

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СТАРООСКОЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.А. УГАРОВА
(филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ОСКОЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ

УТВЕРЖДЕНО НМС ОПК

ПРОТОКОЛ №__

от «__» _____ 20__ г.

Рукавицын Кирилл Олегович

ПМ. 01 МДК.01.04. РАЗДЕЛ 4.1
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Методические указания для студентов очной формы обучения
по выполнению практических работ

Специальность

13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание
электрического и электромеханического оборудования (по
отраслям)

Старый Оскол 2017

*Рассмотрены на заседании П(Ц)К спец.
13.02.11 и 15.02.07
Протокол № _____
от «_____» _____ 20__ г*

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой по МДК 01.04. Техническое регулирование и контроль качества электрического и электромеханического оборудования

Специальности 13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)

Председатель П(Ц)К

_____ *М. В. Горюнова*

Рецензенты:

Внутренний

М. В. Горюнова преподаватель ОПК СТИ НИТУ МИСиС

внешний

Рукавицын К.О.

Электрический привод: методические указания по выполнению практических работ – Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2017. – 32 с.

Учебное пособие разработано на основе Федерального государственного стандарта (далее – ФГОС) по специальности среднего профессионального образования (далее – СПО) 13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям) и с учетом соответствующей примерной основной образовательной программы (Базисного учебного плана).

В учебном пособии также даны необходимый теоретический материал и методические рекомендации для успешного освоения практической формы обучения.

Содержание

Введение.....	4
Правила выполнения практических заданий	5
Практическая работа № 1	6
«Механическая часть электропривода»	6
Практическая работа № 2	12
«Электропривод с двигателями постоянного тока»	12
Практическая работа № 3	21
«Электропривод с двигателями переменного тока».....	21
Список рекомендуемых источников	32

Введение

При изучении дисциплины «Автоматика» важно уже в начальной части курса сформировать умения математического описания линейных объектов и систем управления, преобразования математических моделей. Этому в значительной степени должны содействовать практические и лабораторные занятия.

В ходе дальнейшего изучения дисциплины специалист должен получить глубокую подготовку по общетеоретическим основам автоматического регулирования и управления и прочные практические навыки выполнения расчетных работ по расчету автоматических систем, уметь:

- применять математические методы для анализа общих свойств линейных систем, на этой основе владеть методами анализа и синтеза линейных систем автоматического управления;

- выполнять расчетные работы по анализу устойчивости и качества систем, синтезу параметров и корректирующих звеньев по заданным требованиям к качеству функционирования систем.

Рекомендуемая точность расчетов – три знака после запятой.

Правила выполнения практических заданий

Практические работы являются обязательными и выполняются студентами в аудитории, на специально отведенном занятии (при необходимости, завершение работы выполняется дома).

Задание выдается индивидуально. Номер задания соответствует порядковому номеру студента в групповом журнале.

Практическая работа выполняется после изучения теоретического материала и носит закрепительный характер.

Перед выполнением практической работы, студенту необходимо самостоятельно повторить общие теоретические сведения, ответить на контрольные вопросы.

После выполнения черновых расчетов, студент должен оформить и сдать преподавателю отчет по выполнению практической работы.

Отчет должен содержать:

- ответы на контрольные вопросы;
- цели и задачи которые требуется решить;
- расчетную часть: исходные данные, составление схемы, выполнение расчетов с соответствующим выводом и обоснованием расчетов;
- заключение: основные выводы по решению поставленной задачи.

Итоговая оценка выставляется после защиты студентом практической работы.

Практическая работа № 1

«Механическая часть электропривода»

Цель работы: Сформировать практические навыки в решении задач по механической части электропривода

Студент должен

уметь:

- решать задачи на определение момента статической нагрузки;
- определять приведенный момент инерции электропривода;
- строить механические характеристики исполнительных механизмов;

знать:

- понятия механической части электропривода;
- виды передаточных соединений;

Теоретическая часть:

Активные моменты сопротивления – моменты, вызванные весом поднимаемого и спускаемого груза. В уравнении механического движения электропривода перед этим моментом всегда ставится знак (–) независимо от подъема или спуска груза.

Реактивный момент сопротивления – момент, всегда препятствующий движению электропривода и изменяющий свой знак при изменении направления движения (например при резании металла). При положительной скорости электродвигателя перед этим моментом в уравнении механического движения электропривода необходимо ставить знак (–), а при обратном движении знак (+).

За положительное направление вала двигателя принимается вращение по часовой стрелке. Если временной момент на валу двигателя направлен в эту сторону, то ему приписывают знак (+). При обратном направлении движения – знак (–). В тормозных режимах двигателя знаки перед вращающимся моментом двигателя и угловой скоростью противоположны.

Механическая часть электропривода может быть сложной и представлять кинематическую цепь с большим числом движущихся элементов (шестерни, соединительные муфты, тормозные шкивы, барабаны, поворотные платформы, линейный стол, поднимаемые грузы и т.д.). Движение одного элемента дает полную информацию о движении всех остальных элементов. Обычно в качестве такого элемента принимают вал двигателя, приводя к нему моменты и усилия сопротивления, а также моменты инерции и массы.

В результате такого приведения реальная кинематическая схема заменяется расчетной энергетически эквивалентной схемой. Это позволяет наиболее точно исследовать характер движения привода и режим его работы, точнее формировать законы движения. Покажем такое приведение на примере схемы механической части электропривода подъемной лебедки (рис. 2.1).

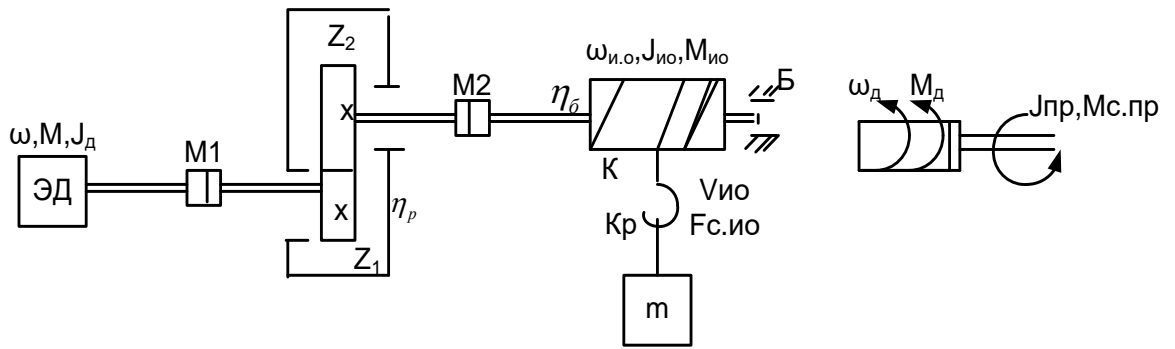


Рис. 1.1. Схема механической части электропривода

На основании вышеизложенного запишем в окончательном виде формулы приведенных к валу электродвигателя параметров исполнительных органов.

Примем следующие *допущения*: *система жесткая, без зазоров.*

При прямом потоке энергии в механической части (подъем груза)

$$M_{с.пр} = \frac{M_{с.ио}}{i_p \cdot \eta_n} \quad (1.1)$$

При обратном потоке энергии в механической части (опускание груза)

$$M_{с.пр} = \frac{M_{с.ио} \cdot \eta_n}{i_p} \quad (1.2)$$

В формулах (1.1) и (1.2):

$$i_p = \frac{\omega_\delta}{\omega_{ио}} = \frac{Z_2}{Z_1} \text{ – передаточное число редуктора;}$$

$$\eta_n = \eta_p \cdot \eta_\delta \text{ – КПД передачи.}$$

При *линейном* движении ИО и прямом потоке энергии (подъем груза)

$$M_{с.пр} = \frac{F_{с.ио} \cdot \rho}{\eta_n} \quad (1.3)$$

При *обратном* потоке энергии (опускание груза)

$$M_{с.пр} = F_{с.ио} \cdot \rho \cdot \eta_n \quad (1.4)$$

В формулах (2.3) и (2.4):

$$F_{с.ио} \text{ – сила тяжести, Н;}$$

$$F_{с.ио} = m \cdot g, \text{ } m \text{ – масса груза вместе с крюком, кг;}$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2 \text{ – ускорение силы тяжести;}$$

$$r = \frac{V_{ио}}{\omega_\delta} \text{ – радиус приведения кинематической цепи между двигателем и}$$

исполнительным органом, м.

Приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции

$$J_{пр} = J_\delta + \frac{J_{ио}}{i_p^2} + mr^2, \quad (1.5)$$

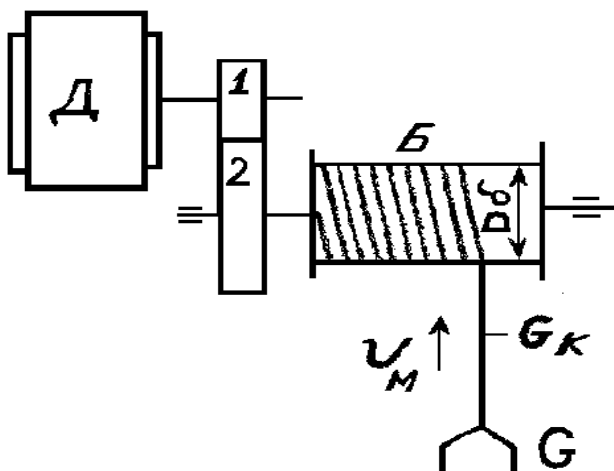
В формуле (1.5) в момент инерции двигателя J_δ входит момент инерции муфты M_1 и шестерни Z_1 , а в момент инерции исполнительного органа (барабана) $J_{ио}$ – момент инерции муфты M_2 и шестерни Z_2 .

Задание

Решить задачу по механической части электропривода, соответствующую варианту.

