

Новосибирский ГАУ

Инженерный институт

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Учебно-методическое пособие
для самостоятельной работы и выполнения расчётно-
графической работы

Новосибирск 2017

УДК 631.3 – 83 + 621.3 (075)

ББК 40.76, Я 73

Э 453

Кафедра техносферной безопасности и
электротехнологий

Составители: *А.Ю. Кузнецов*, ктн, доцент.;

П.В. Зонов, учебный мастер;

Д.С. Болотов, аспирант.

Рецензент доцент, канд. техн. наук *А.Т. Калюжный*

Автоматизированный электропривод: учебно-методическое пособие для самостоятельной работы и выполнения расчётно-графической работы / Новосиб. гос. аграр. ун-т, Инженер. ин-т; сост.: А.Ю. Кузнецов, П.В. Зонов, Д.С. Болотов. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2017. – 84 с.

Учебно-методическое пособие содержит теоретический материал, а также практические задания с примерами и рекомендациями по выполнению заданий расчётно-графической работы по автоматизированному электроприводу. Приведен порядок решения типовых задач.

Предназначено для студентов очной формы обучения, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, по профилю - Электрооборудование и электротехнологии в агропромышленном комплексе.

Утверждено и рекомендовано к изданию методическим советом Инженерного института (протокол №8 от 28 марта 2017 года).

© Новосибирский ГАУ, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельной работы по дисциплине «Автоматизированный электропривод» при выполнении расчётно-графической работы. Оно знакомит студентов с основными теоретическими положениями по электрическому приводу переменного и постоянного тока и содержит задания с рекомендациями для их самостоятельного выполнения.

Учебно-методические указания, изложенные в пособии, разработаны с учетом программы курса «Автоматизированный электропривод» для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, по профилю - Электрооборудование и электротехнологии в агропромышленном комплексе.

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Для студентов всех форм обучения учебным планом по курсу «Автоматизированный электропривод» предусмотрено выполнение расчётно-графической работы.

Расчётно-графическая работа по курсу содержит три задания. Условие каждой задачи общее для всех студентов. Студент должен выполнить свой вариант расчётно-графической работы в соответствии с шифром (**последние две цифры зачетной книжки**). Данные к заданию № 1 приведены в табл. 9 и 10, заданию № 2 – в табл. 2, заданию № 3 – в табл. 2.

Для выполнения расчётно-графической работы студенту необходимо изучить соответствующую литературу, решить задачи и упражнения, приведенные в рекомендованной литературе, чтобы иметь полное представление по рассматриваемому вопросу. Задачи и примеры посвящены вопросам оценки и расчета механических и регулировочных характеристик электроприводов с двигателями постоянного и переменного тока, в том числе с релейным управлением посредством

регулируемых сопротивлений в цепях электродвигателей.

В процессе выполнения расчётно-графической работы студенты приобретают навыки управления координатами электропривода и их регулирования, умение исследовать и анализировать его характеристики.

При выполнении задания расчётно-графической работы студенту необходимо соблюдать следующие правила.

В тексте расчётно-графической работы должны быть приведены условия задачи соответственно выполняемому варианту. Выполнение работы должно сопровождаться краткими объяснениями, подробными вычислениями и необходимыми обоснованиями. При вычислении каждой величины нужно указать, какая величина определяется. Решение задачи надо произвести сначала в общем виде (формулы в буквенных выражениях), и затем, после необходимых преобразований, вставлять соответствующие числовые значения. Необходимо указать размерность как всех заданных в условиях задачи величин, так и полученных результатов. Расчеты можно производить с точностью до трех знаков после запятой.

Рекомендуется выполнять графическое и текстовое оформление с помощью ПК. Принципиальные схемы необходимо начертить в соответствии с ЕСКД (согласно действующим стандартам).

Графический материал желательно выполнять аккуратно на миллиметровой или чертежной бумаге с применением чертежных наборов или с помощью ПК.

В конце расчётно-графической работы необходимо привести список использованной литературы, указать на титульном листе дату окончания работы и поставить свою подпись.

Не засчитываются небрежно оформленные, незаконченные, а также выполненные не по своему варианту расчётно-графические работы.

На экзамене студенты сдают расчётно-графические работы преподавателю-экзаменатору (студенты без расчётно-графических работ к экзамену не допускаются).

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Асинхронным двигателем (АД) называется двигатель переменного тока, в котором угловая скорость ротора не равна угловой скорости вращения магнитного поля статора.

Асинхронный электропривод (АЭП) – это такой электропривод, в состав которого входит АД. Относится к числу наиболее простых, надежных и дешевых электроприводов. Поэтому, несмотря на то, что пусковые характеристики у АЭП являются нелинейными, а электромеханическая и механическая характеристики также нелинейные, этот электропривод находит широкое применение в устройствах, не требующих высокой точности.

В настоящее время принята следующая классификация АД:

- 1) по электропотреблению:
 - однофазный;
 - двухфазный;
 - трехфазный;
- 2) по конструктивному исполнению:
 - с фазным ротором;
 - с короткозамкнутым ротором;
 - с полым немагнитным ротором;
 - с полым ферромагнитным ротором;
- 3) по характеру перемещения рабочего органа:
 - с вращательным движением рабочего органа;
 - с поступательным перемещением рабочего органа.

Схемы включения и конструктивная схема асинхронного двигателя общего назначения представлены на рис. 2.1-2.4.

На рис. 2.1 – 2.2 обозначено:

$R_{1д}$ – дополнительные резисторы в обмотке статора;

$R_{2д}$ – дополнительные резисторы в обмотке ротора (применяются в мощных установках для ограничения тока и регулирования характеристик);

I_1, I_2 – токи первичной и вторичной обмоток.

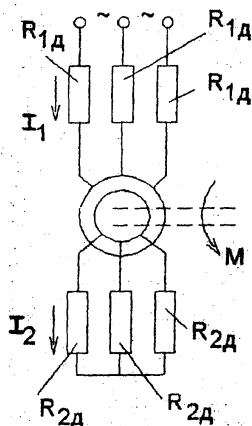


Рис. 2.1. Схема АД с фазным ротором

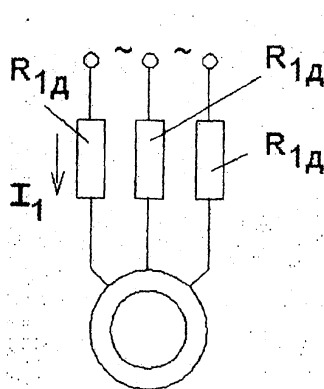


Рис. 2.2. Схема АД с короткозамкнутым ротором

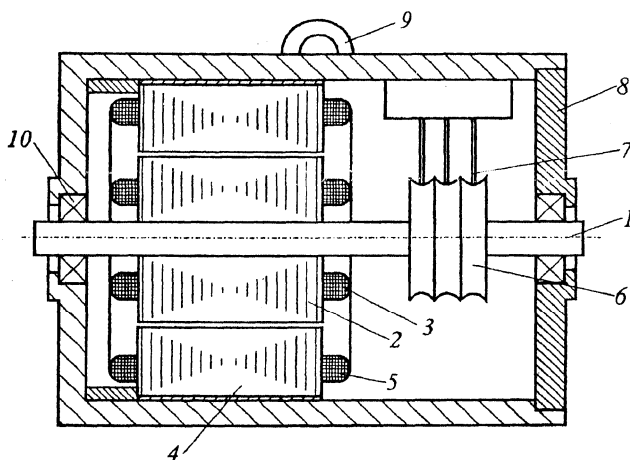


Рис. 2.3. Конструктивная схема АД:

1 – вал электродвигателя; 2 – пакет пластин ротора; 3 – обмотка ротора; 4 – пакет пластин статора; 5 – обмотка статора; 6 – контактные кольца коллекторного токоподвода; 7 – щетки коллекторного токоподвода; 8 – корпус статора; 9 – анкерный болт; 10 – шарикоподшипниковые опоры ротора

Обмотка типа «беличья клетка» может быть изготовлена штамповкой из меди или литьём из алюминиевого сплава.

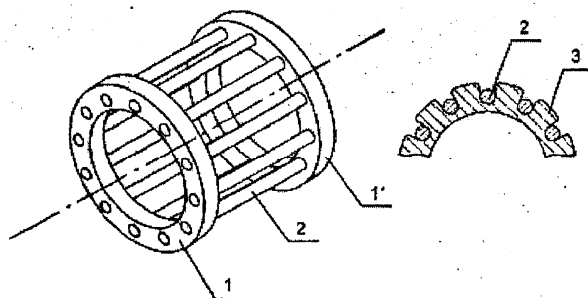


Рис. 2.4. Обмотка короткозамкнутого ротора типа «беличья клетка»:

1, 1' – торцевые части; 2 – стержни; 3 – магнито-мягкое железо ротора

2.1. Принцип действия АД

Для пояснения принципа действия АД на рис. 2.5, 2.6 приведены его электромагнитная и эквивалентная схемы.

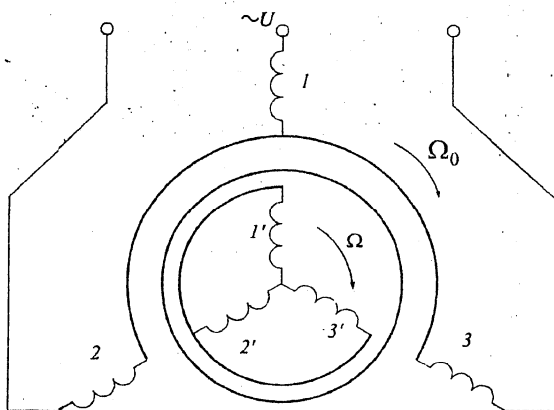


Рис. 2.5. Электромагнитная схема АД

Угловая скорость вращения магнитного поля статора определяется по формуле

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_c}{p}, \quad (2.1)$$

где p – число пар полюсов статора; f_c – частота питающего напряжения.

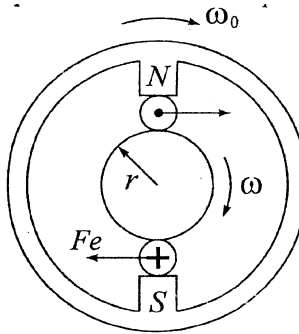


Рис. 2.6. Простейшая эквивалентная схема АД

Угловая скорость вращения ротора ω определяется по формуле

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \quad (2.2)$$

где s – скольжение, равное

$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (2.3)$$

В соответствии с рис. 2.5 электромагнитная система АД создает движущий момент сил за счет разности угловых скоростей ω_0 и ω . Магнитное поле статора (см. рис. 2.6) изображено по более простой схеме. На роторе показан один проводник, вращающийся со скоростью $\omega < \omega_0$, его взаимодействие с магнитным полем статора по закону Ампера приводит к появлению пары сил F .

Рассмотрим силы, возникающие в асинхронном двигателе в зависимости от режимов его работы.

1. *Двигательный режим.* Ротор вращается с угловой скоростью ω , меньшей угловой скорости статора ω_0 .

По правилу левой руки определяется направление тока, наводимого в короткозамкнутой обмотке ротора под действием ЭДС индукции. Сила Ампера F увлекает проводник в направлении движения электромагнитного поля и определяется по правилу левой руки (рис. 2.7).

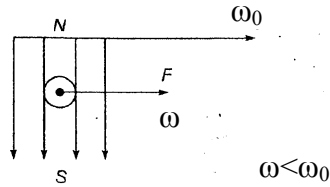


Рис. 2.7. Векторная диаграмма сил в двигательном режиме

При этом скольжение определяется выражениями

$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0} = 1 - \frac{n}{n_0}; \omega \geq \omega_0 \Rightarrow s \in [1, 0), \omega \in [0, \infty). \quad (2.4)$$

2. Генераторный режим.

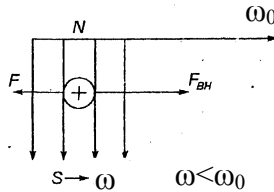


Рис. 2.8. Векторная диаграмма сил в генераторном режиме

С помощью внешней силы будем двигать проводник (ротор) со скоростью ω . В этом случае ротор вращается быстрее, чем магнитное поле статора ($\omega < \omega_0$), и в проводнике ротора наводится ЭДС индукции по закону Фарадея. Возникает сила F по закону Ампера, так что (рис. 2.8) имеем:

$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}; \omega \geq \omega_0 \Rightarrow \omega \in [\omega_0, \infty); s \in (0, -\infty). \quad (2.5)$$

3. Режим торможения противовключением. Под действием внешней силы $F_{вн}$ ротор вращается против вращения магнитного поля (рис. 2.9).

Угловая скорость $|\omega| < |\omega_0|$.

Направление ЭДС индукции определяется по правилу правой руки, а направление движущей силы F – по правилу левой руки.

Имеем в соответствии с рис. 2.9 формулы:

$$s = \frac{\omega_0 - (-\omega)}{\omega_0} = 1 + \frac{\omega}{\omega_0}; -\omega \in [0, -\infty); s \in (1, +\infty). \quad (2.6)$$

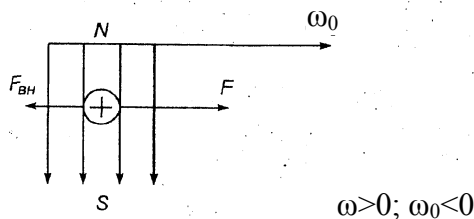


Рис. 2.9. Векторная диаграмма процессов торможения

2.2. Схемы замещения. Естественные характеристики АД

Схемы замещения АД справедливы для одной фазы (рис. 2.10, 2.11).

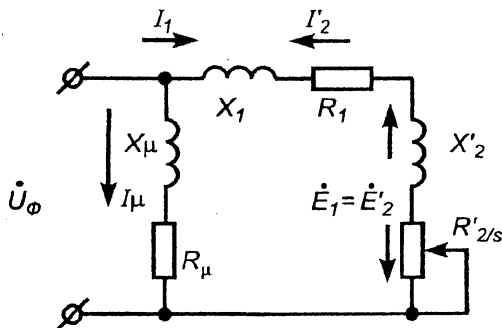


Рис. 2.10. Π-образная схема замещения

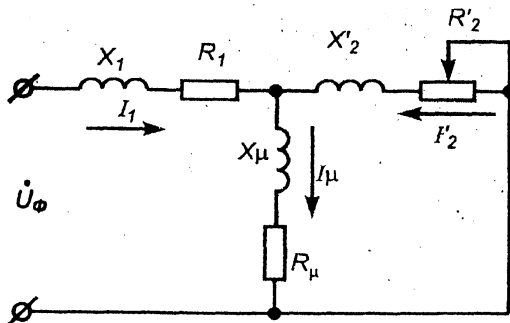


Рис. 2.11. Т-образная схема замещения

На рис. 2.10, 2.11 приняты следующие обозначения: U_ϕ – фазовое напряжение; X_μ , R_μ – индуктивная и активная составляющие сопротивления воздушного зазора; I_μ – ток в зазоре; I_1 – ток в обмотке статора; I'_2 – приведенный ток во вторичной обмотке; X_1 , R_1 – индуктивная и активная составляющие сопротивления статора; X'_2 , R'_2 – приведённые ко вторичной обмотке индуктивная и активная составляющие сопротивления ротора; E_1 , E'_2 – ЭДС индукции первичной и вторичной обмоток; s – скольжение ротора.

В реальном случае ротор механически не связан со статором, а в схеме замещения они находятся в единой цепи, поскольку ток переменный и имеют место утечки через воздушный зазор.

Введем понятие коэффициента трансформации:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = 0,95 \cdot \frac{U_{\phi.\text{ном}}}{E_{2k}}, \quad (2.7)$$

где E_1 и E_{2k} – фазные ЭДС статора и ротора при неподвижном роторе; $U_{\phi.\text{ном}}$ – фазное номинальное напряжение сети.

Тогда параметры ротора пересчитываются к параметрам первичной обмотки (статора) по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} E'_2 &= E_1 = k \cdot E_2; \\ I'_2 &= \frac{I_2}{k^2}; \\ R'_2 &= R_2 \cdot k^2; \\ X'_2 &= X_2 \cdot k^2; \\ R'_2 &= \frac{E'_2}{I'_2}, \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Формулы (2.7) и (2.8) – это формулы приведения (штрих означает приведенный параметр). Реакция воздушного зазора отражена в виде включения в цепь сопротивлений R_μ и X_μ .

Влияние ротора проявляется соответственно через индуктивное и переменное активное сопротивление X'_2 и R'_2/s . Будем использовать для анализа П-образную схему замещения. Т-образную схему обычно не рассматривают, так как выражение для I'_2 в ней гораздо сложнее; результаты же получаются очень близкими для обеих схем.

Достоинством схемы, представленной на рис. 2.10, является то, что токи, протекающие через зазор, не оказывают влияния на расчетный ток I'_2 . Это справедливо, если пренебречь внутренним сопротивлением источника тока. При таком предположении для расчета остаются неизвестными только U_Φ и ток, протекающий через элементы внешнего контура электрической схемы.

По закону Ома находим уравнение электромеханической характеристики АД:

$$I'_2 = \frac{U_\Phi}{\sqrt{(X_1 + X'_2) + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)}}. \quad (2.9)$$

Выведем уравнение механической характеристики АД. Для этого запишем формулу для мощности:

$$P_0 = M \cdot \omega_0, \quad (2.10)$$

где M – электромагнитный момент АД.

