

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**И.Г. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, С.М.
Семенов**

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2017

УДК 621.31:658(076.5)
ББК 31.26 я73
О-432

Однокопылов И.Г.
О432 Электрооборудование промышленности. Лабораторный
практикум: учебное пособие / И.Г. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев,
С.М. Семенов. – Томск: Изд-во Томского политехнического
университета, 2017. – 310 с.

В лабораторном практикуме приведены описания десяти работ, содержащих материалы по исследованию параметров, статических и динамических режимов работы различных систем электрооборудования.

Наряду с традиционным содержанием каждой лабораторной работы (поставленные цели и задачи, решаемые в описании; краткие теоретические сведения; программа работы; технические параметры установок; перечень вопросов для самопроверки; список литературы) широко представлено использование компьютерной техники для углубленного исследования электромеханических процессов в автоматизированных устройствах электрооборудования.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения.

УДК 621.83
ББК 00000

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор, директор НИИ промышленной
электроники ТУСУР
Г.Я. Михальченко

Кандидат технических наук
заведующий отделом электропривода и автоматизации промышленных
установок ТУСУР
В.В. Аржанов

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2017
© Однокопылов И.Г., Дементьев Ю.Н.,
Семёнов С.М., 2017
© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2017

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕВЕРСИВНОГО ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

1.1. Цель работы

Исследование электромеханических $\omega = f(I)$ и механических $\omega = f(M)$ характеристик, параметров, показателей и режимов работы реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока.

1.2. Оборудование стенда (перечень аппаратуры)

Аппаратная часть комплекса выполнена по блочному (модульному) принципу и содержит:

- составной лабораторный стол со встроенными контейнерами для хранения проводников и методических материалов, рамами для установки необходимых в эксперименте функциональных блоков, выкатной полкой для клавиатуры компьютера и подставкой для системного блока последнего;

- спроектированные натурные аналоги элементов выпрямительно-инверторных преобразователей;
- источники питания;
- нагрузки;
- измерительные преобразователи и приборы;
- IBM-совместимый персональный компьютер со встроенной платой ввода/вывода информации фирмы National Instruments [1].

Питание комплекса осуществляется от трехфазной электрической сети напряжением 380 В с нейтральным и защитным проводниками.

Параметры стенда:

- Потребляемая мощность В·А, не более.....1000
- Габариты (длина/ ширина/ высота), мм.....2750×900×1600
- Масса, кг, не более.....250

1.2.1. Назначения и описания функциональных блоков

Перечень функциональных блоков приводится в соответствии с рис. 1.1.