Пример решения задания

Шахтная подъемная лебедка поднимает груз $G = 60\,000$ Н. **Определить приведенные к валу электродвигателя суммарный момент инерции ЭП подъемной лебедки и статический момент нагрузки**, если даны номинальная скорость вращения электродвигателя $n_n = 494$ об/мин, вес каната $G_k = 7800$ Н, передаточное число редуктора $i = 11,5$, КПД редуктора $\eta = 0,94$, момент инерции барабана Б вместе с зубчатым колесом 2 $J_2 = 67,5$ кг·м², момент инерции двигателя вместе с зубчатым колесом 1 $J_1 = 106$ кг·м², диаметр барабана $D_6 = 3$ м.



1. Определим скорость подъема груза V_M :

$$V_M = \pi D_6 n_n / (i \cdot 60)$$

2. Определим суммарный приведенный к валу электродвигателя момент инерции подъемной лебедки:

$$J = J_1 + J_2 / i^2 + ((G + G_k) / g^2)(V_M / \omega_n)^2$$

$$\text{где } \omega_n = 2\pi n_n / 60$$

3. Приведенный к валу электродвигателя момент сопротивления нагрузки:

$$M_{c\uparrow} = (G + G_k) R_6 / (i \eta)$$

или

$$M_{c\uparrow} = ((G + G_k) / 10) \cdot \rho / \eta$$

Варианты заданий

1. Необходимо рассчитать и построить механическую характеристику вентилятора $M_c(\omega)$ с учетом момента потерь в двигателе $\Delta M_{дв}$ и механизме $\Delta M_{мех}$.

$$P_{вент} = 20 \text{ кВт}, \omega_{вент.ном.} = 105 \text{ рад/с}, \Delta M_{дв} + \Delta M_{мех} = 2 \text{ кВт}$$

2. Уравнение механических характеристик двигателя и исполнительного органа рабочей машины имеют вид $\omega=300-3M$ и $M_c=30+2\omega$. Требуется узнать установившиеся скорость и момент двигателя.

3. Необходимо рассчитать и построить механическую характеристику **намоточной машины** $M_c(\omega)$ с учетом момента потерь в двигателе $\Delta M_{дв}$ и механизме $\Delta M_{мех}$.

$$P_{вент}=215 \text{ кВт}, \omega_{вент.ном.}=300 \text{ рад/с}, \Delta M_{дв}+\Delta M_{мех}=0,07M_{дв.ном.}$$

4. Необходимо рассчитать и построить механическую характеристику **насоса** $M_c(\omega)$ с учетом момента потерь в двигателе $\Delta M_{дв}$ и механизме $\Delta M_{мех}$.

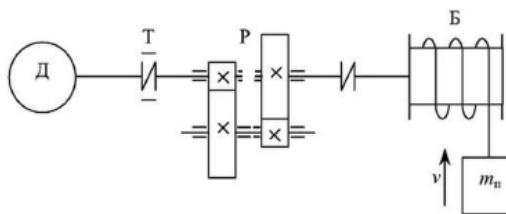
$$P_{вент}=15 \text{ кВт}, \omega_{вент.ном.}=95 \text{ рад/с}, \Delta M_{дв}+\Delta M_{мех}=0,08M_{дв.ном.}$$

5. Необходимо рассчитать и построить механическую характеристику **генератора** $M_c(\omega)$ с учетом момента потерь в двигателе $\Delta M_{дв}$ и механизме $\Delta M_{мех}$.

$$P_{вент}=51 \text{ кВт}, \omega_{вент.ном.}=105 \text{ рад/с}, \Delta M_{дв}+\Delta M_{мех}=4 \text{ кВт}$$

6. Рассчитать статический момент и частоту вращения двигателя прокатного стана. Двигатель соединен с валками через редуктор ($i=4, \eta_p=0,95$), шестереночную клеть ($\eta_k=0,94$) и шпиндель ($\eta_{ш}=0,99$). Момент прокатки и сил трения $M_{пр}=M_{с.м.}=62 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Скорость прокатки $v=1,5 \text{ м/с}$, диаметр валков $d=0,8 \text{ м}$.

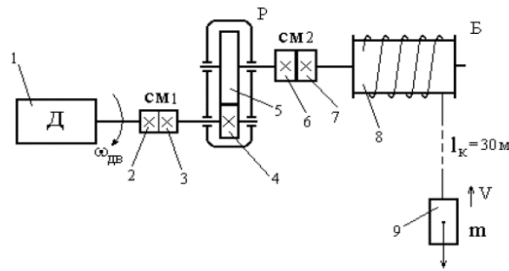
7. Определить приведенный момент инерции привода подъемного механизма если известно: угловая скорость двигателя $\omega=75,35 \text{ рад/с}$, масса поступательно движущегося груза $m_{п}=98 \text{ т}$, передаточные числа редукторов $i_1=8, i_2=8,7$, диаметр барабана $d_b=0,5 \text{ м}$, момент инерции двигателя $J_d=0,668 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, момент инерции муфты и тормозного шкива $J_T=0,255 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, момент инерции барабана $J_b=14 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, момент инерции редуктора равен 20% от момента инерции двигателя.



8. Определить за какое время разгонится привод прокатной клетки если динамический момент равен $39,29 \text{ кН}\cdot\text{м}$, начальная угловая скорость привода – 15 об/мин , конечная скорость привода 60 об/мин , приведенный момент инерции всех частей привода – $12,125 \text{ т}\cdot\text{м}^2$.

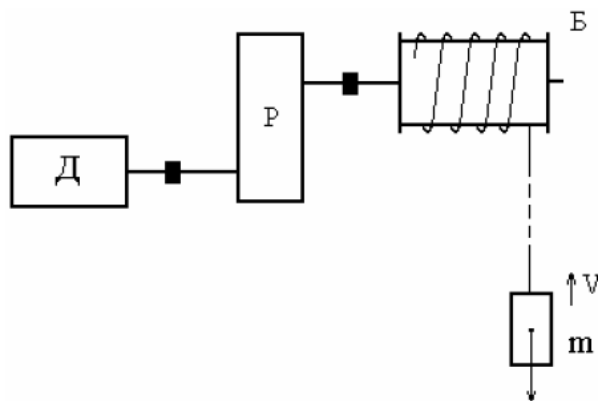
9. Рассчитать приведенный момент инерции привода грузоподъемной лебедки при нижнем положении груза. Данные для расчета: передаточное

число редуктора $i_p=11$; КПД редуктора $\eta_r = 0,92$; диаметр барабана Б $D_b = 1$ м; масса груза $m = 15000$ кг. Моменты инерции вращательно движущихся элементов двигателя $J_{дв}=1$ кг·м², элементов 2 и 3, 6 и 7 – 0,05 кг·м², редуктора 4-5 – 0,01 кг·м², барабана – 0,7 кг·м².



10. Электропривод с двигателем приводит в движение грузоподъемную лебедку. Найти время, через которое скорость снизится до нуля, если двигатель отключается от сети.

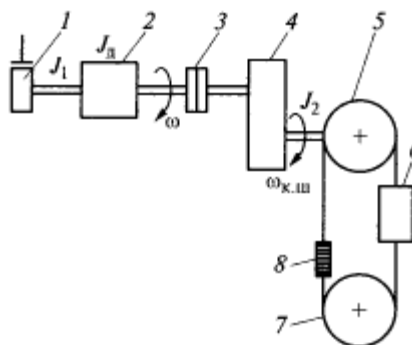
11. Данные для расчета: $P_n = 37$ кВт, $n_n = 575$ об/мин; $\omega_{нач} = 61$ рад/с, $J_{дв} = 2$ кг·м²; масса груза $m_r = 1000$ кг; передаточное число редуктора Р $i_p = 6,4$; масса барабана Б $m_b = 300$ кг; радиус барабана $R_b = 0,3$ м; КПД редуктора равен 0,89; механические связи считать абсолютно жесткими.



12. Определить динамический момент, который при моменте инерции 0,2 кг·м² обеспечит увеличение скорости на 200 рад/с за время 1 с.

13. Схема механической части электропривода лифта приведена на рисунке. Записать в общем виде формулы для определения приведенного статического момента и момента инерции электропривода.

14. Исходные данные: грузоподъемность лифта (6) m_r кг, скорость движения кабины v м/с, масса кабины m_k кг, масса противовеса (8) $m_{пв}$ кг, диаметр канатоведущего шкива (5) $d_{к.ш.}$ м; передаточное число редуктора (4) i_p , КПД механической передачи $\eta_{мп}$, длина канатов L_k , масса 1 м каната m_k кг/м, моменты инерции 1 и 4 J_1 и J_2 , момент инерции двигателя (2) J_d . Двигатель связан с тормозом 1 и через муфту с редуктором 4.



Контрольные вопросы:

- 1) Назовите составные части электропривода.
- 2) Назовите основные типы электродвигателей.
- 3) Запишите уравнения движения электропривода. Поясните возможные состояния электропривода на основании уравнения движения.
- 4) Какие элементы относятся к механической части электропривода?
- 5) Что такое динамический момент электропривода? Когда он возникает?
- 6) Как рассчитывается время разгона и торможения в электрическом приводе?
- 7) Какие двигатели используются в электроприводах с частыми разгонами и торможениями?
- 8) С какой целью осуществляется приведение моментов электропривода к одной оси вращения?
- 9) С какой целью и как осуществляется приведение моментов инерции электропривода к одной оси вращения?
- 10) Что такое радиус приведения? В каком случае он используется при приведении момента инерции?
- 11) Как учитывается КПД исполнительного механизма при работе привода в двигательном режиме? В тормозном (генераторном) режиме?
- 12) Что такое механическая характеристика?
- 13) Что такое жесткость механической характеристики?
- 14) Какие виды механических характеристик исполнительных органов Вы знаете?
- 15) Какие виды механических характеристик двигателей Вы знаете?
- 16) Назовите условие устойчивого движения в установившемся режиме
- 17) В каких случаях возникает неустановившееся движение?
- 18) Для чего необходим анализ переходных процессов в электроприводе?
- 19) Какие четыре группы переходных процессов в электроприводе Вы знаете?

Практическая работа № 2

«Электропривод с двигателями постоянного тока»

Цель работы: Сформировать практические навыки по решению задач с ДПТ

Студент должен

уметь:

- строить механическую характеристику ДПТ (естественную и искусственную);

- рассчитывать тормозные сопротивления;

знать:

- основные виды торможения;

- основные режимы работы ДПТ;

- виды ДПТ.