Полезная мощность:

$$P = M \cdot \omega. \quad (2.11)$$

Тогда потери мощности:

$$\Delta P = P_0 - P = M \cdot (\omega_0 - \omega) = M \cdot \omega_0 \cdot s. \quad (2.12)$$

Выразим ΔP через электрические параметры для трех фаз АД:

$$\Delta P = 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2. \quad (2.13)$$

Приравниваем (2.12) и (2.13):

$$M \cdot \omega_0 \cdot s = 3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2, \quad (2.14)$$

откуда

$$M = \frac{3 \cdot (I'_2)^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s}. \quad (2.15)$$

Подставляя в полученное выражение уравнение (2.9), получаем формулу для статической механической характеристики асинхронного двигателя:

$$M = \frac{3 \cdot (U_\Phi)^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_1 + X'_2)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 \right]}. \quad (2.16)$$

Выражения (2.9) и (2.16) – итоговые соотношения (т.е. не содержащие дифференциальных элементов). В отдельных случаях выражение (2.16) разрешают относительно s .

Потери мощности (2.12) вызваны наличием момента сопротивления:

$$M_D - M_C = 0. \quad (2.17)$$

В установившемся режиме:

$$M_D = M_C = M. \quad (2.18)$$

На основании выражений (2.17), (2.18) получают зависимость момента двигателя от скольжения.

2.3. Анализ электромеханической характеристики АД

График электромеханической характеристики АД имеет вид, представленный на рис. 2.12.

На рис. 2.12 приняты следующие обозначения: $I_{кз}$ – ток короткого замыкания (ротор неподвижен); ω – угловая скорость; s – скольжение; I'_2 – действующее значение тока. Точка a соответствует максимальному значению тока в роторе (в этой точке имеет место критическое скольжение s_k). В точке $s = 0$ ток равен нулю. Пересечение кривой 2 и оси абсцисс I'_2 соответствует значению тока на вторичной обмотке при неподвижном роторе.

Из уравнения (2.9) для s_k находим:

$$R_1 + \frac{R'_2}{s} = 0; \quad (2.19)$$

$$s_k = -\frac{R'_2}{R_1}. \quad (2.20)$$

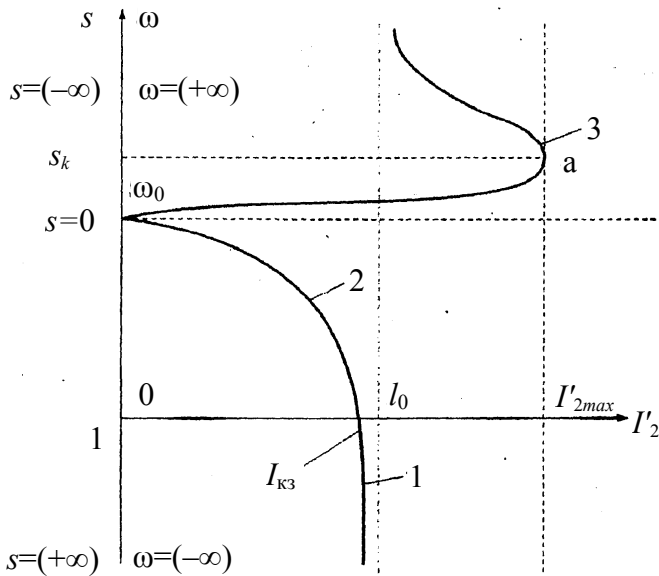


Рис. 2.12. Электромеханическая характеристика

Если $s \rightarrow \pm\infty$, то:

$$I'_2 = \frac{U_\Phi}{\sqrt{(X_1 + X'_2) + R_1}}. \quad (2.21)$$

Максимальное значение тока:

$$I'_{2max} = \frac{U_\Phi}{X_k}; \quad (2.22)$$

$$X_k = X_1 + X'_2. \quad (2.23)$$

2.4. Анализ механической характеристики АД

График электромеханической характеристики АД имеет вид, представленный на рис. 2.13.

На графике (рис. 2.13) точка B соответствует двигательному режиму работы, точка C – генераторному режиму; $M_{ном}$ – номинальный момент, определяется при скольжении $s = 3-5\%$; $M_{п} = M_{кз}$ – пусковой момент.

Из выражения (2.16) определяем максимальное значение момента:

$$M = \frac{3 \cdot (U_{\Phi})^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2})}. \quad (2.24)$$

Критическое скольжение:

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + R_k^2}}. \quad (2.25)$$

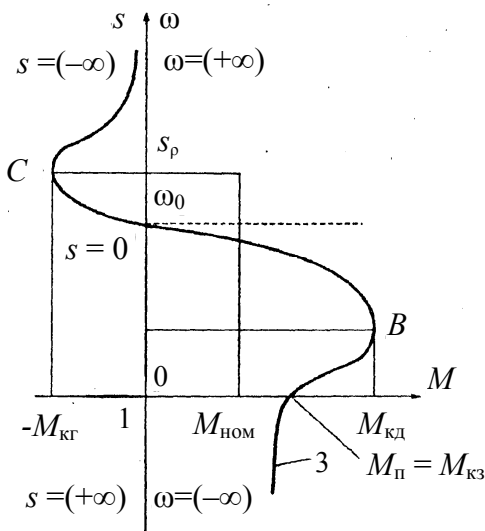


Рис. 2.13. Механическая характеристика

Задание № 1

Данные, используемые для расчета задания №1, приведены в табл. 9

Для системы трехфазный асинхронный электродвигатель – рабочая машина (двигатель питается от электросети напряжением 380/220 В):

1. По данным нагрузочной диаграммы, используя метод эквивалентных величин, определить необходимую мощность приводного электродвигателя по нагреву. Выбрать в качестве приводного электродвигателя по каталогу электродвигатель сельскохозяйственного назначения или четырехполюсный асинхронный двигатель общепромышленного назначения серии 4А.

2. Рассчитать и построить механическую характеристику электродвигателя $\omega = f_1(M_d)$, определить мощность, потребляемую из сети в номинальном режиме, номинальный и пусковой ток электродвигателя.

3. Рассчитать и построить на том же графике механическую характеристику рабочей машины $\omega = f_2(M_c)$, приведенную к угловой скорости вращения вала электродвигателя.

4. Определить графоаналитическим методом (методом площадей) продолжительность пуска электродвигателя с нагрузкой при номинальном напряжении.

5. Оценить условия запуска электродвигателя с нагрузкой при снижении питающего напряжения на ΔU %.

6. Выбрать сечение токоведущих жил линии, питающей АД от распределительного пункта (РП). Данные по линии приведены в табл. 10. Проверить, запустится ли АД при пуске вхолостую в условиях, когда напряжение на шинах РП равно номинальному. При проверке исходить из того, что пуск АД возможен, если напряжение на его зажимах $U_d \geq 0,8 \cdot U_{d,ном}$.

Рекомендации по выполнению задания №1

1. Эквивалентная по нагреву мощность нагрузки на валу электродвигателя $P_{\text{Э}}$ рассчитывается по выражению:

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i^2 \cdot t_i}{\sum_1^n t_i}}, \quad (1)$$

где P_i – мощность на валу электродвигателя в i -й период работы, кВт;

t_i – продолжительность i -го периода работы, мин;

n – количество периодов нагрузки.

Мощность электродвигателя при его полном охлаждении во время паузы в работе выбирают по каталогу исходя из условия:

$$P_{\text{Н}} \geq \frac{P_{\text{Э}}}{p_{\text{М}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{Н}}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$p_{\text{М}}$ – коэффициент механической перегрузки.

Коэффициент механической перегрузки $p_{\text{М}}$ определяется через коэффициент тепловой перегрузки двигателя $p_{\text{Т}}$:

$$p_{\text{М}} = \sqrt{p_{\text{Т}}}; \quad (3)$$

$$p_{\text{Т}} = \frac{1}{1 - e^{-t_{\text{р}}/T_{\text{Н}}}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{р}}$ – полная продолжительность работы двигателя с переменной нагрузкой, мин; $T_{\text{Н}}$ – постоянная времени нагрева электродвигателя, мин. Постоянную времени нагрева $T_{\text{Н}}$ принять для ориентировочного выбора мощности электродвигателя по (2), где $T_{\text{Н}} = 20$ мин.

Анализируя выражения (3) и (4), можно установить, что при $t_{\text{р}} > 90$ мин $p_{\text{Т}} \approx 1$, а следовательно, и $p_{\text{М}} \approx 1$.

Каталожные параметры двигателя свести в таблицу по образцу табл. 1, используя данные табл. 5.

Таблица 1

Каталожные параметры электродвигателя

Тип АД	P_n , кВт	U_n , В	M^*_m , Н·м	$M^*_п$, Н·м	$M^*_к$, Н·м	$\cos \varphi$	η , %	S_n	$I^*_п$

Примечание:

M^*_m – кратность минимального вращающего момента электродвигателя по отношению к номинальному моменту;

$M^*_п$ – кратность пускового вращающего момента электродвигателя по отношению к номинальному моменту;

$M^*_к$ – кратность максимального вращающего момента электродвигателя по отношению к номинальному моменту;

$S_n = (n_0 - n_n) / n_0$ – номинальное скольжение АД, соответствующее номинальному вращающему моменту;

$n_0 = (60 \cdot f) / p$ – синхронная частота вращения ЭД (магнитного поля статора), об/мин;

$p = (60 \cdot f) / n_n$ – число пар полюсов электродвигателя (ближайшее меньшее целое число);

$f = 50$ Гц – частота тока в электрической сети;

$I^*_п$ – кратность пускового тока.

Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме работы, определяется по формуле

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}, \quad (5)$$

где U_n – номинальное напряжение электродвигателя, В;

$\cos \varphi_n$ – коэффициент мощности;

η_n – коэффициент полезного действия.

Пусковой ток равен

$$I_p = k_p \cdot I_n, \quad (6)$$

где $k_p = I^*_п$ – кратность пускового тока.

2. Механическую характеристику АД $\omega = f_1(M_d)$ строят на основании расчета его вращающих моментов для угловых скоростей, соответствующих скольжениям:

$$s = 0; s = s_n; s = 0,1; s = s_k; s = 0,4; s = s_m = 0,8; s = 1.$$

Вращающий пусковой момент электродвигателя при $s = 1$ ($\omega = 0$) следует определить, используя кратность пускового

момента M_{Π}^* , а минимального при $s = 0,8$ – используя кратность минимального момента M_{Π}^* по выражению:

$$M_{\Pi} = M_{\Pi} \cdot M_{\Pi}^*; \quad M_{\Pi} = M_{\Pi} \cdot M_{\Pi}^*, \quad (7)$$

где $M_{\Pi} = P_{\Pi} / \omega_{\Pi}$ – номинальный вращающий момент АД, Н·м; $\omega_{\Pi} = \pi \cdot n_{\Pi} / 30 = 0,105 \cdot n_{\Pi}$ – номинальная угловая скорость АД, 1/с; n_{Π} – номинальная частота вращения, об/мин).

Остальные вращающие моменты электродвигателя для скольжений от 0 до 0,9 рассчитываются на основании упрощенной формулы Клосса (8):

$$M = \frac{2 \cdot M_{\Pi}}{\frac{s}{s_{\Pi}} + \frac{s_{\Pi}}{s}}, \quad (8)$$

где $M_{\Pi} = M_{\Pi} \cdot M_{\Pi}^*$ – максимальный вращающий момент АД, Н·м;

$$s_{\Pi} = s_{\Pi} \cdot \left(M_{\Pi}^* + \sqrt{(M_{\Pi}^*)^2 - 1} \right) - \text{критическое скольжение}$$

двигателя, соответствующее максимальному вращающему моменту.

Данные расчета механической характеристики $\omega = f_1(M_{\Pi})$ свести в табл. 2. Переход от скольжения к угловой скорости произвести по формуле

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \quad (9)$$

где $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f / p$ – синхронная угловая скорость вращения вала АД, 1/с.

Таблица 2

Данные к построению механической характеристики асинхронного двигателя

s	0	s_{Π}	0,1	s_{Π}	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ω , 1/с	ω_0	ω_{Π}		ω_{Π}						ω_{Π}		0
M , Н·м	0	M_{Π}		M_{Π}						M_{Π}		M_{Π}

При построении механических характеристик $\omega = f_1(M_{\Pi})$ значения ω располагают по оси ординат (функция), а значения M – по оси абсцисс (аргумент).

Интерполируя механическую характеристику двигателя в ее пусковой части, следует учесть, что при скольжении $s > s_k$ формула Клосса занижает действительные вращающие моменты. В частности, для $s = 0,4$ вращающий момент, вычисленный по (8), будет несколько занижен.

3. Для приведения моментов вращения рабочей машины к валу электродвигателя, необходимо использовать следующее соотношение:

$$M_C = \frac{M_{PM}}{i \cdot \eta_{пер}}, \quad (10)$$

где $i = n_n / n_{PM,ном}$ – передаточное отношение передачи от электродвигателя к рабочей машине; M_C – приведенный момент сопротивления, Н·м.

С учетом выражения (10) приведенный момент статического сопротивления на валу электродвигателя:

$$M_C = \frac{1}{i \cdot \eta_{пер}} \cdot \left[M_{PM,0} + (M_{PM,ном} - M_{PM,0}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^\alpha \right]. \quad (11)$$

Давая ω значения от 0 до $\omega = \omega_0$, рассчитывают зависимость $\omega = f_2(M_C)$. Принять $M_{PM,0}$ равным $0,2 \cdot M_{PM,ном}$, где $M_{PM,0}$ – момент сопротивления рабочей машины при угловой скорости, равной 0.

На основании этих расчетных данных строится кривая $\omega = f_2(M_C)$ на том же графике, что и механическая характеристика электродвигателя $\omega = f_1(M_d)$. Данные расчета механической характеристики $\omega = f_2(M_C)$ свести в табл. 3.

Таблица 3

Данные к построению механической характеристики рабочей машины относительно вала электродвигателя

$\omega, 1/c$								
$M_C, Н \cdot м$								

4. Графоаналитический метод расчета времени пуска и торможения ЭП, получивший название метода площадей, подробно изложен в рекомендованной литературе [1-5].

Метод площадей, вкратце, заключается в следующем. При известном графике изменения момента двигателя и статического момента рабочей машины в выражении $M_d - M_c = J(d\omega/dt)$ бесконечно малые приращения скорости $d\omega$ и времени dt заменяют малыми, конечными приращениями $\Delta\omega$ и Δt . При этом считают, что в уравнении движения электропривода используются средние значения момента двигателя и момента сопротивления для каждого интервала изменения скорости. Полагая, что на некотором отрезке времени Δt разность моментов $M_d - M_c$ остается величиной постоянной, с учетом принятых допущений уравнение движения электропривода будет иметь вид:

$$(M_d - M_c)/J = \Delta\omega/\Delta t. \quad (12)$$

Приведенный момент инерции системы «АД – рабочая машина» относительно вала электродвигателя можно выразить в виде:

$$J = k \cdot J_d + \frac{J_{PM}}{i^2}, \quad (13)$$

где k – коэффициент, учитывающий момент инерции передачи от электродвигателя к рабочей машине. Принять k равным 1,2.

Используя построенные во втором квадранте (рис. 1) механические характеристики электродвигателя $\omega = f_1(M_d)$ и рабочей машины $\omega = f_2(M_c)$, графически находим их разность – кривую динамического (избыточного) момента $M_{дин} = f_3(M_d - M_c) = f_3(\omega)$. Эту кривую заменяют ступенчатой линией с участками, на которых динамический момент постоянен ($M_d - M_c = \text{const}$ и равен его средней величине $M_{дин.i}$).

Эти значения избыточных (динамических) моментов откладывают вверх по оси ординат. Так, для первого участка получаем отрезок OB , для второго – OB_1 и т.д. Отмеченные на оси ординат точки B , B_1 , B_2 и т.д. соединяют прямыми линиями с точкой A , находящейся от начала координат на

расстоянии, пропорциональном значению J . Затем из начала координат проводят прямую OC , параллельную AB , которая характеризует искомую функцию $\omega = f_4(t)$ для первого участка моментов. Это следует из подобия треугольников AOB и ODC . Действительно, $OB/OA = CD/OD$, но $OB = M_d - M_c$, $OA = J$, $CD = \Delta\omega$, следовательно, отрезок OD , согласно уравнению (12), соответствует времени пуска на первом участке, т.е. $OD = \Delta t_1$.

Проведя аналогичное построение для всех последующих участков, определяют $\omega = f_4(t)$ и находят искомое время пуска привода: $t_n = J \cdot \omega_n / (M_d - M_c)$, где принимается $M_d = (M_n + M_k)/2$. В процессе построения принимают за t_n время, при котором $\omega = 0,95 \cdot \omega_0$.

Продолжительность разгона электропривода на каждом участке угловых скоростей рассчитывают по выражению

$$\Delta t_i = J \cdot \frac{\Delta \omega_i}{M_{\text{дин. } i}}, \quad (14)$$

где $\Delta \omega_i = \omega_i - \omega_{i-1}$ – интервал угловой скорости на i -м участке, 1/с; $M_{\text{дин. } i}$ – средний избыточный момент на i -м участке, принимаемый постоянным, Н·м.

Полная продолжительность пуска равна сумме частичных продолжительностей:

$$t_n = \sum_{i=1}^m \Delta t_i, \quad (15)$$

где m – количество ступеней, на которые разбивается кривая динамических (избыточных) моментов.

Результаты расчета свести в таблицу 4.