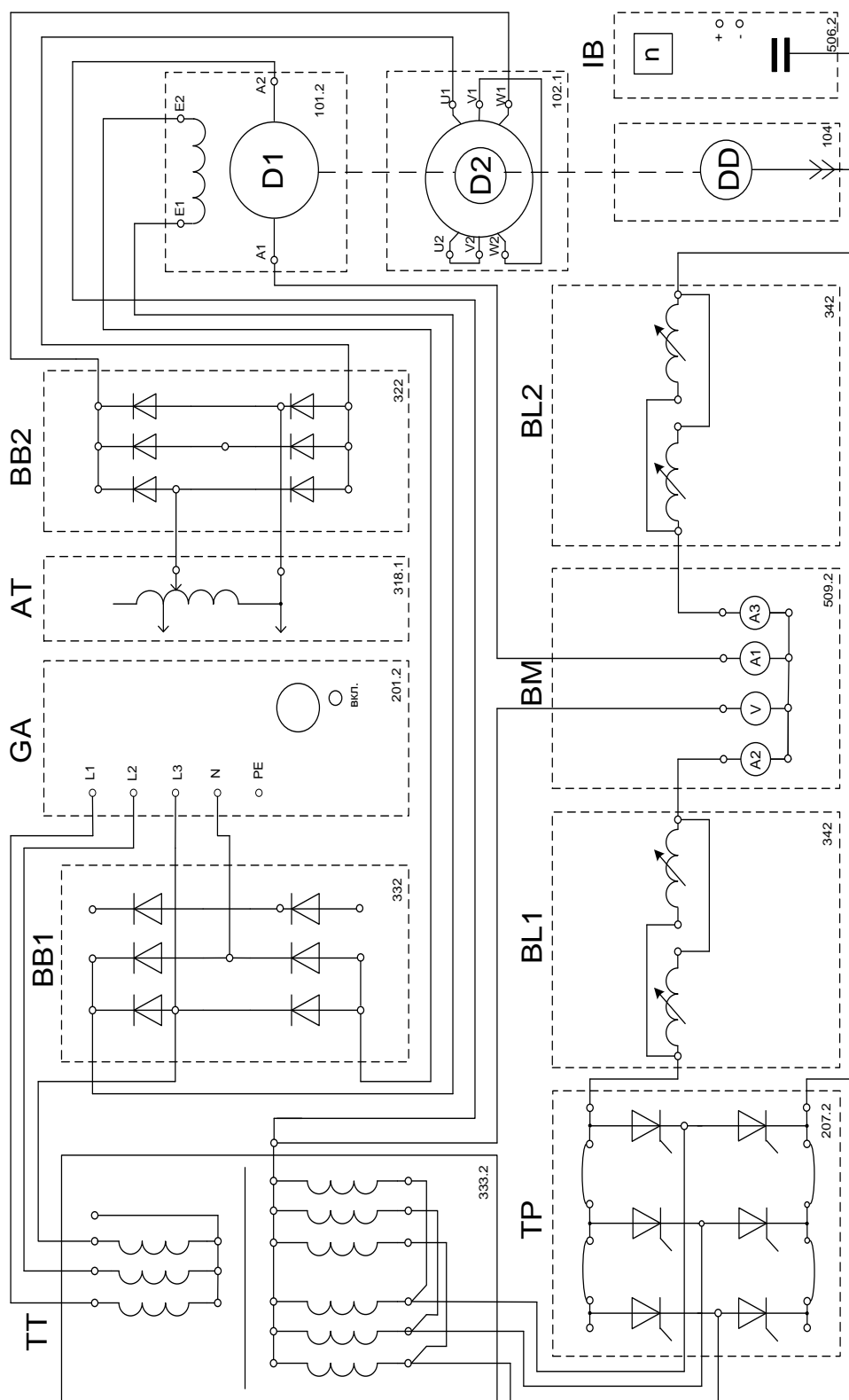


Рис. 1.1. Принципиальная электрическая схема реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока

- Тиристорный преобразователь / регулятор (ТР). Предназначен для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока (режим преобразователя) и трехфазного асинхронного двигателя (режим регулятора). Преобразует трехфазное напряжение синусоидального тока в напряжение постоянного тока, а также в трехфазное напряжение переменной величины. Выходное напряжение регулируется вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ).

- Регулируемый автотрансформатор (АТ). Предназначен для получения регулируемого однофазного напряжения.

- Выпрямитель (ВВ2). Предназначен для неуправляемого преобразования энергии трехфазного переменного тока в энергию постоянного тока.

- Блок диодов (ВВ1). Предназначен для моделирования диодов.

- Преобразовательный трансформатор (ТТ). Предназначен для преобразования трехфазного или однофазного переменного напряжения в переменное напряжение других параметров. Регулируется ступенчато вручную.

- Блок дросселей (ВЛ). Предназначен для моделирования индуктивности. Регулируется ступенчато вручную.

- Указатель частоты вращения (ИВ). Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в аналоговой форме. Имеет выходные гнезда для подключения к ПЭВМ.

- Блок мультиметров (ВМ). Предназначен для измерения токов, напряжений, активного сопротивления. В состав блока входят два цифровых мультиметра с жидкокристаллическим дисплеем.

- Преобразователь угловых перемещений (ДД). Предназначен для преобразования скорости вращения электрических машин в сигнал цифрового вида.

- Исследуемая машина постоянного тока (D1, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением):

$$P_H = 90 \text{ Вт}; \quad n_n = 1500 \text{ об/мин}; \quad \cos \phi_n = 0,73;$$

$$U_H = 220 \text{ В}; \quad I_{BH} = 0,2 \text{ А}; \quad R_r = 86 \text{ Ом};$$

$$I_H = 0,56 \text{ А}; \quad \eta_n = 57,2 \text{ \%}; \quad R_{o.v.} = 1,15 \text{ кОм}.$$

- Нагрузочная машина переменного тока (D2, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$P_H = 120 \text{ Вт}; \quad \cos \phi_H = 0,66;$$

$$U_H = 220 \text{ В}; \quad x_1 = 0,087 \text{ о.е.};$$

$$I_H = 0,44 / 0,76 \text{ А}; \quad R_1 = 0,18 \text{ о.е.};$$

$$n_H = 1350 \text{ об/мин}; \quad x_2' = 0,15 \text{ о.е.};$$

$$\eta_H = 63 \%; \quad R_2' = 0,150 \text{ о.е.}$$

Исследуемая и нагрузочная машины жестко соединены между собой и представлены в виде электромашинного агрегата, дополненного маховиком и преобразователем угловых перемещений.