2.2.1. Пояснение к занятию:

На рисунке 4.1 приведена схема включения ЭД в сеть.

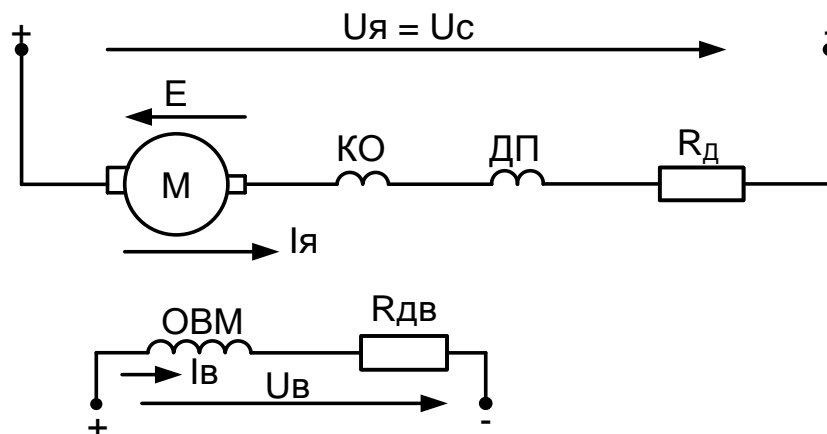


Рис. 2.1. Схема включения ЭД в сеть

ДПТ НВ может работать в двигательных и тормозных режимах.

Электромеханической характеристикой называется зависимость угловой скорости ЭД от тока якоря $\omega = f(I_я)$. Она характеризует загрузку якоря по току.

Механической характеристикой называется зависимость момента ЭД от скорости: $M = f(\omega)$. Она характеризует работу электродвигателя. Обе зависимости связаны между собой следующим выражением:

$$M = \kappa \phi_n \cdot I_я, \quad (2.1)$$

где $\kappa = \frac{P \cdot N}{2\pi a}$ – конструктивный коэффициент ЭД (P – число пар полюсов статора; N – число активных проводников обмотки якоря; a – число параллельных ветвей обмотки якоря);

ϕ_n – номинальный магнитный поток статора, Вб;

$I_я$ – ток якоря, А.

Двигательный режим ДПТ НВ

Для якорной цепи может быть записано следующее выражение:

$$U_{\text{я}} = E + (R_{\text{я}} + R_{\text{д}}) \cdot I_{\text{я}}. \quad (2.2)$$

Для цепи возбуждения:

$$U_{\text{в}} = (R_{\text{овм}} + R_{\text{дв}}) \cdot I_{\text{в}}, \quad (2.3)$$

где $I_{\text{я}}$ и $I_{\text{в}}$ – токи в цепи якоря и обмотки возбуждения, А; $U_{\text{я}} = U_{\text{с}}$ – напряжение якоря и сети, В; E – противоЭДС, наводимая в обмотке якоря при его вращении в магнитном поле, создаваемом обмоткой возбуждения, В; $R_{\text{д}}$ и $R_{\text{дв}}$ – добавочные сопротивления в цепях якоря и возбуждения, Ом (они могут отсутствовать); $R_{\text{я}} = R_{\text{о.я}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{щ.к}}$ – внутреннее сопротивление якорной цепи, Ом; ($R_{\text{о.я}}$ – сопротивление обмотки якоря; $R_{\text{дп}}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов; $R_{\text{ко}}$ – сопротивление компенсационной обмотки; $R_{\text{щ.к}}$ – сопротивление щеточного контакта).

Сопротивление $R_{\text{я}}$ определяется по выражению:

$$R_{\text{я}} = 0,5(1 - \eta_{\text{нд}}) \frac{U_{\text{ян}}}{I_{\text{ян}}}. \quad (2.4)$$

Ток возбуждения создает магнитный поток Φ (в веберах). Для получения номинального магнитного потока при пуске ЭД сопротивление $R_{\text{дв}}$ принимается равным нулю. После чего подается номинальное напряжение на якорную цепь и на обмотку возбуждения. Взаимодействие пускового тока якоря с номинальным магнитным потоком статора $\Phi_{\text{н}}$ создает вращающий момент $M_{\text{в}}$ и двигатель запускается.

При скорости $\omega = 0$ и $R_{\text{д}} = 0$, пусковой ток в якоре определяется по выражению

$$I_{\text{япуск}} = \frac{U_{\text{ян}}}{R_{\text{я}}} \approx (10 - 50) I_{\text{ян}},$$

т.к. $R_{\text{я}}$ – очень мало.

Для уменьшения пускового тока якоря до безопасного значения ($2,5 I_{\text{ян}}$) на время пуска ЭД в цепь якоря необходимо включать добавочное сопротивление

$$R_{\text{д}} = \frac{U_{\text{ян}}}{2,5 I_{\text{ян}}} - R_{\text{я}}. \quad (2.5)$$

Обычно добавочное сопротивление (пусковой реостат) разбит на секции. По мере увеличения скорости растет противоЭДС и ток в якоре уменьшается согласно выражению:

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{ян}} - E}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}, \quad (2.6)$$

где $E = k\phi_{\text{н}} \cdot \omega$ – противоЭДС ЭД.

Поэтому при пуске ЭД необходимо постепенно шунтировать секции пускового реостата.

Если решить уравнение (4.2) относительно угловой скорости, то получим уравнение для естественной электромеханической характеристики [1,4]:

$$\omega = \frac{U_{\text{ян}}}{k\phi_{\text{н}}} - \frac{I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{k\phi_{\text{н}}} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (2.7)$$

где ω_0 – скорость идеального холостого хода ЭД; $\Delta\omega$ – перепад скорости по отношению к скорости ω_0 .

В уравнении (4.7) $k\phi_n$ определяется как:

$$k\phi_n = \frac{U_{ян} - I_{ян} \cdot R_{я}}{\omega_n}, \quad (2.8)$$

где $\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}$ – номинальная угловая скорость ЭД, рад/с.

Ток якоря определяется по выражению $I_{ян} = M_n / k\phi_n$.

Если этот ток подставить в уравнение (4.7), то получим уравнение для механической характеристики [1,4]:

$$\omega = \frac{U_{ян}}{k\phi_n} - \frac{M_n \cdot R_{я}}{(k\phi_n)^2} = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (2.9)$$

где $M_n = 9550 \frac{P_{2н}}{n_n} = \frac{P_{2н}}{\omega_n} \cdot 10^3, Н \cdot м$; $P_{2н}$ – номинальная мощность ЭД, кВт;

M_n – номинальный момент ЭД, Н·м.

Если $U_{я} \neq U_{ян}$, или $\phi \neq \phi_n$, или $R_d \neq 0$, то получим искусственные электромеханические и механические характеристики. Естественная и искусственные характеристики приведены на рисунке 2.2.

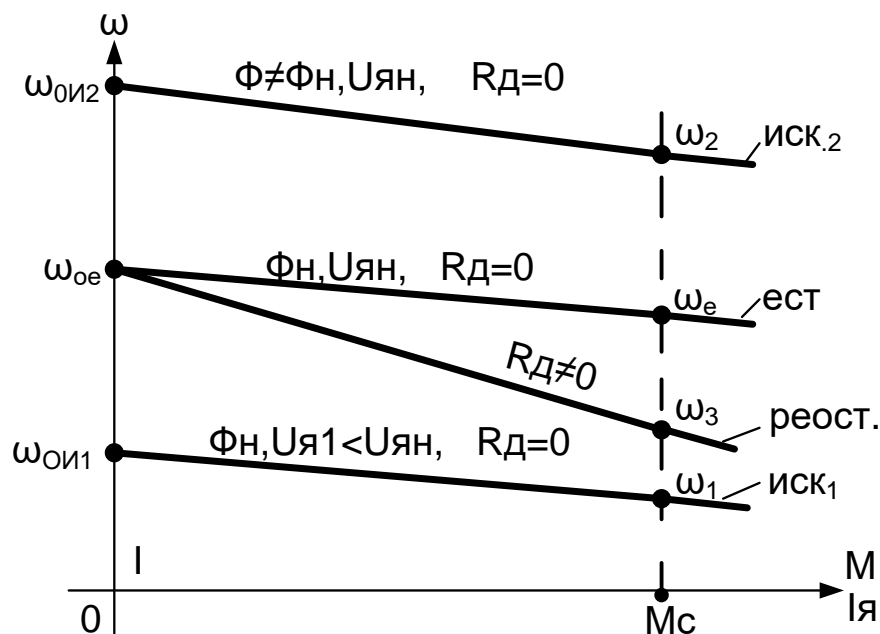


Рис. 2.2. Естественная и искусственные характеристики ЭД

Тормозные режимы ДПТ НВ

ЭД может работать в трех тормозных режимах – генераторном (рекуперативном), динамического торможения и в режиме противовключения [1,4].

а) Генераторный (рекуперативный) режим

Его можно получить, если уменьшить напряжение на якоре ($U_{я} < U_{ян}$). При этом скорость якоря ω будет больше скорости ω'_0 . Схема ЭД будет такая же, как и в двигательном режиме. Сначала ЭД тормозится, отдавая энергию в сеть, затем он переходит работать в двигательный режим, но с меньшей скоростью (рис. 2.3).