5. Вращающий момент асинхронного электродвигателя для любой фиксированной частоты вращения прямо пропорционален квадрату приложенного напряжения, поэтому для всех частот вращения справедливо соотношение:

$$M_{(U)} = M_{U_{\text{ном}}} \cdot (U^*)^2, \quad (16)$$

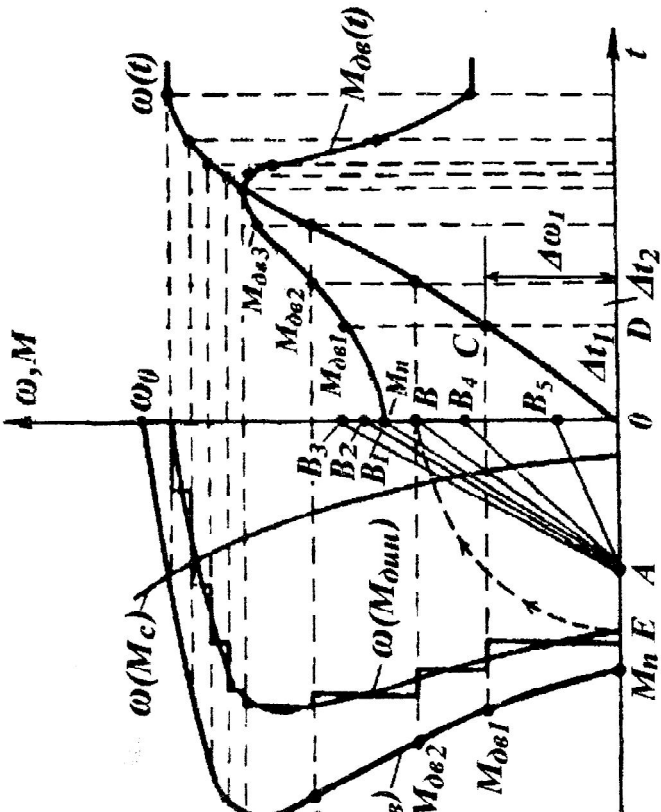
где $M_{U_{\text{ном}}}$ – вращающий момент асинхронного двигателя при номинальном напряжении, Н·м; $M_{(U)}$ – вращающий момент

АД при напряжении, по величине неравном номинальному, но при той же частоте вращения, Н·м; $U^* = U/U_n$ – относительная величина напряжения, подведенного к электродвигателю, в долях от номинального.

Таблица 4

**Данные расчета продолжительности пуска
электропривода с нагрузкой**

Номер участка при разгоне	1	2	3	4	5	6	7	8
$\omega_{нач}, 1/c$	0							
$\omega_{кон}, 1/c$								
$\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_{i-1}, 1/c$								
$M_{дин. i}, Н·м$								
$\Delta t_i, c$								
$t_{п}, c$								



Для оценки возможности запуска электродвигателя при нагрузке в случае снижения напряжения на ΔU % необходимо пересчитать вращающие моменты ЭД прямо пропорционально квадрату напряжения $U^* = 1 - (\Delta U \% / 100)$ и построить зависимость $\omega = f_4[M_{д(U)}]$, совместив ее с механической характеристикой рабочей машины, приведенной к валу электродвигателя. Это позволит сделать заключение: электродвигатель не запустится, запустится или «застрянет» и не разгонится до частоты вращения, соответствующей рабочей зоне его механической характеристики.

Если хотя бы на одном участке механических характеристик разгона электропривода $M_{дин(U)} \leq 0$, то необходимо сделать заключение, что при пуске с нагрузкой и понижении питающего напряжения на ΔU % электропривод не запустится. Тогда ΔU % принять равным 20 %.

6. Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [6], сечение проводов и кабелей местных линий напряжением до 1000 В выбирается по условию

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб}},$$

где $I_{\text{доп}}$ – длительно допустимый ток для провода (кабеля) выбранного сечения, соответствующий условиям прокладки линии; $I_{\text{раб}}$ – рабочий ток линии.

Поскольку в данном случае кабельная линия питает только один двигатель, ток в этой линии равен току, потребляемому двигателем из сети. Следовательно, $I_{\text{раб}} = I_{\text{ном}}$. В соответствии с условием $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб}} = I_{\text{ном}}$ по табл. 6 выбираем сечение кабеля S , мм², для которого $I_{\text{доп}}$ подходит.

Выбранное сечение кабеля необходимо проверить по допустимой потере напряжения в нормальном режиме работы. Согласно нормам ПУЭ [6], относительное падение напряжения для силовых электроприемников в нормальном режиме равно $\Delta U \% = 5 \%$.

Для трехфазной сети [7] с сосредоточенной нагрузкой, приложенной в конце линии, потеря напряжения равна:

$$\Delta U = \frac{1}{U_{\text{н}} \cdot \cos \varphi} \cdot (R_0 \cdot \cos \varphi + X_0 \cdot \sin \varphi) \cdot P \cdot l, \quad (17)$$

где ΔU – линейная потеря напряжения, В;

$U_{\text{н}}$ – номинальное (междуфазное) напряжение, В;

l – длина линии, км;

R_0 , X_0 – активное и реактивное сопротивления проводников на единицу длины линии, Ом / км;

P – расчетная активная мощность в линии, кВт.

Для расчетов более удобно пользоваться относительной величиной потери напряжения:

$$\Delta U \% = e_0 \% \cdot I_{\text{IH}} \cdot l, \quad (18)$$

где $\Delta U \%$ – линейная потеря напряжения в процентах, %;

$e_0 \%$ – удельная потеря напряжения, % / (А·км);

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток фазы статора.

Найдем предельно допустимую удельную потерю напряжения $e_0 \%_{\text{пред}}$:

$$e_0 \% \text{ пред.} = \Delta U \% / I_{\text{ном}} \cdot l, \% / \text{А} \cdot \text{км.}$$

Очевидно, что для прокладки линии должен быть принят кабель такого минимального сечения, для которого необходимо выполнение условия:

$$e_0 \% \leq e_0 \% \text{ пред.}$$

Из табл. 8 выбираем кабель с минимальным сечением (мм^2), соответствующим условию выбранного двигателя (т.к. для него $e_0 \%$ уже определено). Таким образом, исходя из проверки по предельно допустимой потере напряжения, сечение кабеля может быть увеличено.

Проверим выполнение условий пуска без реостата:

$$e_0 \% \text{ пред.} = \Delta U_{\text{п}} \% / I_{\text{л.п}} \cdot l, \%,$$

где $I_{\text{л.п}} = I_{\text{ном}} \cdot I_{\text{п}}^*$ – линейный пусковой ток.

Тогда по табл. 8 по известному $\cos \varphi_{\text{п}}$, находим, что условие пуска обеспечивается при кабеле, сечение фазы которого равно $S, \text{мм}^2$.

Таблица 5

Технические данные АД серии 4А основного исполнения

Тип	$P_{\text{н}},$ кВт	$I_{\text{н}},$ А	$n_{\text{н}},$ об/мин	$\cos \varphi_{\text{н}}$	$\eta_{\text{н}},$ %	$I_{\text{п}}^*$	$M_{\text{п}}^*$	$M_{\text{к}}^*$	$M_{\text{м}}^*$	$J_{\text{д}},$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2$
4А50А4УЗ	0,06	0,31	1380	0,60	50	2,5	2,0	2,2	1,7	$29 \cdot 10^{-6}$
4А50А4УЗ	0,09	0,42	1370	0,60	55	2,5	2,0	2,2	1,7	$33 \cdot 10^{-6}$
4А56А4УЗ	0,12	0,44	1375	0,66	63	3,5	2,1	2,2	1,5	0,0007
4А56В4УЗ	0,18	0,66	1365	0,64	64	3,5	2,1	2,2	1,5	0,0008
4А6ЭА4УЗ	0,95	0,85	1380	0,66	68	4	2,0	2,2	1,5	0,0012
4А6ЭВ4УЗ	0,37	1,2	1365	0,69	68	4	2,0	2,2	1,5	0,0014
4А71А4УЗ	0,55	1,7	1390	0,70	70,5	4,5	2,0	2,2	1,8	0,0013
4А71В4УЗ	0,75	2,17	1390	0,73	72	4,5	2,0	2,2	1,8	0,0014
4А80А4УЗ	11	2,76	1420	0,81	75	5	2,0	2,2	1,6	0,0032
4А80В4УЗ	1,5	3,57	1415	0,83	77	5	2,0	2,2	1,6	0,0033
4А90А4УЗ	2,2	5,02	1425	0,83	80	6	2,1	2,4	1,6	0,0056
4А100А4УЗ	3,0	6,7	1435	0,83	82	6	2,0	2,4	1,6	0,0087
4А110А4УЗ	4,0	8,6	1430	0,84	84	6	2,0	2,4	1,6	0,011

4A112M4Y3	5,5	11,5	1445	0,85	84,5	7	2,0	2,2	1,6	0,017
4A1324Y3	7,5	15,1	1455	0,86	87,5	7,5	2,2	3,0	1,7	0,028
4A132M4Y3	11	22	1460	0,87	87,5	7,5	2,3	3,0	1,7	0,04
4A1.604Y3	15	29,3	1465	0,88	89	7	1,4	2,3	1,0	0,10
4A160M4Y3	18,5	35,7	1465	0,88	90	7	1,4	2,3	1,0	0,13
4A1804Y3	22	41,3	1470	0,90	90	6,5	1,4	2,3	1,0	0,18
4A180M4Y3	30	56	1470	0,89	91	6,5	1,4	2,3	1,0	0,23
4A200M4Y3	37	68,8	1475	0,90	91	7	1,4	2,5	1,0	0,37
4A2004Y3	45	82,6	1475	0,90	92	7	1,4	2,5	1,0	0,45
4A225M4Y3	55	100	1480	0,90	92,5	7	1,3	2,5	1,0	0,64
4A2504Y3	75	136	1480	0,80	93	7	1,2	2,3	1,0	1,0
4A250M4Y3	90	162	1480	0,91	93	7	1,2	2,3	1,0	1,2
4A2804Y3	110	201	1470	0,90	82,5	5,5	1,2	2,0	1,0	2,3
4A280M4Y3	132	240	1480	0,90	93	5,5	1,3	2,0	1,0	2,5
4A3154Y3	160	285	1480	0,91	93,5	6	1,3	2,2	1,9	3,1
4A315M4Y3	200	351	1480	0,92	94	6	1,3	2,2	0,9	3,6
4A3554Y3	250	438	1485	0,92	94,5	7	1,2	2,0	0,9	6,0
4A355M4Y3	315	549	1485	0,92	94,5	7	1,2	2,0	0,9	7,0

Таблица 6

**Токовые нагрузки четырехжильных кабелей с
алюминиевыми или медными (в знаменателе) жилами**

Сечение жилы, мм ²	Нагрузка (А) кабелей, проложенных		
	в земле, $t = 15^{\circ}\text{C}$	в воздухе, $t = 25^{\circ}\text{C}$	в воде
4	38 / 50	— / 35	
6	46 / 60	31 / 45	
10	65 / 85	45 / 60	
16	90 / 115	60 / 80	
25	115 / 150	75 / 100	150 / 195
35	135 / 175	95 / 120	175 / 280
50	165 / 215	110 / 145	220 / 285
70	200 / 265	140 / 185	270 / 350

95	240 / 310	165 / 215	315 / 410
120	270 / 350	200 / 260	360 / 470
150	305 / 395	230 / 300	
185	345 / 450	260 / 340	

Таблица 7

**Токовые нагрузки проводов с алюминиевыми
или медными (в знаменателе) жилами с резиновой
и поливинилхлоридной изоляцией**

Сечение жилы, мм ²	Нагрузка (А) для проводов, проложенных	
	открыто	4 одножильных в одной трубе
2	21 / –	15 / –
2,5	24 / 30	19 / 25
3	27 / –	21 / –
4	32 / 41	23 / 30
5	36 / –	27 / –
6	39 / 50	30 / 40
8	46 / -	37 / –
10	60 / 80	39 / 50

16	75 / 100	55 / 75
25	106 / 140	70 / 90
35	130 / 170	85 / 115
50	165 / 215	120 / 150
70	210 / 270	140 / 185
95	255 / 330	175 / 225
120	295 / 385	200 / 260
150	340 / 440	—
185	390 / 510	—
240	465 / 605	—
300	535 / 695	—
400	645 / 830	—

Таблица 8

**Удельные потери напряжения (e_0 %) в трехфазных
сетях 380 В, выполненных проводами в трубах и
кабелями, % (А·км)**

\varnothing , мм ²	e_0 % при $\cos \varphi_n$							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Провода и кабели с алюминиевыми жилами</i>								
2,5	1,76	2,32	2,89	3,45	4,02	4,58	5,14	5,69
4	1,11	1,47	1,82	2,18	2,52	2,87	3,23	3,56
6	0,754	0,988	1,22	1,46	1,69	1,92	2,15	2,37
10	0,469	0,610	0,748	0,887	1,03	1,17	1,29	1,42
16	0,307	0,394	0,480	0,567	0,642	0,735	0,817	0,888
25	0,211	0,266	0,321	0,375	0,428	0,480	0,53	0,569
35	0,160	0,200	0,238	0,276	0,313	0,349	0,384	0,407

50	0,122	0,149	0,176	0,202	0,277	0,251	0,273	0,284
70	0,0965	0,116	0,134	0,152	0,169	0,185	0,200	0,203
95	0,080	0,0934	0,106	0,119	0,130	0,141	0,151	0,150
120	0,070	0,0806	0,906	0,100	0,109	0,117	0,123	0,119
150	0,0628	0,0710	0,0787	0,0855	0,0915	0,0970	0,100	0,0945
185	0,0574	0,0638	0,0692	0,0746	0,0792	0,0830	0,0847	0,0769
240	0,0510	0,0555	0,0601	0,0637	0,0664	0,0683	0,0687	0,0592

Окончание табл. 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Провода и кабели с медными жилами</i>								
1	2,63	3,43	4,26	5,10	5,94	6,76	7,6	8,41
1,5	1,74	2,29	2,85	3,41	3,96	4,51	5,06	5,60
2,5	1,06	1,40	1,73	2,06	2,39	2,72	3,05	3,37
4	0,68	0,891	1,10	1,30	1,51	1,71	1,92	2,11
6	0,464	0,603	0,741	0,880	1,02	1,15	1,28	1,41
10	0,293	0,378	0,458	0,541	0,621	0,70	0,776	0,842
16	0,199	0,250	0,301	0,351	0,400	0,447	0,494	0,528
25	0,142	0,173	0,205	0,236	0,266	0,295	0,322	0,337
35	0,110	0,133	0,155	0,176	0,197	0,216	0,234	0,241
50	0,0874	0,103	0,117	0,132	0,146	0,158	0,169	0,169
70	0,0701	0,0805	0,0901	0,0997	0,107	0,115	0,121	0,120
95	0,0615	0,0692	0,760	0,0824	0,0879	0,0929	0,0956	0,0887

120	0,0555	0,0615	0,0664	0,0710	0,0751	0,0779	0,0787	0,0702
150	0,0514	0,0551	0,0592	0,0624	0,0646	0,0664	0,0660	0,0562
185	0,0478	0,0510	0,0537	0,0555	0,0574	0,0578	0,0565	0,0455
240	0,0440	0,0460	0,0478	0,0490	0,0495	0,0490	0,0467	0,0350

Варианты задания № 1 без п. 6

Шифр	P_1	P_2	P_3	P_4	t_1	t_2	t_3	t_4	$\eta_{\text{пер}}$	$\eta_{\text{РМн}}$	$M_{\text{РМн}}$	$J_{\text{РМ}}$	α
р	кВт				мин					мин ⁻¹	Н·м	кг·м ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
00	0,3	0,4	0,2	0,1	22	12	25	8	0,6	960	2,4	0,02	1
01	0,3	0,4	7,0	0,3	10	8	12	20	0,6	1470	1,6	0,02	2
02	0,2	0,3	0,2	0,4	14	8	22	18	0,6	2800	0,60	0,01	0
03	0,1	0,2	0,5	0,1	12	10	20	8	0,8	2700	0,40	0,07	1
04	5,0	5,8	0,1	3	15	18	24	10	0,9	2850	12	0,07	2
05	5	8	5	4	20	15	22	26	0,9	1470	32	0,01	1
06	7	16	0,1	14	15	18	22	24	0,9	1420	70	0,04	2
07	13	12	4,6	10	22	13	28	16	0,9	960	70	0,08	1
08	8	24	6	16	24	18	10	16	0,9	1460	100	0,06	2
09	18	33	10	16	20	20	18	26	0,9	1480	140	0,04	1
10	28	40	6	10	18	16	24	20	0,8	1430	170	0,26	2
11	30	50	10	20	20	20	22	18	0,8	1400	200	0,03	1
12	40	6,6	20	4	15	16	20	22	0,6	1440	35	0,01	2
13	5	1,7	20	1,3	16	18	14	6	0,9	1460	65	0,38	2
14	1	3,2	30	1	18	12	20	24	0,8	2700	60	0,06	1
15	2,6	4,2	4,5	3	20	20	22	24	0,9	2800	8	0,65	1
16	3,6	1,6	0,8	1,6	16	16	10	20	0,8	1460	6,2	0,32	0
17	1,0	3,2	1,8	1	16	16	20	10	0,8	2700	6,3	0,06	1
18	2,8	6	2,8	3	16	18	20	22	0,7	2850	13	0,07	0
19	5	4	0,8	3	16	20	12	20	0,9	1460	25	0,07	0
20	6	30	2	15	15	20	25	30	1,0	960	25	0,26	1
21	40	3,8	4	4	16	20	25	30	0,7	1460	16	0,06	2
22	4,5	0,4	5	2,2	18	16	20	26	0,8	1470	1,4	0,18	0
23	0,3	0,3	2,0	0,1	12	16	18	20	0,8	960	2,2	0,02	2
24	0,4	2	2,6	0,8	20	10	15	22	1,0	2700	3,2	0,38	1
25	1	20	0,2	10	18	20	22	26	1,0	1460	100	0,06	2
26	24	28	0,2	15	10	15	18	20	0,9	1480	140	0,04	1
27	33	3	1,4	2	16	20	18	24	0,8	2700	10	0,6	2
28	5	12	18	6	18	16	20	22	1,0	960	66	0,06	1
29	8	6	20	5	10	14	16	22	0,9	1470	35	0,08	0
30	8	10	4	12	12	20	24	18	1,0	1420	60	0,04	1
31	18	10	10	4	12	16	20	22	0,9	960	66	0,09	2
32	12	0,4	4	0,4	18	12	16	20	0,9	1470	1,6	0,02	1