1.2.2.Обозначения и параметры исследуемой аппаратуры

Обозначение и параметры изучаемой схемы приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
GA	Трехфазный источник питания	201.2	~400 В; 16 А
ТТ	Преобразовательный трансформатор	333.2	Первичная обмотка: Y – 380 В / 320 В·А; 2 вторичные полуобмотки: 0,5 А каждая / номинальные фазные напряжения: 42, 73, 127 В
BB1	Блок диодов	332	2 А / 800 В6 диодов
ТР	Тиристорный преобразователь - регулятор	207.2	~3×400 В / 2 А
BL1, BL2	Блоки дросселей	342	2×3 Гн / 0,5 А
АТ	Регулируемый автотрансформатор	318.1	0...240 В / 2 А
BB2	Выпрямитель	322	Трехфазный мост 3×400 В / 2 А
IB	Указатель частоты вращения	506.2	-2000...0...2000 мин ⁻¹
D1	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт, -220 В, 1500 мин ⁻¹

D2	Асинхронный двигатель	106	120 Вт, ~ 220 , 1350 мин^{-1}
DD	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных каналов, 1000 имп./оборот, $0 \dots 6000 \text{ мин}^{-1}$
BM	Блок мультиметров	509.2	2 мультиметра: $\approx 0 \dots 1000 \text{ В}$; $\approx 0 \dots 10 \text{ А}$; $0 \dots 20 \text{ Мом}$

1.2.3. Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра

Для измерения трех базовых электрических величин (напряжения, тока и омического сопротивления) используется мультиметр. Схемы подключения мультиметра для измерения этих величин приведены на рис. 1.2, рис. 1.3, рис. 1.4. До его подключения к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- установить род тока (постоянный/переменный);
- выбрать диапазон измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильно подсоединить зажимы мультиметра к измеряемой цепи.

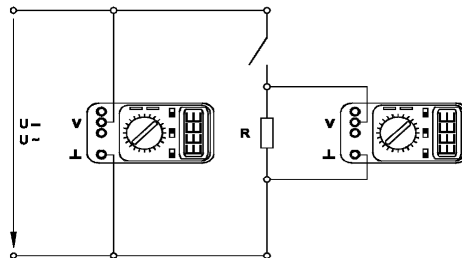


Рис. 1.2. Схема присоединения мультиметра (как вольтметра) для измерения напряжения

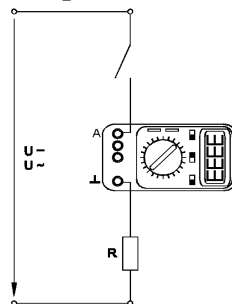


Рис. 1.3. Схема присоединения мультиметра (как амперметра) для измерения тока

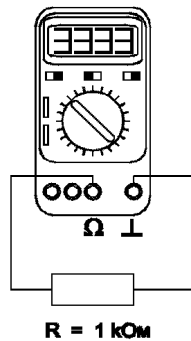


Рис. 1.4. Схема присоединения мультиметра (как омметра) для измерения омического сопротивления

1.3. Общие сведения

1.3.1. Реверсивные тиристорные преобразователи

Как известно реверсивным является преобразователь (РТП), через который выпрямленный ток может протекать в обоих направлениях. Так как вентили пропускают ток только в одном направлении, то для изменения направления тока при одном комплекте вентилях необходимо применять переключатель в главной цепи или использовать два комплекта (группы) вентилях, каждый из которых работает в своем направлении [2].

Режимы работы вентиляхных преобразователей:

Выпрямительный режим. Выпрямление предназначено для преобразования переменного тока в постоянный и заключается в том, что нагрузка циклически переключается с одной фазы источника переменного напряжения на другую. Такое переключение, осуществляемое вентилями, называется коммутацией.

Инверторный режим. Инвертор служит для преобразования постоянного тока в переменный. При работе преобразователя в инверторном режиме энергия из цепи нагрузки передается в питающую сеть, т. е. в противоположном направлении по сравнению с выпрямительным режимом. Поэтому при инвертировании ток и ЭДС обмотки трансформатора направлены встречно, а при выпрямлении — согласно.

Статические характеристики системы ТП–Д: регулировочные характеристики СИФУ $\alpha(U_{\text{уп}})$; управляемого выпрямителя $E_d(\alpha)$; тиристорного преобразователя $E_{\text{ТП}}(U_{\text{уп}})$; внешние характеристики преобразователя $U_d(I_d)$ и электромеханические характеристики привода $\omega(I_d)$.

Статические характеристики преобразователя и электропривода зависят от характера тока нагрузки.

Статические характеристики в выпрямительном и инверторном режиме изображены на рис. 1.5. Внешние характеристики инвертора отличаются от характеристик выпрямителя тем, что с ростом нагрузки напряжение не падает, а увеличивается. Кроме того, в инверторе существует граница предельного тока, зависящая от углов β и γ . Эта граница изображена пунктирной линией на рис. 1.5,а.