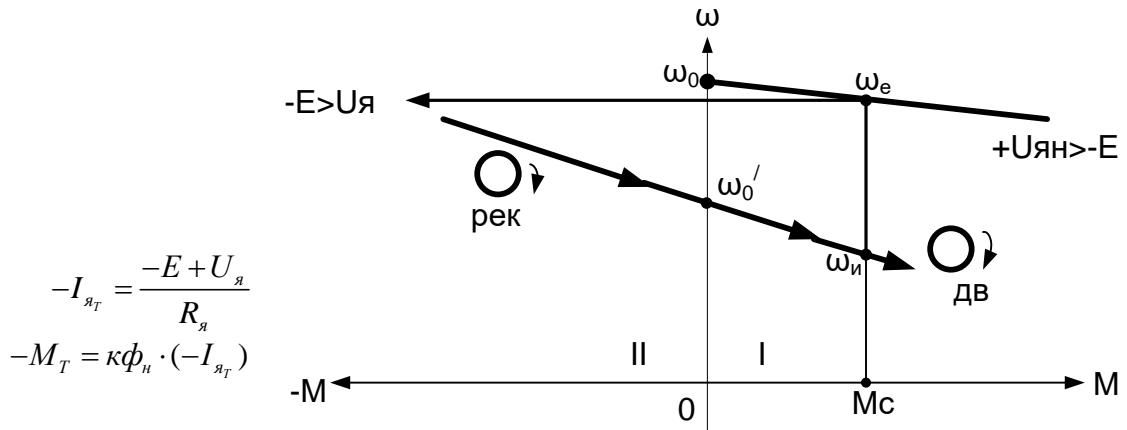
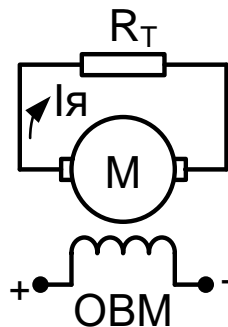


Рис. 2.3. Характеристики двигательного и рекуперативного режима торможения ЭД

б) Динамический режим

Необходимо у работающего ЭД якорь замкнуть на тормозное сопротивление R_T , а обмотку возбуждения оставить подключенной к источнику питания (рис. 4.4).



$$-I_{яТ} = \frac{-E_{нач}}{R_{я} + R_T}; -M_T = k\phi(-I_{яТ})$$

Рис. 4.4. Схема ЭД в динамическом режиме торможения

Сопротивление R_T включено для ограничения начального тормозного тока до величины $I_{т.нач} = 2,5I_{ян}$: $R_T = \frac{E_{нач}}{2,5I_{ян}} - R_{я}$.

Тормозная характеристика приведена на рисунке 2.5 (второй квадрант).

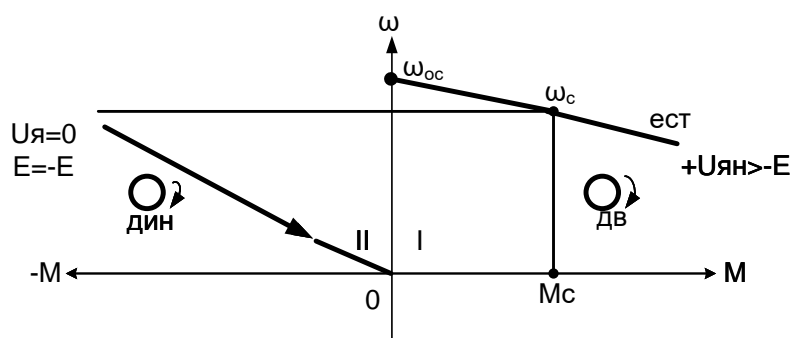


Рис. 2.5. Тормозная характеристика ЭД в динамическом режиме торможения

в) Торможение противовключения путем перемены полярности напряжения на якоре. Схема ЭД приведена на рисунке 426.

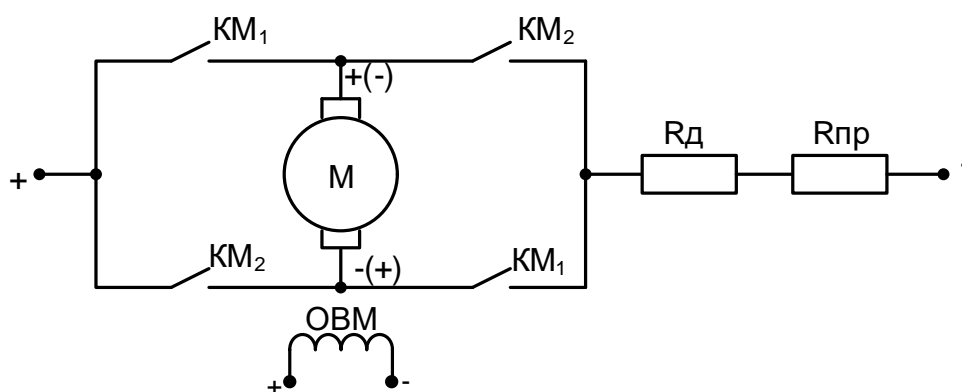


Рис. 2.6. Схема ЭД при реализации торможения противовключения путем перемены полярности напряжения на якоре

Для включения ЭД в двигательный режим необходимо включить контакты контактора КМ₁. Для получения торможения противовключением необходимо отключить контакты КМ₁ и включить контакты контактора КМ₂. В результате таких переключений поменяется полярность напряжения на якоре, изменится направление тока в якоре, и ЭД будет тормозиться.

Для ограничения тормозного тока на время торможения ЭД включают в цепь якоря сопротивление R_д и так называемое сопротивление противовключения R_{пр}:

$$R_{пр} = \frac{-U_{ян} - E_{иле}}{2,5I_{ян}} - (R_{я} + R_{\delta}), \quad (2.10)$$

Тормозной ток определяется по выражению:

$$-I_{яТ} = \frac{-U_{ян} - E_{нач}}{R_{я} + R_{\delta} + R_{пр}} \approx -\frac{2U_{ян}}{R_{я} + R_{\delta} + R_{пр}}, \quad -M_T \equiv -I_{яТ}. \quad (2.11)$$

Тормозные характеристики приведены на рисунке 2.7 (второй квадрант).

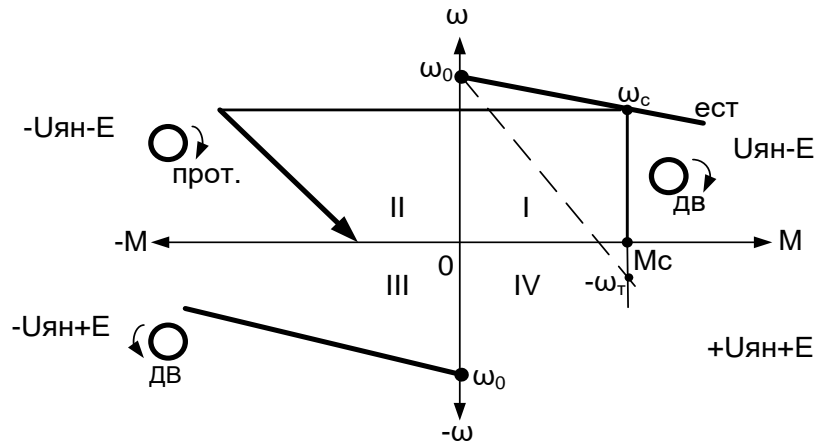


Рис. 427. Тормозные характеристики ЭД при торможении противовключением
 При скорости $\omega=0$ ЭД отключают от сети. Если требуется осуществить реверс ЭД, то при скорости $\omega=0$ необходимо отключить сопротивление $R_{пр}$. Тогда двигатель начнет вращаться в противоположную сторону (третий квадрант).

г) Торможение противовключением за счет действия активного момента сопротивления $M_{с}$.

Если при подъеме груза ввести в цепь якоря сопротивление R_d и $R_{пр}$, то сформируется механическая характеристика, на которой все моменты двигателя (в том числе и при нулевой скорости) будут меньше $M_{с}$. Под действием момента сопротивления якорь выворачивается в обратную сторону. В результате в режиме противовключения осуществляется спуск груза на малой (ползучей) скорости ($-\omega_t$). Механическая характеристика приведена на рисунке 4.7 пунктиром.

Задание

Рассчитать *трехступенчатый* пусковой реостат ($Z = 3$) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, технические данные которого: $P_{ном} = 7,1$ кВт; $U_{ном} = 220$ В; $n_{ном} = 750$ об/мин; $r_{я} = 0,48$ Ом; $\eta_{ном} = 83,5$ %. Режим пуска *форсированный*.

Решение:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{7100}{220 \cdot 0,835} = 38,6 A$$

1. Ток якоря в номинальном режиме:

2. Принимаем значение пускового тока: $I_{пуск} = 1,4 \cdot 38,6 = 54 A$

3. Номинальное сопротивление двигателя: $R_{ном} = U_{ном} / I_{ном} = 220 / 38,6 = 5,70 \text{ Ом}$

4. Отношение начального пускового тока к току переключений:

$$\lambda = \sqrt[3]{U_{ном} / (I_{пуск} \cdot r_{я})} = \sqrt[3]{220 / (54 \cdot 0,48)} = 2,05$$

5. Сопротивление резисторов реостата:

$$r_3 = r_{я} (\lambda - 1) = 0,48 \cdot (2,05 - 1) = 0,50 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 0,5 \cdot 2,05 = 1,02 \text{ Ом}$$

$$r_1 = 1,02 \cdot 2,05 = 2,09 \text{ Ом}$$

Варианты

1) Построить естественную механическую характеристику ДПТ НВ 2ПН90МУХЛ4 $P_{\text{ном}}=0,25$ кВт $U_{\text{ном}}=220$ В; $n_{\text{ном}}=1120$ об/мин; $n_{\text{макс}}=2000$ об/мин; $\eta=57\%$; $R_{\text{оя}15}=15,47$ Ом; $R_{\text{дп}15}=11,2$ Ом; $R_{\text{ов}15}=162$ Ом; $L_{\text{оя}}=297$ мГн.

2) ДПТ НВ типа 2ПН225МУХЛ4 имеет следующие паспортные данные $P_{\text{ном}}=37$ кВт $U_{\text{ном}}=220$ В; $n_{\text{ном}}=1500$ об/мин; $n_{\text{макс}}=3000$ об/мин; $\eta=86,5\%$; $R_{\text{оя}15}=0,0336$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,0159$ Ом; $R_{\text{ов}15}=45,75$ Ом. Требуется определить: сопротивления резисторов, включение которых ограничит ток при пуске и торможении противовключением до уровня $I_{\text{доп}} = 2,5 I_{\text{н}}$

3) Построить естественную механическую характеристику ДПТ НВ 2ПН160МУХЛ4 $P_{\text{ном}}=18$ кВт $U_{\text{ном}}=440$ В; $n_{\text{ном}}=3150$ об/мин; $n_{\text{макс}}=4000$ об/мин; $\eta=87,5\%$; $R_{\text{оя}15}=0,145$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,101$ Ом; $R_{\text{ов}15}=12,6$ Ом; $L_{\text{оя}}=4$ мГн.