Продолжение табл. 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
33	0,3	6	8	5	12	16	20	18	0,9	2700	18	0,01	1
34	8	14	8	12	12	14	20	12	0,9	1420	70	0,04	0
35	18	40	0,2	20	15	16	20	22	1,0	1400	200	0,03	1
36	50	6	4	3	18	20	24	15	0,9	1440	30	0,01	0
37	7	10	10	12	12	20	24	18	1,0	1420	70	0,04	1
38	18	4	30	4	12	14	16	20	1,0	1460	16	0,65	0
39	5	0,4	4	0,5	20	16	18	18	0,9	2700	0,8	0,04	2
40	0,3	0,4	0,2	0,1	22	12	25	8	0,6	960	2,4	0,02	1
41	0,3	0,4	7,0	0,3	10	8	12	20	0,6	1470	1,6	0,02	2
42	0,2	0,3	0,2	0,4	14	8	22	18	0,6	2800	0,60	0,01	0
43	0,1	0,2	0,5	0,1	12	10	20	8	0,8	2700	0,40	0,07	1
44	5,0	5,8	0,1	3	15	18	24	10	0,9	2850	12	0,07	2
45	5	8	5	4	20	15	22	26	0,9	1470	32	0,01	1
46	7	16	0,1	14	15	18	22	24	0,9	1420	70	0,04	2
47	13	12	4,6	10	22	13	28	16	0,9	960	70	0,08	1
48	8	24	6	16	24	18	10	16	0,9	1460	100	0,06	2
49	18	33	10	16	20	20	18	26	0,9	1480	140	0,04	1
50	28	40	6	10	18	16	24	20	0,8	1430	170	0,26	2
51	30	50	10	20	20	20	22	18	0,8	1400	200	0,03	1
52	40	6,6	20	4	15	16	20	22	0,6	1440	35	0,01	2
53	5	1,7	20	1,3	16	18	14	6	0,9	1460	65	0,38	2
54	1	3,2	30	1	18	12	20	24	0,8	2700	60	0,06	1
55	2,6	4,2	4,5	3	20	20	22	24	0,9	2800	8	0,65	1
56	3,6	1,6	0,8	1,6	16	16	10	20	0,8	1460	6,2	0,32	0
57	1,0	3,2	1,8	1	16	16	20	10	0,8	2700	6,2	0,06	1
58	2,8	6	2,8	3	16	18	20	22	0,7	2850	13	0,07	0
59	5	4	0,8	3	16	20	12	20	0,9	1460	25	0,07	0
60	6	30	2	15	15	20	25	30	1,0	960	25	0,26	1
61	40	3,8	4	4	16	20	25	30	0,7	1460	16	0,06	2
62	4,5	0,4	5	2,2	18	16	20	26	0,8	1470	1,4	0,18	0
63	0,3	0,3	2,0	0,1	12	16	18	20	0,8	960	2,2	0,02	2
64	0,4	2	2,6	0,8	20	10	15	22	1,0	2700	3,2	0,38	1
65	1	20	0,2	10	18	20	22	26	1,0	1460	100	0,06	2

Окончание табл. 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
66	24	28	0,2	15	10	15	18	20	0,9	1480	140	0,04	1
67	33	3	1,4	2	16	20	18	24	0,8	2700	10	0,6	2
68	5	12	18	6	18	16	20	22	1,0	960	66	0,06	1
69	8	6	20	5	10	14	16	22	0,9	1470	35	0,08	0
70	8	10	4	12	12	20	24	18	1,0	1420	60	0,04	1
71	18	10	10	4	12	16	20	22	0,9	960	66	0,09	2
72	12	0,4	4	0,4	18	12	16	20	0,9	1470	1,6	0,02	1
73	0,3	6	8	5	12	16	20	18	0,9	2700	18	0,01	1
74	8	14	8	12	12	14	20	12	0,9	1420	70	0,04	0
75	18	40	0,2	20	15	16	20	22	1,0	1400	200	0,03	1
76	50	6	4	3	18	20	24	15	0,9	1440	30	0,01	0
77	7	10	10	12	12	20	24	18	1,0	1420	70	0,04	1
78	18	4	30	4	12	14	16	20	1,0	1460	16	0,65	0
79	5	0,4	4	0,5	20	16	18	18	0,9	2700	0,8	0,04	2
80	0,3	0,4	0,2	0,1	22	12	25	8	0,6	960	2,4	0,02	1
81	0,3	0,4	7,0	0,3	10	8	12	20	0,6	1470	1,6	0,02	2
82	0,2	0,3	0,2	0,4	14	8	22	18	0,6	2800	0,60	0,01	0
83	0,1	0,2	0,5	0,1	12	10	20	8	0,8	2700	0,40	0,07	1
84	5,0	5,8	0,1	3	15	18	24	10	0,9	2850	12	0,07	2
85	5	8	5	4	20	15	22	26	0,9	1470	32	0,01	1
86	7	16	0,1	14	15	18	22	24	0,9	1420	70	0,04	2
87	13	12	4,6	10	22	13	28	16	0,9	960	70	0,08	1
88	8	24	6	16	24	18	10	16	0,9	1460	100	0,06	2
89	18	33	10	16	20	20	18	26	0,9	1480	140	0,04	1
90	28	40	6	10	18	16	24	20	0,8	1430	170	0,26	2
91	30	50	10	20	20	20	22	18	0,8	1400	200	0,03	1
92	40	6,6	20	4	15	16	20	22	0,6	1440	35	0,01	2
93	5	1,7	20	1,3	16	18	14	6	0,9	1460	65	0,38	2
94	1	3,2	30	1	18	12	20	24	0,8	2700	60	0,06	1
95	2,6	4,2	4,5	3	20	20	22	24	0,9	2800	8	0,65	1
96	3,6	1,6	0,8	1,6	16	16	10	20	0,8	1460	6,2	0,32	0
97	1,0	3,2	1,8	1	16	16	20	10	0,8	2700	6,2	0,06	1
98	2,8	6	2,8	3	16	18	20	22	0,7	2850	13	0,07	0
99	5	4	0,8	3	16	20	12	20	0,9	1460	25	0,07	0

Варианты задания № 1 с п. 6

Шифр	Питающая линия		
	тип	материал	длина, м
1	2	3	4
00	Кл	Cu	50
01	Кл	Al	50
02	Кл	Cu	60
03	Кл	Al	60
04	Кл	Cu	70
05	Кл	Al	70
06	Кл	Cu	70
07	Вл	Al	100
08	Вл	Cu	100
09	Вл	Al	100
10	Вл	Cu	120
11	Вл	Al	120
12	Вл	Cu	130
13	Вл	Al	130
14	Вл	Cu	140
15	Вл	Al	140
16	Кл	Cu	140
17	Кл	Al	140
18	Кл	Cu	150
19	Кл	Al	150
20	Кл	Cu	150
21	Кл	Al	140
22	Кл	Cu	140
23	Кл	Al	120
24	Кл	Cu	120
25	Кл	Al	90
26	Кл	Cu	90
27	Кл	Al	50
28	Кл	Cu	50
29	Кл	Al	50
30	Кл	Cu	50
31	Кл	Al	70
32	Вл	Cu	100

Продолжение табл. 10

1	2	3	4
33	Вл	Al	100
34	Вл	Cu	80
35	Вл	Al	80
36	Кл	Cu	60
37	Кл	Al	50
38	Кл	Cu	50
39	Кл	Al	50
40	Кл	Cu	50
41	Вл	Al	100
42	Вл	Cu	100
43	Вл	Al	100
44	Вл	Cu	100
45	Вл	Al	90
46	Вл	Cu	80
47	Кл	Al	60
48	Кл	Cu	50
49	Кл	Al	50
50	Кл	Cu	45
51	Кл	Al	45
52	Кл	Cu	40
53	Кл	Al	40
54	Вл	Cu	70
55	Кл	Al	70
56	Кл	Cu	60
57	Кл	Al	60
58	Вл	Cu	80
59	Вл	Al	100
60	Вл	Cu	90
61	Кл	Al	60
62	Кл	Cu	70
63	Кл	Al	80
64	Кл	Cu	90
65	Кл	Al	95
66	Кл	Cu	100
67	Вл	Al	110

Окончание табл. 3.10

1	2	3	4
68	Вл	Cu	120
69	Вл	Al	130
70	Вл	Cu	140
71	Вл	Al	150
72	Вл	Cu	160
73	Вл	Al	170
74	Вл	Cu	180
75	Вл	Al	190
76	Кл	Cu	200
77	Кл	Al	210
78	Кл	Cu	220
79	Кл	Al	230
80	Кл	Cu	240
81	Кл	Al	250
82	Кл	Cu	260
83	Кл	Al	270
84	Кл	Cu	280
85	Кл	Al	290
86	Кл	Cu	190
87	Кл	Al	150
88	Кл	Cu	150
89	Кл	Al	150
90	Кл	Cu	150
91	Кл	Al	70
92	Вл	Cu	100
93	Вл	Al	100
94	Вл	Cu	80
95	Вл	Al	80
96	Кл	Cu	60
97	Кл	Al	50
98	Кл	Cu	50
99	Кл	Al	50

Примечание: Кл – кабельная линия в траншее; Вл – линия, проложенная открыто; Al – алюминиевая токоведущая жила; Cu – медная токоведущая жила.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Схемы включения двигателя постоянного тока и его конструктивная схема

Электроприводы на основе двигателей постоянного тока (ДПТ) очень распространены в технике, в том числе в АПК (двигатели стригальных машин и т.п.).

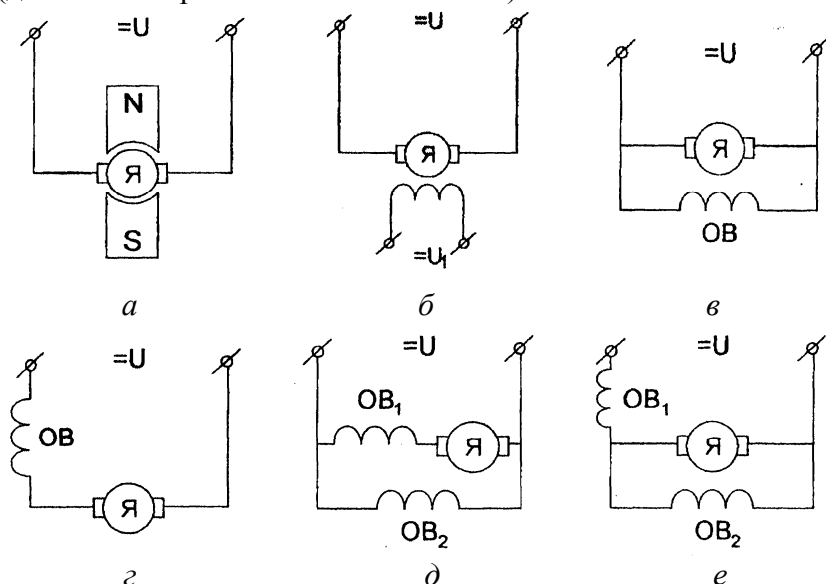


Рис. 3.1. Схемы включения ЭД постоянного тока

Схемы включения ДПТ, представленные на рис. 3.1 *а, б*, — это схемы включения двигателей с независимым возбуждением. Все остальные схемы (см. рис. 3.1 *в - е*) — это схемы включения ДПТ с самовозбуждением. Схема, представленная на рис. 3.1, *в* соответствует включению ДПТ с параллельным возбуждением, схема, представленная на рис. 3.1, *г* — схема включения ДПТ с последовательным возбуждением. Рис. 3.1 *д, е* — схемы компаундного (смешанного) возбуждения. В последнее время в микроэлектроприводе применяется схема включения ДПТ с независимым возбуждением от постоянных магнитов (см.

рис. 3.1, а) – это повышает КПД двигателя и значительно уменьшает его габариты. Реже применяется схема включения ДПТ, представленная на рис. 3.1 а (частота ее применения возрастает с увеличением допустимых размеров электропривода).

Считается, что наиболее устойчивыми в работе являются схемы включения ДПТ с параллельным возбуждением. Двигатели с самовозбуждением позволяют производить регулирование скорости вращения ротора в ограниченных пределах.

В сельском хозяйстве наибольшее распространение нашли схемы включения ДПТ с независимым возбуждением (см. рис. 3.1 а, б). Конструктивная схема ДПТ с независимым возбуждением представлена на рис. 3.2.

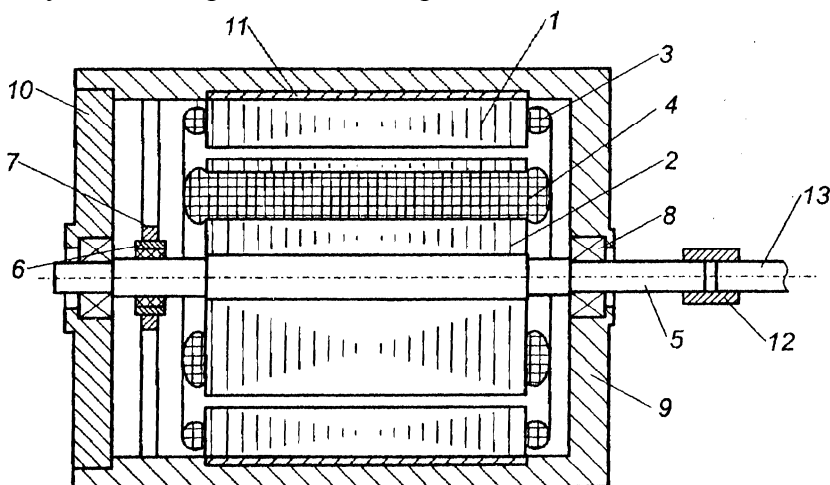


Рис. 3.2. Конструктивная схема ДПТ с НВ:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – обмотка статора; 4 – обмотка ротора; 5 – вал двигателя; 6 – кольца коллектора; 7 – щетка коллектора; 8 – шарикоподшипниковый узел опоры; 9 – корпус; 10 – крышка; 11 – ярмо; 12 – муфта; 13 – вал приводного устройства

Двумя слабыми звеньями в ДПТ являются щеточно-коллекторный и подшипниковый узлы (шарикоподшипники

в ряде случаев заменяются магнитными, воздушными опорами и т.п.).

Обмотки ротора – третий по надежности элемент в двигателе постоянного тока.

Для повышения надежности ДПТ в последнее время применяют двигатели с печатной обмоткой.

Ярмо статора выполняется из магнито-мягких материалов и служит для замыкания магнитного потока.

3.2. Типы обмоток двигателей постоянного тока

Выделяют три типа конструкции обмоток якоря:

- 1) кольцевого (тороидального) типа;
- 2) барабанного типа;
- 3) плоского (колпачкового) типа.

Кольцевая обмотка и обмотка барабанного типа характерны для макромашин.

Обмотка плоского типа характерна для микромашин постоянного тока, применяемых в приборостроении. Вначале рассматривается электродвигатель с кольцевой обмоткой (рис. 3.3).

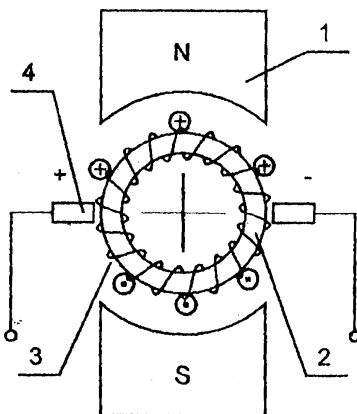


Рис. 3.3. Кольцевая обмотка ротора:

1 – статор; 2 – ротор с тороидальной обмоткой;
3 – щетка коллекторного узла

Направление вращения ротора определяется по правилу левой руки в соответствии с законом Ампера.

Недостаток ДПТ данного типа: внутренние части обмотки ротора используются вхолостую, что приводит к увеличению массы двигателя.

В обмотке барабанного типа (рис. 3.4) работают обе половины витка, а лобовые части витков являются нерабочими. В одном пазу может быть несколько витков.

Обмотки плоского типа применяют в малогабаритных электродвигателях.

