направлен встречно вращению, то есть тормозит вращение. Движение при этом может поддерживаться либо за счет инерции вращения, либо за счет подкручивающего действия со стороны механизма (например, при спуске груза, когда движение происходит под действием силы тяжести).

Тормозной режим может создаваться при включенном в сеть двигателе, когда энергия торможения передается в питающую сеть, и двигатель переходит в режим генератора - режим с рекуперацией (возвратом) энергии в сеть. Но может осуществляться и при отключенном от сети режиме: тогда двигатель работает генератором, отдает мощность на некоторое сопротивление, называемое тормозным. Но может быть и такой режим, когда двигатель остается включенным в сеть, но из-за изменения направления тока в цепи якоря момент двигателя меняет направление (как, например, при реверсе) и начинает действовать как тормозной.

Если двигательный режим один, то тормозных режимов - три. Заметим, что во всех тормозных режимах двигатель работает генератором, поэтому торможение называется электромагнитным. Преобразованная механическая энергия отдается генератором либо в питающую сеть, как в случае рекуперативного торможения, либо сопротивлению, которое поглощает энергию, генерируемую двигателем, и которая рассеивается в виде тепла на тормозном сопротивлении.

6.2. Режим генераторного или рекуперативного торможения

Тормозной момент, действующий встречно вращению, создается за счет изменения направления тока в якоре с $+I$ на $-I$. Двигатель остается включенным в сеть, но его скорость превышает скорость идеального холостого хода Ω_0 . Известно, что при любом режиме ток якоря определяется формулой

$$I = \frac{U - k\Phi\Omega}{R_a + R_{\text{л}}}, \quad (6.3)$$

В двигательном режиме противоЭДС $E = k\Phi\Omega$ имеет значения меньше приложенного напряжения ($U - E > 0$), поэтому ток $I > 0$, т.е. положительный.

В двигательном режиме направление тока всегда совпадает с направлением (полярностью) напряжения. Это записывается так: $U > 0, I > 0$, или $U < 0, I < 0$. При этом мощность $P = UI > 0$ потребляется двигателем из сети, то есть имеет положительный знак.

При этом момент в двигательном режиме совпадает с направлением вращения

$$M = k \Phi I > 0,$$

а в генераторном режиме – действует встречно вращению

$$M = k \Phi (-I) < 0,$$

так как $U - E < 0$, и ток $I < 0$.

Для того чтобы скорость Ω превысила Ω_o , необходима «подкрутка» вала двигателя со стороны механизма. При этом механизм превращается в первичный двигатель, а эл. машина переходит в режим генератора.

На рис. 6.2 изображена схема для двигательного (а) и генераторного (б) режимов.

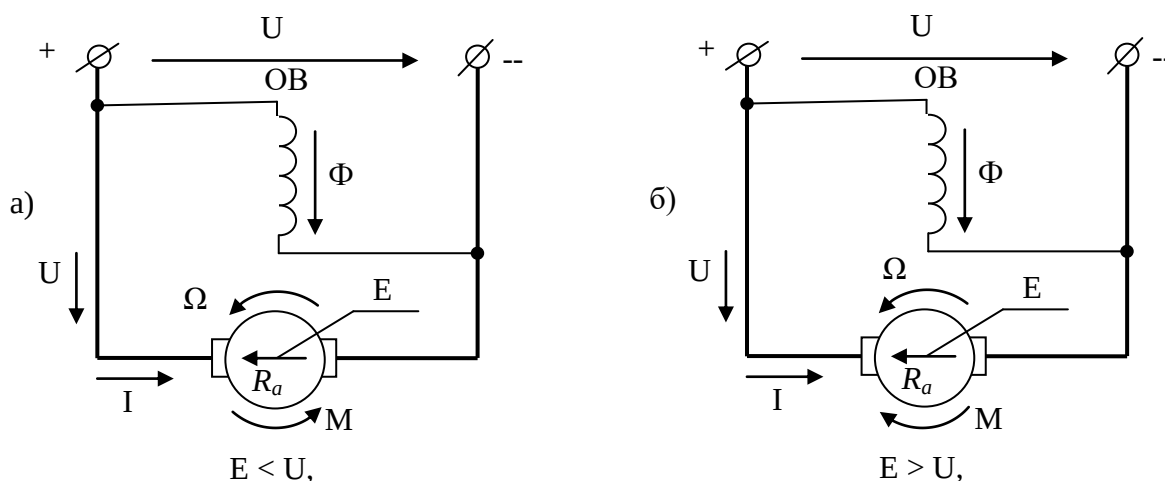


Рисунок 6.2 - Работа ДПТ в двигательном (а) и генераторном (б) режимах

Как видим, электрическая схема остается без изменения, а эл. машина, согласно принципу обратимости, при возрастании Ω и проходе скорости через Ω_o , переходит из двигательного режима в генераторный.

Для двигательного режима при $\Omega < \Omega_o$ и $E < U$ уравнение Кирхгофа для цепи якоря имеет вид

$$U = E + I R_a . \quad (6.4)$$

После умножения (6.4) на ток I , получаем уравнение баланса мощностей:

$$UI = EI + I^2 R_a, \quad (6.5)$$

где $UI = P_1$ – мощность, потребляемая двигателем из сети; $EI = k \Phi \Omega \cdot I = M \Omega$ – мощность, передаваемая на вал двигателя; $I^2 R_a$ – мощность, рассеиваемая в виде тепловых потерь на сопротивлении якоря (джоулевы потери).

Для генераторного режима $U < E$ и ток, согласно (6.3) меняет направление (знак)

$$U = E + (-I R_a). \quad (6.6)$$

После умножения (6.6) на $(-I)$, получаем другой баланс мощности:

$$EI = UI + I^2 R_a, \quad (6.7)$$

где $EI = k \Phi \Omega \cdot I = M \Omega$ – электромагнитная мощность, развиваемая исполнительным механизмом; UI – мощность, передаваемая в сеть; $I^2 R_a$ – мощность джоулевых потерь.

Поэтому этот режим называют генераторным режимом при параллельной работе с сетью.

На механической характеристике двигателя, рис. 6.3, точка «а» соответствует двигательному, а точка «в» - генераторному режиму.

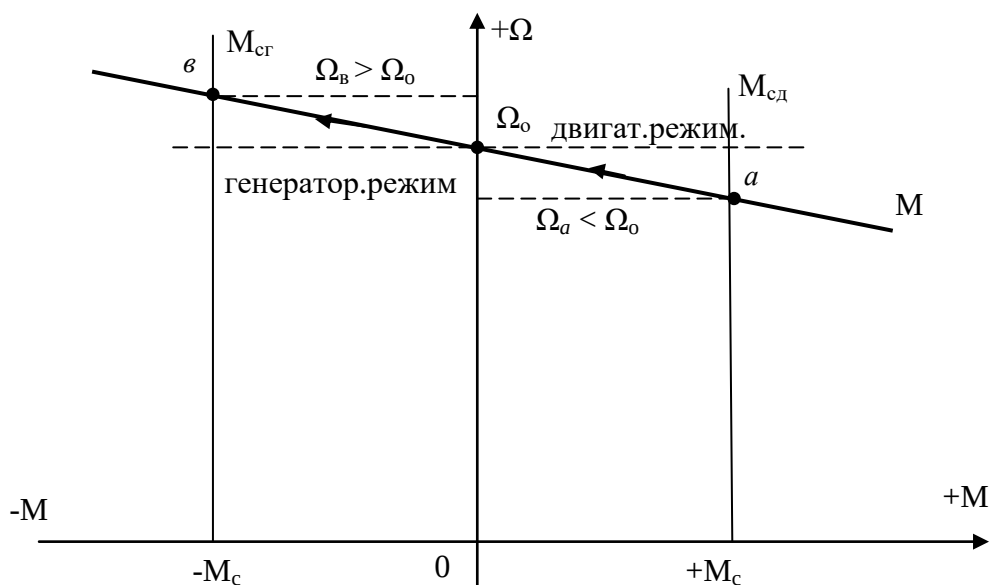


Рисунок 6.3 - Рабочие точки двигательного, точка (а), и генераторного, точка (в), режимов

Как видим, режим генераторного торможения наступает при условии, когда скорость вала двигателя Ω превысит скорость идеального холостого хода Ω_0 .

6.3. Режим динамического торможения

Схема для осуществления режима динамического торможения представлена на рис. 6.4. Обмотка возбуждения ОВ создает постоянный магнитный поток и не отключается от сети.

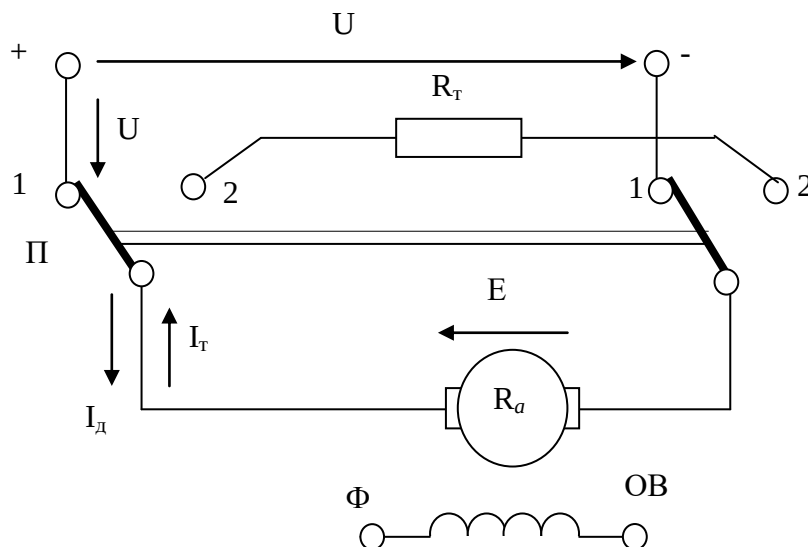


Рисунок 6.4 - Схема переключения двигателя в режим динамического торможения переводом переключателя П из положения 1 в положение 2

Режим торможения возникает из-за реверса тока. В исходном двигательном режиме направление протекания тока через якорь определялось приложенным напряжением при условии $E > I = k \Phi \Omega$:

$$I_{дв} = \frac{U - k\Phi\Omega}{R_a} > 0,$$

а в режиме динамического торможения ток начинает протекать под действием противоЭДС E , т.к. $U=0$:

$$I_{дт} = \frac{0 - k\Phi\Omega}{R_a + R_T} < 0.$$

При неизменном магнитном потоке изменение направления тока означает изменения знака момента

$$M_{дв} = k \Phi I; \quad M_{дт} = k \Phi (-I).$$

Так как в двигателе постоянного тока в режиме нагрузки $U \approx E$, то величину тормозного тока в начальный момент ограничивает введение сопротивления R_T .

Величина тормозного тока $I_{дт}$ зависит от сопротивлений $(R_a + R_T)$, и заранее определяется расчетом. Ограничения начального тока при торможении те же, что и при пуске двигателя. По мере снижения скорости из-за торможения уменьшаются ЭДС, ток и тормозной момент.

При $\Omega = 0$ тормозной момент $M_{дт} = 0$.

На рис. 6.5 изображены механические характеристики динамического торможения, располагающиеся во II-м и IV-м квадрантах. Для ускорения торможения до остановки двигателя сопротивление R_T может быть разбито на

части, которые шунтируются по мере уменьшения скорости, см. рис. 6.5, что по виду напоминает перевёрнутую пусковую диаграмму.

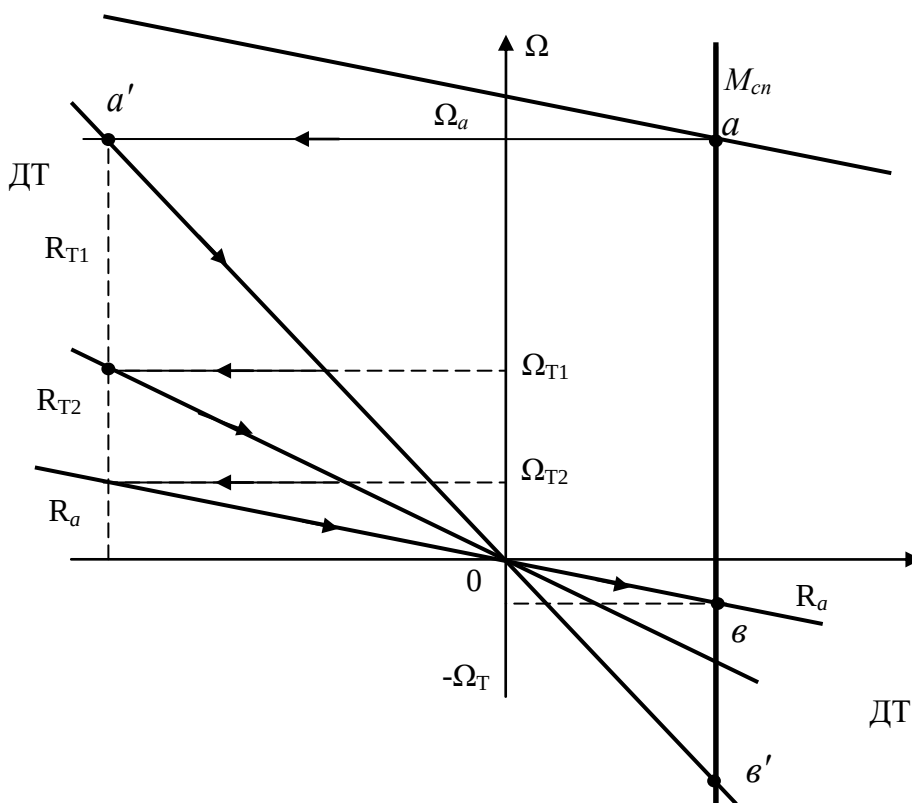


Рисунок 6.5 - Механические характеристики для режима динамического торможения ступенями

При ДТ из точки «а», $\Omega = \Omega$ двигательного режима при потенциальном моменте сопротивления $M_{cn} = \text{const}$ можно быстро погасить скорость (динамически). При уменьшении скорости до $\Omega = 0$, необходимо отключить двигатель, взяв груз на электромагнитный тормоз. Но если двигатель не отключать, и тогда получим режим динамического торможения (IV-й квадрант) при скорости $-\Omega_T$ в токе «б»: режим так называемого силового опускания груза.

При торможении от скорости Ω_a до нуля $\Omega = 0$ последовательно шунтируются ступени тормозного сопротивления R_{T1} и R_{T2} .

6.4. Торможение противовключением

Примером торможения противовключением является реверс двигателя. При этом для изменения направления действия момента изменяется полярность подводимого к якорю напряжения, а в цепь якоря вводится токоограничивающее сопротивление R_T . Схема реверса показана на рис. 6.6.

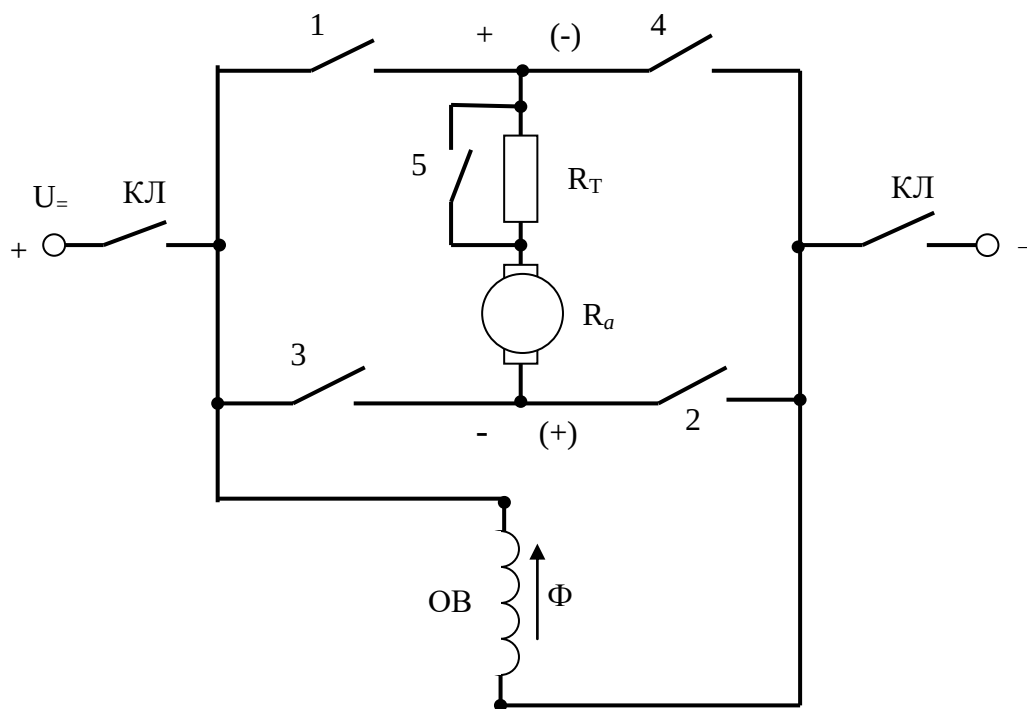


Рисунок 6.6 - Схема торможения противовключением при реверсе

При замыкании контактов КЛ линейного контактора подается питание на обмотку возбуждения ОВ, создающей необходимый магнитный поток Φ .

Для пуска двигателя «вперед» замыкаются контакты 1 и 2. На якоре оказывается напряжение, указанное на схеме без скобок.

Контакт 5 в начале разомкнут, что используется для реостатного пуска двигателя через сопротивление R_T . После разгона двигателя контакт 5 замыкается и шунтирует сопротивление R_T .

Для реверса двигателя контакты 1–2 размыкаются, при этом одновременно, размыкается контакт 5. Затем происходит замыкание контактов 3 – 4. Ток через двигатель будет протекать снизу-вверх, соответственно полярности, показанной в скобках:

$$I = \frac{-U - k\Phi\Omega}{R_T + R_a} < 0.$$

Как видим, ток якоря меняет направление.

Соответственно, момент двигателя меняет знак, и становится тормозным, что приводит к быстрому снижению скорости до нуля. При необходимости остановки двигателя при $\Omega = 0$ производят отключение двигателя и взятие его на тормоз.

Для реверса при достижении скорости $\Omega = 0$ двигатель оставляют включенным с изменённой полярностью, вследствие чего начинается разгон двигателя в обратном направлении, то есть, по сути, идет пуск двигателя с включенным пусковым сопротивлением $R_n = R_T$. Шунтированием на определенной скорости сопротивление R_T , завершается разгон двигателя в обратном направлении и выход на естественную механическую характеристику при обратном направлении вращения.