4) ДПТ НВ типа 2ПН90МУХЛ4 имеет следующие паспортные данные: $P_{\text{ном}}=0,25$ кВт $U_{\text{ном}}=220$ В; $n_{\text{ном}}=1120$ об/мин; $n_{\text{макс}}=2000$ об/мин; $\eta=57\%$; $R_{\text{оя}15}=15,47$ Ом; $R_{\text{дп}15}=11,2$ Ом; $R_{\text{ов}15}=162$ Ом; $L_{\text{оя}}=297$ мГн. Требуется определить: сопротивления резисторов, включение которых ограничит ток при пуске и торможении противовключением до уровня $I_{\text{доп}} = 3 I_{\text{н}}$

5) Построить естественную механическую характеристику ДПТ НВ 2ПН225МУХЛ4 $P_{\text{ном}}=37$ кВт $U_{\text{ном}}=220$ В; $n_{\text{ном}}=1500$ об/мин; $n_{\text{макс}}=3000$ об/мин; $\eta=86,5\%$; $R_{\text{оя}15}=0,0336$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,0159$ Ом; $R_{\text{ов}15}=45,75$ Ом.

6) Рассчитать *двухступенчатый* пусковой реостат ($Z = 2$) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, технические данные которого: $P_{\text{ном}} = 37$ кВт; $U_{\text{ном}} = 440$ В; $n_{\text{ном}} = 1500$ об/мин; $r_{\text{я}} = 0,0614$ Ом; $\eta_{\text{ном}} = 91$ %. Режим пуска *форсированный*.

7) Рассчитать *двухступенчатый* пусковой реостат ($Z = 2$) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, технические данные которого: $P_{\text{ном}} = 18$ кВт; $U_{\text{ном}} = 440$ В; $n_{\text{ном}} = 3150$ об/мин; $r_{\text{я}} = 0,305$ Ом; $\eta_{\text{ном}} = 87,5$ %. Режим пуска *форсированный*.

8) Построить естественную механическую характеристику ДПТ НВ 2ПН315МУХЛ4 $P_{\text{ном}}=200$ кВт $U_{\text{ном}}=440$ В; $n_{\text{ном}}=1500$ об/мин; $n_{\text{макс}}=2400$ об/мин; $\eta=91\%$; $R_{\text{оя}15}=0,013$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,0081$ Ом; $R_{\text{ов}15}=14,8$ Ом

9) Электропривод имеет линейные механические характеристики с жесткостью $\beta=45$ Н·м·с. Номинальный момент $M_{\text{н}}=77$ Н·м. Наибольшее значение скорости холостого хода $\omega_0=104,6$ рад/с. Найти величину диапазона регулирования скорости, если момент на валу двигателя может изменяться в пределах $0,2M_{\text{н}} \leq M_{\text{с}} \leq 1,5M_{\text{н}}$ и требуемая точность поддержания заданной скорости составляет $\Delta_{\text{доп}}=5$ %. Какой должна быть жесткость механической характеристик, чтобы достичь диапазона $D=10000$?

10) Построить естественную механическую характеристику и искусственную ДПТ НВ 2ПН160МУХЛ4 ($P_{\text{ном}}=18$ кВт $U_{\text{ном}}=440$ В; $n_{\text{ном}}=3150$ об/мин; $n_{\text{макс}}=4000$ об/мин; $\eta=87,5\%$; $R_{\text{оя}15}=0,145$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,101$ Ом; $R_{\text{ов}15}=12,6$ Ом; $L_{\text{оя}}=4$ мГн) при уменьшении магнитного потока в 1,5 раза

11) Построить естественную механическую характеристику и искусственную ДПТ НВ 2ПН225МУХЛ4 ($P_{\text{ном}}=37$ кВт $U_{\text{ном}}=220$ В; $n_{\text{ном}}=1500$

об/мин; $n_{\max}=3000$ об/мин; $\eta=86,5\%$; $R_{\text{оя}15}=0,0336$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,0159$ Ом; $R_{\text{об}15}=45,75$ Ом) при уменьшении напряжения на якоре до 100 В.

12) Рассчитать *трехступенчатый* пусковой реостат ($Z = 3$) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, технические данные которого: $P_{\text{ном}}=18$ кВт; $U_{\text{ном}}=440$ В; $n_{\text{ном}}=3150$ об/мин; $r_{\text{я}}=0,305$ Ом; $\eta_{\text{ном}}=87,5\%$. Режим пуска *форсированный*

13) Рассчитать *трехступенчатый* пусковой реостат ($Z = 3$) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, технические данные которого: $P_{\text{ном}}=37$ кВт; $U_{\text{ном}}=440$ В; $n_{\text{ном}}=1500$ об/мин; $r_{\text{я}}=0,0614$ Ом; $\eta_{\text{ном}}=91\%$. Режим пуска *форсированный*.

14) Построить естественную механическую характеристику и искусственную ДПТ НВ 2ПН160МУХЛ4 ($P_{\text{ном}}=18$ кВт $U_{\text{ном}}=440$ В; $n_{\text{ном}}=3150$ об/мин; $n_{\max}=4000$ об/мин; $\eta=87,5\%$; $R_{\text{оя}15}=0,145$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,101$ Ом; $R_{\text{об}15}=12,6$ Ом; $L_{\text{оя}}=4$ мГн) при введении в цепь якоря сопротивления 1,5 Ом

15) Построить естественную механическую характеристику и искусственную ДПТ НВ 2ПН225МУХЛ4 ($P_{\text{ном}}=37$ кВт $U_{\text{ном}}=220$ В; $n_{\text{ном}}=1500$ об/мин; $n_{\max}=3000$ об/мин; $\eta=86,5\%$; $R_{\text{оя}15}=0,0336$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,0159$ Ом; $R_{\text{об}15}=45,75$ Ом) при введении добавочного сопротивления в цепь якоря, равному 1 Ом.

16) ДПТ НВ типа 2ПН160МУХЛ4 имеет следующие паспортные данные: $P_{\text{ном}}=18$ кВт $U_{\text{ном}}=440$ В; $n_{\text{ном}}=3150$ об/мин; $n_{\max}=4000$ об/мин; $\eta=87,5\%$; $R_{\text{оя}15}=0,145$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,101$ Ом; $R_{\text{об}15}=12,6$ Ом; $L_{\text{оя}}=4$ мГн. Требуется определить: сопротивления резисторов, включение которых ограничит ток при пуске и торможении противовключением до уровня $I_{\text{доп}}=3 I_{\text{н}}$

17) ДПТ НВ типа 2ПН315МУХЛ4 имеет следующие паспортные данные $P_{\text{ном}}=200$ кВт $U_{\text{ном}}=440$ В; $n_{\text{ном}}=1500$ об/мин; $n_{\max}=2400$ об/мин; $\eta=91\%$; $R_{\text{оя}15}=0,013$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,0081$ Ом; $R_{\text{об}15}=14,8$ Ом. Требуется определить: сопротивления резисторов, включение которых ограничит ток при пуске и торможении противовключением до уровня $I_{\text{доп}}=2,5 I_{\text{н}}$.

18) Построить естественную механическую характеристику и искусственную ДПТ НВ 2ПН225МУХЛ4 ($P_{\text{ном}}=37$ кВт $U_{\text{ном}}=220$ В; $n_{\text{ном}}=1500$ об/мин; $n_{\max}=3000$ об/мин; $\eta=86,5\%$; $R_{\text{оя}15}=0,0336$ Ом; $R_{\text{дп}15}=0,0159$ Ом; $R_{\text{об}15}=45,75$ Ом) при уменьшении магнитного потока в ОВ в 2 раза

19) Электропривод имеет линейные механические характеристики с жесткостью $\beta=20$ Н·м·с. Номинальный момент $M_{\text{н}}=40$ Н·м. Наибольшее значение скорости холостого хода $\omega_0=120$ рад/с. Найти величину диапазона регулирования скорости, если момент на валу двигателя может изменяться в пределах $0,3M_{\text{н}} \leq M_{\text{с}} \leq M_{\text{н}}$ и требуемая точность поддержания заданной скорости составляет $\Delta_{\text{доп}}=1\%$. Какой должна быть жесткость механической характеристик, чтобы достичь диапазона $D=1000$.

20) Построить естественную механическую характеристику и искусственную ДПТ НВ 2ПН90МУХЛ4 ($P_{\text{ном}}=0,25$ кВт $U_{\text{ном}}=220$ В; $n_{\text{ном}}=1120$ об/мин; $n_{\max}=2000$ об/мин; $\eta=57\%$; $R_{\text{оя}15}=15,47$ Ом; $R_{\text{дп}15}=11,2$ Ом; $R_{\text{об}15}=162$ Ом; $L_{\text{оя}}=297$ мГн) при введении добавочного сопротивления в цепь якоря, равному 30 Ом

Контрольные вопросы:

1. Какие типы двигателей постоянного тока существуют?
2. По каким двум точкам строятся статические механические характеристики ДПТ НВ?
3. Назовите достоинства, недостатки, область применения торможения противовключением.
4. В чем заключается сущность импульсного регулирования?
5. Какими уравнениями описываются электрические и электромеханические процессы в двигателях постоянного тока независимого возбуждения?
6. Что такое жесткость? Как ее вычислить для ДПТ НВ?
7. Как можно осуществить режим торможения противовключением?
8. Назовите типы преобразовательных устройств, применяемые в ЭП постоянного тока.
9. Как вычисляется жесткость механической характеристики ДПТ?
10. Как происходит переход от абсолютных величин к относительным?
11. Назовите достоинства, недостатки, область применения динамического торможения.
12. Каковы недостатки системы Г-Д?
13. Назовите режимы работы ДПТ НВ.
14. Регулируя какие параметры ДПТ НВ можно получить искусственные механические (электромеханические характеристики)?
15. Как можно осуществить режим динамического торможения?
16. Опишите функциональную схему и принцип действия управляемого тиристорного преобразователя.
17. Назовите генераторные режимы ДПТ НВ.
18. Какие виды пуска Вы знаете?
19. Как осуществляется реверс ДПТ НВ?
20. Каким образом регулируется напряжения якоря ДПТ в системе ТП – Д?
21. Назовите режимы работы ДПТ ПВ.
22. Какие технологические требования, предъявляемые к пуску Вы знаете?
23. Как осуществляется реверс ДПТ ПВ, ДПТ СВ, ДПТ ШВ?
24. В чем заключается сущность импульсного регулирования?
25. Назовите режимы работы ДПТ СВ.
26. Какими методами можно рассчитать сопротивления для реостатного пуска?
27. Какие способы регулирования скорости ДПТ вы знаете?
28. Назовите типы преобразовательных устройств, применяемые в ЭП постоянного тока.