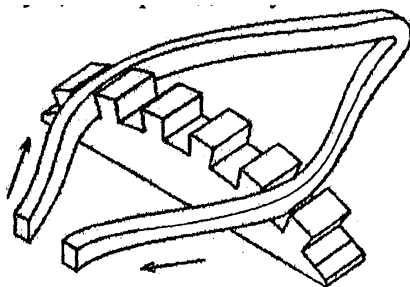
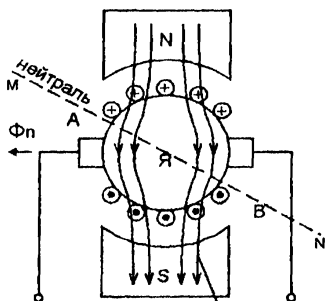


Рис. 3.4. Один виток обмотки барабанного типа

3.3. Особенности схемных и конструктивных решений ДПТ. Реакция якоря



направление линий магнитной индукции
магнитного поля статора

Рис. 3.5. Смещение электрической нейтрали ДПТ

На рис. 3.5 – 3.6 магнитный поток Φ создается магнитом статора, а магнитный поток Φ_{Π} – обмоткой ротора (якоря) в соответствии с законом Био – Савара – Лапласа; Φ_r – результирующий магнитный поток.

Линия, перпендикулярная Φ_r , является нейтралью. Предполагаем, что линии магнитной индукции магнитного поля возбуждения располагаются параллельно вертикальной оси симметрии.

Векторная диаграмма, изображенная на рис. 3.6, показывает, что электрическая нейтраль MN поворачивается на угол β , и линии магнитной индукции результирующего магнитного поля изгибаются. Смещение электрической нейтрали от перпендикулярного положения относительно вертикальной оси симметрии двигателя представляет собой реакцию двигателя постоянного тока. Внешне эта реакция проявляется в повышенном искрении щеток коллектора, вплоть до появления «кругового огня», что приводит к быстрому выходу двигателя из строя.

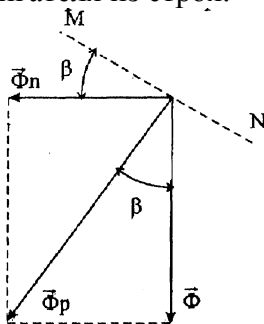


Рис. 3.6. Векторная диаграмма

Существуют следующие методы борьбы с реакцией обмоток ротора в двигателях постоянного тока:

1) перенос щеток – размещение щеток по электрической нейтрали MN (если угол $\beta = \text{const}$). При этом

$$\operatorname{tg} \beta = \Phi_{\Pi} / \Phi. \quad (3.1)$$

В случае, если угол β изменяется ($\beta = \text{var}$), что имеет место при изменении величины тока якоря, то необходимо,

чтобы устройство перемещения щеток было совмещено со следующей системой;

2) в 1885 г. Метер изобрел ДПТ с дополнительными полюсами статора. Обмотки дополнительных полюсов статора расположены по линии электрической нейтрали статора и включены последовательно со щетками и обмоткой якоря (рис. 3.7 – 3.8).

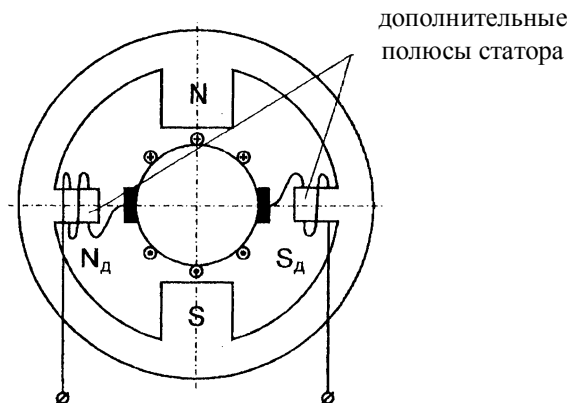


Рис. 3.7. Схема ДПТ с дополнительными полюсами статора

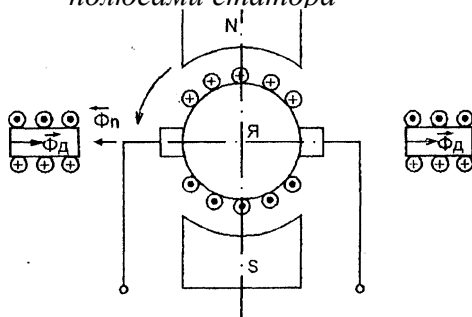


Рис. 3.8. Компенсация реакции якоря в ДПТ с дополнительными полюсами статора

Зазор между дополнительными полюсами статора и якорем больше, чем зазор между якорем и основными полюсами статора, за счет влияния щеток. Дополнительные полюсы нейтрализуют реакцию якоря в зоне щеток коллектора за счет дополнительного магнитного потока Φ_D ,

что приводит к уменьшению искрения в щетках и, соответственно, уменьшает вероятность выхода из строя щеточно-коллекторного узла;

3) в 1885 г. Менгес изобрел двигатель постоянного тока с компенсационными обмотками (рис. 3.9).

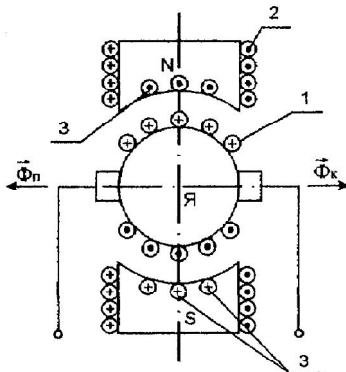


Рис. 3.9. Схема ДПТ с компенсационными обмотками статора:

1 – витки обмотки якоря; 2 – витки основной обмотки возбуждения (основной обмотки статора); 3 – витки компенсационной обмотки статора

На рис. 3.10 показана упрощенная схема включения компенсационных обмоток.

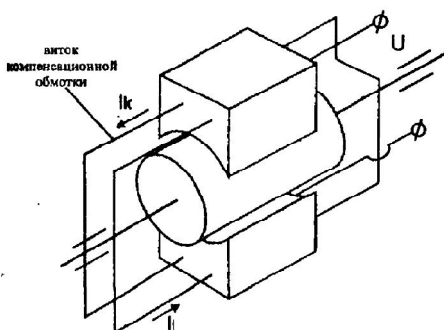


Рис. 3.10. К пояснению принципа действия ДПТ с компенсационными обмотками

Направление включения компенсационных обмоток статора и обмоток якоря – магнито-встречное, поэтому при любом токе компенсационная обмотка статора призвана компенсировать реакцию якоря – магнитный поток $\Phi_{\text{п}}$.

Витки компенсационных обмоток статора параллельны основной обмотке статора, они проходят через сверления в статоре.

В конструктивном отношении схема является не очень удачной, поскольку компенсационная обмотка хорошо компенсирует магнитный поток якоря в зоне полюсов статора, но в зоне щеток подобная компенсация менее эффективна. Поэтому в двигателях постоянного тока применяется комбинация двух последних методов уменьшения реакции якоря.

3.4. Электромеханическая и механическая характеристики ДПТ независимого возбуждения

Определяются следующими соотношениями:

$$\omega = f(I); \quad (3.2)$$

$$\omega = f(M), \quad (3.3)$$

где (3.2) – выражение электромеханической характеристики; (3.3) – выражение механической характеристики ЭП.

Характеристики (3.2) и (3.3) обычно выводятся следующим образом. За основу принимают уравнение цепи якоря:

$$U = E + R \cdot I, \quad (3.4)$$

где U – подводимое напряжение; E – ЭДС якоря; R – омическое сопротивление цепи якоря.

Необходимые допущения:

- 1) пренебрегают индуктивной составляющей сопротивления;
- 2) считают, что поперечная реакция якоря отсутствует;
- 3) считают, что момент на валу равен электромагнитному моменту.

Из третьего условия выводят искомые характеристики, полагая, что:

$$E = C_E \cdot \omega; \quad (3.5)$$

$$M = C_M \cdot I, \quad (3.6)$$

где C_E – постоянная электропривода по ЭДС; C_M – постоянная электропривода по моменту.

При этом в системе СИ численные значения постоянных равны:

$$C_E = C_M = k \cdot \Phi, \quad (3.7)$$

где k – конструктивная постоянная, зависящая от числа полюсов; Φ – магнитный поток статора.

На основе выражений (4.4) и (4.5) получают выражение:

$$C_E \cdot \omega = U - R \cdot I. \quad (3.8)$$

Из выражения (3.8) имеем:

$$\omega = \frac{U}{C_E} - \frac{R}{C_E} \cdot I. \quad (3.9)$$

Выражение (3.9) – уравнение электромеханической характеристики.

Выразим ток I из формулы (3.6) и вставим в соотношение (3.9):

$$\omega = \frac{U}{C_E} - \frac{R}{C_E \cdot C_M} \cdot M. \quad (3.10)$$

Получили выражение (3.10) – уравнение механической характеристики. Иногда в уравнения (3.9) – (3.10) вставляют вместо C_E и C_M выражение (3.7) и получают:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R}{k \cdot \Phi} \cdot I; \quad (3.9')$$

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M. \quad (3.10')$$

Проведем обратное преобразование: приведем механическую характеристику к электромеханической характеристике.

В формулу (3.6) вставим выражение (3.7), получим:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I, \quad (3.11)$$

В формулу (3.10') вставим (3.11), после преобразования будем иметь:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R}{k \cdot \Phi} \cdot I. \quad (3.12)$$

Внешний вид (для случая $k \cdot \Phi = \text{const}$) естественных механической и электромеханической характеристик ДПТ НВ приведен на рис. 3.11.

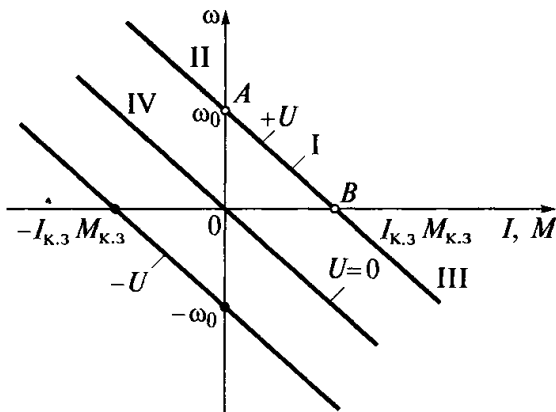


Рис. 3.11. Естественные механическая и электромеханическая характеристики ДПТ с НВ

3.5. Режимы торможения ДПТ

Торможение ЭП может быть обусловлено разными причинами:

- естественным торможением при отсутствии питания;
- аварийной остановкой;
- программной работой ЭП.

Способы торможения якоря двигателя постоянного тока:

- 1) применение механических тормозов;
- 2) торможение за счет трения в опорах якоря при естественном выбеге при отключении питания;
- 3) торможение противовключением, когда якорь или обмотка возбуждения переключаются на питание напряжением, имеющим обратную полярность;
- 4) динамическое торможение, когда обмотка якоря ЭД закорачивается сама на себя, а обмотка возбуждения

продолжает оставаться подключенной к цепи питания постоянным током;

5) рекуперативное торможение – это генераторный режим, при котором энергия возвращается в сеть;

6) регенеративное торможение – это генераторный режим, при котором энергия накапливается в аккумуляторах электрической энергии.

Основой для рассмотрения этих режимов являются уравнения ЭП с ДПТ НВ:

$$T \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{C_E} - \frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E}; \quad (3.13)$$

$$T \cdot \frac{dI}{dt} + I = \frac{M_C}{C_M}. \quad (3.14)$$

3.5.1. Режим динамического торможения

Рассмотрим режим торможения якоря ДПТ с НВ (рис. 3.12) при $U = 0$ по укороченному уравнению (3.13):

$$T \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = -\frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E}; \quad (3.15)$$

$$T \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = 0. \quad (3.16)$$

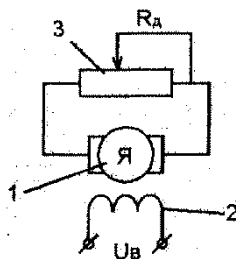


Рис. 3.12. Режим динамического торможения ДПТ НВ:
1 – якорь; 2 – обмотка возбуждения; 3 – резистор

Уравнение (3.16) применяют в том случае, если можно пренебречь моментом сопротивления M_C . Уравнения (3.15) и (3.16) отличаются между собой тем, что уравнение (3.15)

аналитически решить не удастся (это связано с тем, что M_C – сложная функция скорости, а иногда и угла).

Пусть $M_C = \text{const}$, тогда задача имеет аналитическое решение.

Берем начальные условия: $t_0 = 0$, $\omega(0) = \omega$. Решение уравнения (3.15) имеет вид:

$$\omega = -\frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E} + C \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (3.17)$$

Используем начальные условия для определения постоянной интегрирования C :

$$\omega^* = -\frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E} + C; \quad (3.18)$$

$$C = \omega^* + \frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E}; \quad (3.19)$$

$$\omega = -\frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E} + \left(\omega^* + \frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T}}; \quad (3.20)$$

$$\omega(t) = \frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \omega^* \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (3.21)$$

Время торможения t_T якоря двигателя определяется из условия:

$$\omega(t_T) = 0. \quad (3.22)$$

При этом надо иметь в виду, что электромеханическая постоянная времени равна:

$$T = \frac{(R + R_D) \cdot J}{C_E \cdot C_M}. \quad (3.23)$$

Имеем:

$$0 = U = I(R + R_D) + C_E \cdot \omega; \quad (3.24)$$

$$I = \frac{C_E \cdot \omega}{R + R_D}, \quad (3.25)$$

где ω определяется из решения (3.20).

3.5.2. Торможение противовключением

В момент начала этого режима происходит реверсирование напряжения питания с помощью переключателя, знак момента, создаваемого двигателем, меняется, и происходит торможение (рис. 3.13).

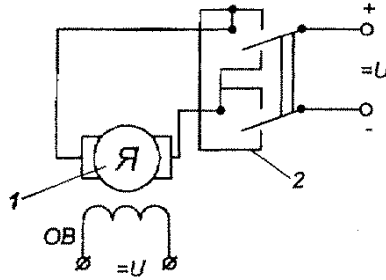


Рис. 3.13. Электрическая схема соединений при торможении ДПТ НВ противовключением:
1 – двигатель; 2 – переключатель

Для того чтобы двигатель остановился, нужна следящая система, которая в момент $\omega = 0$ отключит питание. Уравнение движения для этого случая имеет вид:

$$T \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = -\frac{U}{C_E} - \frac{R}{C_M \cdot C_E} \cdot M_C. \quad (3.26)$$

Начальные условия: $t = 0$; $\omega = \omega^*$; $M_C = 0$. Тогда:

$$T \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = -\frac{U}{C_E}. \quad (3.27)$$

Решение уравнения (3.27):

$$\omega = C \cdot e^{\frac{t}{T}} - \omega_0, \quad (3.28)$$

$$\text{где } \omega_0 = \frac{U}{C_E}. \quad (3.29)$$

В начальный момент времени:

$$\omega_0 = C - \omega_0; \quad C = 2 \cdot \omega_0. \quad (3.30)$$

Подставим выражения (3.30) в решение (3.28):

$$\omega = 2 \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} - \omega_0, \quad (3.31)$$

Для режима торможения ДПТ противовключением статических характеристик не существует, т.к. этот режим – динамический.

Определим время торможения:

$$0 = 2 \cdot \omega_0 \cdot e^{-\frac{t_T}{T}} - \omega_0, \quad (3.32)$$

$$e^{-\frac{t_T}{T}} = \frac{1}{2}; \quad t_T = T \cdot \ln 2 \approx 0,693 \cdot T.$$

При $C_M = C_E = 0,1$; $R = 0,5 \text{ Ом}$; $J = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ получаем:

$$T = \frac{J \cdot R}{C_E \cdot C_M} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad t_T = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Режим торможения противовключением является эффективным, но требуется применение сложной следящей системы. Поэтому часто стараются применять режим естественного механического торможения, когда двигатель останавливается за счет естественного момента M_C , или же момента M_C , искусственно созданного, когда с помощью тормоза к ротору прикладывается большой момент сил трения.

3.5.3. Режим естественного торможения

Пусть в уравнении (3.26) $U = 0$. Тогда:

$$T \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = -\frac{R}{C_M \cdot C_E} \cdot M_C. \quad (3.33)$$

Решение данного уравнения при постоянном моменте сопротивления имеет вид:

$$\omega = C \cdot e^{\frac{t}{T}} - \frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E}. \quad (3.34)$$

При $t_0 = 0$, $\omega(0) = \omega^*$:

$$\omega^* = C - \frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E}. \quad (3.35)$$

Определим постоянную интегрирования:

$$C = \omega^* + \frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E}. \quad (3.36)$$

Тогда из уравнения (4.34) следует:

$$\omega = \left(\omega^* + \frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E} \right) \cdot e^{\frac{t}{T}} - \frac{R \cdot M_C}{C_M \cdot C_E}. \quad (3.37)$$

Время торможения t_T определим из условия, что при $t = t_T$ $\omega(t_T) = 0$. Тогда из уравнения (3.33) находим:

$$T \cdot \frac{d\omega}{dt} = - \frac{R}{C_M \cdot C_E} \cdot M_C. \quad (3.38)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = - \frac{R}{C_M \cdot C_E} \cdot \frac{M_C}{T}. \quad (3.39)$$

$$\omega = \omega^* - \frac{R}{C_M \cdot C_E} \cdot \frac{M_C}{T} \cdot t_T; \quad (3.40)$$

$$\omega^* = \frac{R}{C_M \cdot C_E} \cdot \frac{M_C}{T} \cdot t_T. \quad (3.41)$$

Из последней формулы видно, что чем больше момент сопротивления M_C , тем быстрее остановится двигатель (время торможения t_T меньше).