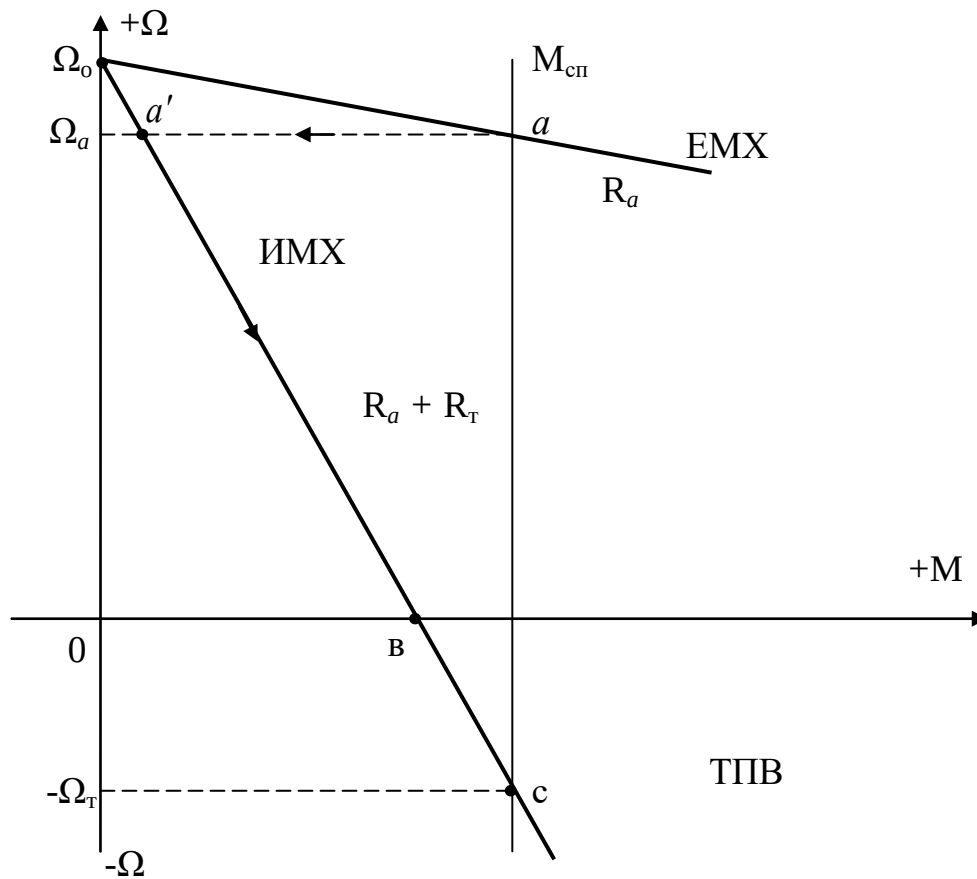


Рисунок 6.8 - Силовой спуск груза при торможении противовключением

Торможение противовключением имеет место в установившемся режиме в точке «с», со скоростью $-\Omega_T$, хотя двигатель включен на подъем груза со скоростью $+\Omega$ (в точке «а» это скорость $+\Omega_a$), но он под действием груза вращается на его опускание.

ЛЕКЦИЯ № 7

Тема: Электропривод с асинхронным двигателем

7.1. Схемы соединения фазных обмоток асинхронного двигателя (АД)

Наиболее надежной является схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКР). Однако лучшими пусковыми и регулировочными свойствами обладает АД с фазным ротором (АДФР).

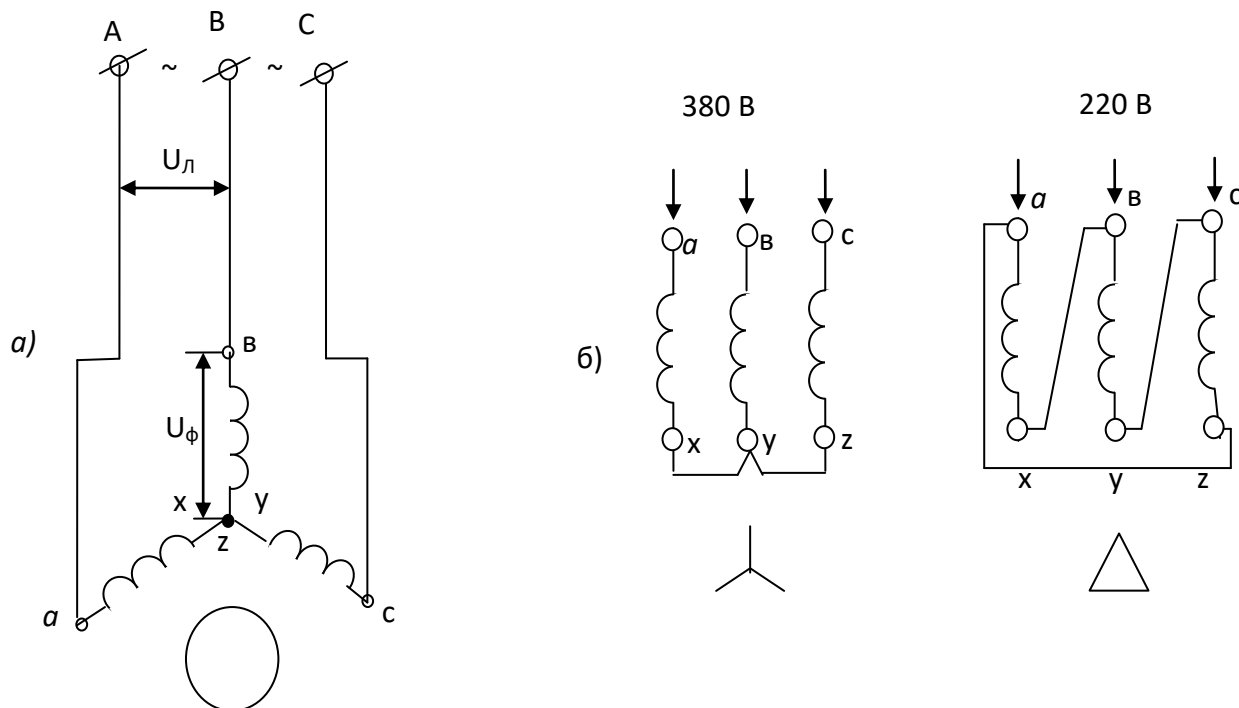


Рисунок 7.1 - Схема соединения обмоток фаз статора в звезду (Y) и треугольника (Δ)

На рис. 7.1 показана схема включения фазных обмоток статора в сеть при соединении фаз в звезду, при которой фазное напряжение U_ϕ меньше линейного напряжения сети U_L в $\sqrt{3}$ раз. Если напряжение сети соответствует фазному, то обмотки фаз статора следует включить по схеме треугольника, рис.7.1, б.

Короткозамкнутый ротор изображается замкнутой окружностью.

На рис.7.2 изображена схема АД с фазным ротором.

Фазная обмотка ротора выполняется по типу статорной, то есть имеет три изолированные фазные обмотки, которые замыкаются через скользящий контакт на симметричное регулируемое сопротивление r_{2n} , которое может регулироваться от значения $r_{2n} = 0$ до максимального значения $r_{2n} = r_{2n \max}$.

Изменяя величину r_{2n} , можно влиять на величину тока ротора, что позволяет регулировать скорость вращения двигателя.

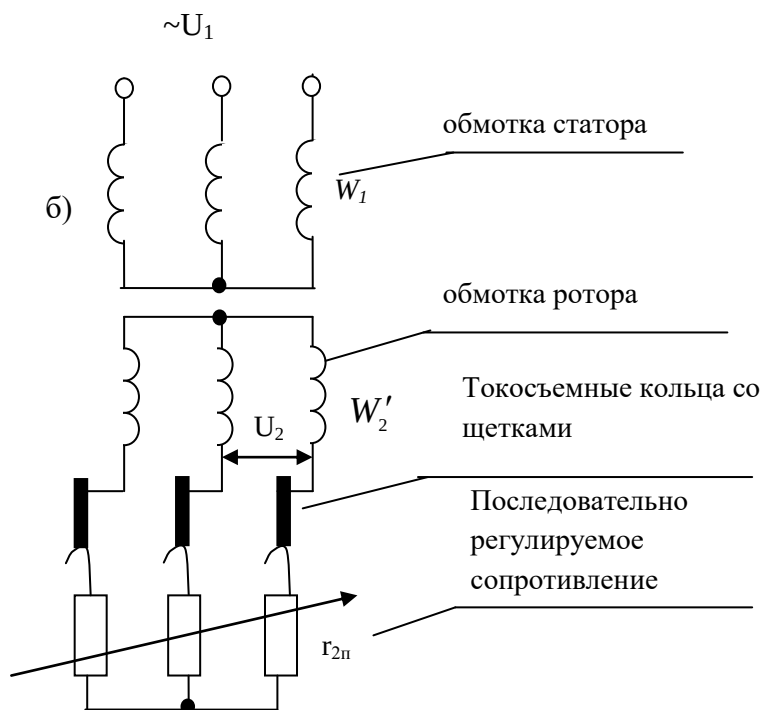


Рисунок 7.2 - Схема обмоток статора (индекс 1) и ротора (индекс 2) асинхронного двигателя с фазным ротором

7.2. Работа асинхронного двигателя в приводе судового центробежного насоса

Схема привода показана на рис.7.3.

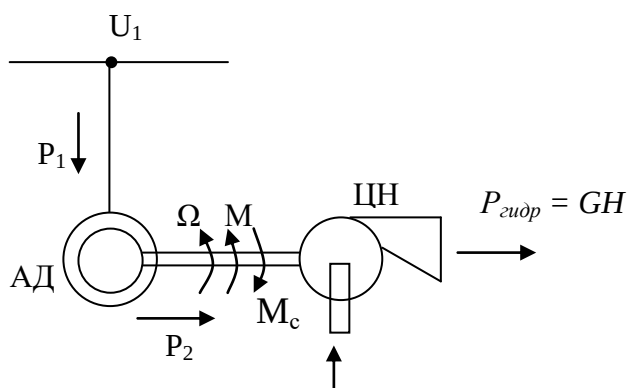


Рисунок 7.3 - Схема привода центробежного насоса с асинхронным двигателем

В данной схеме: наружное кольцо – статор АД, внутреннее – короткозамкнутый ротор. К ротору (внутреннему кольцу) присоединён вал, посредством которого двигатель приводит во вращение центробежный насос ЦН.

Мощность, развиваемая насосом (гидравлическая мощность $P_{гидр}$) определяется в системе единиц СИ произведением

$$P_z = G \cdot H, \quad (7.1)$$

где G – расход (подача) $\left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right]$ жидкости (воды, масла, топлива, ...); H – напор (противодавление) $\left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Па}]$.

Корректность формулы мощности проверяем через размерности входящих в неё величин:

$$P_{\text{гидр}} \approx \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right] = [\text{Вт}].$$

КПД гидравлических насосов невелик: $\eta_{\text{гидр}} = 0,6 \dots 0,72$.

Мощность, необходимая для работы ЦН, и поставляемая по валу двигателем, находится с учётом гидравлического КПД:

$$P_2 = \frac{P_{\text{гидр}}}{\eta_{\text{гидр}}} [\text{Вт}]. \quad (7.2)$$

Для создания мощности P_2 на валу двигатель должен развивать вращающий момент, который при известной скорости, находится из отношения:

$$\dot{M} = \frac{P_2}{\Omega} [I \cdot \dot{\varphi}]. \quad (7.3)$$

Если, далее, разделить P_2 на КПД двигателя, то получим величину мощности, потребляемой двигателем из сети

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_d}. \quad (7.4)$$

В трехфазной цепи активная мощность определяется формулой

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad (7.5)$$

где $U_1 = U_{\text{л}}$ – линейное напряжение трёхфазной сети: $I_1 = I_{\text{лф}}$.

Зная коэффициент мощности $\cos \varphi_1$, можем найти:

$$\left. \begin{aligned} \text{ток фаз статора } I_1 &= \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 \cdot \cos \varphi_1}; \\ \text{полную мощность } S_1 &= \frac{P_1}{\cos \varphi_1}. \end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

Мощность двигателя задаётся по величине мощности P_2 , развиваемой на валу при номинальной нагрузке и в его паспортных данных для $P_2 = P_{2\text{н}}$ приводятся номинальные значения скорости $n_{\text{н}}$ [об/мин], коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{н}}$, КПД $\eta_{\text{н}}$ и, обязательно, линейное напряжение.

7.3. Схема замещения асинхронного двигателя

Для расчета механических и электромеханических характеристик пользуются схемой замещения, составляемой для фазы двигателя.

Схема замещения – электрическая цепь, токи и мощность в которой соответствуют токам и мощностям в фазе реальной машины. В схеме замещения АД параметры ротора приводятся к параметрам статора. Статорная обмотка – первичная, к ней подводится напряжение, протекает ток и потребляется мощность из сети. Но эти параметры зависят от параметров и режима ротора, как в обычном трансформаторе, в котором токи первичной обмотки зависят от токов его вторичной обмотки. К вторичной обмотке непосредственно подключается потребитель (в виде некоторого сопротивления нагрузки).

Число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора в обычном трансформаторе различно, $W_1 \neq W_2$. Однако соотношение витков или коэффициент трансформации W_1 / W_2 , не играет никакой роли, если оценивать энергетические характеристики работы трансформатора. Это позволяет для всех энергетических расчетов использовать эквивалентный ему трансформатор, у которого $W_1 = W_2$. Равенство $W_1 = W_2$ позволяет от электромагнитной связи между первичными и вторичными обмотками перейти к электрической связи и построить простую схему замещения см. рис. 7.4.

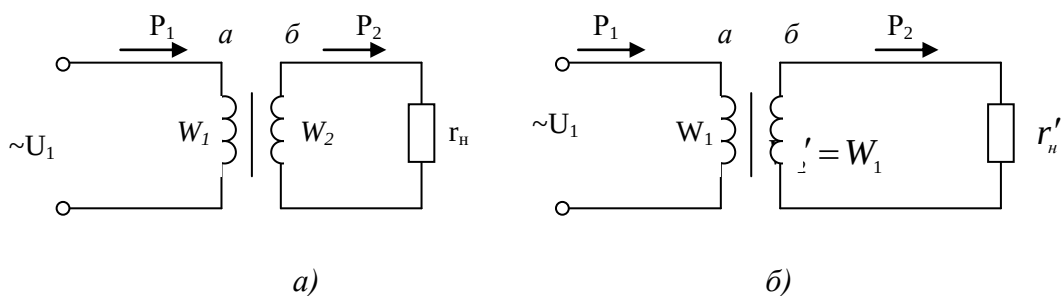


Рисунок 7.4 - Схема подключения реального (а) и приведенного (б) однофазного трансформатора

Сопротивление нагрузки r_n включено в цепь вторичной обмотки, оно определяет передаваемую в нагрузку мощность $P_2 \approx P_1$.

В приведенном трансформаторе сопротивлению нагрузки r'_n будет передаваться та же мощность $P_2 \approx P_1$.

Некоторое расхождение P_2 и P_1 как в реальном трансформаторе (а), так и в приведенном (б) определяется потерями мощности на активных сопротивлениях обмоток r_1 и r_2 (а), и r_1 и r'_2 (б). Таким образом баланс мощностей в обеих схемах (а и б) совпадает.

Преимуществом приведённого трансформатора является то, что потенциалы точек «а» и «б» у него одинаковы в любой момент времени, поэтому его схему замещения можно построить в виде электрической цепи без индуктивных связей между обмотками, см. рис. 7.5.

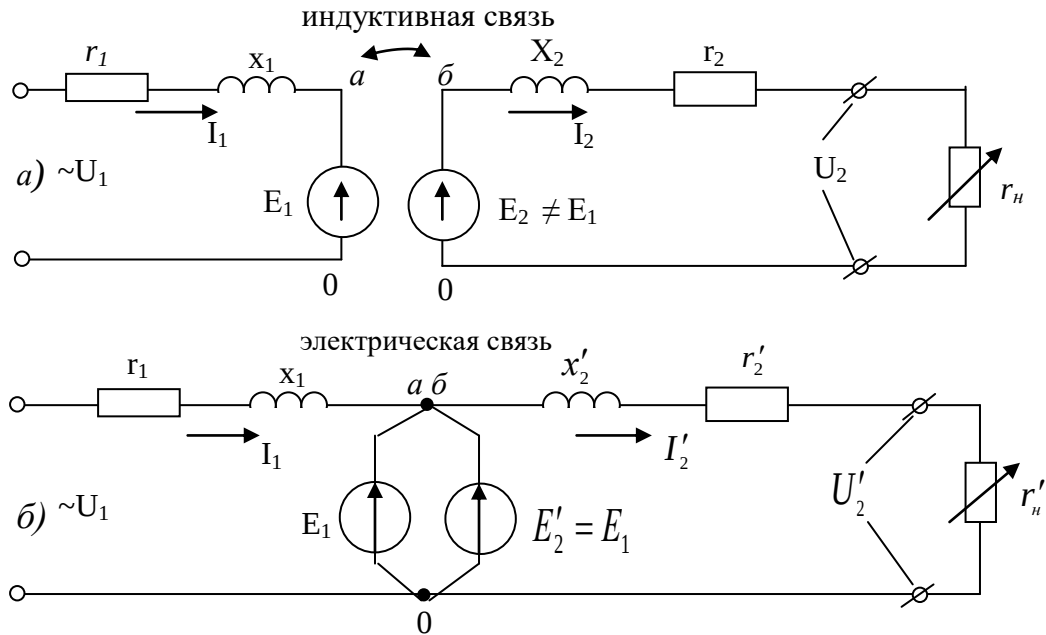


Рисунок 7.5 - Схема замещения реального (а) и приведенного (б) трансформатора

В приведенном трансформаторе $E_1 = E'_2$, и точки a и b могут быть объединены. Этим исключается индуктивная связь обмоток W_1 и W_2 . Реальные параметры r_2 и x_2 вторичной обмотки пересчитываются на r'_2 и x'_2 . Это же относится и к пересчету сопротивления нагрузки r_n на r'_n . (см. дисц. «Эл. машины»).

На рис.7.6 преобразована схема замещения асинхронного двигателя, которую используют для расчётов режима нагрузки.