Практическая работа № 3

«Электропривод с двигателями переменного тока»

Цель работы: Сформировать практические навыки по решению задач с асинхронными двигателями

Студент должен

уметь:

- строить механическую характеристику АД (естественную и искусственную);

- рассчитывать тормозные сопротивления;

знать:

- основные виды торможения;

- основные режимы работы АД;

- виды двигателей переменного тока.

Теоретическое введение:

Основная схема включения трехфазного АД в сеть и соответствующая ей однофазная схема замещения с вынесенным контуром намагниченности показаны на рисунке 3.1

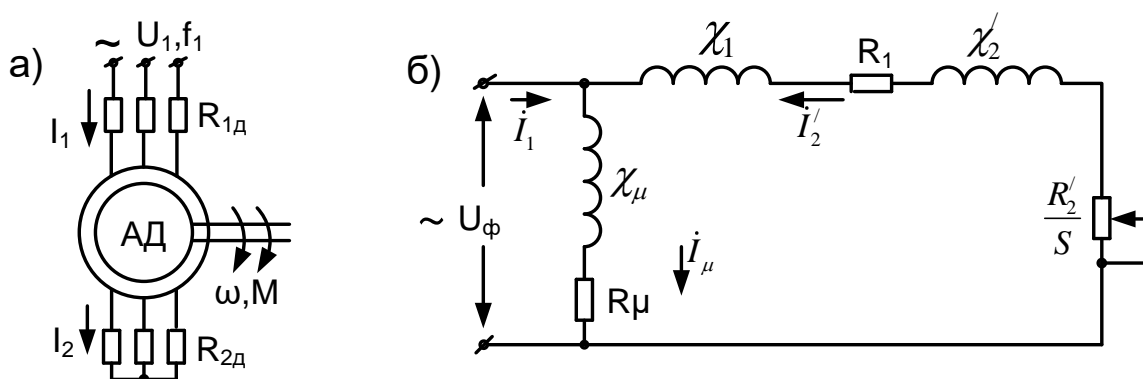


Рис.3.1. Схема включения (а) и однофазная схема замещения (б) АД

На схеме приняты следующие обозначения:

U_{ϕ} – действующее значение фазного напряжения сети, В;

I_{μ}, I_1, I_2' – фазные токи соответственного намагничивания, обмотки статора и приведенный ток ротора, А;

χ_{μ} – индуктивное сопротивление контура намагничивания, Ом;

R_1, R_2' – активные фазные сопротивления обмоток, соответственно статора и ротора; последнее приведено к обмотке статора, Ом;

$R_{1д}$ и $R_{2д}$ – добавочные сопротивления в фазах статора и ротора;

χ_1, χ_2' – индуктивные фазные сопротивления, обусловленные полями рассеяния обмоток статора и ротора; последнее приведено к обмотке статора, Ом.

S – скольжение двигателя, определяется по выражению :

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (3.1)$$

где ω – угловая скорость ротора, рад/с; ω_0 – угловая скорость магнитного поля статора, называемая синхронной, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (3.2)$$

В выражении (3.2):

f_1 – частота напряжения питающей сети, Гц; p – число пар полюсов двигателя.

Рассматриваемая схема замещения АД получена при определенных допущениях. В частности, ее параметры считаются не зависящими от режима работы, не учитываются насыщение магнитопровода, добавочные потери, а также влияние пространственных и временных высших гармонических составляющих (н.с.) обмоток статора и ротора.

При подведении к обмотке статора переменного трехфазного напряжения в статоре образуется вращающееся магнитное поле со скоростью ω_0 . Это поле пересекает обмотку ротора и наводит в ней ЭДС [1]:

$$E_{2_s} = 4,44\kappa_2 \cdot f_2 \cdot W_2 \cdot \phi_m, \quad (3.3)$$

где $\kappa_2 < 1$ – обмоточный коэффициент, учитывающий уменьшение ЭДС ротора вследствие геометрического сложения ЭДС, и укорочение шага обмотки ротора;

f_2 – частота тока в обмотке ротора, Гц;

W_2 – число витков обмотки фазы ротора;

ϕ_m – максимальное значение магнитного потока статора, Вб.

Эта ЭДС создает ток в обмотке ротора

$$I_2 = \frac{E_{2_s}}{Z_{2_s}} = \frac{E_{2_s}}{\sqrt{R_2^2 + \chi_2^2}}, \quad (3.4)$$

где R_2 – активное сопротивление фазной обмотки ротора;

χ_2 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки.

Взаимодействуя с полем статора, активный ток создает пусковой вращающий момент, и двигатель запускается, вращаясь в дальнейшем со скоростью

$$\omega = \omega_0(1 - S). \quad (3.5)$$

При номинальном скольжении S_n номинальная скорость $\omega_n = \omega_0(1 - S_n)$.

Для обычных двигателей $S_n = 0,02 \div 0,06$, для двигателей с повышенным скольжением $S_n = 0,08 \div 0,18$.

Запуск электродвигателя происходит по следующей механической характеристике (рис. 3.2).

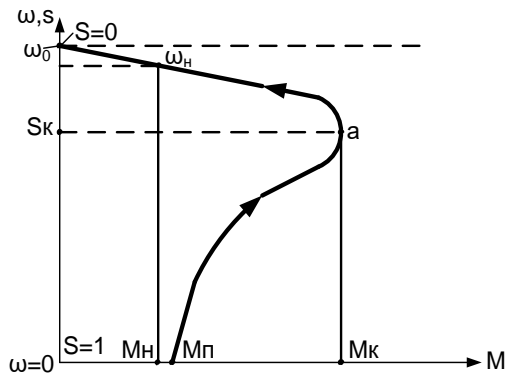


Рис. 3.2. Механическая характеристика АД

На рисунке 8.2 обозначено: $M_{п}$ – пусковой момент; $M_{к}$ – критический момент; $M_{н}$ – номинальный момент; $S_{к}$ – критическое скольжение.

Так как ЭДС, индуцированная в обмотке ротора в момент пуска имеет максимальное значение (при $S=1$, $f_2=50$ Гц), то ток в обмотке ротора $I_2 = (4-8)I_{н.д.}$ ($I_{н.д.}$ – номинальный ток двигателя).

Однако на пусковой момент влияет не эта величина пускового тока ($I_2 = I_{п}$), а сдвиг фаз между током I_2 и ЭДС E_{2s} ротора.

Если индуктивность обмотки ротора велика, то будет большим и сдвиг фаз между током ротора I_2 и ЭДС ротора E_{2s} .

В момент пуска, когда ротор еще неподвижен, частота тока в обмотке ротора наибольшая ($f_2 = f_1 = 50$ Гц), и поэтому индуктивное сопротивление χ_{2s} имеет наибольшее максимальное значение χ_{2m} :

$$\chi_{2s} = 2\pi \cdot f_2 \cdot L_{2s} = \chi_{2m}; \quad f_2 = f_1 \cdot S, \quad (3.6)$$

где L_{2s} – индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора.

Вращающий момент АД определяется по формуле

$$M_{вр} = \kappa_2 \cdot \phi_m \cdot I_2 \cos \psi_2, \quad (3.7)$$

а коэффициент мощности $\cos \psi_2$ – по выражению [1]

$$\cos \psi_2 = \frac{R_{я}}{Z_{2s}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + \chi_{2s}^2}}. \quad (3.8)$$

В формуле (8.7): κ_2 – обмоточный коэффициент; ψ_2 – угол сдвига фаз между ЭДС и током фазы обмотки ротора.

Таким образом, момент двигателя определяется активной слагающей пускового полного тока ротора $I_{2п} \cdot \cos \psi_{п} = I_{2a}$.

Пусковой момент двигателя можно увеличить, если в момент пуска уменьшить сдвиг фаз между током I_2 и ЭДС E_{2s} ротора. Это приведет к тому, что увеличится $\cos \psi_2$. При $R_{2доб} = 0$ и $\omega = 0$ $\cos \psi_2 = 0,1 \div 0,2$. При $R_{2доб} \neq 0$ $\cos \psi_2 = 0,3-0,6$. При $\omega = \omega_n$ $\cos \psi_2 = 0,8 \div 0,9$. На практике этим способом часто пользуются. Для этого в цепь ротора вводят активное сопротивление, которое затем выводят как только двигатель увеличит скорость, либо применяют

двигатель, у которого на роторе глубокие пазы для стержней, либо две клетки (две короткозамкнутые обмотки).

Таким образом, пусковой момент двигателя зависит от конструкции ротора.

При пуске АД с уменьшением скольжения от $S = 1$ до $S = S_k$ уменьшаются частота f_2 и ЭДС E_2 , полный ток I_2 уменьшается очень медленно (всего на 29 % от $I_{2п}$), а $\cos\psi_2$ и активный ток $I_{2а}$ значительно увеличиваются. При дальнейшем пуске АД от $S = S_k$ до $S = 0$ токи I_2 и $I_{2а}$ резко уменьшаются при незначительном росте $\cos\psi_2$. Такие изменения параметров в цепи ротора и определяют вид характеристики (рис. 3.2).