Получим рабочую формулу для определения времени торможения:

$$\frac{U}{C_E} = \omega^* = \frac{R}{C_M \cdot C_E} \cdot \frac{M_C}{T} \cdot t_T, \quad (3.42)$$

откуда находим:

$$t_T = \frac{U \cdot C_M \cdot T}{R \cdot M_C}. \quad (3.43)$$

Пример. Пусть $U = 10$ В; $C_M = 0,1$ Н·м/А; $M_C = 0,01$ Н·м; $T = 0,02$ с; $R = 2$ Ом, тогда получаем:

$$t_T = \frac{U \cdot C_M \cdot T}{R \cdot M_C} = \frac{10 \cdot 0,1}{2 \cdot 0,01} \cdot 0,02 = 1 \text{ с.}$$

Таким образом, в сравнении с режимом торможения методом противовключения время естественного

торможения почти на два порядка больше. При искусственном торможении выведенные выше формулы справедливы, а момент сопротивления M_C во много раз больше.

3.6. Способы регулирования скорости вращения

Необходимость изменения скорости предопределяется назначением электропривода.

Теоретической основой для вывода соотношений, определяющих процесс регулирования угловой скорости вала ДПТ НВ, является уравнение движения вала по угловой скорости:

$$T \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{C_E} - \frac{R}{C_M \cdot C_E} \cdot M_C. \quad (3.44)$$

Для установившегося режима имеем:

$$\omega = \frac{U}{C_E} - \frac{R}{C_M \cdot C_E} \cdot M_C. \quad (3.45)$$

Введем в соотношение (3.45) следующие обозначения:

$$\frac{U}{C_E} = \omega_0; \quad \frac{M_C}{C_M} = I. \quad (3.46)$$

Тогда:

$$\omega = \omega_0 - \frac{R}{C_E} \cdot I. \quad (3.47)$$

Кроме того:

$$C_E = k \cdot \Phi(I_B); \quad (3.48)$$

$$C_M = k \cdot \Phi(I_B). \quad (3.49)$$

Соотношения (3.45), (3.47) – (3.49) определяют основные способы регулирования скорости:

- 1) изменением напряжения на якоре U – (3.45);
- 2) изменением момента сопротивления M_C – (3.45);
- 3) изменением сопротивления якорной цепи R – (3.47);
- 4) изменением тока в обмотке возбуждения I_B – (3.48), (3.49):

а) регулированием напряжения возбуждения;

б) регулированием сопротивления цепи возбуждения.
В большинстве ЭП скорость изменяется ступенчато.

3.6.1. Изменение скорости вращения вала ДПТ с НВ изменением магнитного потока в магнитопроводе

Данный способ находит широкое применение в ЭП из-за простоты реализации и экономичности, т.к. регулирование осуществляется в относительно маломощной цепи обмотки возбуждения (ОВ) и не сопровождается большими потерями мощности.

Магнитный поток Φ в этом случае уменьшается по сравнению с рабочим значением $\Phi_{\text{ном}}$ за счет снижения тока возбуждения I_B . Повышать магнитный поток Φ свыше номинального значения нецелесообразно из-за возможности перегрева ОВ. Кроме того, двигатель рассчитан и сконструирован так, что его магнитная система близка к насыщению.

Регулирование тока осуществляется включением добавочного резистора в цепь ОВ или питанием ОВ от управляемого выпрямителя (рис. 3.14).

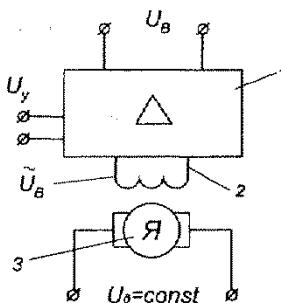


Рис. 3.14. Схема регулирования скорости вращения вала ДПТ с НВ за счет ОВ ($U_B = \text{var}$):

1 – усилитель в цепи обмотки возбуждения; 2 – обмотка возбуждения; 3 – якорь двигателя; U_y – напряжение управления; U_B – напряжение возбуждения

Выходное напряжение U_B регулируется в управляемом выпрямителе напряжением управления U_{γ} . Эта схема регулирует ток возбуждения в широких пределах в мощных двигателях, работающих в замкнутых ЭП. Она реверсирует ток возбуждения I_B при реверсивном выпрямителе.

Рассмотрим данный способ регулирования более подробно:

$$C_M = k \cdot \Phi = C_E; \quad (3.50)$$

$$\Phi = \Phi(I_B, W), \quad (3.51)$$

где W – число витков в первичной обмотке;

I_B – ток возбуждения.

Следовательно:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M_C; \quad (3.52)$$

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R}{k \cdot \Phi} \cdot I. \quad (3.53)$$

Регулировочные характеристики $\omega(I)$, $\omega(M_C)$ имеют вид прямых линий (рис. 3.15 – 3.16).

На рис. 3.15 обозначено:

$$\omega_{0,i} = \frac{U}{k \cdot \Phi_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.54)$$

$$\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3 < \dots$$

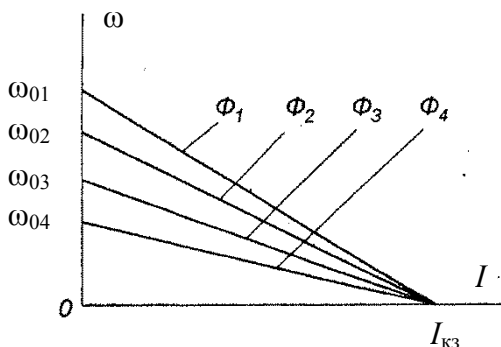


Рис. 3.15. Электромеханические регулировочные характеристики ДПТ НВ

При малых значениях $U_B \sim$ вращающий момент уменьшается, следовательно, в работе электропривода будет наблюдаться неравномерность вращения вала.

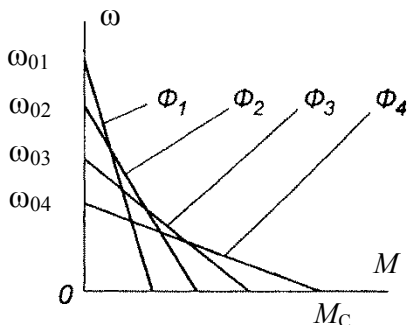


Рис. 3.16. Механические регулировочные характеристики ДПТ НВ

Способ регулирования скорости вращения путем изменения потока возбуждения является ограниченным по диапазону скоростей (глубина регулирования – 3-4 раза).

3.6.2. Способ регулирования скорости, основанный на изменении напряжения, подводимого к якорию ДПТ

Этот способ широко используется для регулирования любых координат ЭП при обеспечении высоких требований к показателям его качества. По этой причине он является основным.

Из формул (3.52) – (3.54) видно, что при неизменном магнитном потоке Φ изменение U приводит к изменению скорости холостого хода. Это дает изменение скорости вращения электропривода и под нагрузкой:

$$\omega_n = (0,96 \dots 0,98) \cdot \omega_0. \quad (3.55)$$

Формула (3.55) соответствует нерегулируемому ЭП. На практике чаще всего приходится иметь дело с необходимостью регулирования угловой скорости ω в широких пределах.

Схема включения ЭП будет иметь вид, показанный на рис. 3.17.

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U}{U_y}, \quad (3.56)$$

где U – напряжение, подводимое к якорю; U_y – управляющее напряжение.

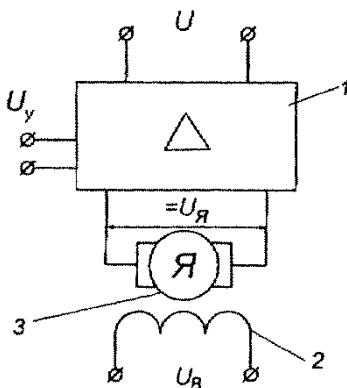


Рис. 3.17. Схема включения ДПТ с НВ в цепь с регулируемым напряжением якоря ($U_{\text{я}} = \text{var}$):
1 – усилитель цепи якоря; 2 – обмотка возбуждения;
3 – якорь

Напряжение U_y может изменяться по некоторому закону:

$$U_y = U_y(t). \quad (3.57)$$

Данный способ является наиболее эффективным.

Электромеханические $\omega(I)$ и механические $\omega(M_C)$ характеристики имеют одинаковый вид (рис. 3.18):

На рис. 3.18 обозначено:

$$\omega_{0,i} = \frac{U_i}{k \cdot \Phi} (i = 1, 2, 3, \dots); \quad (3.58)$$

$$U_{B1} > U_{B2} > U_{B3} > \dots$$

Каждая характеристика соответствует постоянным значениям напряжения возбуждения $U_{B1}, U_{B2}, U_{B3}, \dots$

Данный способ регулирования скорости позволяет изменять ее в сотни раз. Его обычно используют совместно с предыдущим способом.

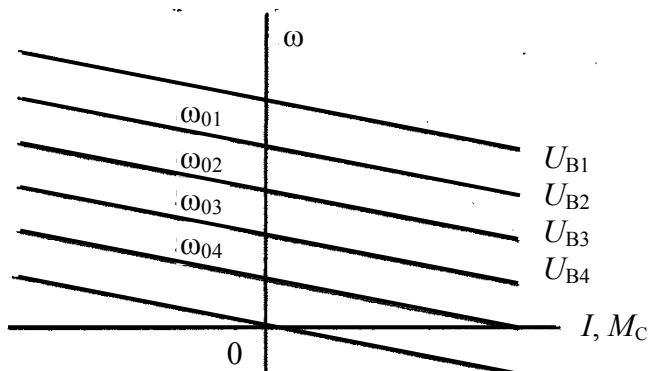


Рис. 3.18. Электромеханические $\omega(I)$ и механические $\omega(M_c)$ характеристики ДПТ НВ

Задание № 2

Данные, используемые для расчета задания № 2, приведены в табл. 1 – 2.

Для электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения, технические данные которого приведены в табл. 2, при напряжении питающей сети $U = 220 \text{ В}$, 127 В , 110 В и 100 В :

1. Начертить электрическую схему с пусковым реостатом в цепи якоря и регулировочным реостатом в цепи возбуждения.

2. Определить величину сопротивления регулировочного реостата R_p , обеспечивающего ослабление магнитного потока до величины $\Phi' = 0,76 \cdot \Phi_{\text{ном}}$.

3. Определить величину сопротивления пускового реостата при кратности пускового тока якоря $K_I = I_{\text{п}} / I_{\text{я ном}}$, заданной в табл. 2.

4. Построить на одном графике естественную механическую характеристику и искусственную при $\Phi' = 0,76 \cdot \Phi_{\text{ном}}$ и $R_{\text{п}} = 0$ (воспользоваться данными табл. 1).

5. Построить на одном графике естественную механическую характеристику и искусственную при $\Phi_{\text{ном}}$ и введенном сопротивлении пускового реостата $R_{\text{п}}$.

6. Ответить на вопросы, указанные в табл. 2.

7. Определить номинальный ток плавкой вставки в предохранителях, защищающих ответвление к ЭД, и выбрать сечение проводов для питания ЭД, номинальные данные которого приведены в табл. 2.

Рекомендации по выполнению задания № 2

Сначала определим сопротивление обмотки возбуждения

$$R_B = U_{\text{ном}} / I_{\text{в. ном}}, \text{ Ом.} \quad (1)$$

Для расчета сопротивления R_p регулировочного реостата найдем вначале ток в обмотке возбуждения, соответствующий ослабленному магнитному потоку $\Phi' = 0,78 \cdot \Phi_{\text{ном}}$. С этой целью обычно используют универсальную

кривую намагничивания двигателей постоянного тока, заданную в табл. 1.

С помощью интерполяции находим, что при $\Phi' / \Phi_{\text{ном}} = 0,78$ отношение $I_B / I_{B,\text{ном}} = 0,55$.

Тогда можно определить ток обмотки возбуждения:

$$I_B = 0,55 \cdot I_{B,\text{ном}}, \text{ А.} \quad (2)$$

Общее сопротивление цепи возбуждения

$$R_o = R_B + R_p = U_{\text{ном}} / I_B, \text{ Ом.} \quad (3)$$

Таблица 1

$I_B / I_{B,\text{ном}}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$\Phi / \Phi_{\text{ном}}$	0	0,2	0,4	0,55	0,67	0,75	0,81

$I_B / I_{B,\text{ном}}$	0	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$\Phi / \Phi_{\text{ном}}$	0	0,87	0,92	0,94	1,0	1,04	1,08

Сопротивление регулировочного реостата в цепи возбуждения

$$R_p = (U_{\text{ном}} / I_B) - R_B, \text{ Ом.} \quad (4)$$

Для номинального режима работы двигателя найдем следующие величины:

- ток в цепи якоря

$$I_{\text{я. ном}} = I_{\text{ном}} - I_{B,\text{ном}}, \text{ А;} \quad (5)$$

- ЭДС якоря

$$E_{\text{я. ном}} = U_{\text{ном}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я. ном}}, \text{ В;} \quad (6)$$

- момент

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot (P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}), \text{ Н·м.} \quad (7)$$

Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением представляют собой линейные зависимости и строятся по двум точкам.

Рассчитаем координаты двух точек для естественной характеристики:

1) в режиме холостого хода при $M = 0$ частота вращения

$$n_0 = U_{\text{ном}} / (C_e \cdot \Phi_{\text{ном}}) = (U_{\text{ном}} / E_{\text{я. ном}}) \cdot n_{\text{ном}}, \text{ мин}^{-1};$$

2) при номинальной нагрузке

$$M = M_{\text{ном}}, n = n_{\text{ном}}.$$

Естественная механическая характеристика построена на рис. 1 в виде сплошной прямой.

Рассчитаем координаты двух точек для построения искусственной характеристики:

1) в режиме холостого хода при $M = 0$ частота вращения якоря при ослабленном магнитном потоке $\Phi' = 0,78 \cdot \Phi_{\text{ном}}$

$$n'_0 = U_{\text{ном}} / (C_e \cdot \Phi') = U_{\text{ном}} / (0,78 \cdot C_e \cdot \Phi_{\text{ном}}), \text{ мин}^{-1};$$

2) при номинальной нагрузке $M = M_{\text{ном}}$

$$n' = E_{\text{я}} / (0,78 \cdot C_e \cdot \Phi_{\text{ном}}) = [(U_{\text{ном}} - R_{\text{я}} \cdot I'_{\text{я}}) / (0,78 \cdot E_{\text{я. ном}})] \cdot n_{\text{ном}}, \text{ мин}^{-1},$$

$$\text{где } I'_{\text{я}} = M_{\text{ном}} / (0,78 \cdot C_m \cdot \Phi_{\text{ном}}) = I_{\text{я. ном}} / 0,78, \text{ А.}$$

Искусственная характеристика построена на рис. 1 штриховой линией.

Так как в момент пуска ЭДС якоря $E_{\text{я}} = 0$, то пусковой ток

$$I_{\text{п}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{я}}, \text{ А.}$$

Сопротивление пускового реостата определяется из равенства

$$I_{\text{п}} = K_I \cdot I_{\text{я. ном}} = U_{\text{ном}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{п}}).$$

Отсюда

$$R_{\text{п}} = [U_{\text{ном}} / (K_I \cdot I_{\text{я. ном}})] - R_{\text{я}}, \text{ Ом.} \quad (8)$$

Искусственную механическую характеристику также строим по двум точкам:

1) в режиме холостого хода при $M = 0$ частота вращения

$$n_0 = U_{\text{ном}} / (C_e \cdot \Phi_{\text{ном}}), \text{ мин}^{-1};$$

2) при номинальной нагрузке $M = M_{\text{ном}}$ частота вращения

$$n = E_{\text{я}} / (C_e \cdot \Phi_{\text{ном}}) = n_{\text{ном}} [U_{\text{ном}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) \cdot I_{\text{я. ном}}] / E_{\text{я. ном}}, \text{ мин}^{-1}.$$

Искусственная механическая характеристика построена на рис. 1 штрихпунктирной линией для ДПТ НВ с $n_0 = 3000 \text{ мин}^{-1}$.

Для определения номинального тока плавкой вставки предохранителей, защищающих ответвление к ДПТ, определим номинальный ток двигателя:

$$I_{\text{я. ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}}} \quad (9)$$

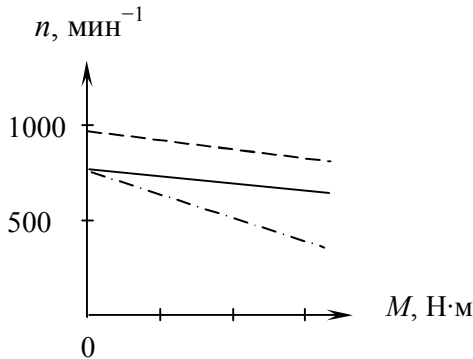


Рис. 1. Естественная и искусственные механические характеристики

Пусковой ток

$$I_{\text{п}} = K_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}}. \quad (10)$$

Ток плавкой вставки

$$I_{\text{вс}} = I_{\text{п}} / 2,5. \quad (11)$$

К установке по справочнику выбираем предохранитель на номинальный ток плавкой вставки $I_{\text{вс. ном}}$.

Допустимая нагрузка на провод по условию нагревания длительным расчетным током

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{дл}}, \text{ где } I_{\text{дл}} = I_{\text{ном}}. \quad (12)$$

По табл. 3.6 – 3.7 выбираем три одножильных провода с алюминиевыми жилами, проложенных в одной трубе, для которых известна допустимая токовая нагрузка $I_{\text{доп}}$. Проверяем выбранное сечение по условию соответствия аппарату максимально-токовой защиты:

$$I_{\text{доп}} \geq K_{\text{защ}} \cdot I_{\text{защ}}, \quad (13)$$

где $K_{\text{защ}}$ – коэффициент защиты (для линий, идущих к АД, установленным в невзрывоопасных помещениях, $K_{\text{защ}} = 0,33$).