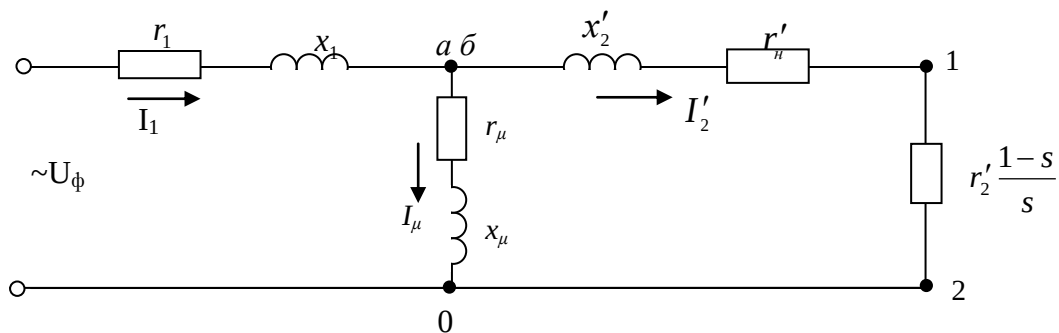


Рисунок 7.6 - Схема замещения фазы АД

Если пренебречь ветвью намагничивания с током I_μ и сопротивлениями r_μ и x_μ , то для анализа энергетических характеристик двигателя можно положить, что $I_1 \approx I'_2$. Дальнейшее упрощение схемы замещения приводит ее к виду, как изображено на рис. 7.7.

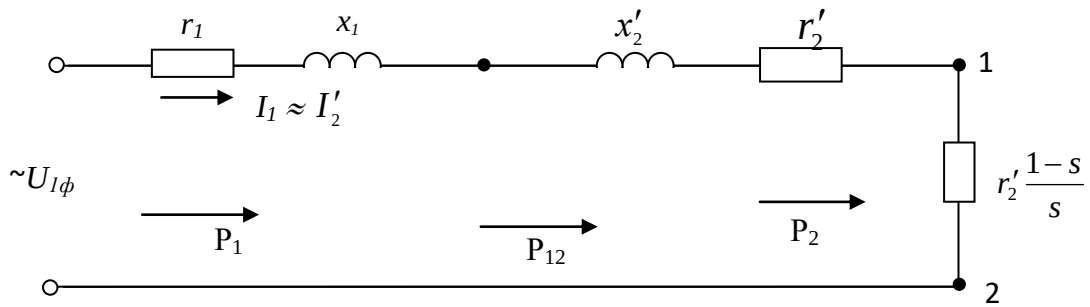


Рисунок 7.7 - Упрощенная схема замещения фазы асинхронного двигателя

Рассмотрим баланс мощностей:

$I_1^2 \cdot r_1$ - мощность потерь в фазной обмотке статора;

$I_1^2 \cdot x_1$ - реактивная мощность, теряемая на реактивном сопротивлении фазы статора;

$I_2'^2 \cdot r_2'$ - мощность потерь в фазной (условной) обмотке ротора;

$I_2'^2 \cdot x_2'$ - реактивная мощность, теряемая на реактивном сопротивлении фазы ротора;

$I_2'^2 \cdot r_2' \frac{1-s}{s}$ - мощность, передаваемая на вал ротора, и условно эквивалентная как электрическая мощность, выделяемая на некотором эквивалентном сопротивлении нагрузки (как в трансформаторе);

s - скольжение ротора: при $s = 0$ сопротивление нагрузки равно бесконечности, что равнозначно разрыву вторичной цепи; при $s = 1$ сопротивление нагрузки равно нулю. В первом случае имеем идеальный холостой ход (синхронное вращение ротора вместе с полем статора), а во втором случае - имеем режим короткого замыкания (стояночный режим).

В режиме короткого замыкания точки 1 и 2 на схеме замещения замкнуты, что позволяет из опыта определить параметры короткого замыкания реального двигателя:

$$r_1 + r_2' = r_k; \quad x_1 + x_2' = x_k. \quad (7.7)$$

(это можно рассмотреть на примере).

7.4. Механические характеристики АД

Для расчётов вторичной цепи, рис. 7.7, объединим сопротивление ротора и нагрузки

$$\begin{cases} r_H' = r_2' \frac{1-s}{s} \\ r_2' + r_H' = r_2' + r_2' \frac{1-s}{s} = \frac{r_2'}{s} \end{cases}, \quad (7.8)$$

Тогда ток фазы двигателя

$$I_1 = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{s} + r_1\right)^2 + (x'_2 + x_1)^2}}. \quad (7.9)$$

Электромагнитная активная мощность P_{12} , передаваемая от статора к ротору,

$$P_{12} = 3I_1'^2 \cdot \frac{r'_2}{s}. \quad (7.10)$$

Учитывая (7.9) получим выражение для мощности P_{12}

$$P_{12} = \frac{3U_{1\phi}^2 \cdot \frac{r'_2}{s}}{\left[\left(\frac{r'_2}{s} + r_1\right)^2 + x_r^2\right]}. \quad (7.11)$$

Тогда момент двигателя

$$M_2 = \frac{P_{12}}{\Omega_o}, \quad (7.12)$$

где $\Omega_i = \frac{2\pi \cdot f}{\delta}$ - синхронная скорость (скорость поля), рад/с; p – число пар полюсов магнитного поля, создаваемого обмоткой статора; M_2 – электромагнитный момент [Н·м].

Если положить, что все параметры двигателя постоянные величины, включая напряжение U и частоту сети f , то окажется, что момент двигателя зависит от одного параметра – скольжения s :

$$s = \frac{\Omega_o - \Omega}{\Omega_o}. \quad (7.13)$$

Кривая момента $M = f(s)$ имеет два максимума: один в генераторном режиме (при $s < 0$ и $\Omega > \Omega_o$) и один в двигательном режиме (при $s > 0$, $\Omega < \Omega_o$).

Приравнявая $dM / ds = 0$, определяем критическое скольжение s_k , при котором двигатель развивает максимальный (критический) момент:

$$s_k = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}. \quad (7.14)$$

Используя s_k в формуле момента, находим выражение для максимального момента

$$M_k = \frac{3U_{1\phi}^2}{2\Omega_o \cdot \left[r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + x_k^2}\right]}. \quad (7.15)$$

Знак «+» - относится к двигательному режиму, знак «-» - к генераторному режиму параллельно с сетью (при $\Omega > \Omega_o$).

Если момент двигателя (7.11 и 7.12) разделить на (7.15) и произвести соответствующие преобразования, то можно получить выражение

$$M = \frac{2M_{\kappa} \cdot (1 + a \cdot s_{\kappa})}{s/s_{\kappa} + s_{\kappa}/s + 2a \cdot s_{\kappa}}, \quad (7.16)$$

где M_{κ} – максимальный или критический момент (7.15); s_{κ} – критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту, $a = \frac{r_1}{r_2'}$.

Для обычных двигателей $\frac{r_1}{r_2'} \approx 1$, тогда формула (7.16) приобретает вид

$$M = \frac{2M_{\kappa} (1 + s_{\kappa})}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s} + 2s_{\kappa}}. \quad (7.17)$$

Эта формула получила название формулы Клосса. Удобство для построения характеристик $M = f(s)$ заключается в том, что момент критический задается в каталожных данных на двигатель в виде отношения $M_{\kappa}/M_n = \lambda$. При этом $\lambda \approx (1,8 \dots 2,8)$ называется перегрузочной способностью двигателя (при номинальном напряжении).

Критическое скольжение находится по формуле

$$s_{\kappa} = s_n \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (7.18)$$

Как видим, момент на валу двигателя, определяется, при равных условиях и постоянных параметрах, только скольжением s . Для электропривода важным является величина скорости Ω , которое через скольжение определяется по формуле

$$\Omega = \Omega_0 (1 - s) \quad (7.19)$$

или

$$\Omega_2 = \Omega_1 (1 - s),$$

где $\Omega_0 = \Omega_1 = \frac{2\pi f}{p}$ – скорость поля (синхронная скорость).

ЛЕКЦИЯ № 8

Тема: Электромеханические и механические характеристики АД

8.1. Характеристики АД при номинальных напряжении и частоте

Характерный вид механической характеристики $\Omega=f(M)$ и электромеханической характеристики $\Omega=f(I)$ приведен на рис. 8.1. Характеристика тока скорости по (7, а), а момента – по (7.11) и (7.12).

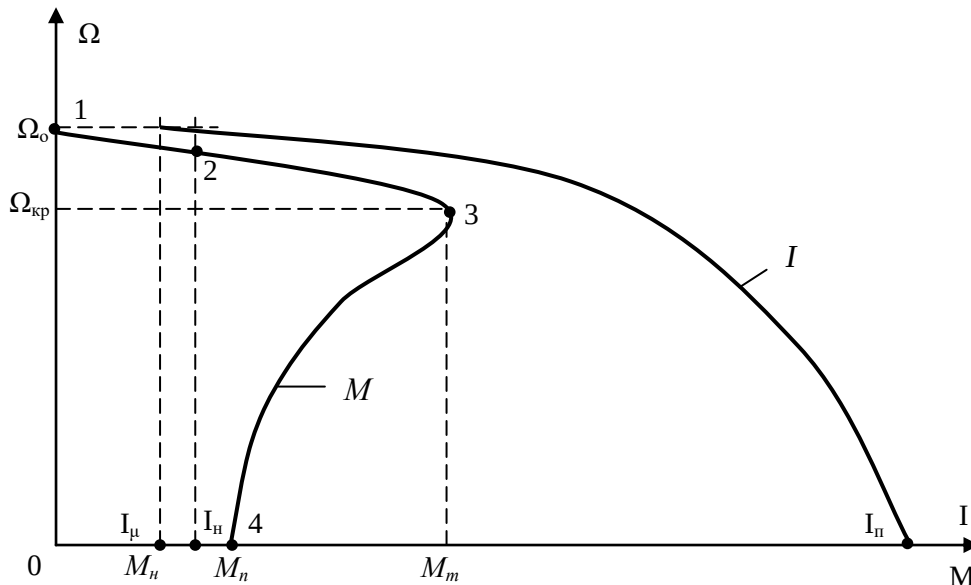


Рисунок 8.1 - Характерный вид характеристик $\Omega = f(M)$ и $\Omega = f(I)$ для АД

Характерные точки на характеристике момента:

1. $\Omega = \Omega_o, M = 0$;
2. $\Omega = \Omega_n, M = M_n$;
3. $\Omega = \Omega_k, M = M_m$; $M_m = 1,8 \dots 2,8 M_n$;
4. $\Omega = 0; M = M_n$; $M_n = 1,0 \dots 1,3 M_n$.

Характерные точки на характеристике тока

1. $\Omega = \Omega_o, I = I_\mu = (0,3 \dots 0,4) I_n = I_n$;
2. $\Omega = \Omega_n, I = I_n$;
3. $\Omega = 0,5\Omega_o, I \approx (0,8 \dots 0,9) I_n$;
4. $\Omega = 0; I = I_n \approx (5 \dots 7) I_n$.

Формула связи между скольжением и скоростью, см. (7.19)

$$\Omega = \Omega_o (1 - s). \quad (8.1)$$

Часто пользуются величиной относительной скорости:

$$\left. \begin{array}{l} \text{тогда} \quad \nu = \frac{\Omega}{\Omega_o} = (1-s), \\ \text{или} \quad s = 1 - \nu. \end{array} \right\} \quad (8.2)$$

Отсутствие пропорциональности между моментом двигателя и током статора во время пуска объясняется значительным снижением магнитного потока двигателя, а также уменьшением коэффициента мощности вторичной цепи при пуске.

Момент асинхронного двигателя, как и любой электрической машины, пропорционален магнитному потоку Φ и активной составляющей вторичного тока:

$$M = k' \Phi \cdot I'_2 \cos \Psi_2, \quad (8.3)$$

где k' - конструктивный коэффициент; Ψ_2 – угол сдвига между ЭДС и током ротора;

$$\cos \Psi_2 = \frac{r'_2/s}{\sqrt{(r'_2/s)^2 + r'_k}}. \quad (8.4)$$

На рис. 8.2 изображена схема замещения АД для начального момента пуска (режим КЗ).

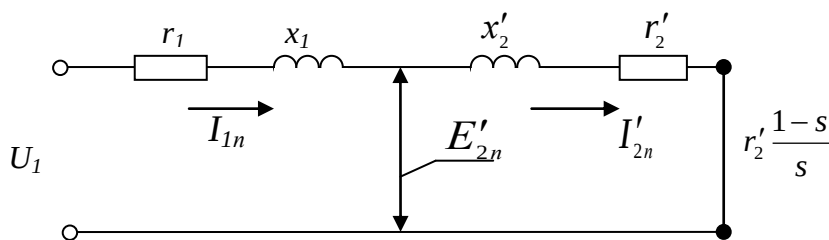


Рисунок 8.2 - Схема замещения АД в режиме короткого замыкания

Как видим, пусковой ток $I_{1n} = I'_{2n}$ находится как

$$I_{1n} \approx I'_{2n} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}},$$

где $r_k = r_1 + r'_2$; $x_k = x_1 + x'_2$ - сопротивления КЗ.

ЭДС $E_{1n} = E'_{2n}$ при пуске

$$E_{1n} = U_1 - I_{1n} (r_1 + jx_1) \approx 0,5 U_1.$$

Магнитный поток Φ определяется из формулы: $E_{1n} = 4,44 W_\phi \cdot f \cdot \Phi_n$, и оказывается примерно вдвое меньше магнитного потока в режиме номинальной нагрузки, или холостого хода. $\cos \varphi_{1n} \approx \cos \Psi_2 \approx 0,4$, вместо 0,8 ... 0,9 при номинальном режиме нагрузки.

Итак, формула момента

$$M_n = k' \cdot \Phi_n \cdot I'_{2n} \cdot \cos \varphi_{1n}$$

при пуске ($t = 0$) даёт

$$M_n = k'(0,5\Phi_n)(5I'_{2n}) \cdot (0,4) \approx 1,0 M_n.$$

Несмотря на то, что I'_{2n} принят равным пятикратному току, момент $M_n \approx M_n$.

В случае, если рассматриваются двигатели с увеличенным сопротивлением ротора r'_2 (глубокопазные и др.), (в их обозначениях появляется буква С или П – повышенный пусковой момент), то их характеристики момента будут иметь три особенности:

- 1) С увеличением r'_2 критическое скольжение пропорционально увеличивается ($s_k \equiv r'_2$);
- 2) Максимальный момент M_{max} остается неизменным ($M_m = const$);
- 3) Пусковой момент увеличивается, а пусковой ток уменьшается.

Если в цепь ротора фазного двигателя ввести сопротивление r'_{2n} , то наблюдаются те же три особенности, см. рис. 8.3.

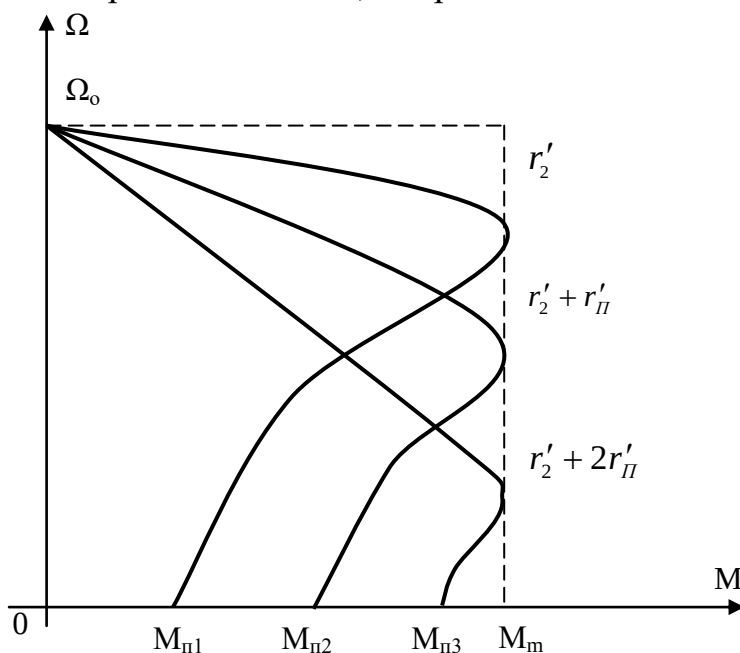


Рисунок 8.3 - Изменение механических характеристик АД с ФР при увеличении сопротивления r'_{2n}

8.2. Сравнение характеристик двигателей: обычного и с повышенным скольжением

Сравнение характеристики двигателя для обычного исполнения и с повышенным сопротивлением ротора можно провести, используя соответствующие графики.

Предполагается, что на рис. 8.4 изображены двигатели одинаковой мощности и синхронной скорости Ω_o .

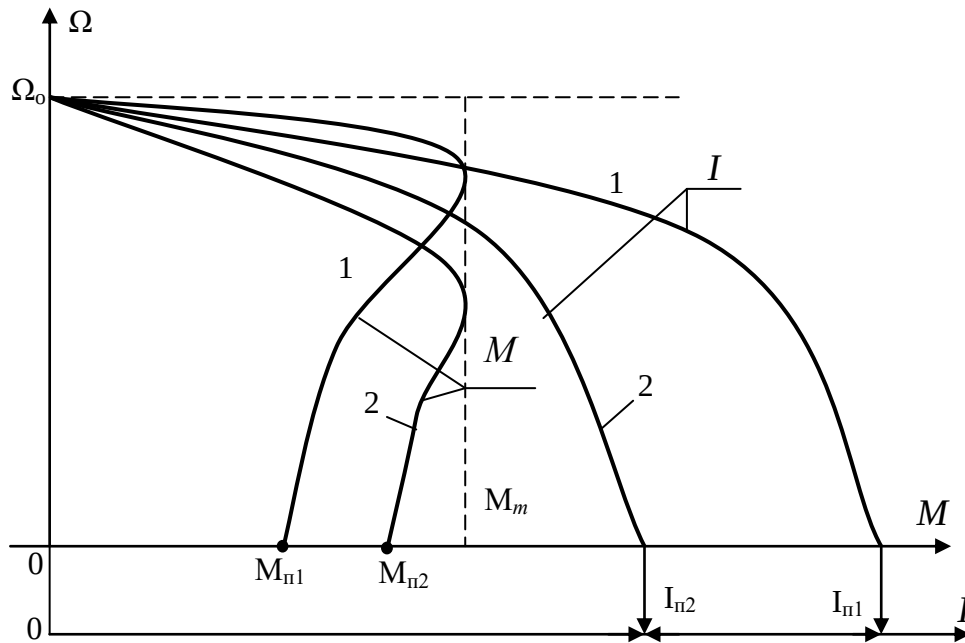


Рисунок 8.4 - Характеристики тока I и момента M двигателей с обычным (1) и повышенным (2) сопротивлением ротора

Двигатели с повышенным сопротивлением r'_2 , или при подключении r_{2n} в цепь фазного ротора, имеют хорошие пусковые показатели: увеличенный пусковой момент $M_{n2} > M_{n1}$, и уменьшенный пусковой ток $I_{n2} < I_{n1}$. Такой двигатель быстрее разгоняется (сокращается время пуска) и, кроме того, за время разгона имеет меньшие пусковые токи и, следовательно, уменьшенную среднюю мощность тепловыделения (что особенно важно для изоляции обмотки статора двигателя).