Для вывода уравнения механической характеристики и ее построения обычно пользуются схемой замещения двигателя (рис. 3.1б), рассматривая баланс мощности в двигателе.

Электромагнитная мощность P_{12} , передаваемая ротору от статора, определяется электромагнитным моментом M , развиваемым двигателем: $P_{12} = M \cdot \omega_0$. Здесь, как и ранее, считается, что электромагнитный момент двигателя приблизительно равен моменту на его валу, т.е. не учитываются механические потери.

Мощность, передаваемую ротору, можно разделить на две составляющие: мощность, преобразуемую в механическую P_m , и мощность потерь $\Delta P_{эл.2}$ в роторе. Первая составляющая может быть определена следующим образом: $P_m = M \cdot \omega$. Вторая составляющая представляет собой электрические потери в обмотках ротора и потери на перемагничивание.

Как правило, потери в стали ротора существенно меньше электрических потерь, в связи с чем последними можно пренебречь. Тогда

$$P_{12} = P_m + \Delta P_{эл.2}, \quad (3.9)$$

$$\text{или } M \cdot \omega_0 = M \cdot \omega + \Delta P_{эл.2}.$$

Отсюда

$$\Delta P_{эл.2} = M(\omega_0 - \omega) = M \cdot \omega_0 \cdot S. \quad (3.10)$$

Учитывая, что

$$\Delta P_{эл.2} = 3I_2'^2 \cdot R_{2\Sigma}', \quad (3.11)$$

где $R_{2\Sigma}' = R_2' + R_{2л}'$, можно записать выражение для момента в виде

$$M = \frac{3I_2'^2 \cdot R_{2\Sigma}'}{\omega_0 \cdot S}. \quad (3.12)$$

Из схемы замещения

$$I_{2(s)'} = \frac{U\phi}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_{2\Sigma}'}{S})^2 + \chi_k^2}}, \quad (3.13)$$

где $\chi_k = \chi_1 + \chi_2'$ – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания.

Выражение (8.13) представляет собой уравнение электромеханической характеристики двигателя $I_2'(S)$, так как скольжение S однозначно определяет величину скорости двигателя $\omega = \omega_0(1 - S)$.

Отметим, что для АД обычно под электромеханическими и механическими характеристиками понимаются зависимости момента и тока от скольжения. В этом случае соответствующие уравнения получают более компактную форму записи и оказываются удобными для вычисления.

Подстановка (8.13) в (8.12) дает уравнение механической характеристики [1,2,3,4]:

$$M = \frac{3U\phi^2 \cdot R'_{2\Sigma}}{\omega_0 S \left[\left(R_1 + \frac{R'_{2\Sigma}}{S} \right)^2 + \chi_k^2 \right]}. \quad (3.14)$$

Максимальное значение момента M_k принято называть критическим (допустимым перегрузочным моментом). Соответствующее ему скольжение S_k также называется *критическим*. Для определения S_k необходимо решить уравнение вида $\frac{dM}{dS} = 0$, подставив в него $M(S)$.

Решение этого уравнения дает:

$$S_k = \pm \frac{R'_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + \chi_k^2}}. \quad (3.15)$$

Подставляя значение S_k в уравнение (8.14), находим:

$$M_k = \frac{3U\phi^2}{2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + \chi_k^2})}. \quad (3.16)$$

Знак (+) соответствует $S > 0$, а (-) – $S < 0$. Знаки «±» в уравнении (3.16) означают, что максимум момента может иметь место при $S > 0$ в двигательном режиме или в режиме противовключения, а при $S < 0$ – в генераторном режиме.

Из уравнения (8.16) видно, что при работе в генераторном режиме с рекуперацией энергии критический момент больше, чем при работе в двигательном режиме или режиме противовключения.

Из уравнений (3.14) и (3.16) с учетом (3.15) может быть получена другая формула для механической характеристики:

$$M_k = \frac{2M_k(1 + aS_k)}{S/S_{kp} + S_{kp}/S + 2aS_k}, \quad (3.17)$$

где $a = \frac{R_1}{R'_{2\Sigma}}$.

Для крупных машин сопротивление R_1 невелико, поэтому практически $R_1 \ll \chi_k$. В этом случае получится формула, более удобная для расчетов:

$$M = \frac{2M_k}{S/S_k + S_k/S}, \quad (3.18)$$

Критическое скольжение можно определять по следующему выражению:

$$S_k = S_n (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (3.19)$$

где $\lambda = M_k / M_n$ – коэффициент перегрузочной способности.

Для уравнения (8.18) достаточно знать лишь параметры, которые обычно указываются в каталогах, или могут быть найдены по данным каталогов, тогда как такие параметры, как χ_k и R_1 обычно неизвестны.

Анализ формулы (8.18) показывает, что при $S > S_k$ (нерабочая часть характеристики) получается гипербола. Эта часть характеристики соответствует лишь пусковым и тормозным режимам.

При малых значениях скольжения ($S < S_k$) для $M = f(S)$ получится уравнение прямой линии. Эта линейная часть характеристики является ее рабочей частью, на которой двигатель обычно работает в установившемся режиме. На этой же части характеристики находятся точки, соответствующие номинальным данным $M_n, I_n, \omega_n, S_n \dots$

Величина номинального скольжения зависит от сопротивления ротора и мощности двигателя. Двигатель с малым сопротивлением (большой мощности) ротора имеет малые S_k и S_n и более жесткую механическую характеристику.

Анализ уравнений (3.15) и (3.16) показывает, что M_k и S_k уменьшаются с увеличением индуктивных сопротивлений обмоток χ_k и активного сопротивления R_1 обмотки статора.

Критическое скольжение не зависит от питающего напряжения и прямо пропорционально $R'_{2\Sigma}$. Это свойство используется для увеличения пускового момента АД с фазным ротором при включении в цепь ротора добавочного сопротивления $R_{2д}$ (рис. 3.1а).

Механические характеристики АД с фазным ротором приведены на рисунке 3.3.

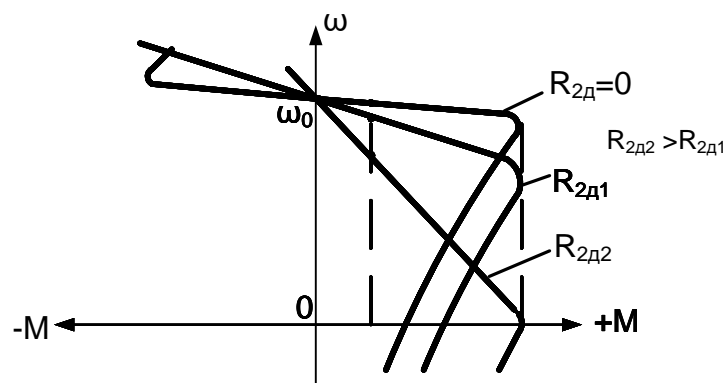


Рис. 3.3. Механические характеристики АД с фазным ротором

С увеличением сопротивления $R_{2д}$ снижается жесткость механических характеристик аналогично как и для ДПТ независимого возбуждения.

Момент M_k не зависит от активного сопротивления цепи ротора и пропорционален квадрату напряжения питающей сети. Снижение напряжения питающей сети на $\sim 15\%$ приводит к уменьшению M_k и соответственно λ на 28% .

Задание

Задача 1. Построить естественную и искусственные механические характеристики асинхронного двигателя при различных способах регулирования. Естественная и искусственные (3 шт.) механические характеристики должны быть построены в одной оси координат (**в одной системе координат 4 графика: 3 искусственной механической характеристики + 1 естественная !!!!**). Данные к задаче приведены в таблице 3.1. **Недостающие данные необходимо получить из каталогов двигателей. В конце задачи необходимо ответить НА ВСЕ контрольные вопросы.**

Каждый изготовленный двигатель имеет соответствующие ГОСТ характеристики, которые приведены в каталогах. Эти данные можно представить следующим образом. Режим номинальной мощности (100%-ая нагрузка): линейное напряжение $U_{ном.}$ и ток статора $I_{1ном.}$, полезная мощность $P_{2ном.}$, коэффициент полезного действия $\eta_{ном.}$, коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном.}$, частота вращения n_2 . (или скольжение $s_{ном.}$). Режим максимального момента: кратность максимального момента $K_M = M_{пт}/M_{ном.}$. Режим короткого замыкания (заторможенный ротор): кратности пускового момента $K_{п} = M_{п}/M_{ном.}$ и пускового тока $K_i = I_{п}/I_{ном.}$. Для АД серии 4А в каталогах приведены также параметры схемы замещения АД в **относительных единицах**, а именно активное и индуктивное сопротивление статора R_1^* и X_1^* , приведенные активное и индуктивное сопротивление ротора $R_2'^*$ и $X_2'^*$ и индуктивное сопротивление цепи намагничивания X_{μ}^* . Для перехода от относительных единиц к абсолютным, необходимо найти номинальное фазное напряжение двигателя $U_{\phi} = U_{ном.}/\sqrt{3}$ и номинальный ток:

$$I_{1ном} = \frac{P_{2ном}}{\sqrt{3}U_{ном} \cos\varphi_{ном} \eta_{ном}}.$$

Базовое сопротивление:

$$Z = \frac{U_{\phi}}{I_{1ном}}.$$

Тогда активное сопротивление статора будет равно

$$R_1 = R_1^* Z$$

Индуктивное сопротивление статора

$$X_1 = X_1^* Z$$

Приведенное активное сопротивление ротора

$$R_2' = R_2'^* Z$$

Приведенное индуктивное сопротивление ротора

$$X_2' = X_2'^* Z.$$

Для двигателей серии 4А также указывается критическое скольжение s_k , если оно не дано, то его можно вычислить приближенно по формулам:

$$s_k = s_n (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1}) \quad \text{или} \quad s_k = \pm \frac{R_{2\Sigma}'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}},$$

где X_k – индуктивное сопротивление КЗ, s_n – номинальное скольжение.

$$X_k = X_1 + X_2'$$

Механическую характеристику асинхронного двигателя можно построить по уточненной (или упрощенной) формуле Клосса. Воспользуемся уточненной формулой, имеющей вид:

$$M = \frac{2 \cdot M_k (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2 \cdot a \cdot s_k},$$

где M_k – критический момент; s_k – критическое скольжение; $a = R_1/R_2'$ – отношение активных сопротивлений статора и приведенного сопротивления ротора; s – текущее скольжение; M – текущий момент.