Условие выполняется.

Таблица 2

Варианты задания № 2

Шифр	U , В	Номер вопро- са.	K_I	Технические данные двигателя				
				$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, мин^{-1}	$R_{\text{я}}$, Ом	$R_{\text{в}}$, Ом	$I_{\text{ном}}$, А
1	2	3	4	5	6	7	8	9
00	127	11,21	2,8	8	1000	0,395	168	48
01	220	1, 30	2,5	1,5	3000	1,9	600	9
02	220	3, 28	2,4	1,5	1500	2,45	470	8,7
03	220	5, 26	2,3	2,2	1500	1,205	358	12
04	220	7, 24	2,2	2,2	3000	1,03	712	12,5
05	220	9, 22	2,1	3,2	3000	0,642	285	17,5
06	127	11,20	2,0	4,5	1000	0,632	184	25,2
07	220	13,18	1,9	4,5	1500	0,78	228	25,4
08	220	15,16	1,8	4,5	3000	0,352	270	24,3
09	220	17,14	1,9	6	1500	0,472	132	33,2
10	127	19,12	2,0	6	1000	0,494	158	32,6
11	220	21,10	2,1	6,2	3000	0,36	280	33
12	220	23, 8	2,2	6,6	2200	0,303	368	35
13	127	25, 6	2,3	8	1000	0,328	136	43
14	220	27, 4	2,4	9	1500	0,240	282	48
15	127	29, 2	2,5	10	1000	0,300	85	63
16	110	4, 15	2,4	10	750	0,357	92,5	58
17	127	6, 17	2,3	12,5	1000	0,237	108	76
18	110	8, 20	2,2	14	750	0,244	92	79
19	110	17, 8	1,7	17	750	0,157	73,3	93
20	100	19, 6	1,9	19	600	0,198	44	106
21	127	21, 2	2,1	20,5	970	0,086	115	110
22	110	10,17	1,8	25	750	0,102	44	136
23	110	12,15	2,0	25	600	0,111	48,4	136
24	110	14,13	2,1	32	750	0,102	44	136
25	100	16,11	2,2	42	600	0,111	48,4	136
26	127	18, 9	2,3	55	600	0,036	32,5	287
27	110	20, 7	2,4	70	600	0,0202	24	361
28	220	22,17	2,2	3,2	1500	1,03	198	18,4
29	110	24,15	2,1	12,0	730	0,20	94	65
30	127	26,13	2,0	24,0	1060	0,05	70	124
31	220	1, 30	2,5	1,5	3000	1,9	600	9

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
32	220	3,28	2,4	1,5	1500	2,45	470	8,7
33	220	5,26	2,3	2,2	1500	1,205	358	12
34	220	7,24	2,2	2,2	3000	1,03	712	12,5
35	220	9,22	2,1	3,2	3000	0,642	285	17,5
36	127	11,20	2,0	4,5	1000	0,632	184	25,2
37	220	13,18	1,9	4,5	1500	0,78	228	25,4
38	220	15,16	1,8	4,5	3000	0,352	270	24,3
39	220	17,14	1,9	6	1500	0,472	132	33,2
40	127	19,12	2,0	6	1000	0,494	158	32,6
41	220	21,10	2,1	6,2	3000	0,36	280	33
42	220	23,8	2,2	6,6	2200	0,303	368	35
43	127	25,6	2,3	8	1000	0,328	136	43
44	220	27,4	2,4	9	1500	0,240	282	48
45	127	29,2	2,5	10	1000	0,300	85	63
46	110	4,15	2,4	10	750	0,357	92,5	58
47	127	6,17	2,3	12,5	1000	0,237	108	76
48	110	8,20	2,2	14	750	0,244	92	79
49	110	17,8	1,7	17	750	0,157	73,3	93
50	100	19,6	1,9	19	600	0,198	44	106
51	127	21,2	2,1	20,5	970	0,086	115	110
52	110	10,17	1,8	25	750	0,102	44	136
53	110	12,15	2,0	25	600	0,111	48,4	136
54	110	14,13	2,1	32	750	0,102	44	136
55	100	16,11	2,2	42	600	0,111	48,4	136
56	127	18,9	2,3	55	600	0,036	32,5	287
57	110	20,7	2,4	70	600	0,0202	24	361
58	220	22,17	2,2	3,2	1500	1,03	198	18,4
59	110	24,15	2,1	12,0	740	0,20	94	65
60	127	26,13	2,0	24,0	1060	0,05	70	124
61	110	14,13	2,1	32	750	0,102	44	136
62	100	16,11	2,2	42	600	0,111	48,4	136
63	220	22,17	2,2	3,2	1500	1,03	198	18,4
64	127	18,9	2,3	55	600	0,036	32,5	287
65	110	14,13	2,1	32	750	0,102	44	136
66	100	16,11	2,2	42	600	0,111	48,4	136

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
67	220	2,30	1,5	2,5	2000	2,9	800	19
68	220	1,30	2,5	1,5	3000	1,9	600	9
69	220	3,28	2,4	1,5	1500	2,45	470	8,7
70	220	5,26	2,3	2,2	1500	1,205	358	12
71	220	7,24	2,2	2,2	3000	1,03	712	12,5
72	220	9,22	2,1	3,2	3000	0,642	285	17,5
73	127	11,20	2,0	4,5	1000	0,632	184	25,2
74	220	13,18	1,9	4,5	1500	0,78	228	25,4
75	220	15,16	1,8	4,5	3000	0,352	270	24,3
76	220	17,14	1,9	6	1500	0,472	132	33,2
77	127	19,12	2,0	6	1000	0,494	158	32,6
78	220	21,10	2,1	6,2	3000	0,36	280	33
79	220	23,8	2,2	6,6	2200	0,303	368	35
80	127	25,6	2,3	8	1000	0,328	136	43
81	220	27,4	2,4	9	1500	0,240	282	48
82	127	29,2	2,5	10	1000	0,300	85	63
83	110	4,15	2,4	10	750	0,357	92,5	58
84	127	6,17	2,3	12,5	1000	0,237	108	76
85	110	8,20	2,2	14	750	0,244	92	79
86	110	17,8	1,7	17	750	0,157	73,3	93
87	100	19,6	1,9	19	600	0,198	44	106
88	127	21,2	2,1	20,5	970	0,086	115	110
89	110	10,17	1,8	25	750	0,102	44	136
90	110	12,15	2,0	25	600	0,111	48,4	136
91	110	14,13	2,1	32	750	0,102	44	136
92	100	16,11	2,2	42	600	0,111	48,4	136
93	127	18,9	2,3	55	600	0,036	32,5	287
94	110	20,7	2,4	70	600	0,0202	24	361
95	220	22,17	2,2	3,2	1500	1,03	198	18,4
96	110	24,15	2,1	12,0	740	0,20	94	65
97	127	26,13	2,0	24,0	1060	0,05	70	124
98	110	28,15	2,1	12,0	760	0,20	95	66
99	100	16,15	2,2	36,0	600	0,15	48,8	136

Вопросы к пункту 6 задания № 2

1. Каково назначение дополнительных полюсов и компенсационной обмотки машины постоянного тока?
2. Какие условия нужно выполнить, чтобы произошло самовозбуждение генератора постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения?
3. Для чего в цепи обмотки якоря при пуске двигателя необходимо включать дополнительные сопротивления?
4. Почему нельзя включать в сеть двигатель последовательного возбуждения без нагрузки? Каким при этом должно быть соединение двигателя с рабочим механизмом?
5. Назовите основные части машины постоянного тока и поясните их конструкцию.
6. Каково назначение коллектора у генератора и двигателя?
7. Каким образом можно регулировать ЭДС генератора?
8. Объясните влияние реакции якоря на величину ЭДС машины постоянного тока.
9. Поясните сущность коммутации машины постоянного тока.
10. Как уменьшить вредное влияние реакции якоря на работу машины постоянного тока?
11. Чем определяется конечное напряжение, до которого самовозбуждается генератор с параллельным возбуждением?
12. Каковы достоинства и недостатки генератора с последовательным возбуждением?
13. Каковы особенности внешней характеристики генератора с параллельным возбуждением?
14. Какой вид имеет внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением при согласном и встречном включении обмоток возбуждения?
15. Поясните, как осуществляется регулирование частоты вращения двигателя с параллельным возбуждением.
16. Как осуществляется регулирование частоты вращения двигателя с последовательным возбуждением?

17. Зачем необходим реостат в цепи якоря двигателя постоянного тока при его запуске?
18. Поясните, почему с увеличением нагрузки частота вращения двигателя последовательного возбуждения уменьшается, а с уменьшением нагрузки – увеличивается.
19. От чего зависит частота вращения двигателя и как ее можно регулировать?
20. От каких факторов зависит ЭДС генератора смешанного возбуждения?
21. Почему реакция якоря может вызвать искрение под щетками?
22. Почему ток короткого замыкания генератора параллельного возбуждения очень быстро снижается до величин, меньших номинального тока?
23. Что произойдет при обрыве обмотки возбуждения двигателя с параллельным возбуждением, если он работал с номинальным моментом на валу?
24. Что произойдет при обрыве обмотки возбуждения двигателя с параллельным возбуждением, если он работал в режиме холостого хода?
25. Какова распространенная ошибка при подключении двигателя с параллельным возбуждением к сети? К чему она приводит?
26. Как изменяется частота вращения двигателя с параллельным возбуждением при увеличении нагрузки?
27. Приведите схему реостатного пуска двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, если используется трехступенчатый пусковой реостат.
28. Как скажется снижение напряжения питающей сети на частоте вращения и токе якоря при неизменной нагрузке на валу двигателя параллельного возбуждения?
29. Как скажется снижение напряжения питающей сети на частоте вращения и токе якоря при неизменной нагрузке на валу двигателя последовательного возбуждения?
30. Как зависит пусковой ток двигателя от нагрузки на валу и момента инерции устройства, приводимого во вращение?

Задание № 3

Составить принципиальную электрическую схему управления электродвигателем в соответствии с заданием, указанным в табл. 2, и начертить в соответствии с ГОСТом. Описать работу схемы и ее возможности. Выбрать, применительно к технологическому процессу производства в АПК, пускорегулирующую и защитную аппаратуру. В вариантах с указанием мощности и напряжения электродвигателей выбор пускорегулирующей и защитной аппаратуры обосновать расчетом.

Рекомендации и примеры по выполнению задания № 3

Электрические машины, аппараты и устройства управления ими изображают на схемах условными обозначениями (ГОСТ 2.755–87). Некоторые обозначения релейно-контактных элементов управления ЭП приведены в табл. 1.

Каждая схема управления электроприводом имеет две электрические цепи: силовую, выделяемую обычно жирными линиями, и цепь управления – тонкими линиями. Аппараты в соответствии с их функциями обозначаются буквами согласно СТ СЭВ 2182–80, например: КМ – главный контактор, QF – автоматический выключатель, F – плавкий предохранитель, КК – реле тепловое, КА – реле токовое, КТ – реле времени, KV – реле напряжения, S – кнопка, SQ – путевой выключатель и т.д.

Элементы одного устройства принято показывать в разных электрических цепях в зависимости от их функционального назначения, например: обмотка контактора включена в цепь управления, главные контакты этого контактора – в силовую цепь, а вспомогательные контакты – в цепь управления. Однако все элементы аппарата должны иметь одинаковые буквенные и цифровые обозначения. На схемах все элементы (контакты, кнопки и т.п.) показывают при отсутствии токов в обмотках и ненажатых кнопках.

Пример. Для привода трехсекционного транспортера используются три асинхронных двигателя серии 4А, которые для нормальной работы должны включаться и отключаться в определенной последовательности: вкл. 3-2-1, а откл. 1-2-3. Управление двигателями осуществляется контакторами переменного тока и кнопочным постом с 3 кнопками включения и 3 кнопками отключения.

Составить схему управления электродвигателями.

Решение:

1. Схема включения ЭД показана на рис. 1.

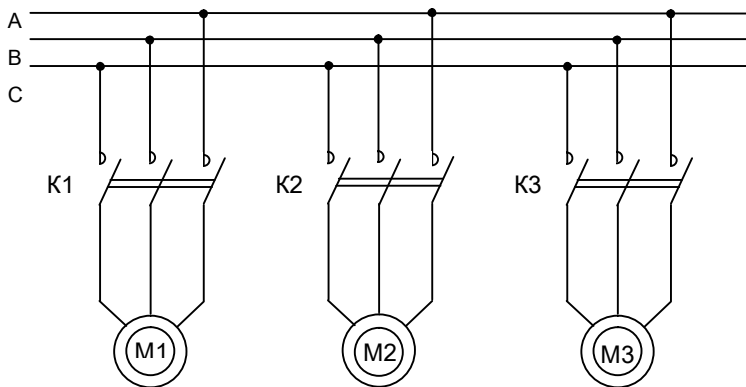


Рис. 1. Схема включения АД

2. Для нормальной работы транспортера двигатели должны включаться только в следующем порядке: первым – двигатель последней секции М3, затем – М2 и последним – двигатель первой секции М1. При неверной последовательности включения неработающие секции транспортера будут переполнены перемещаемыми деталями. Отключение секций должно обязательно происходить в обратном порядке, т.е. М1–М2–М3, чтобы секции успели очиститься.

3. Контактнo-релейная схема управления. Так как логика работы двигателей достаточно проста, можно создать схему управления, используя только вспомогательные контакты контакторов и кнопочный пост.

Таблица 1

Обозначения релейно-контактных элементов управления

Обозначение	Наименование
	Предохранитель плавкий
а)  б) 	Контакт коммутационного устройства: а) замыкающий б) размыкающий
	Выключатель трехполюсный
	Выключатель автоматический трехполюсный
а)  б) 	Кнопки с самовозвратом а) с замыкающим контактом; б) с размыкающим контактом
	Контакт главной цепи контактора, пускателя
а)  б) 	Контакты путевого или концевого выключателя: а) размыкающий б) замыкающий
	Контакт замыкающий с замедлением а) при замыкании; б) при размыкании
	Контакт размыкающий с замедлением: а) при размыкании; б) при замыкании
	Катушка контактора, реле, пускателя
	Нагревательный элемент теплового реле
	Контакт теплового реле с возвратом нажатием кнопки

1) Логика включения двигателей. Первым можно включить только двигатель М3. Никаких ограничений на его включение нет. Поэтому схема его включения – стандартная (рис. 2). Двигатель М2 должен включаться только после М3. Для этого в цепь катушки К2 последовательно введем вспомогательный замыкающий контакт К3. Двигатель М1 включается только после М2. Для этого в цепь катушки К1 введем контакт К2.

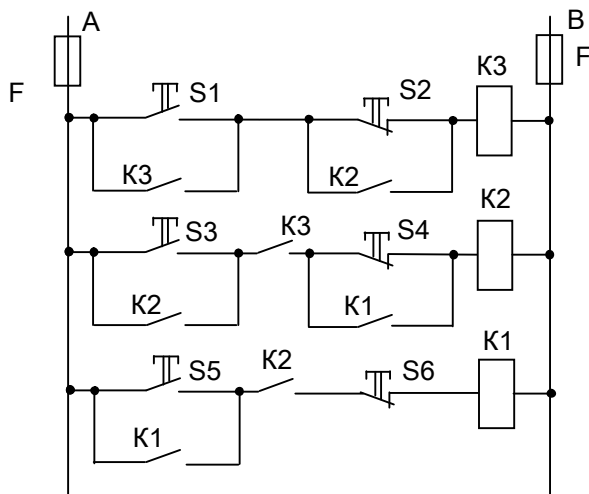


Рис. 2. Релейно-контакторная схема управления АД

2) Логика отключения. Первым должен быть отключен двигатель М1. Ограничений на его отключение нет. Поэтому в цепи катушки К1 предусмотрена только кнопка S6. Двигатель М2 должен отключаться вторым, после отключения М1. Поэтому кнопка S4 шунтирована вспомогательным контактом К1. Двигатель М3 должен отключаться последним, после М2, поэтому кнопка S2 шунтирована вспомогательным контактом К2. Для защиты цепи управления от коротких замыканий применены плавкие предохранители F.