Однако, в режиме нагрузки при установившемся режиме, двигатель с повышенным сопротивлением r'_2 (или $r'_2 + r'_{2n}$) будет иметь и повышенные потери мощности, как в роторе, так и в статоре.

Суммарные потери определяются из формулы

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = M_n \cdot \Omega_o \cdot s_n \left(1 + \frac{r_1}{r'_2} \right),$$

где номинальное скольжение $s_n \cong s_k = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$ пропорционально r'_2 , так как

r_1 и $x_k = x_1 + x'_2$ от сопротивления r'_2 не зависят.

При продолжительном режиме работы двигателя с повышенным скольжением оказываются менее экономичными, так как у них низкий КПД и повышенный нагрев обмоток из-за увеличения потерь.

8.3. Механические характеристики АД в тормозных режимах

Режим генераторного или рекуперативного торможения (ГТ).

Возникает при подкрутке двигателя со стороны механизма, например, при ускоренном спуске груза. Двигатель реверсируется и далее вращается под действием момента силы тяжести груза. Но при скорости $\Omega > \Omega_0$ скольжение становится отрицательным, что приводит к изменению знака момента. Момент вместо подкручивания начинает тормозить движение. На рис. 8.5 изображена рабочая точка «а» режима ГТ.

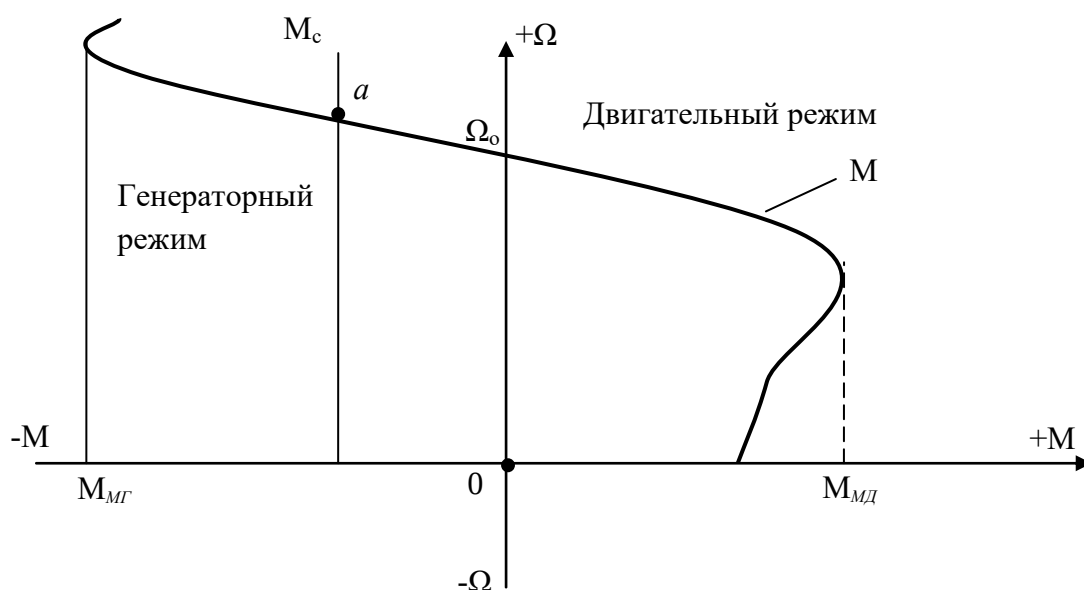


Рисунок 8.5 - Тормозной режим в точке «а» при рекуперации энергии в сети

В режиме генераторного торможения двигатель работает как асинхронный генератор, отдавая энергию в сеть, и потребляя реактивную мощность, при этом максимальный момент в генераторном режиме больше, чем в двигательном $M_{MG} > M_{MD}$.

Режим динамического торможения.

В этом режиме обмотка статора отключается от сети питания и подключается к источнику постоянного напряжения. Постоянный ток, протекая по обмотке статора создает неподвижное магнитное поле, в котором вращается ротор. Относительная скорость ротора $\nu = \frac{\Omega}{\Omega_0}$ по существу определяет собой скольжение, то есть относительную скорость движения стержней ротора в неподвижном магнитном поле.

На рис. 8.6 показан переход из режима генерального торможения в режим динамического торможения. Точка 0 занимает место точки синхронной скорости Ω_0 .

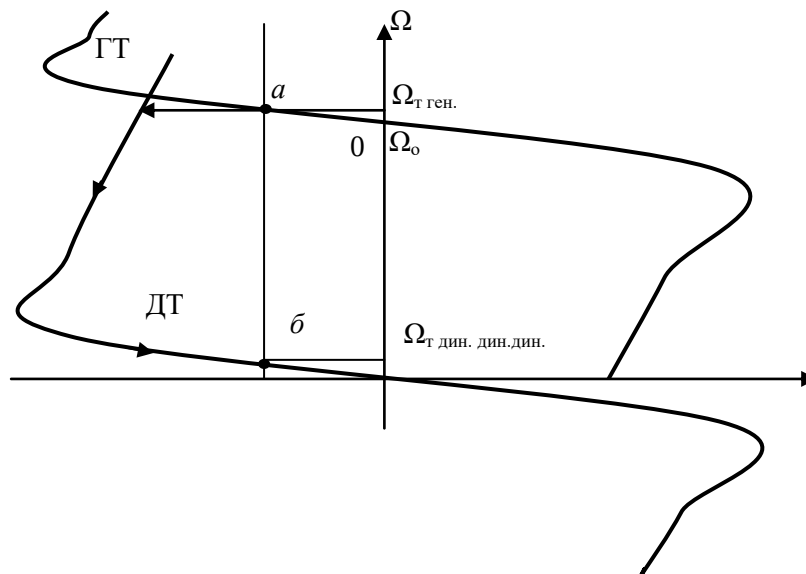


Рисунок 8.6 - Переход от точки режима генераторного торможения «а» в точку динамического торможения «б»

Из графиков на рис. 8.6 становится понятным название – режим динамического торможения. Действительно, если двигатель был включен на спуск груза и работал в точке «а», то в режиме генераторного торможения (ГТ) осуществлялся очень быстрый спуск со скоростью $\Omega_{т\text{ ген.}} > \Omega_0$. При необходимости «посадки» груза на основание, чтобы его не разбить, включается режим динамического торможения (ДТ), и груз «приземляется» со скоростью $\Omega_{т\text{ дин}} \approx 0$, точка «б».

Схемы подключения обмотки статора на постоянное напряжение и величина самого напряжения могут быть различными, в том числе, постоянное напряжение может подаваться от сети переменного тока через выпрямитель.

Режим торможения противовключением.

Режим получается изменением направления вращения поля. Достигается изменением подвода напряжения сети к двум любым фазам обмоток статора, см. рис. 8.7. На схеме фаза «а» двигателя подключена к фазе А сети. С помощью переключателя Π при положении I обеспечивается подключение вывода «в» к фазе В сети, и «с» к фазе С. В положении II происходит подключение вывода «в» к фазе С сети, а «с» к фазе В сети.

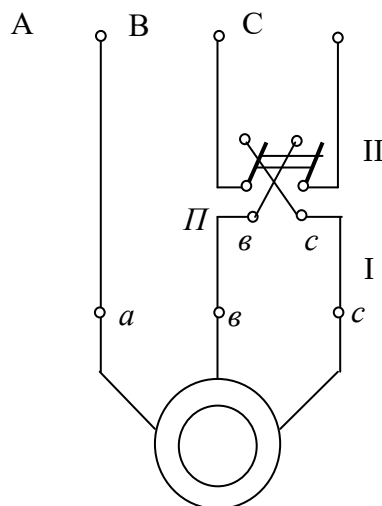


Рисунок 8.7 - Схема реверса двигателя с КЗ ротором

На рис. 8.8 показан переход АД в режим реверса с использованием механических характеристик: для прямого (+М, + Ω) и обратного (-М, - Ω) направлений вращения поля.

После переключения фаз двигатель последовательно переходит с рабочей точки «а» в точку «в», где оказывается в режиме торможения противовключением (ТПВ). При скольжении, близком к $s \approx 2.0$ происходит быстрое снижение скорости до $\Omega = 0$ в точку «с».

При необходимости быстро затормозить спуск груза до остановки, в точке «с» нужно просто отключить двигатель от сети. При этом груз будет автоматически взят на электромагнитный тормоз (как и при исчезновении питания).

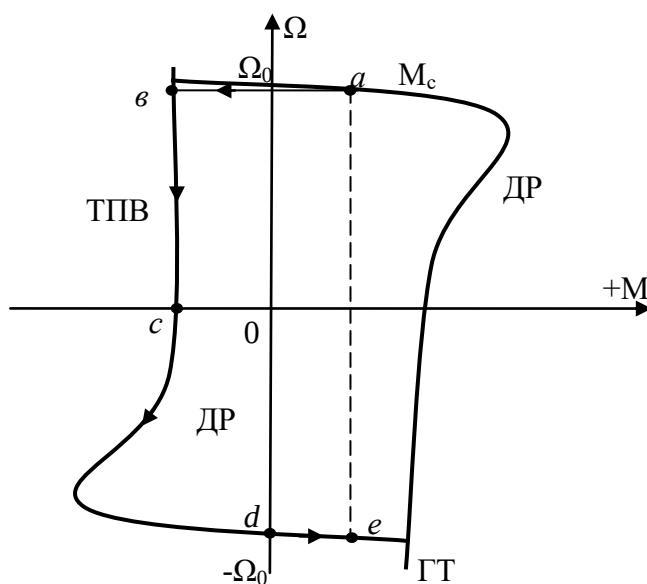


Рисунок 8.8 - Переход АД из режима двигателя, точка «а», в режим ТПВ, участок «в – с», разгона в обратном направлении, участок «с – d», и далее, в режим ГТ, участок «d – e»

Если двигатель не отключить от сети, то происходит разгон двигателя в обратном направлении до скорости $-\Omega_0$ (точка «d»). На интервалах механической характеристики «c-d» имеет место двигательный режим. Так как момент сопротивления $M_c = \text{const}$ потенциальный (не меняет направления), то после точки «d» (при $\Omega = -\Omega_0$) происходит разгон до точки «e» при скорости $-\Omega < -\Omega_0$ (за счёт подкрутки со стороны груза).

В точке «e» АД в режиме рекуперативного торможения (это IV-й квадрант), будет работать с постоянной скоростью, обеспечивая быстрое опускание груза.

ЛЕКЦИЯ № 9

Тема: Регулирование скорости электропривода с двигателями постоянного тока

9.1. Принципы регулирования. Показатели регулирования

Регулирование скорости двигателя осуществляется воздействием на изменение положения его механической характеристики вдоль оси скорости. При этом рабочая точка также смещается вдоль оси скорости.

В зависимости от двигателя и способа получения различных искусственных механических характеристик различают следующие показатели регулирования:

- 1) Диапазон регулирования $D = \Omega_{max} / \Omega_{min}$;
- 2) Плавность регулирования $\phi_{пл} = \Omega_i / \Omega_{i-1}$
- 3) Экономичность регулирования мощности оценивается относительной величиной потерь при различных скоростях;
- 4) Стабильность скорости: характеризуется изменением скорости при заданном изменении момента нагрузки, зависит от жесткости механической характеристики.
- 5) Направление регулирования, то есть уменьшение или увеличение ее по отношению к номинальной скорости. Различают однозонное регулирование, т.е. вверх или вниз от основной скорости, и двухзонное, то есть и вниз, и вверх от основной, номинальной скорости.
- 6) Допустимая нагрузка двигателя, т.е. наибольшее значение момента, который двигатель может развивать при работе на регулировочных характеристиках, определяется нагревом двигателя.

Условием полного использования двигателя при работе на разных регулировочных характеристиках является постоянство нагрузочного тока.

9.2. Регулирование скорости ДПТ независимого возбуждения

Из уравнения

$$\Omega = \frac{U - I R}{k\Phi} \quad (9.1)$$

вытекает, что возможны три принципиально различных способа регулирования скорости двигателя:

- 1) Изменением тока возбуждения (магнитного потока) двигателя;
- 2) Изменением сопротивления цепи якоря посредством резисторов (реостатное);
- 3) Изменением подводимого к якору двигателя напряжения.

Схемы возможных способов регулирования можно изобразить в виде некоторой универсальной схемы, рис. 9.1.

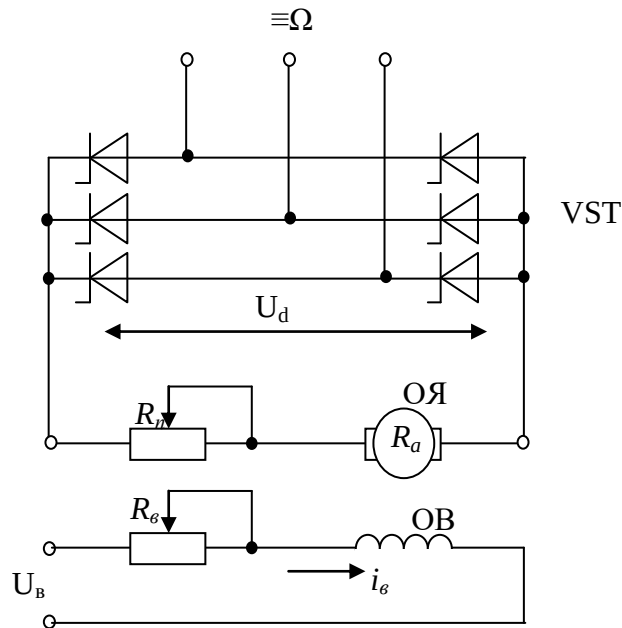


Рисунок 9.1 - Три способа регулирования в одной схеме ДПТ

Первый способ – изменение магнитного потока регулирования i_g с помощью реостата R_g . При выведенном реостате $R_g = 0$ имеем $\Phi = \Phi_{max}$, при введении реостата, $R_g > 0$, магнитный поток можно только ослабить, так как $\Phi_{max} = \Phi_{ном}$. На рис. 9.2 показаны механические характеристики регулирования скорости магнитным потоком.

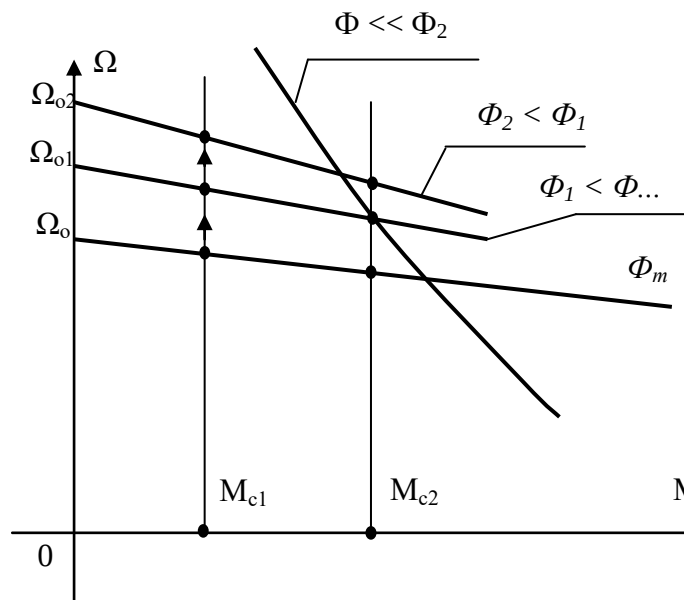


Рисунок 9.2 - Смещение МХ вверх от ЕМХ при ослаблении магнитного потока

При ослаблении магнитного потока увеличивается скорость идеального холостого хода $\Omega_o = U / k\Phi$. С увеличением нагрузочного момента $M_c > 0$ наклон характеристик возрастает тем более, чем меньше магнитный поток.

Таким образом, изменение магнитного потока Φ (его уменьшение) позволяет регулировать скорость только вверх от основной и имеет следующие особенности:

- 1) с увеличением нагрузочного момента диапазон регулирования уменьшается;
- 2) экономичность регулирования снижается при увеличении скорости, так как переменные потери пропорциональны перепаду скорости $\Delta\Omega = \Omega_0 - \Omega$.
- 3) При сильном ослаблении магнитного потока и работе с большими моментами нагрузки скорость может падать (опрокидывание регулирования).
- 4) плавность регулирования высокая, так как реостатом с малыми токами возбуждения ($i_{gn} \approx 0,05 I_{an}$) можно плавно изменять i_g .

Второй способ – регулирование введением сопротивления R_n в цепь якоря (часто для этой цели могут использоваться пусковые сопротивления). При этом $\Phi = \Phi_{max}$, $U = U_n = const$.

Так как сопротивления R_n должны пропускать нагрузочные токи якоря, то регулирование скорости ступенчатое.

Характеристики момента при различных значениях $R_n = R_{n1}, R_{n2}, R_{n3}$ напоминают пусковую диаграмму тока, рис. 9.3.