Скольжение – величина, характеризующая запаздывание скорости вращения ротора по отношению к скорости вращения статора. Определяется по выражению:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad \text{или} \quad s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot 100 \%$$

где $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$, $n_0 = 60 f_1 / p$ – синхронная угловая скорость и частота вращения статора (или же угловая скорость (частота вращения) холостого хода), f_1, p – соответственно частота сети и число пар полюсов.

При использовании полученных формул можно построить естественную механическую характеристику. При построении механической характеристики $M(\omega)$ или $M(n)$ не забываем, что $n = (1-s)n_0$ или $\omega = (1-s)\omega_0$.

При построении искусственной механической характеристики необходимо узнать как изменятся параметры a , s_k и M_k в уточненной формуле Клосса. **(НАПОМИНАНИЕ: В АДК невозможно регулирование скорости путем изменения параметров со стороны ротора).**

$$a_{иск} = (R_1 + R_{1доб})/R_2'$$

$$T.к. \quad s_k = \pm \frac{R'_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}, \text{ то}$$

$$s_{киск} = \frac{s_{кест} \left(\sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}{\sqrt{(R_1 + R_{1доб})^2 + X_k^2}} - \text{при регулировании введением добавочного}$$

сопротивления в цепь статора.

$$s_{киск} = \frac{s_{кест} \left(\sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}{\left(\sqrt{R_1^2 + (X_k + X_{1доб})^2} \right)} - \text{при регулировании введением добавочной}$$

индуктивности в цепь статора.

$$s_{киск} = \frac{s_{кест} \left(\sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}{\left(\sqrt{R_1^2 + \frac{f_1^2}{f_{1ном}^2} X_k^2} \right)} - \text{при регулировании изменением частоты питающего}$$

напряжения.

$$T.к. \quad M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}, \text{ то}$$

$$M_{киск} = \frac{U_\phi^2 \cdot M_{кест}}{U_{\phi ном}^2} \quad - \quad \text{при регулировании амплитудой питающего}$$

напряжения.

$$M_{киск} = \frac{M_{кест} \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}{R_1 + R_{1доб} + \sqrt{(R_1 + R_{1доб})^2 + X_k^2}} \quad - \quad \text{при регулировании введением}$$

добавочного сопротивления в цепь статора.

$$M_{киск} = \frac{M_{кест} (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_k + X_{1доб})^2}} \quad - \quad \text{при регулировании введением}$$

добавочной индуктивности в цепь статора.

$$M_{киск} = \frac{M_{кест} (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + \left(X_k \frac{f_1}{f_{1ном}}\right)^2}} \quad - \quad \text{при регулировании частотой питающего}$$

напряжения.

Напоминание:

$$M_{кест} = K_M \cdot M_{ном};$$

$$M_{ном} = P_{2ном} / \omega_{ном};$$

$$\omega_{ном} = \pi n_{ном} / 30.$$

$f_{1ном}$ – номинальная частота питающей сети (50 Гц).

Далее по уточненной формуле Клосса строим искусственные характеристики:

$$M = \frac{2M_{киск} (1 + a_{иск} \cdot s_{киск})}{\frac{s}{s_{киск}} + \frac{s_{киск}}{s} + 2a_{иск} \cdot s_{киск}}$$

Таблица 3.1. Данные для задачи №1.

№ вар.	Тип двигателя	Искусственная 1	Искусственная 2	Искусственная 3
1	4A100S2Y3	$U_\phi = 0,5U_{\phi ном}$	$f_1 = 20 \text{ Гц}$	$R_{1доб} = 2R_1$
2	4AA63B4Y3	$X_{1доб} = 2X_k$	$U_\phi = 0,75U_{\phi ном}$	$f_1 = 40 \text{ Гц}$
3	4A180M6Y3	$R_{1доб} = 3R_1$	$X_{1доб} = 3X_k$	$U_\phi = 0,8U_{\phi ном}$
4	4A112MB8Y3	$f_1 = 35 \text{ Гц}$	$R_{1доб} = 4R_1$	$X_{1доб} = 4X_k$
5	4A250S10Y3	$U_\phi = 0,65U_{\phi ном}$	$f_1 = 30 \text{ Гц}$	$R_{1доб} = 2,5 R_1$
6	4A355M2Y3	$X_{1доб} = 4X_k$	$U_\phi = 0,45U_{\phi ном}$	$f_1 = 45 \text{ Гц}$
7	4AA225M4Y3	$R_{1доб} = 1,5 R_1$	$X_{1доб} = 1,5X_k$	$U_\phi = 0,5U_{\phi ном}$
8	4AA63A6Y3	$f_1 = 20 \text{ Гц}$	$R_{1доб} = 2R_1$	$X_{1доб} = 2X_k$
9	4A100L8Y3	$U_\phi = 0,75U_{\phi ном}$	$f_1 = 40 \text{ Гц}$	$R_{1доб} = 3R_1$
0	4A315M12Y3	$X_{1доб} = 3X_k$	$U_\phi = 0,8U_{\phi ном}$	$f_1 = 35 \text{ Гц}$

Задача №2. По данным предыдущей задачи построить естественную и искусственные механические характеристики асинхронного двигателя при

способе регулирования $U/f=\text{const}$. Естественная и искусственные (2 шт.) механические характеристики должны быть построены в одной оси координат (в одной системе координат **3 графика: 2 искусственной механической характеристики + 1 естественная !!!!!**). Данные к задаче приведены в таблице 3.2. **Недостающие данные необходимо получить из каталогов двигателей. В конце задачи необходимо ответить НА ВСЕ контрольные вопросы.**

Существуют 3 вида скалярного управления. Одним из них является метод, при котором поддерживают постоянными отношения напряжения и частоты питающего напряжения – $U/f=\text{const}$. При данном способе регулирования остается постоянным критический момент:

$$M_{к\text{иск}}=M_{к\text{ест}}= K_M \cdot M_{ном}$$

Скорость холостого хода падает пропорционально уменьшению частоты. В современных преобразователях частоты (ПЧ) при осуществлении скалярного управления стараются минимизировать влияние активного сопротивления статора, поэтому критическое скольжение будет расти обратно пропорционально уменьшению частоты питающего напряжения:

$$s_{к\text{иск}} = \frac{s_{к\text{ест}} \left(\sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}{\left(\sqrt{R_1^2 + \frac{f_1^2}{f_{ном}^2} X_k^2} \right)} \approx \frac{s_{к\text{ест}} \left(\sqrt{X_k^2} \right)}{\left(\sqrt{\frac{f_1^2}{f_{ном}^2} X_k^2} \right)} = \frac{s_{к\text{ест}} X_k}{\frac{f_1}{f_{ном}} X_k} = s_{к\text{ест}} f_{ном} / f_1$$

Таблица 3.2. Данные для задачи №2.

№ вар.	Тип двигателя	Искусственная 1	Искусственная 2
1	4A100S2Y3	f1=25Гц	f1=30Гц
2	4AA63B4Y3	f1=45Гц	f1=35Гц
3	4A180M6Y3	f1=45Гц	f1=25Гц
4	4A112MB8Y3	f1=25Гц	f1=30Гц
5	4A250S10Y3	f1=40Гц	f1=20Гц
6	4A355M2Y3	f1=45Гц	f1=30Гц
7	4AA225M4Y3	f1=15Гц	f1=45Гц
8	4AA63A6Y3	f1=25Гц	f1=35Гц
9	4A100L8Y3	f1=45Гц	f1=25Гц
0	4A315M12Y3	f1=25Гц	f1=20Гц

Контрольные вопросы:

- 1) При каких способах регулирования АД жесткость механической характеристики остается постоянной?
- 2) Чем ограничивается регулирование скорости АД при увеличении частоты питающего напряжения?
- 3) Каковы достоинства регулирования скорости АДФ при введении добавочного сопротивления в цепь ротора? Недостатки?
- 4) Какие способы регулирования скорости АД являются энергоэффективными?
- 5) Почему стараются увеличить пусковой момент АД?
- 6) Как называются двигатели, в которых можно изменить число пар полюсов? Какие недостатки регулирования скорости изменением числа пар полюсов?

- 7) С помощью каких устройств возможно регулирование скорости АД путем изменения напряжения на статоре (минимум 2 устройства)? Каковы достоинства и недостатки такого метода регулирования?
- 8) Почему отношение пускового тока к номинальному значительно выше, чем отношение пускового момента к номинальному?
- 9) Какими способами ограничивают пусковые токи АД (минимум 3 метода написать)?
- 10) Запишите 3 закона скалярного управления.
- 11) При регулировании $U/f=\text{const}$ как ведет себя жесткость механической характеристики? Критический момент?
- 12) Что такое преобразователь частоты?
- 13) Какие еще системы управления АД существуют?
- 14) На какие 3 части можно условно разделить преобразователь частоты?
- 15) Что предусмотрено в звене постоянного тока ПЧ для торможения двигателя?
- 16) В чем достоинства векторного управления перед скалярным?
- 17) Какие ключевые полупроводниковые элементы используются в инверторе ПЧ?
- 18) Какую функцию выполняет выпрямитель в ПЧ? Инвертор?
- 19) По каким 2 основным параметрам необходимо правильно подбирать преобразователь частоты к АД?

Список рекомендуемых источников

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.: ил. ISBN 978-5-383-00918-5
2. Электропривод промышленных установок: учебное пособие/ С.В. Петухов, М.В. Кришьянис. – Архангельск: С(А)ФУ, 2015. – 303 с.
3. Новиков В.А. Электропривод в современных технологиях/ М: Издательский центр «Академия», 2014 – 400 с.