В качестве примера приведем типовую схему управления электроприводом: рис. 3 – схема управления, защиты от

перегрузок и коротких замыканий и автоматизированного реостатного пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции тока [1, с. 468];

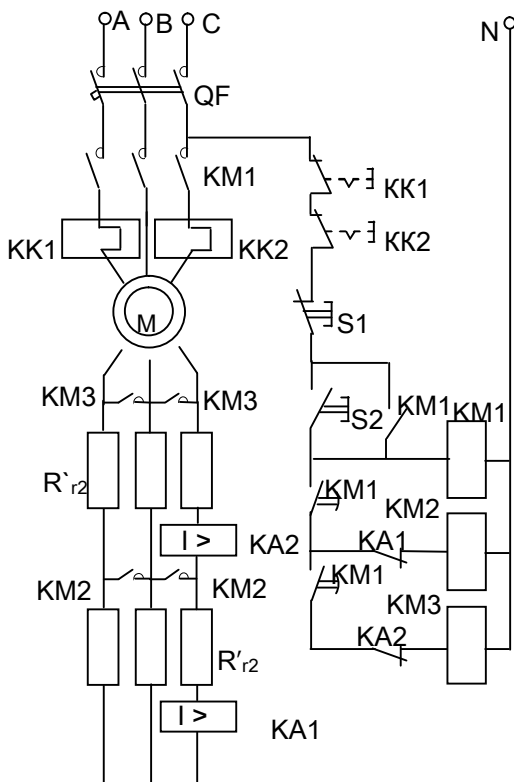


Рис. 3. Схема управления, защиты и пуска АД с фазным ротором

Таблица 2

Варианты задания № 3

Шифр	Наименование схемы
1	2
00	Схема управления и защиты реверсивного трехфазного синхронного двигателя с помощью магнитного и кнопочного пускателей. Предусмотреть защиту от коротких замыканий и перегрузок
01	Схема управления и защиты нереверсивного трехфазного асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутой обмоткой ротора с помощью магнитного и кнопочного пускателей
02	Схема автоматического управления пуском АД с фазным ротором (пусковой реостат имеет 5 ступеней регулирования)
03	Схема автоматического управления пуском двигателя постоянного тока (ДПТ) с НВ
04	Схема управления и защиты короткозамкнутого АД с помощью реверсивного магнитного пускателя. Предусмотреть возможность управления с четырех мест и защиту от коротких замыканий
05	Схема управления АД с короткозамкнутой обмоткой ротора и динамическим торможением. Предусмотреть пуск, остановку, защиту от перегрузок и коротких замыканий, динамическое и регенеративное торможение
06	Схема дистанционного управления (пуск и остановка) АД с четырех мест. Предусмотреть защиту от коротких замыканий и перегрузок
07	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий для четырех трехфазных АД с короткозамкнутыми роторами. Использовать магнитные пускатели и кнопочные станции, запитать двигатели от общей сети 230 В
08	Схема автоматического управления пуском АД с фазным ротором. Использовать трехступенчатый реостат, предусмотреть защиту от перегрузок

1	2
09	Схема дистанционного управления АД с короткозамкнутым ротором с четырех мест с помощью контактора и кнопочных станций. Обеспечить защиту от коротких замыканий (КЗ) и перегрузок
10	Схема автоматизированного реостатного пуска ДПТ параллельного возбуждения в функции тока и времени
11	Схема автоматизированного динамического торможения ДПТ смешанного возбуждения [1, с.470]
12	Схема электропривода ДПТ последовательного возбуждения от трехфазной сети с помощью диодного преобразователя (выпрямителя с нулевым выводом)
13	Схема управления и регулирования частоты вращения АД с фазным ротором с помощью тиристорного преобразователя переменного напряжения с двумя встречно-параллельными тиристорами в каждой фазе обмотки статора АД [3, с. 410]. Предусмотреть защиту от КЗ и перегрузок
14	Схема управления (пуск, остановка) и регулирования частоты вращения АД с фазным ротором с помощью транзисторного преобразователя в цепи ротора. Предусмотреть защиту от КЗ и перегрузок
15	Схема автоматизированного асинхронного пуска синхронного двигателя [1, с. 470]. Предусмотреть защиту от КЗ и перегрузок
16	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий трех АД с короткозамкнутым ротором, питаемых от общей трехфазной сети 380 В
17	Схема дистанционного управления с четырех мест синхронным двигателем. Обеспечить защиту от перегрузок и коротких замыканий
18	Схема управления АД с короткозамкнутой обмоткой ротора в функции тока и времени. Запитать от трехфазной сети 380 В. Обеспечить защиту от перегрузок и коротких замыканий

1	2
19	Схема автоматизированного реостатного пуска асинхронного двигателя с фазным ротором в функции тока и времени. Предусмотреть защиту от коротких замыканий и перегрузок
20	Схема автоматизированного реостатного пуска ДПТ смешанного возбуждения в функции скорости [1, с. 468]
21	Схема управления двумя синхронными двигателями, питаемыми от общей трехфазной сети. Для управления одним из них использовать контактор, другим – магнитный пускатель
22	Схема управления и защиты АД с короткозамкнутым ротором от коротких замыканий, перегрузок и обрыва фазы с помощью электромагнитного реле тока, реле времени и промежуточного реле
23	Схема управления двумя АД, питаемыми от общей трехфазной сети. Использовать магнитные пускатели и кнопочные станции. Предусмотреть для одного из них возможность дистанционного управления с трех мест
24	Схема управления и защиты от перегрузок, обрыва одной фазы и коротких замыканий реверсивного АД с фазным ротором
25	Схема автоматического управления пуском АД с фазным ротором, трехступенчатый пусковой реостат
26	Схема дистанционного управления с трех мест и защиты от перегрузок АД с фазным ротором
27	Схема управления и защиты АД с фазным ротором от перегрузок, используя электромагнитное реле тока
28	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий АД с короткозамкнутым ротором и АД с фазным ротором, питаемых от трехфазной сети 380 В
29	Схема дистанционного управления с трех мест и автоматического управления пуском АД с фазным ротором. Использовать пятиступенчатый пусковой реостат

1	2
30	Схема тиристорного электропривода ДПТ от трехфазной сети [3, с. 411]
31	Схема управления и защиты реверсивного трехфазного АД с короткозамкнутой обмоткой ротора с помощью магнитного пускателя
32	Схема автоматического управления пуском АД с фазным ротором, используя трехступенчатый пусковой реостат
33	Схема автоматического управления пуском ДПТ с параллельным возбуждением [4, с. 355]
34	Схема управления и защиты короткозамкнутого АД с помощью нереверсивного магнитного пускателя. Предусмотреть возможность управления с двух мест
35	Схема управления АД с короткозамкнутой обмоткой ротора и динамическим торможением. Предусмотреть пуск, остановку, защиту от перегрузок и коротких замыканий, динамическое торможение
36	Схема дистанционного управления (пуск и остановка) АД с трех мест. Предусмотреть защиту от коротких замыканий и перегрузок
37	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий для трех трехфазных АД с короткозамкнутыми роторами. Использовать магнитные пускатели и кнопочные станции, запитать двигатели от общей сети 220 В
38	Схема автоматического управления пуском АД с фазным ротором. Использовать двухступенчатый реостат, предусмотреть защиту от коротких замыканий и перегрузок
39	Схема дистанционного управления АД с короткозамкнутым ротором с двух мест с помощью контактора и кнопочных станций. Обеспечить защиту от КЗ
40	Схема автоматизированного реостатного пуска ДПТ параллельного возбуждения в функции времени [1, с. 469]

1	2
41	Схема автоматизированного динамического торможения ДПТ параллельного возбуждения [1, с.470]
42	Схема электропривода ДПТ последовательного возбуждения от трехфазной сети с помощью тиристорного преобразователя (выпрямителя с нулевым выводом) [3, с. 411]
43	Схема управления и регулирования частоты вращения АД с фазным ротором с помощью тиристорного преобразователя переменного напряжения с двумя встречно-параллельными тиристорами в каждой фазе обмотки статора двигателя [3, с. 410]. Предусмотреть защиту от коротких замыканий
44	Схема управления (пуск, остановка) и регулирования частоты вращения АД с фазным ротором с помощью тиристорного преобразователя в цепи ротора [3, с. 410]. Предусмотреть защиту от коротких замыканий.
45	Схема автоматизированного асинхронного пуска синхронного двигателя [1, с. 470]. Предусмотреть защиту от коротких замыканий
46	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий двух АД с короткозамкнутым ротором, питаемых от общей трехфазной сети
47	Схема дистанционного управления с трех мест синхронным двигателем. Обеспечить защиту от перегрузок и коротких замыканий
48	Схема управления АД с короткозамкнутой обмоткой ротора в функции пути и времени. Запитать от трехфазной сети 380 В [2, с. 522]
49	Схема автоматизированного реостатного пуска АД с фазным ротором в функции тока [1, с. 468]. Предусмотреть защиту от коротких замыканий
50	Схема автоматизированного реостатного пуска ДПТ параллельного возбуждения в функции скорости [1, с.468]

1	2
51	Схема управления двумя АД, питаемыми от общей трехфазной сети. Для управления одним из них использовать контактор, другим – магнитный пускатель
52	Схема управления и защиты АД с короткозамкнутым ротором от перегрузок и обрыва фазы с помощью электромагнитного реле тока, реле времени и промежуточного реле
53	Схема управления двумя АД, питаемыми от общей трехфазной сети. Использовать магнитные пускатели и кнопочные станции. Предусмотреть для одного из них возможность дистанционного управления с двух мест
54	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий реверсивного АД с фазным ротором
55	Схема автоматического управления пуском АД с фазным ротором, используя четырехступенчатый реостат
56	Схема дистанционного управления с двух мест и защиты от перегрузок АД с фазным ротором
57	Схема управления и защиты АД с фазным ротором от КЗ с использованием электромагнитного реле тока
58	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий АД с короткозамкнутым ротором и АД с фазным ротором, питаемых от общей трехфазной сети
59	Схема дистанционного управления с трех мест и автоматического управления пуском АД с фазным ротором. Использовать двухступенчатый пусковой реостат
60	Схема тиристорного электропривода ДПТ от трехфазной сети [3, с. 411]
61	Схема управления и защиты короткозамкнутого АД с помощью реверсивного магнитного пускателя. Предусмотреть возможность управления с трех мест
62	Схема автоматического управления пуском АД с фазным ротором. Использовать трехступенчатый реостат, предусмотреть защиту от перегрузок

1	2
63	Схема автоматизированного реостатного пуска ДПТ смешанного возбуждения в функции времени
64	Схема автоматизированного динамического торможения ДПТ смешанного возбуждения
65	Схема электропривода ДПТ последовательного возбуждения от трехфазной сети с помощью транзисторного преобразователя
66	Схема автоматизированного реостатного пуска АД с фазным ротором в функции времени. Предусмотреть защиту от коротких замыканий и перегрузок
67	Схема дистанционного управления с двух мест и автоматического управления пуском АД с фазным ротором. Использовать трехступенчатый пусковой реостат
68	Схема дистанционного управления АД с короткозамкнутым ротором с трех мест с помощью контактора и кнопочных станций. Обеспечить защиту от перегрузок и коротких замыканий
69	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий реверсивного АД с фазным ротором. Использовать четырехступенчатый реостат
70	Схема управления и защиты реверсивного трехфазного АД с фазным ротором с помощью кнопочного пускателя
71	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий АД с фазными роторами, питаемыми от общей трехфазной сети 380 В
72	Схема автоматизированного реостатного пуска ДПТ независимого возбуждения в функции тока и времени
73	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий реверсивного АД с короткозамкнутым ротором
74	Схема автоматизированного реостатного пуска АД с фазным ротором в функции тока и времени. Предусмотреть защиту от КЗ и перегрузок

1	2
75	Схема управления АД с фазным ротором и реостатным торможением. Предусмотреть пуск, остановку, защиту от перегрузок и КЗ, динамическое торможение
76	Схема управления и защиты от перегрузок и КЗ реверсивного АД с короткозамкнутым ротором
77	Схема управления и защиты от перегрузок и коротких замыканий для трех трехфазных АД с короткозамкнутыми роторами. Использовать магнитные пускатели и кнопочные станции. Запитать двигатели от трехфазной сети 380 В
78	Схема управления и регулирования частоты вращения АД с короткозамкнутым ротором с помощью тиристорного преобразователя переменного напряжения с двумя встречно-параллельными тиристорами в каждой фазе обмотки статора двигателя. Предусмотреть защиту от коротких замыканий и перегрузок
79	Схема управления и защиты реверсивного трехфазного АД с фазным ротором с помощью магнитного и кнопочного пускателя. Использовать пятиступенчатый реостат
80	Схема АД с короткозамкнутым ротором трехфазного тока мощностью 10 кВт для привода металлообрабатывающего станка с динамическим торможением. Напряжение сети 380 В
81	Схема АД с короткозамкнутым ротором мощностью 7,5 кВт и АД с фазным ротором мощностью 13 кВт трехфазного тока. Пускаются в заданной последовательности. Напряжение сети 380 В
82	Схема АД с фазным ротором мощностью 18 кВт для привода теплового двигателя при обкатке. Напряжение сети 380 В
83	Схема из трех АД на 380 В с короткозамкнутыми роторами мощностью 1,1; 2,2 и 4,4 кВт для привода ленточных транспортеров технологической линии.

1	2
84	Схема синхронного электродвигателя трехфазного тока с машинным возбуждением мощностью 30 кВт для привода центробежного насоса. Пуск плавный и легкий. Напряжение сети 380 В
85	Схема синхронного электродвигателя трехфазного тока без машинного возбуждения (с кремниевыми выпрямителями) мощностью 40 кВт для привода компрессора. Напряжение сети 380 В
86	Схема АД однофазного тока мощностью 100 Вт для привода компрессора холодильника. Напряжение 220 В
87	Схема ДПТ параллельного возбуждения мощностью 4 кВт для привода электрокара. Напряжение сети 110 В
88	Схема ДПТ последовательного возбуждения мощностью 6 кВт для привода грейферного крана. Напряжение сети 110 В
89	Схема ДПТ смешанного возбуждения мощностью 1 кВт для привода подвесной тележки. Напряжение сети 220 В
90	Схема АД с короткозамкнутым ротором трехфазного тока мощностью 20 кВт для привода деревообрабатывающего станка с реостатным торможением. Напряжение сети 380 В
91	Схема АД с короткозамкнутым ротором мощностью 7,5 кВт и АД с фазным ротором мощностью 15 кВт трехфазного тока. Напряжение сети 380 В. Пускаются в заданной последовательности
92	Схема АД с фазным ротором мощностью 38 кВт для привода теплового двигателя при обкатке. Напряжение сети 380 В
93	Схема из трех АД с фазными роторами мощностью 2, 4 и 6 кВт для привода ленточных транспортеров технологической линии сельскохозяйственного предприятия. Использовать трехступенчатые реостаты. Напряжение сети 380 В

1	2
94	Схема синхронного электродвигателя трехфазного тока с машинным возбуждением мощностью 40 кВт для привода центробежного насоса. Пуск плавный. Напряжение сети 380 В
95	Схема синхронного электродвигателя трехфазного тока без машинного возбуждения (с кремниевыми выпрямителями) мощностью 40 кВт для привода компрессора. Напряжение сети 380 В
96	Схема АД однофазного тока мощностью 200 Вт для привода компрессора холодильника. Напряжение сети 220 В
97	Схема ДПТ параллельного возбуждения мощностью 4 кВт для привода электрокара. Напряжение сети 220 В
98	Схема ДПТ последовательного возбуждения мощностью 6 кВт для привода грейферного крана. Напряжение сети 127 В
99	Схема ДПТ смешанного возбуждения мощностью 2 кВт для привода подвесной тележки. Напряжение сети 110 В

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Электротехника* / под ред. проф. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.
2. *Борисов Ю.М.* Электротехника / Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов, Ю.Н. Зорин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 550 с.
3. *Касаткин А.С.* Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 440 с.
4. *Иванов И.И.* Электротехника / И.И. Иванов, В.С. Равдоник. – М.: Высш. шк., 1984. – 375 с.
5. *Волынский Б.А.* Электротехника / Б.А. Волынский, Е.Н. Зейн, В.Е. Шатерников. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 525 с.
6. *Правила устройства электроустановок.* – 7-е изд., по сост. на 13.05.2009. – СПб.: Деан, 2009. – 464 с.
7. *Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования* / под ред. общей ред. Ю.Н. Тищенко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
8. *Москаленко В.В.* Электрический привод. – М.: Академия, 2007. – 368 с.
9. *Алексеев В.В.* Электрический привод / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук. – М.: Академия, 2008. – 200 с.
10. *Епифанов А.П.* Основы электропривода. – СПб.: Лань, 2008. – 192 с.
11. *Кабдин Н.Е.* Электропривод и электрооборудование: метод. рекомендации по изучению дисциплины и задания для выполнения контр. работы / Н.Е. Кабдин, А.А. Герасенков. – М.: Изд-во МГАУ им. В.П. Горячкина, 2002. – 34 с.
12. *Домников С.В.* Методическое пособие к выполнению РГР по дисциплине «Электротехника, электрические машины и аппараты»: в 3 ч. Ч.2: Трансформаторы, электрические машины и аппараты, электропривод / С.В. Домников и др.; под ред. Т.Т. Розум. – Минск: Изд-во БНТУ, 2002. – 65 с.
13. *Плотников П.К.* Электропривод в приборостроении: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Саратов: Изд-во СарГТУ, 2008. – 164 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ.....	3
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	5
2.1. Принцип действия АД.....	7
2.2. Схемы замещения. Естественные характеристики АД.....	10
2.3. Анализ электромеханической характеристики АД.....	13
2.4. Анализ механической характеристики АД.....	14
Задание №1	16
3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	38
3.1. Схемы включения двигателя постоянного тока и его конструктивная схема.....	38
3.2. Типы обмоток двигателей постоянного тока.....	40
3.3. Особенности схемных и конструктивных решений ДПТ. Реакция якоря.....	41
3.4. Электромеханическая и механическая характеристики ДПТ независимого возбуждения.....	45
3.5. Режимы торможения ДПТ.....	47
3.6. Способы регулирования скорости вращения.....	53
Задание №2	59
Задание №3	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	83

Кузнецов Андрей Юрьевич

Зонов Павел Владимирович

Болотов Денис Сергеевич

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Учебно-методическое пособие
для самостоятельной работы и выполнения расчётно-
графической работы

Редактор Т.К. Коробкова

Компьютерная верстка Т.А. Измайлова

Подписано к печати _____ 2017 г.

Объем 5,52 уч.-изд. л. Формат 60×84^{1/16}

Тираж 10 экз. Изд. № Заказ №

Отпечатано в издательском центре «Золотой колос»
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160