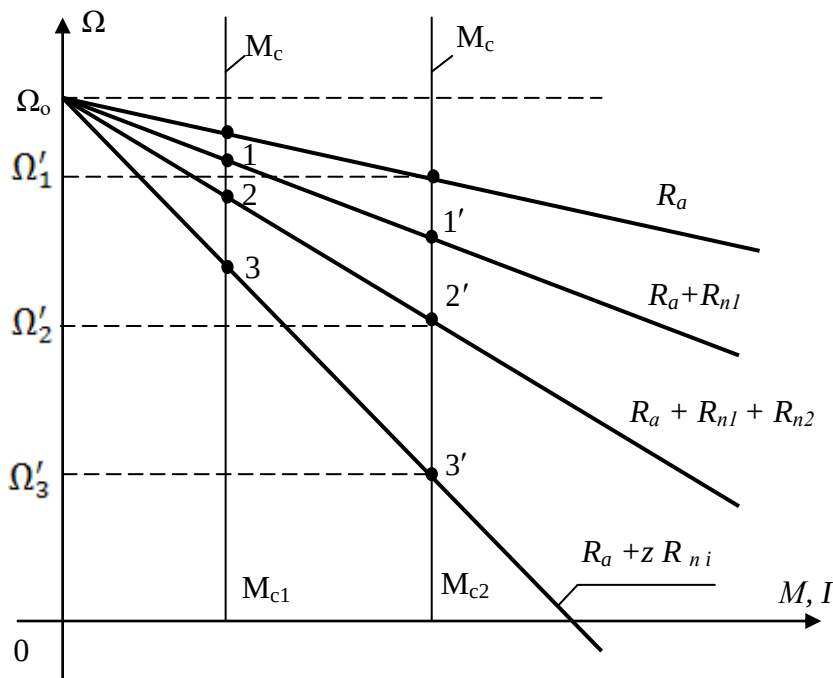


Рисунок 9.3 - Механические характеристики реостатного регулирования скорости

Показатели реостатного регулирования скорости:

- 1) регулирование – вниз от основной скорости;

- 2) диапазон регулирования зависит от нагрузочного момента M_c : чем больше M_c , тем больше диапазон; без нагрузки скорость не регулируется;
- 3) плавность низкая, это так называемое ступенчатое регулирование;
- 4) экономичность – низкая.

Так, например, при скорости Ω'_3 и моменте M_{c2} имеем: мощность идущая на вал двигателя или полезная мощность:

$$P'_{2=} = M_{c2} \cdot \Omega'_3,$$

а потери мощности на сопротивлениях

$$\Delta P'_2 = M_{c2} (\Omega_o - \Omega'_3),$$

то есть потери превышают полезную мощность. Реостатное регулирование поэтому называют часто регулирование потерями.

Третий способ – регулирование скорости напряжением, подводимым к якору двигателя. Если есть возможность его осуществления, то это самый эффективный способ.

Для его реализации необходим источник постоянного напряжения (генератор) с плавным регулированием величины самого напряжения. Обмотка возбуждения генератора при этом подключается на постоянное независимое напряжение при максимальном магнитном потоке.

Такой принцип регулирования для мощных приводов, например, гребного винта реализуется на многих судах. Первичный двигатель, например, дизель, вращает якорь генератора с постоянной скоростью. Изменением возбуждения генератора достигается плавное регулирование напряжения практически от нуля до номинального значения. Если изменить полярность напряжения на обмотке возбуждения, то изменится и полярность напряжения генератора, что можно использовать для реверса эл. двигателя, подключенного к генератору. На рис. 9.4 приведена схема, получившая название системы «Генератор-двигатель» или система Г-Д.

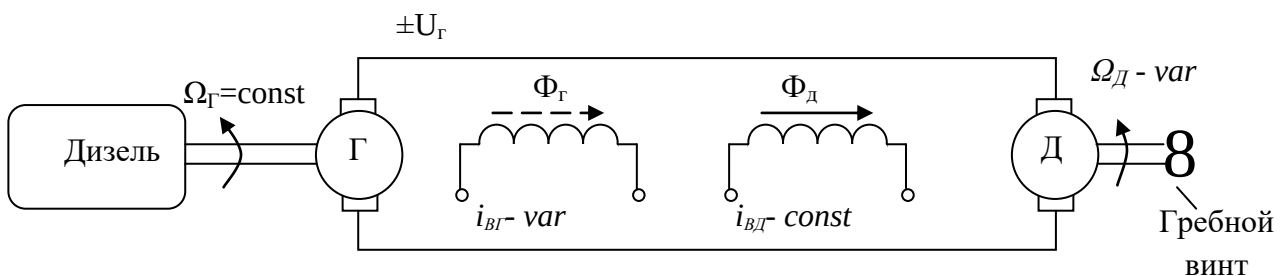


Рисунок 9.4 - Система «Генератор - Двигатель»

Двигатель генератора (дизель) вращает генератор с постоянной скоростью $\Omega_{\Gamma} = \text{const}$. Ток возбуждения генератора $i_{БГ}$ плавно может изменяться от нуля до максимального. При этом напряжение U_{Γ} так же будет

меняться от нуля до $+U_{\Gamma max}$, а при изменении направления тока i_{BG} в обмотке возбуждения, регулирование напряжения осуществляется с обратной полярностью, то есть от нуля до $-U_{\Gamma max}$.

Подключенный к генератору дизель обычно имеет высокую скорость (до 1500 об/мин), в то время как исполнительный двигатель Д, вращающий гребной винт, может иметь меньшую скорость (100 - 300 об/мин). Тем самым исключается редуктор, устанавливаемый обычно между быстроходным дизелем и тихоходным гребным винтом, так как дизель при любой нагрузке работает с постоянной скоростью, то это создает наилучший для него режим (нерегулируемый по скорости дизель рассчитывается на один оптимальный скоростной режим).

Если учесть, что реверс гребного двигателя и гребного винта можно осуществить изменением полярности напряжения генератора, то мы получаем электрический привод гребного винта с высокой управляемостью (регулирование скорости и реверс) без всяких механических регуляторов. Исключается еще один важный механический элемент – шинно-пневматическая муфта, позволяющая иметь работающий дизель и не работающий винт, так как механический вал заменен электрическим, который можно просто «отключать».

На рис. 9.5 изображены механические характеристики, используемые для регулирования работы двигателя.

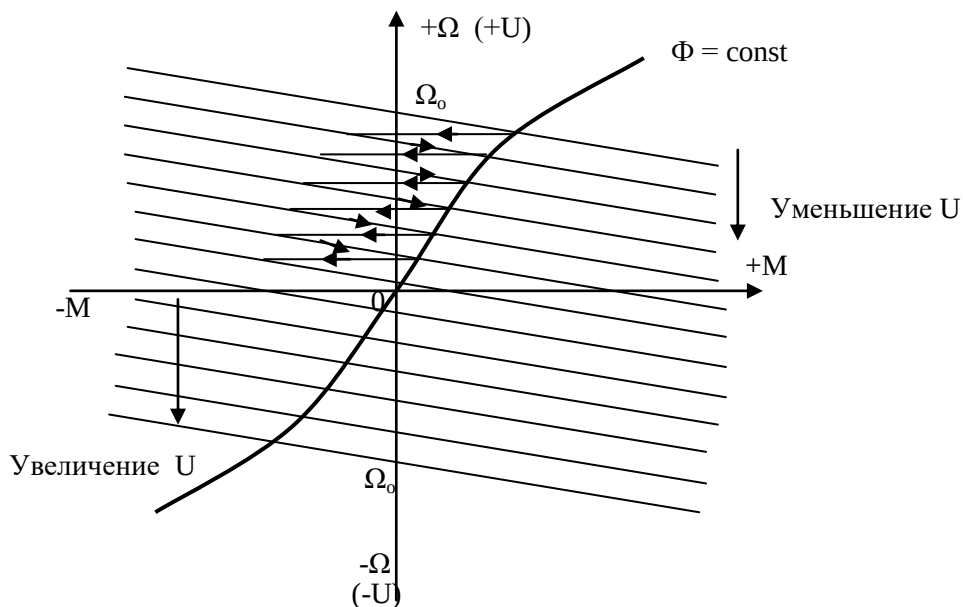


Рисунок 9.5 - Семейство механических характеристик системы «Г – Д»
в приводе гребного винта

При быстром снижении напряжения двигатель переходит в режим генераторного торможения, точки характеристик при этом оказываются во II квадрате $(+\Omega_1 - M)$. Также регулируемые по скорости электрические

приводы (по системе Г-Д) используются до настоящего времени в чёрной металлургии на прокатных станках.

Так как жесткость характеристик постоянна, в цепях якоря и возбуждения не используется сопротивлений, то, в дополнение к достоинствам управления, можно добавить еще и экономичность.

Описанная система регулирования скорости двигателя постоянного тока в приводе гребного винта получила название «Система электродвижения», а суда с электродвижением часто называются «Электроходами».

Системе электродвижения присущи и недостатки:

- двойное преобразование энергии, и наличие соответственно двух эл. машин;
- генератора и двигателя равной с дизелем мощности, приводит к утяжелению главной энергетической установки, обеспечивающий ход судна. Не высоким оказывается и КПД главной установки.

Однако описанная система может найти применение во вспомогательных гребных двигателях, или в электроприводах подруливающих устройств. При этом в качестве источника регулируемого по величине напряжения может выступать управляемый выпрямитель (система УВ-Д). Для возможности реверса и генераторного торможения применяется схема с двумя комплектами выпрямителей, см. рис. 9.6.

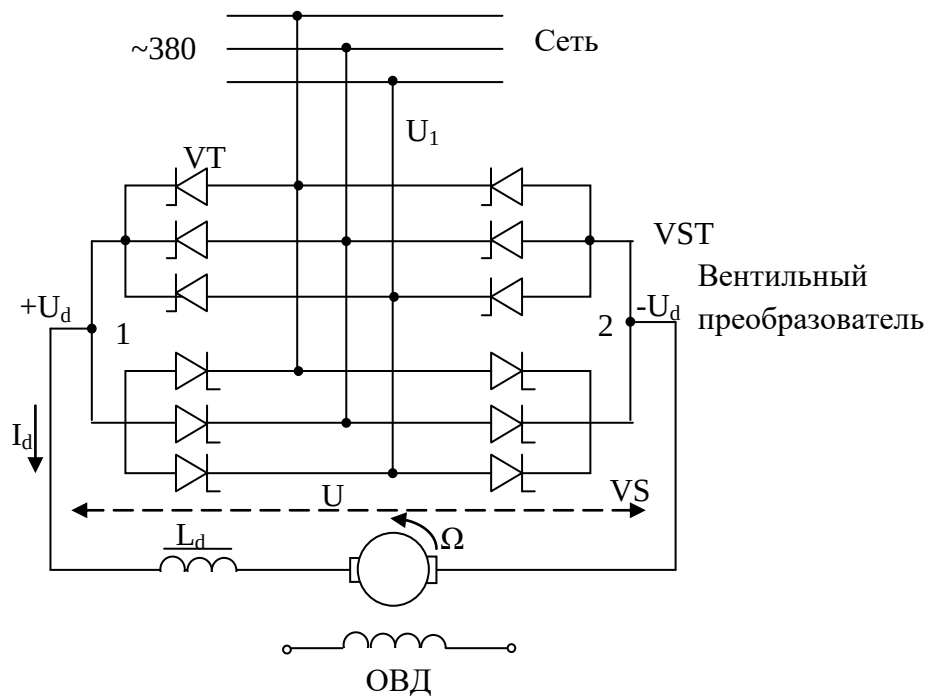


Рисунок 9.6 - Двухкомплектная (VST1 и VST2) схема вентильного преобразователя с реверсированием тока в цепи якоря двигателя (М)

Вентильные группы VST1 и VST2 собраны в схемы трехфазных мостовых выпрямителей на управляемых вентилях-тиристорах VT.

При прямом направлении выпрямленного напряжения $+U_d$ (точка 1) выпрямленный ток I_d будет протекать в направлении от точки 1 к точке 2 схемы, обеспечивая, например, прямое направление вращения Ω якоря машины M . При этом в выпрямительном режиме будет работать группа VST1. Для регулирования величины U_d , а, следовательно, и скорости Ω , управляющие импульсы на тиристоры VT группы подаются с регулируемым углом управления α . Выпрямленное напряжение U_d зависит от угла направления α в соответствии с формулой:

$$U_d = U_{do} \cdot \cos \alpha ,$$

где U_{do} – максимальное выпрямленное напряжение при $\alpha = 0$ и $\cos \alpha = 1$.

Соотношение между переменным напряжением $\sim U_1$ и выпрямленным напряжением $= U_{do}$ для трехфазной мостовой схемы выпрямления определяется из соотношения

$$U_{do} = 1,35 \cdot U_1 .$$

При $U_1 = 380$ В, тогда $U_{do} = 513$ В. Поэтому для согласования напряжений между сетью питания U_1 и выпрямленным напряжением U_d включается понижающий трансформатор. В противном случае к выходу вентильного преобразователя подключается двигатель с номинальным напряжением 500 В.

Вторая группа вентиля VST2 работает для обеспечения обратного направления вращения двигателя.

ЛЕКЦИЯ № 10

Тема: Регулирование скорости электроприводов с асинхронными двигателями

10.1. Способы регулирования скорости АД

К числу наиболее распространенных относятся способы регулирования изменением добавочного активного сопротивления в цепи ротора r'_{2n} , частоты и напряжения, подводимого к обмотке статора, а также изменение числа пар полюсов магнитного поля АД. К числу специальных относятся способы импульсного регулирования.

10.2. Регулирование скорости изменением r'_{2n}

Регулирование возможно для асинхронных двигателей с фазным ротором (ФР). Схема включения АД с ФР приведена на рис. 10.1.

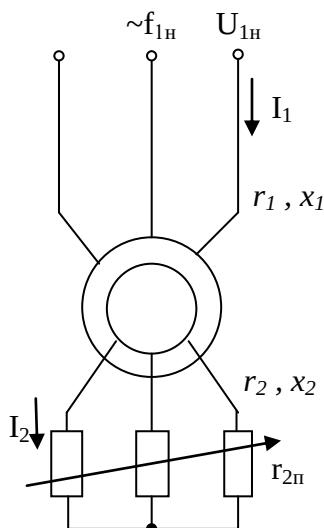


Рисунок 10.1. Схема включения АД с ФР

Механические характеристики при $r_{2n} = var$ приведены на рис.10.2.

Сопротивление резистора $r_{2\partial 2}$, обеспечивающее прохождение характеристики через точку с координатами $[\omega_c = \omega_o(1 - s_c), Mc]$, определяют по формуле

$$\left. \begin{aligned} r_{2\partial 2} &= \left(\frac{s_c}{s_e} - 1 \right) \cdot r'_2, \\ \text{или} \quad r_{2\partial 2} &= \left(\frac{s_{\kappa u}}{s_{\kappa e}} - 1 \right) \cdot r'_2, \end{aligned} \right\} \quad (10.1)$$

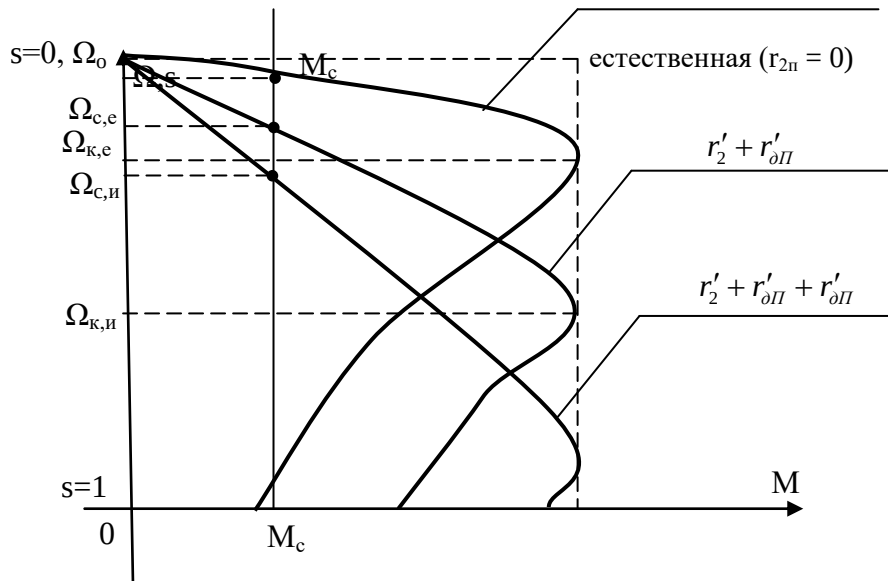


Рисунок 10.2 - Искусственные реостатные механические характеристики АД с ФР

Активное сопротивление фазы обмотки r'_2 берется из паспортных данных, или определяется по приближенной формуле

$$r'_2 \approx \frac{E_{2к} \cdot s_n}{\sqrt{3} I_{2н}}, \quad (10.2)$$

где $E_{2к}$ – ЭДС в фазной обмотке (линейная) при коротком замыкании.

10.3. Регулирование изменением частоты питающего напряжения (частотное регулирование)

Частотное регулирование предусматривает, как правило, одновременное изменение питающего напряжения.

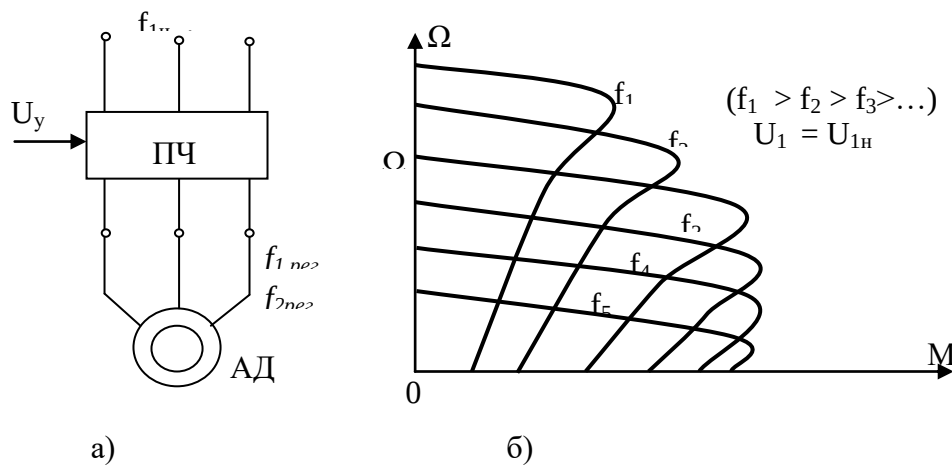


Рисунок 10.3 - Схема включения (а) и механические характеристики (б) АД при питании от ПЧ

Частотное регулирование осуществляется по структурной схеме, рис. 10.3. а, где ПЧ – электромагнитный или вентильный преобразователь частоты.

Если увеличивать частоту ($f_{12} > f_{11} > f_{1н}$) при $U_1 = U_{1н} = const$, то момент максимальный уменьшается. Это происходит за счет уменьшения магнитного потока, согласно формуле

$$\Phi \approx \frac{U_1}{\sqrt{2\pi \cdot w_{\text{э}} \cdot f}} , \quad (10.3)$$

где $w_{\text{э}}$ – витки (эффективные) фазной обмотки.

При увеличении f поток Φ уменьшается, а при уменьшении f – увеличивается. Однако увеличение магнитного потока приводит к насыщению магнитной системы двигателя и быстрому увеличению намагничивающего тока I_{μ} в токе статора I_1 . Так при снижении частоты на 10% происходит увеличение на 10 % потока Φ . При этом из-за насыщения тока $I_{\mu} \approx I_{1н}$. То есть такой двигатель уже нельзя нагружать, опасаясь перегрева обмотки статора. Исходя из этого, при снижении f необходимо снижать U_1 . Для поддержания $\Phi = const$ согласно (10.3) нужно выдерживать «закон» частотного регулирования

$$\frac{U_1}{f_1} = const . \quad (10.4)$$

Этот закон позволяет сохранять критический момент M_m неизменным. При этом на любой частоте вращения перегрузочная способность двигателя, определяемое отношением M_m / M_n сохраняется неизменной. Таким образом (10.4) обеспечивает регулирование скорости при постоянной перегрузочной способности.

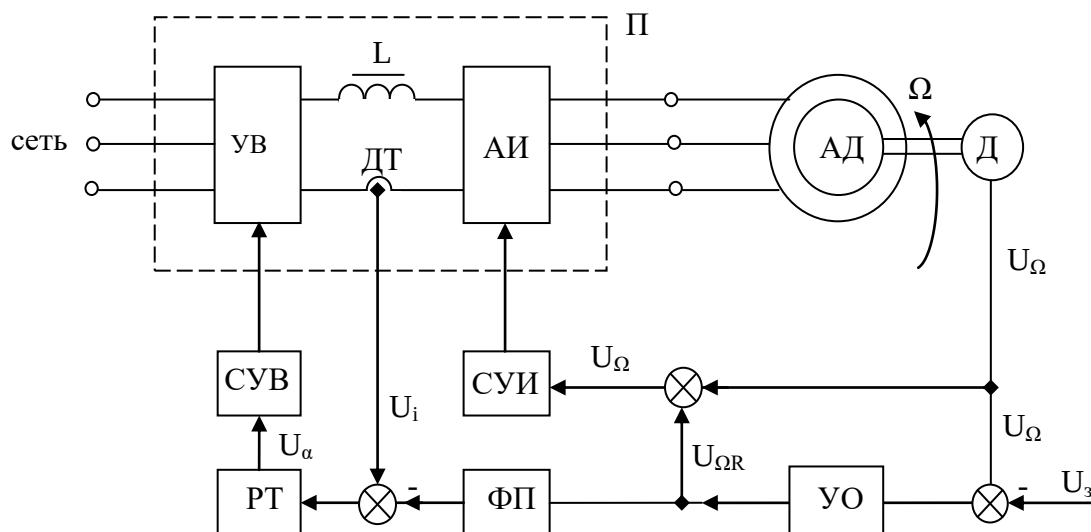


Рисунок 10.4 - Схема частотно-токового управления асинхронным двигателем

Для формирования статических и динамических характеристик асинхронного ЭП с заданным высоким качеством часто используется так называемое частотно-токовое управление, в котором в качестве управляющего воздействия принимается не напряжение, а ток обмотки статора.

Контроль заданного значения тока осуществляется с помощью контура подчиненного регулирования тока.

Система ЭП, реализующая рассмотренный принцип, показана на рис. 10.4. Она содержит управляемый выпрямитель УВ с системой управления СУВ, автономный инвертор тока АИТ с системой управления СУИ, асинхронный двигатель АД, регулятор тока РТ, датчик тока статора ДТ, датчик скорости ДС, усилитель ограничитель УО, функциональный преобразователь ФП. Задающий сигнал U_z определяет частоту переключения тиристоров АИТ, а, следовательно, и частоту тока статора (характеристика задающего генератора предполагается линейной). После вычитания из задающего сигнала напряжения U_Ω , пропорционального скорости ротора Ω , образуется сигнал $U_{\Omega R}$, пропорциональный частоте скольжения ротора. Этот сигнал через функциональный преобразователь, реализующий один из законов связи между частотой скольжения и током статора, используется в качестве сигнала задания в контуре регулирования тока. Частота на выходе АИТ определяется напряжением $U_{\Omega S} = U_\Omega + U_{\Omega R}$. Система построена таким образом, что пока УО работает в линейной зоне, частота на выходе АИТ постоянная и не зависит от нагрузки ($U_{\Omega S} = U_z$). При достижении моментом нагрузки максимального значения ($U_{\Omega R} = U_{\Omega R.m}$) УО входит в ограничение и АД работает с постоянной частотой скольжения, постоянным током и, следовательно, развивает постоянный момент. При переходе АД в генераторный режим АИТ переходит в режим выпрямителя, а УВ – в режим ведомого сетью инвертора, что обеспечивает генераторное торможение с рекуперацией энергии в сеть.

На рис. 10.5 показан примерный вид механических характеристик в рассмотренной системе.

Системы частотно-токового управления позволяют обеспечить диапазон регулирования скорости $D = 100: 1$ с высокими требованиями к динамике.

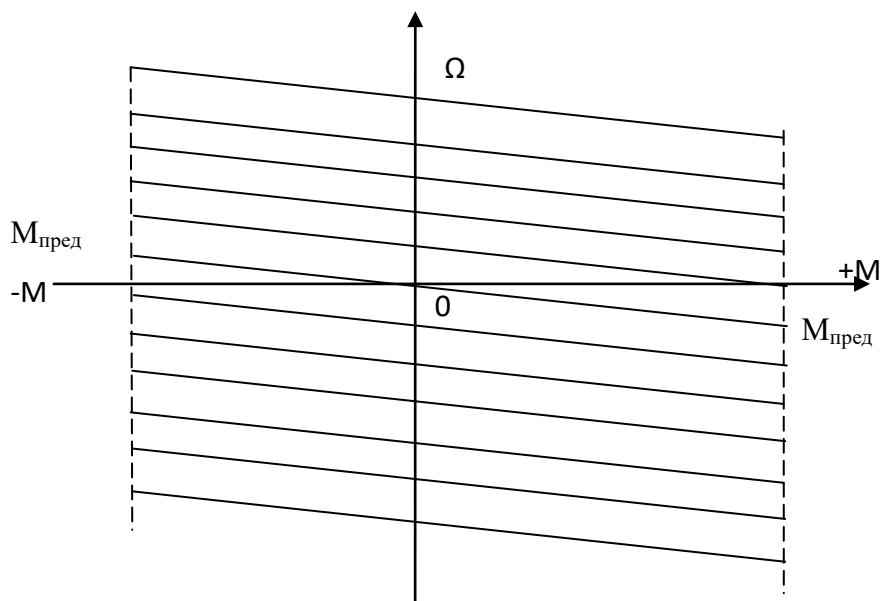


Рисунок 10.5 - Механические характеристики при частотно-токовом управлении АД

10.4. Регулирование скорости изменением числа пар полюсов магнитного поля

Предполагается использование короткозамкнутого асинхронного двигателя с одной или двумя обмотками статора, каждая фаза которой состоит из двух одинаковых частей (полуобмоток). Такие АД называются многоскоростными.

а) Переключение полуобмоток из соединения треугольник - двойная звезда ($\Delta/Y\bar{Y}$ и $Y/Y\bar{Y}$), рис. 10.6.

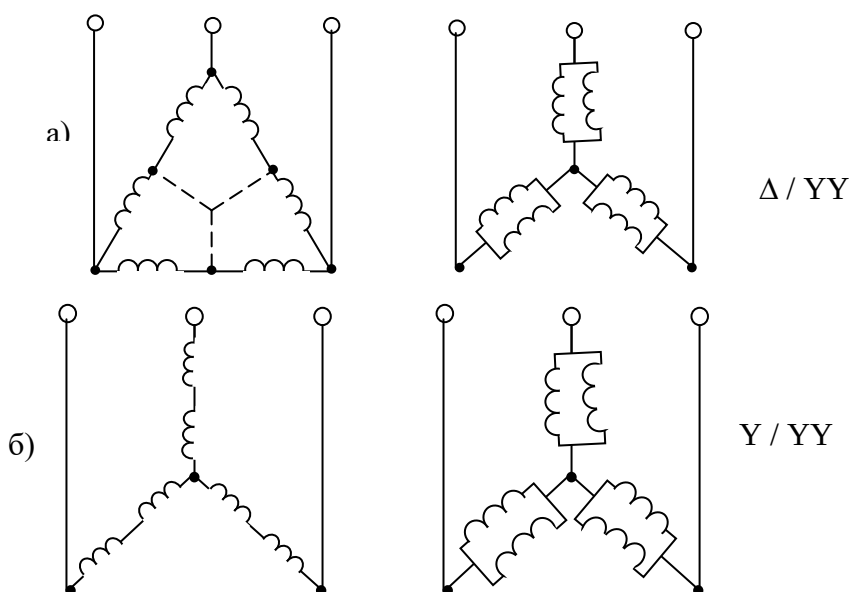


Рисунок 10.6 - Схема переключения полуобмоток статора «треугольник – двойная звезда (а) и «звезда – двойная звезда» (б)

На рис. 10.7 приведены принципиальные схемы присоединения полуобмоток для изменения числа полюсов в обмотках с соотношением 2 : 1.

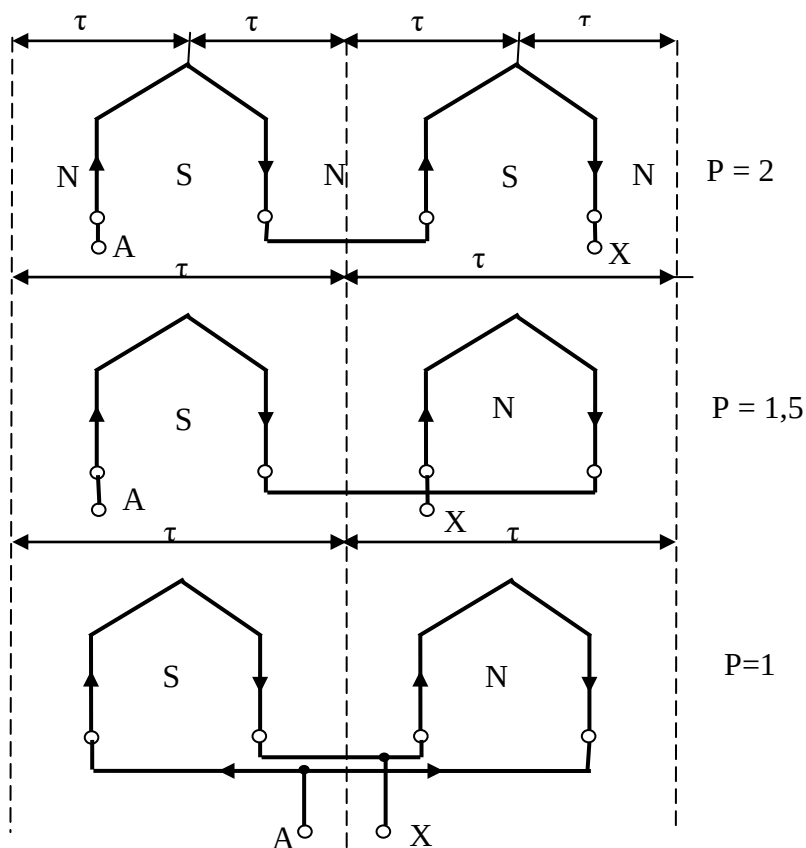


Рисунок 10.7 - Схема переключения фазы обмотки статора на создание полюсов магнитного поля в отношении 2 : 1

На рис.10.8 изображена магнитная характеристика полюсопереключаемых АД при соединении обмотки статора Δ / YY (а) и Y / YY (б).

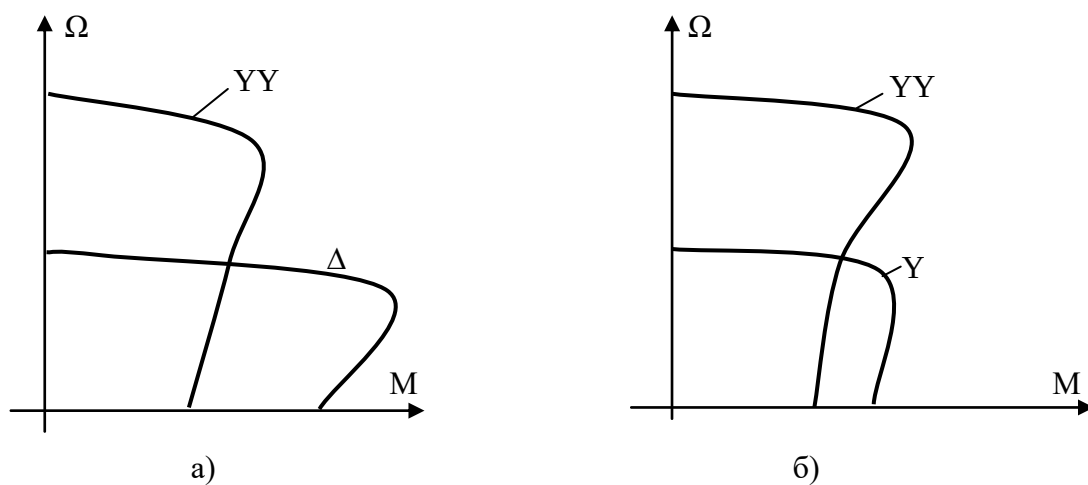


Рисунок 10.8 - Механические характеристики двухскоростных полюсопереключаемых АД

ЛЕКЦИЯ № 11

Тема: Потери энергии при работе электропривода

11.1. Энергетические показатели электропривода

Электроприводы потребляют из сети энергию на совершение полезной работы. Не вся потребленная энергия полезно используется, часть ее расходуется на нагрев двигателя. Энергия измеряется в джоулях ($H \cdot m$), а энергия затрачиваемая в единицу времени, то есть мощность, измеряется в ваттах ($H \cdot m / c = Дж / c = Вт$).

Общим показателем полезного использования энергии является КПД (η): отношение полезно используемой мощности P_2 к потребленной P_1 .

Потери мощности

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{P_2(1-\eta)}{\eta}, \quad (11.1)$$

где КПД

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (11.1, a)$$

КПД двигателя существенно зависит от его нагрузки, то есть от развиваемой мощности P_2 .

Для анализа этой зависимости пользуются методом разделения потерь ΔP на постоянные K и переменные V :

$$\Delta P = K + V. \quad (11.2)$$

Для нерегулируемых по скорости двигателей постоянные потери K складываются из:

- потерь в стали (на перемагничивание и вихревые токи);
- механических потерь, в том числе на возбуждение и на самовентиляцию;
- добавочных потерь ($\sim 0,5 \% P_H$).

Переменные потери это джоулевые потери, пропорциональные квадрату тока в обмотках машины. Их определяют по формуле

- для машин постоянного тока

$$V = I_a^2 \cdot r_a;$$

- для асинхронных двигателей сумма потерь в обмотках статора и ротора

$$V = 3I_1^2 \cdot r_1 + 3I_2'^2 \cdot r_2'.$$

Потери в роторной обмотке (КЗ клетке) могут быть определены через момент нагрузки и скольжение

$$V = 3I_2'^2 \cdot r_2' = M\Omega_o \cdot s. \quad (11.2.1)$$

Практически можно принимать, что потери в обмотке статора относятся к потерям в обмотке ротора в соотношении r_1/r_2' . Тогда переменные потери для асинхронных двигателей можно записать в виде формулы

$$V = M\Omega_o \cdot s \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right). \quad (11.3)$$

Пример 11.1.

Найти КПД АД 4АИ 160 S4 при работе с нагрузкой 50 %. Номинальные технические данные двигателя: $P_H = 18,5 \text{ кВт}$; $\Omega_H = 152 \text{ (1/с)}$; $\eta_H = 0,88$;

$r_1 / r_2' = 0,6$. Синхронная скорость $\Omega_o = \frac{2\pi f}{p} = 157 \text{ 1/с}$.

Решение:

1. Потери в двигателе в номинальном режиме

$$\Delta P_n = \frac{P_n(1-\eta_n)}{\eta_n} = \frac{18500 \cdot (1-0,88)}{0,88} = 2520 \text{ Вт}.$$

2. Скольжение

$$s_H = \frac{(157-152)}{157} = 0,033.$$

3. Переменные потери в номинальном режиме

$$V_n = \frac{P_n}{\Omega_n} \cdot \Omega_o \cdot s_n \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right), \text{ где } M_H = P_H / \Omega_H;$$

$$V_n = \frac{18500}{152} \cdot 157 \cdot 0,033 (1 + 0,6) = 1110 \text{ Вт}$$

4. Постоянные потери $K_n = \Delta P_n - V_n = 2520 - 1110 = 1410 \text{ Вт}$.

5. При нагрузке на валу $M_c = 0,5 \cdot M_H$ двигатель будет работать со скольжением $s \approx 0,5 s_H$. Тогда переменные потери в этом режиме будут

$$V_{0,5} = 0,5 M_n \cdot \Omega_o \cdot 0,5 \cdot s_n \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right) = 0,25 V_n = 278 \text{ Вт}.$$

6. Полные потери в двигателе в режиме половинной нагрузки

$$\Delta P_{0,5} = K + V_{0,5} = 1410 + 278 = 1688 \text{ Вт}.$$

7. КПД двигателя при нагрузке 50 % будет

$$\eta_{0,5} = \frac{0,5P_n}{0,5P_n + \Delta P_{0,5}} = \frac{0,5 \cdot 18500}{0,5 \cdot 18500 + 1688} = 0,845.$$

Мы видим, что при работе с неполной нагрузкой КПД двигателя снижается.

11.2. Потери энергии в переходных режимах

Потери энергии в переходных режимах, как правило, возрастают, поскольку эти процессы сопровождаются большими бросками тока. Так, при пуске асинхронного короткозамкнутого двигателя пусковые токи составляют 5-6 крат номинального тока.

В процессе разгона двигатель затрачивает энергию на совершение механической работы подключенным механизмом и на увеличение запаса кинетической энергии вращающихся частей. Для вращательного движения кинетическая энергия выражается формулой

$$W_{\text{кин}} = \frac{J\Omega^2}{2}. \quad (11.4)$$

Рассмотрим потери энергии в короткозамкнутом асинхронном двигателе за время пуска вхолостую ($M_c = 0$). В процессе пуска двигатель, разгоняясь проходит скольжение от $s = 1$ до $s = 0$. На этом периоде в машине выделяются потери энергии, которые способны резко увеличить её нагрев.

Как показано выше, потери мощности в роторе в любой момент времени разгона будут определяться формулой

$$\Delta P = M \cdot \Omega_o \cdot s. \quad (11.5)$$

Суммарные потери энергии за время пуска будут определяться интегрированием:

$$\Delta A_n = \int_{t=0}^{t_n} M \cdot \Omega_o \cdot s \cdot dt \quad (11.6)$$

Момент двигателя M зависит от скорости и на интервале времени пуска изменяется по сложной зависимости, определяемой видом механической характеристики. Однако, если пуск происходит вхолостую, то решение интеграла (11.6) можно получить достаточно просто. Используем уравнение

$$M = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (11.7)$$

где M – вращающий момент двигателя; J – момент инерции вращающихся частей привода; $d\Omega / dt$ – угловое ускорение ротора.

Уравнение (11.7) справедливо при $M_c = 0$. Из него выразим дифференциал времени dt через дифференциал скорости $\Delta\Omega$:

$$dt = \frac{J}{M} \cdot d\Omega. \quad (11.8)$$

Подставляя dt из (11.8) в (11.6), и соответственно заменяя пределы интегрирования, получим

$$\Delta A_n = \int_0^{\Omega_o} J \Omega_o \cdot s \cdot d\Omega = J \int_0^{\Omega_o} (\Omega_o - \Omega) d\Omega, \quad (11.9)$$

где $\Omega_o \cdot s = \Omega_o - \Omega$.

Решение (11.9) даёт энергию потерь в роторе.

$$\Delta A_n = \frac{J\Omega_o^2}{2} \quad (11.10)$$

Отсюда получается интересный вывод: при пуске двигателя вхолостую потери энергии в роторе равны кинетической энергии ротора после его разгона до скорости Ω_o . Заметим, что потери в роторе не зависят от времени пуска, пусковых токов и других параметров. Выделившаяся в клетке ротора энергия почти полностью идет на нагрев стержней, так как теплоотдача железу сердечника клетки из-за кратковременности невелика. Допустимая величина энергии, выделяющаяся в клетке ротора массой $m_{кл}$, не должна приводить к ее перегреву более чем на $T_{пер} = 300$ °С. Отсюда находим допустимую величину потерь (Дж):

$$\Delta A_{доп} = m_{кл} \cdot C_{кл} \cdot T_{пер}, \quad (11.11)$$

где $C \left[\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C} \right]$ – теплоемкость материала клетки ротора.

Расчет обычно проводится из необходимости обеспечения двух пусков подряд. Поэтому

$$2\Delta A_n < m_{кл} \cdot C_{кл} \cdot 300.$$

Из этих условий определяем предельный момент инерции $J = J_\partial + J_M$;

$$J < \frac{m_{кл} \cdot C_{кл} \cdot 300}{\Omega_o^2}.$$

Потери энергии в роторе при торможении противовключением (при исходном режиме – холостой ход) можно найти интегрированием (11.9), при изменении пределов интегрирования от $s_{нач} = 2$ до $s_{кон} = 1$. При выводе формулы потерь используем интеграл:

$$\Delta A = \int_{t_{нач}}^{t_{кон}} M \Omega_o \cdot s \cdot dt, \quad (11.12)$$

в котором произведём замену пределов интегрирования, для чего используем известные соотношения:

$$\Omega = \Omega_o (1 - s), \quad d\Omega = -\Omega_o \cdot ds; \quad d\Omega = -\Omega_o \cdot ds;$$

$$M = J \frac{d\Omega}{dt} = -J\Omega_o \frac{ds}{dt}.$$

Используя в интеграле (11.12) последнее выражение, запишем

$$\Delta A = \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} -J\Omega_o \frac{ds}{dt} \cdot \Omega_o \cdot s \cdot dt = - \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} J\Omega_o^2 \cdot ds \quad (11.13)$$

Определимся с пределами интегрирования.

При начале торможения $t_{нач}$ имеем $s_{нач} = 2$, а в конце, при остановке $s = 1$. Скольжения взяты для режима торможения противовключением, характеристики см. рис. 11.1.

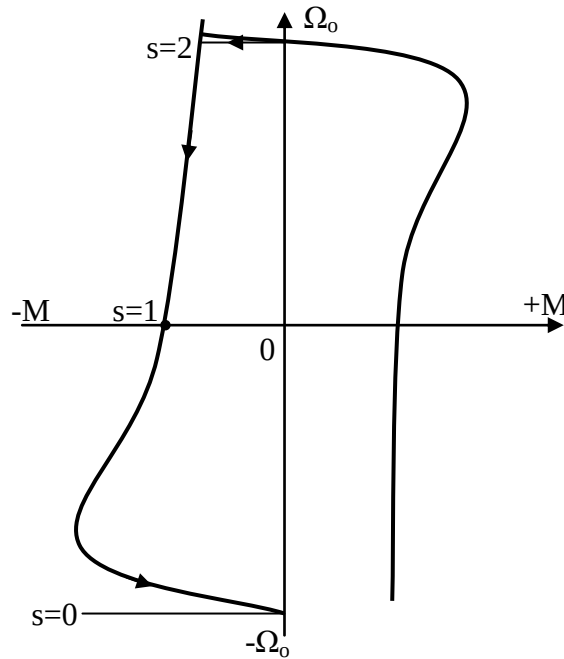


Рисунок 11.1 - Механические характеристики при реверсе противовключением АД

Используем пределы интегрирования в (11.13) и найдём:

$$\Delta A = \int_{s_{кон}}^{s_{н}} J\Omega_o^2 \cdot s \cdot ds = J\Omega_o^2 \cdot \frac{s^2}{2} \Big|_{s_{к}}^{s_{н}}.$$

Знак «-» в (11.13) опущен, так как изменены пределы интегрирования.

Начальное скольжение $s_n = 2$, конечное при остановке $s_{кон} = 1$, при реверсе $s_k = 0$. При торможении до остановки расчёт даёт величину потерь энергии

$$\Delta A_{тнб} = 3 \frac{J \Omega_o^2}{2} \quad (11.14)$$

При полном реверсе потери увеличиваются на величину, равную потерям при разгоне в обратном направлении, в результате имеем:

$$\Delta A_{рев} = 4 \frac{J \Omega_o^2}{2}. \quad (11.15)$$

Действительно, при пуске потери

$$\Delta A_n = J \Omega_o^2 \cdot \frac{s^2}{2} \Big|_0^1 = \frac{J \Omega_o^2}{2}, \quad (11.16)$$

то есть равны запасу кинетической энергии ротора.

Для асинхронного двигателя важно определить потери энергии в переходном режиме не только в роторной, но и в статорной цепи.

Потери в статоре можно найти, если известны потери в роторе, для этого воспользуемся соотношением

$$\frac{\Delta A_{ст}}{\Delta A_{рот}} = \frac{r_1}{r'_2} \rightarrow \Delta A_{ст} = \Delta A_{рот} \cdot \frac{r_1}{r'_2} \quad (11.17)$$

Потери в статоре могут быть уменьшены при использовании повышенного сопротивления ротора r'_2 . При этом в роторе потери при пуске вхолостую не зависят от r'_2 .

Если производится пуск двигателя под нагрузкой, то разгон двигателя замедляется из-за момента сопротивления на валу $M_c > 0$. Суммарные потери при пуске АД под нагрузкой могут быть определены по приближенной формуле

$$\Delta A_n = \frac{J \Omega_o^2}{2} \left(1 + \frac{r_1}{r'_2} \right) + M_c t_n \frac{\Omega_o}{2}, \quad (11.18)$$

где время пуска t_n определяется при осредненных значениях $M_{н.ср}$ – момента двигателя и $M_{с.ср}$ – момента сопротивления (статической нагрузки) на интервале изменения скорости от 0 до Ω_n . Для АД средний момент при пуске

$$M_{н.с} \approx \frac{M_m + M_n}{2},$$

тогда время находится из уравнения движения:

$$M_{ср.д} - M_{ср.с} = J \frac{d\Omega}{dt},$$

решая которое находим время разгона (пуска)

$$t_n = \frac{J\Omega_n}{M_{n.cp} - M_{c.cp}} \quad (11.19)$$

Скорость за время пуска также усредняется и принимается равной $\Omega_o/2$. В режиме торможения момент сопротивления на валу двигателя ускоряет торможение, при этом время торможения будет определяться как

$$t_t = \frac{J\Omega_n}{M_{т.ср} + M_{с.ср}}. \quad (11.20)$$

За счёт тормозного действия нагрузки время торможения оказывается меньше, чем в разгоне. Суммарные потери торможения

$$\Delta A_t = 3 \frac{J\Omega_o^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right) + M_c \cdot t_t \cdot \frac{\Omega_o}{2}. \quad (11.21)$$

В формулах (11.18) и (11.21) M_c также используются как средние значения момента нагрузки M_c на интервале скорости торможения от Ω_o до 0.

ЛЕКЦИЯ № 12

Тема: Нагрев и охлаждение двигателя. Режимы работы двигателей в электроприводе

12.1. Нагрев и охлаждение двигателя

Выделяющиеся в двигателе потери энергии вызывают его нагрев. Примем допущение, что двигатель в тепловом отношении представляет собой однородное твердое тело, характеризующееся:

- теплоемкостью C (Дж/°С), которое показывает сколько тепловой энергии в джоулях необходимо, чтобы повысить температуру двигателя на 1 градус (1 °С) Цельсия;

- коэффициентом теплоотдачи A (Дж / (°С·сек)) показывающим сколько тепловой энергии отдает двигатель окружающей среде за 1 сек. при превышении температуры двигателя τ над температурой окружающей среды в 1 °С.

Уравнение теплового баланса будет

$$\Delta P \cdot dt = C \cdot d\tau + A \cdot \tau \cdot dt, \quad (12.1)$$

где τ – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

Первый член уравнения (12.1) характеризует потери энергии в двигателе, которые преобразуются в тепло, второй член – количество тепла, идущее на нагрев двигателя, т.е. на увеличение перегрева τ , третий – количество тепла, которое двигатель отдает окружающей среде.

В первое время после включения двигателя, когда его температура еще мало отличается от температуры окружающей среды ($\tau = 0$), отдача тепла в окружающую среду отсутствует и третий член уравнения (12.1) равен нулю. По мере нагрева двигателя все большая часть выделяемого в двигателе тепла передается в окружающую среду и, когда достигается равновесие между количеством выделяемого тепла и отдаваемого в окружающую среду, температура двигателя становится постоянной или установившейся.

Преобразуем уравнение (12.1) к нормальному виду при условии $\Delta P = \text{const}$ и получим

$$\frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{\text{уст}}$$

Решение этого уравнения будет

$$\tau = \tau_{уст} + (\tau_{нач} - \tau_{уст}) \cdot e^{-t/T_n} \quad (12.2)$$

Если принять температуру окружающей среды равной начальной температуре двигателя, то $\tau_{нач} = 0$, и уравнение (12.2) примет вид

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T_n}) \quad (12.3)$$

В полученных выражениях:

$\tau_{уст} = \Delta P / A$ установившееся значение температуры перегрева, которое зависит от величины тепловых потерь в двигателе;

$T_n = C / A$ – постоянная времени нагрева двигателя.

Переходная характеристика нагрева двигателя представляется экспоненциальной кривой, см. рис. 12.1.

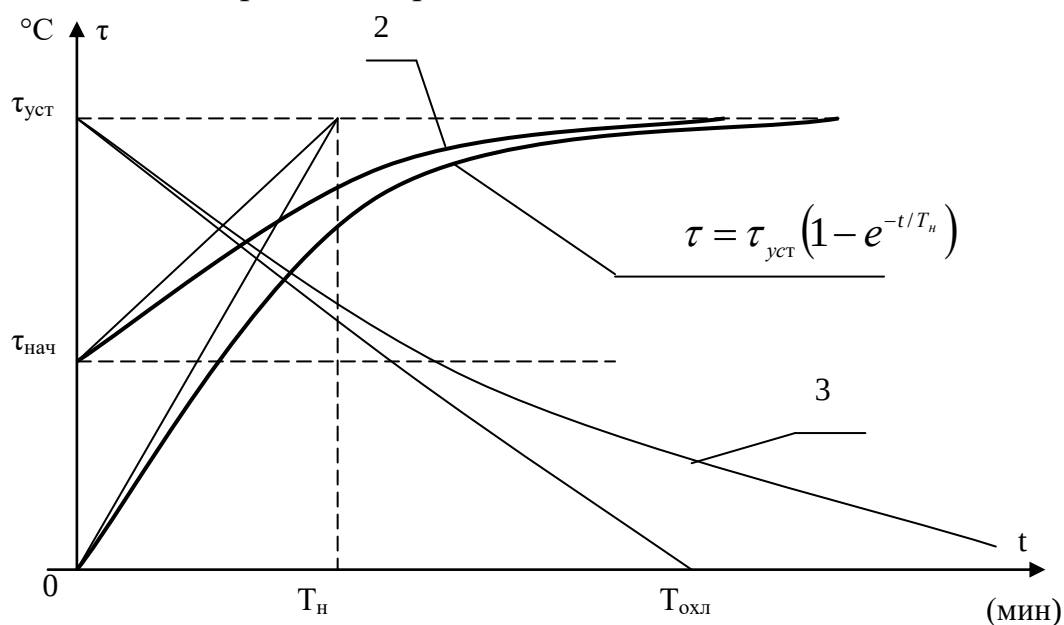


Рисунок 12.1 - Кривые нагрева при работе двигателя после пуска из остывшего состояния (1) и с предварительным нагревом (2) при $\tau_{нач} > 0$; кривая (3) – остывание двигателя

При отключении двигателя (остановке) происходит снижение его температуры. Однако постоянная времени $T_{охл}$ экспоненциального снижения температуры оказывается существенно больше, чем постоянная времени нагрева $T_n < T_{охл}$. Это объясняется тем, при остывании двигателя самовентилиация не работает (вентилиация увеличивает коэффициент теплоотдачи A). Процесс охлаждения будет определяться зависимостью

$$\tau = \tau_{уст} \cdot e^{-t/T_{охл}}, \quad (12.4)$$

где $T_{охл} = \frac{C}{A_{охл}}$ - постоянная времени охлаждения.

12.2 Режимы двигателей по нагреву

Исходя из особенностей режимов нагрева и охлаждения двигателей различают 8 режимов работы, основными из которых являются: продолжительный S1, кратковременный S2 и повторно-кратковременный S3.

1. Продолжительный режим (S1) – режим работы двигателя при неизменной нагрузке такой продолжительности, при которой превышение температуры электродвигателя достигает установившегося значения.

2. Кратковременный режим (S2) – это режим, в котором периоды нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя. При этом за время работы двигателя превышение температуры не достигает установившегося значения, а при отключении все части двигателя охлаждаются до температуры окружающей среды. Режим характеризуется мощностью и временем включения t_p (стандартные t_p – 10, 30, 60, 90 мин).

3. Повторно-кратковременный режим (S3) – это режим, при котором кратковременные периоды нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя, причем за время работы превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения, а при отключении двигателя не успевает остыть до температуры окружающей среды.

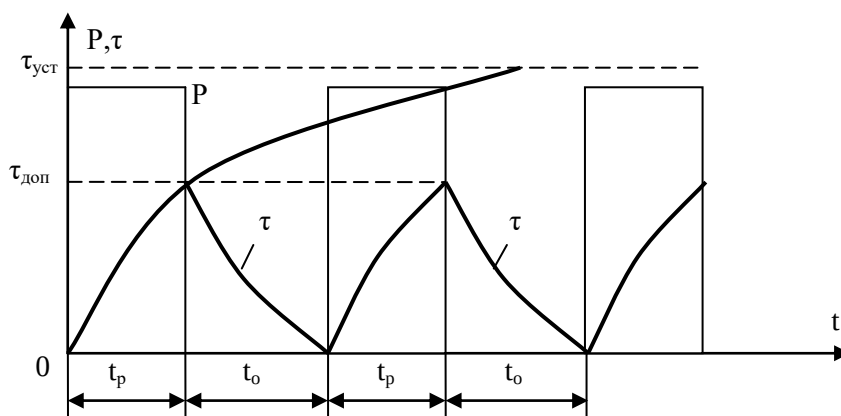


Рисунок 12.4. Графики нагрузки (P) и температура перегрева (τ) при кратковременном режиме работы двигателя

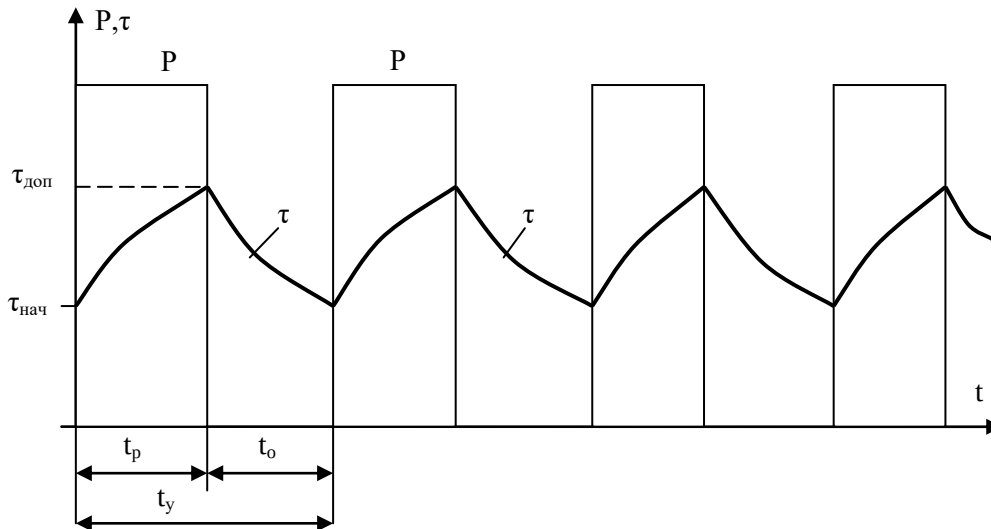


Рисунок 12.5. Графики нагрузки (P) и температуры перегрева (τ) при повторно-кратковременном режиме работы двигателя

Режим S3 характеризуется нагрузкой и продолжительностью включения (ПВ):

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_o} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad \Sigma = \frac{t_p}{t_p + t_o} = \frac{t_p}{t_y}. \quad (12.5)$$

Стандартные значения ПВ, на которые рассчитываются и выпускаются электродвигатели, предназначенные для работы в режиме S3, составляют 15, 25, 40 и 60 %. Максимальная продолжительность цикла не должна превышать 10 мин.

12.3 Выбор двигателя для электропривода

В реальном приводе двигатель работает с переменной нагрузкой. Нагрузка определяется временным графиком $P(t)$, $M(t)$ или $I(t)$. Рассматривая график нагрузки необходимо определить, к какому стандартному режиму его можно отнести. Так, в продолжительном режиме работы можем обнаружить непрерывно изменяющуюся мощность, или момент нагрузки, по величине. Для определения необходимой мощности двигателя надо найти такую постоянную нагрузку, которая была бы в отношении нагрева двигателя эквивалентна данной ступенчатой нагрузке. Это значит, что в течение времени при работе с эквивалентной мощностью в электродвигателе должно выделяться столько же тепла, сколько при работе по заданному графику.

Пусть график нагрузки имеет периодическую ступенчатую форму, как на рис. 12.6

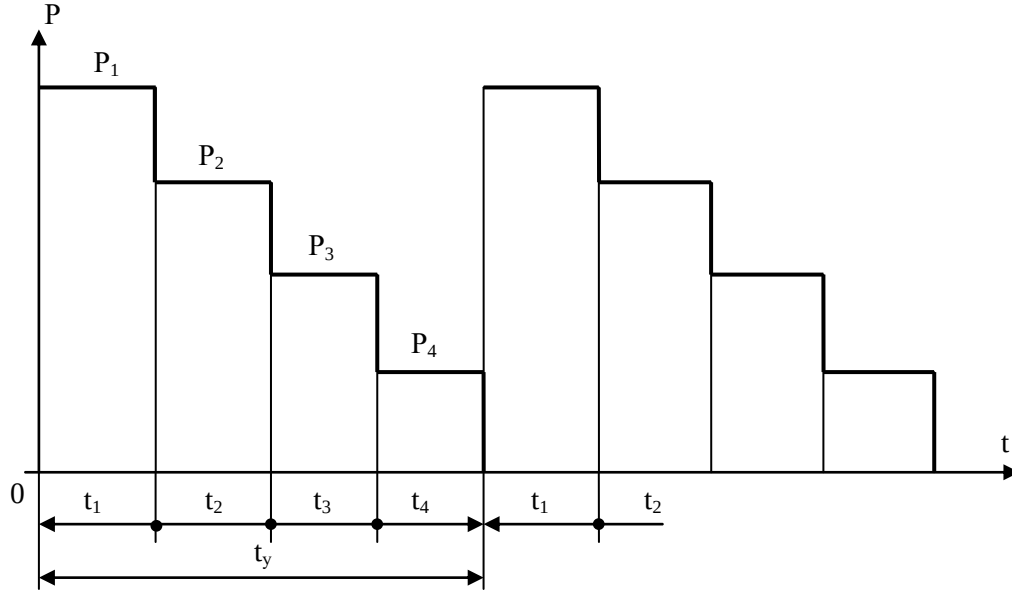


Рисунок 12.6 - График нагрузки электропривода при продолжительном режиме (S1)

Для эквивалентного двигателя можно записать равенство

$$\Delta P_{эл} \cdot t_y = \Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \Delta P_3 \cdot t_3 + \Delta P_4 \cdot t_4. \quad (12.6)$$

Отсюда можно найти $\Delta P_{экв.}$. Разделяя потери на постоянные и переменные согласно выражению

$$\Delta P_i = \Delta P_n + \epsilon I_i^2,$$

можем из (12.6) получить:

$$\Delta P_n + \epsilon \cdot I_{экв}^2 = \Delta P_n + \epsilon \cdot \left(\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots}{t_y} \right).$$

Вычитая из обеих частей последнего равенства постоянные потери и разделив его затем на коэффициент «в», получим формулу эквивалентного тока

$$I_{экв} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots}{t_y}}. \quad (12.7)$$

При работе под нагрузкой для ДПТ можно использовать пропорцию $M \equiv I$, так как магнитный поток двигателей как правило постоянен $\Phi = \text{const}$. Для асинхронных двигателей на рабочем участке механической характеристики также можно принять $\Phi = \text{const}$, и пропорцию $M \equiv I$.

В этом случае вместо (12.7) можем использовать формулу эквивалентного момента

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots}{t_y}}. \quad (12.8)$$

Если же скорость двигателя при изменении нагрузки не регулируется, то можно использовать формулу эквивалентной мощности

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots}{t_y}}. \quad (12.9)$$

Формулы (12.8) и (12.9) дают возможность выбрать двигатель непосредственно по графику нагрузки.

Пример. Определить мощность АД для работы по нагрузочному графику на рис. 12.6, если $P_1 = 9 \text{ кВт}$, $P_2 = 7 \text{ кВт}$, $P_3 = 5 \text{ кВт}$, $P_4 = 2 \text{ кВт}$ и $t_1 = t_2 = 10 \text{ сек}$, $t_3 = 20 \text{ сек}$, $t_4 = 30 \text{ сек}$.

Решение.

1. Определяем эквивалентную мощность

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{9^2 \cdot 10 + 7^2 \cdot 10 + 5^2 \cdot 20 + 2^2 \cdot 30}{10 + 10 + 20 + 30}} = 5.23 \text{ кВт}.$$

Выбираем по каталогу ближайший больший э/д тип АОЛ 241-4 с $P_n = 5.5 \text{ кВт}$, $n_n = 1450 \text{ об/мин}$, $\lambda_k = M_m / M_n = 2$.

2. Проверяем двигатель по перегрузке считая $\lambda_k = 2$, и снижении напряжения до 0,9:

$$P = \frac{P_1}{0.9^2 \cdot 2} = \frac{9.0}{0.72 \cdot 2} = 5.55 \text{ кВт}.$$

Двигатель проходит по перегрузочной способности, если снижение напряжения в сети не превышает 10 % ($U = 0.9 U_n$).

ЛЕКЦИЯ № 13

Тема: Выбор двигателя для повторно-кратковременного и кратковременного режимов нагрузки

13.1. Выбор мощности двигателя методом средних потерь

Повторно-кратковременный режим нагрузки характеризуется короткими периодами нагрузки, вследствие чего эл/д не успевает нагреться до установившегося перегрева. Периоды нагрузки разделены кратковременными паузами, в течение которых двигатель отключен от сети и не успевает охладиться до температуры окружающей среды.

Режиму повторно-кратковременной нагрузки соответствуют графики, подобные представленному на рис. 13.1.

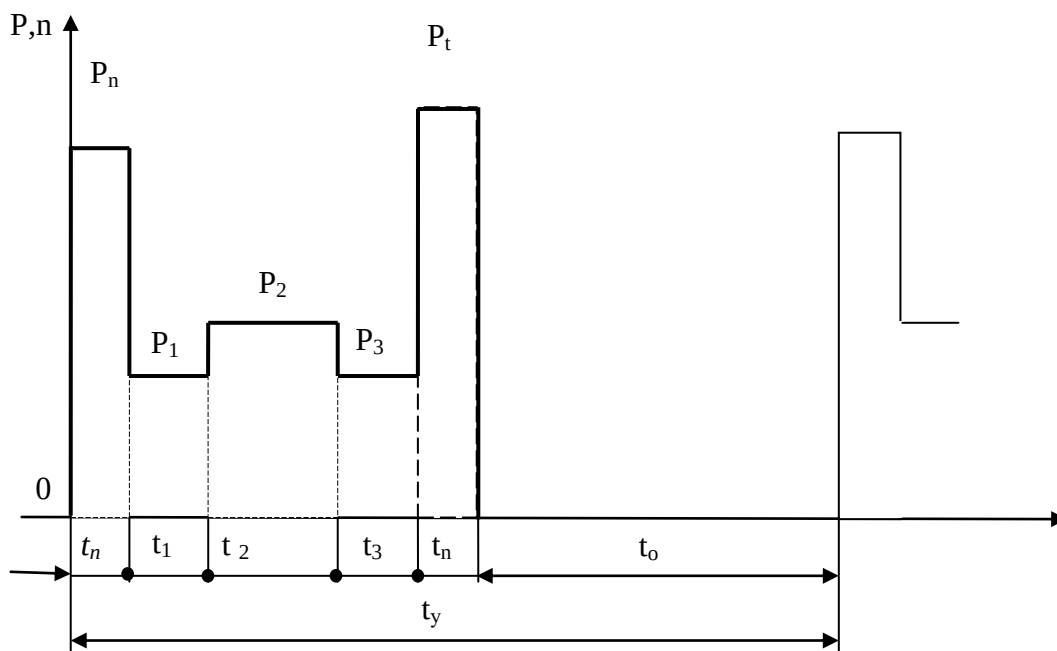


Рисунок 13.1 - График повторно-кратковременной нагрузки

Цикл повторно-кратковременной нагрузки начинается с процесса пуска со средней мощностью P_n и времени t_n . После работы нередко используют тот или иной вид электрического торможения со средней мощностью P_t и временем t_t , затем имеет место пауза t_o .

Мощность электродвигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, наиболее удобно определять по формуле средних потерь, которую можно записать в виде

$$\Delta P_{\text{экв}} = \frac{\Sigma \Delta A_i}{\Sigma t_i} = \frac{\Sigma \Delta A}{t_y}, \quad (13.1)$$

где ΔA_i – потери энергии при каждом значении мощности графика.

Когда электродвигатель не вращается, условия его охлаждения ухудшаются. Это учитывают введением экспериментального коэффициента β_o ухудшения охлаждения. Но коэффициент β_o , величина которого меньше единицы, умножают t_o паузы, в результате знаменатель формулы (13.1) уменьшается и эквивалентные потери увеличиваются. Следовательно, возрастают эквивалентные потери $\Delta P_{\text{экв}}$ электродвигателя.

Коэффициент β_o можно представить таблицей:

- закрытый двигатель с независимой вентиляцией $\beta_o = 1.0$;
- закрытый без принудительного охлаждения $0,95 \dots 0,98$;
- закрытый самовентилируемый $0,45 \dots 0,55$;
- самовентилируемый защищенный $0,25 \dots 0,35$.

Во время пуска и торможения средняя скорость вращения электродвигателя ниже номинальной, поэтому охлаждение самовентилируемых двигателей ухудшается, что учитывается коэффициентом

$$\beta_1 = \frac{1 + \beta_o}{2}. \quad (13.2)$$

Зная коэффициенты β_o и β_1 получим

$$\Delta P_{\text{экв}} = \frac{\Delta A_n + \Delta P_1 e_1 + \Delta P_2 \cdot e_2 \dots + \Delta A_r}{\beta_1 e_n + e_1 + e_2 \dots \beta_1 e_r + \beta_o e_o}, \quad (13.3)$$

где $\Delta P_1, \Delta P_2 \dots$ – потери мощности при различных нагрузках; $t_1, t_2 \dots$ – время действия этих нагрузок; t_n, t_m – время пуска и торможения; $\Delta A_n, \Delta A_m$ – потери энергии в двигателе при пуске и торможении.

13.2 Потери в переходных режимах пуска и торможения.

В переходных режимах пуска и торможения двигателей из-за больших токов возникают и большие потери энергии.

При пуске двигателя под нагрузкой, в предположении, что $M_c > 0$, потери энергии будут определяться формулой

$$\Delta A_n = J \left(\Omega_o \cdot \Omega_c - \frac{\Omega_c^2}{2} \right) + M_c \left(\Omega_o \cdot t_n - \int_0^{t_n} \Omega dt \right), \quad (13.3)$$

где Ω_c – установившееся значение скорости двигателя при данной нагрузке с моментом $M_c = \text{const}$ после завершения пуска ($\Omega_c < \Omega_o$).

Важно заметить, что формула (13.3) определяет потери энергии в якоре ДПТ или в роторе АД. Суммарные потери энергии в роторе и статоре АД можно выразить формулой

$$\Delta A_{no} = \frac{J\Omega_o^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right), \quad (13.4)$$

где r_1 и r_2' – сопротивление статора и ротора приведенное к статору.

Формула (13.4) определяет потери в АД за время пуска вхолостую. Потери в АД при пуске под нагрузкой будут увеличиваться также, как и в ДПТ. При этом вместо (13.3) можно использовать приближенную формулу.

$$\Delta A_n = \frac{J\Omega_o^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) - M_c \cdot \frac{\Omega_o}{2} \cdot t_n, \quad (13.5)$$

где M_c – момент на валу двигателя, обусловленный нагрузкой двигателя; t_n – время пуска. Средняя угловая скорость за время пуска принята равной половине синхронной, то есть $\Omega_o / 2$. Потери энергии на нагрев обмоток двигателя при торможении противовключением можно найти по формуле

$$\Delta A_t = 3 \left[\frac{J\Omega_o^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) - M_c \cdot \frac{\Omega_o}{2} \cdot t_t \right] \quad (13.6)$$

Время пуска t_n и время торможения t_m определяются с использованием уравнения движения

$$M - M_c = J \frac{d\Omega}{dt},$$

решая которое относительно dt , получим

$$dt = \frac{Jd\Omega}{M - M_c},$$

Время пуска находим интегрированием

$$\int_0^{t_n} dt = \frac{J}{M - M_c} \cdot \int_0^{\Omega_c} d\Omega.$$

Для значений момента двигателя принимаем средние значения на интервале скорости разгона от $\Omega = 0$ до $\Omega = \Omega_c$ (скорость Ω_n соответствует моменту M_c в установившемся режиме). То же делается и для величины M_c – она осредняется, если зависит от скорости. Тогда решение (4.10) позволяет определить время пуска:

$$t_n = \frac{J\Omega_c}{M_{n.c.p} + M_{c.c.p}}. \quad (13.7)$$

При электрическом торможении $d\Omega / dt < 0$ и момент двигателя $M < 0$. Следовательно, в режиме торможения и момент двигателя M и момент

нагрузки M_c действуют согласно и направлены встречно вращению. Поэтому время торможения до остановки будет меньше и определяется по формуле

$$t_n = \frac{J\Omega_c}{M_{т.ср} + M_{с.ср}}. \quad (13.8)$$

Пример. Электропривод работает по графику, представленному на рис. 13.2.

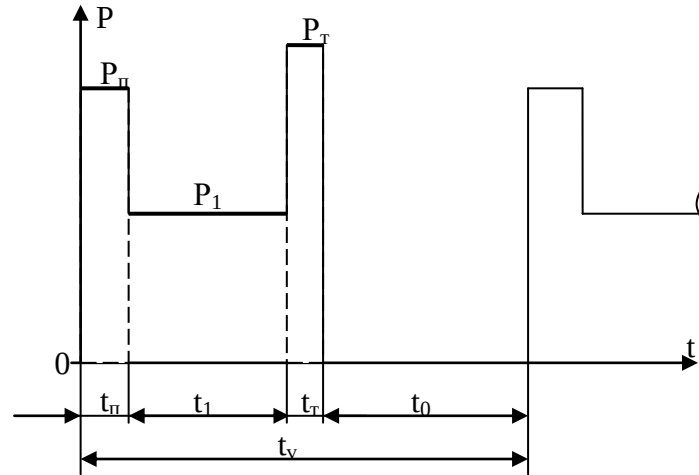


Рисунок 13.2 - Нагрузочный график к примеру

Значение мощности P_1 , время работы t_1 и время паузы t_0 заданы. Время пуска t_n и время торможения t_t , не входят во время работы t_1 .

Необходимо определить номинальную мощность асинхронного короткозамкнутого двигателя (АД с КЗР) с синхронной скоростью n_o для работы по этому нагрузочному графику.

Решение.

1. Предварительно выбираем электродвигатель по условиям перегрузки, принимая, согласно каталогу для двигателей с синхронной скоростью n_o , отношение $\lambda_1 = 0,85 \cdot \frac{M_m}{M_n}$,

$$P_n \geq \frac{P_1}{\lambda_1}. \quad (13.9)$$

По каталогу выбираем двигатель ближайшей большей мощности. Для этого двигателя из каталога находим: маховый момент $GD^2 (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$, или момент инерции $J_d (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$; n_n , η_n , β_o , а также фактическое значение

$$\lambda = M_m / M_n, k_n = M_n / M_n.$$

2. Пользуясь графиком на рис. 13.2, находим номинальные потери в двигателе

$$\Delta P_n = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n.$$

3. Определяем приближенно время пуска и время торможения противовключением:

$$t_n = \frac{(J + J_d)\Omega_o}{M_{n.cp} - M_c}; \quad t_r = \frac{(J + J_d) \cdot \Omega_o}{M_{r.cp} + M_c},$$

где

$$\Omega_o = \frac{2\pi \cdot n_o}{60}; \quad M_c = \frac{P_1}{\Omega_n}; \quad \Omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60}.$$

J – приведенный к валу двигателя момент рабочего механизма.

4. Приближенно определяем потери при пуске и при торможении:

$$\Delta A_n = \frac{J\Omega_j^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r'_2}\right) + M_c \cdot \frac{\Omega_o}{2} \cdot t_n;$$

$$\Delta A_r = 3 \left[\frac{J\Omega_o^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r'_2}\right) \right] - M_c \frac{\Omega_o}{2} \cdot t_r.$$

5. Потери мощности при фактической нагрузке P_1

$$\Delta P_1 = \frac{P_1}{\eta_1} - P_1.$$

КПД при нагрузке $P_1 \neq P_n$ находим по формуле

$$\eta_1 = \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \cdot \frac{a/x + x}{a + 1} \right]^{-1},$$

где $x = P_1 / P_n$; $a = \Delta P_{ном} / \Delta P_{пер} \approx 1$.

6. Находим эквивалентные потери за цикл

$$\Delta P_{эkv} = \frac{\Delta A_n + \Delta P_1 + \Delta A_r}{\beta_1 \cdot t_n + t_1 + \beta_1 \cdot t_r + \beta_o \cdot t_o},$$

где $\beta_1 = (1 + \beta_o) / 2$.

При $\Delta P_n \geq \Delta P_{эkv}$ двигатель, выбранный предварительно по условиям перегрузки, выбран правильно, то есть удовлетворяет требованиям по нагреву. В противном случае нужно выбрать больший по мощности двигатель и повторить расчет.

Данный метод выбора двигателя повторно-кратковременного режима, называемый методом средних потерь, наиболее точный. Если за время работы нагрузка меняется, то учитываются потери на каждом интервале переменной нагрузки.

Пронина Анна Константиновна

**ОСНОВЫ
СУДОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Курс лекций

В авторской редакции

Изд. № 108/2021. Объем 5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»