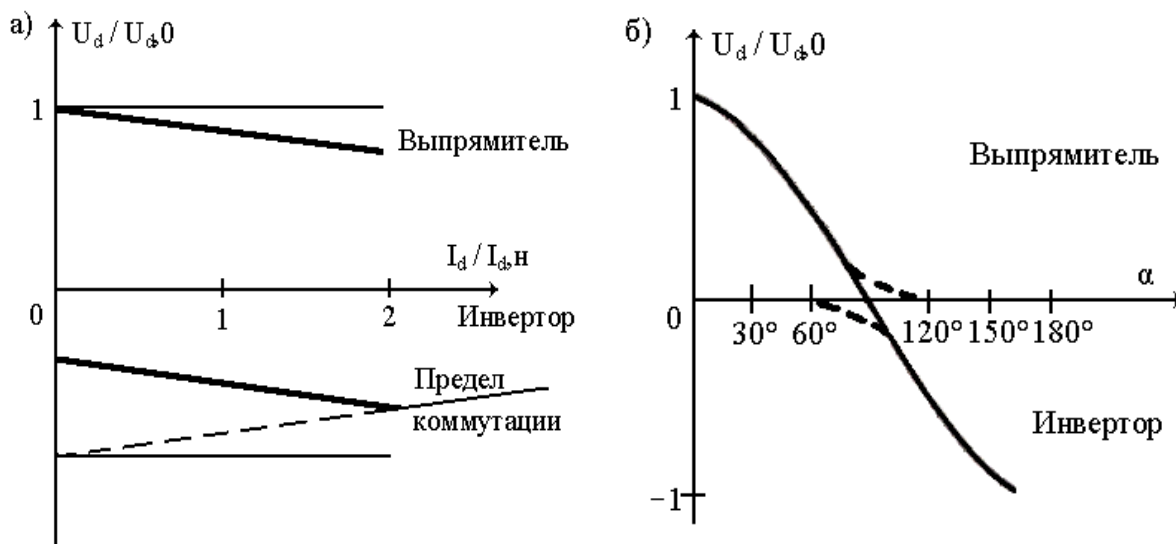


Рис. 1.5. Статические характеристики в выпрямительном и инверторном режимах: а) – внешние; б) – регулировочная

Регулировочная характеристика преобразователя в выпрямительном и инверторном режимах на рис. 1.5,б в зоне около 90° из-за прерывистых токов может быть неоднозначной.

Все реверсивные преобразователи делятся на два класса: однокомплектные и двухкомплектные.

Однокомплектные преобразователи с переключателями или на симисторах имеют такие же силовые схемы, как и нереверсивные преобразователи, например, мостовая симметричная схема (рис. 1.6).

Однокомплектные преобразователи с переключателем обладают такими же характеристиками, как и нереверсивные.

Если обе группы вентилях имеют одну общую систему фазового управления, то статические характеристики двухкомплектного преобразователя не будут отличаться от однокомплектного с переключателем.

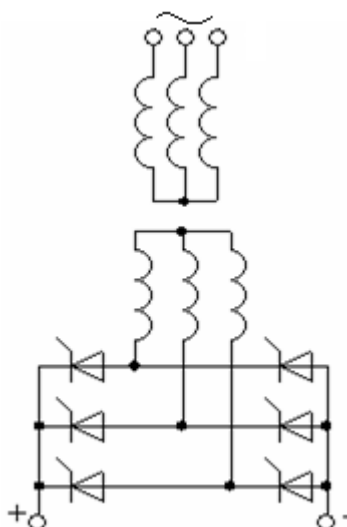


Рис. 1.6. Мостовая симметричная схема

Если обе группы вентиля имеют индивидуальные системы фазового управления, то в зависимости от их согласования будет меняться регулировочная характеристика преобразователя. При согласовании регулировочных характеристик вентиляльных групп в 90° регулировочная характеристика преобразователя такая же, как и для однокомплектного преобразователя.

Системы с линейным согласованием называются согласованными, а с нелинейным - несогласованными.

1.3.2. Статические, динамические характеристики и режимы работы реверсивных тиристорных электроприводов

В настоящее время система реверсивный тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока (РТП-ДПТ) находит широчайшее применение в электрооборудовании различных отраслей.

1.3.2.1. Статические характеристики в режиме прерывистого тока

В режиме прерывистого тока, проводящий тиристор (или пара тиристоров), прекращает проводить ток до момента отпирания тиристора следующей фазы. В результате угловая продолжительность тока в тиристоре λ становится меньше углового интервала управления $\frac{2\pi}{m_B}$ выпрямителя (m_B – число фаз или пульсов за период преобразователя), появляются участки, где ток равен нулю, а коммутация и перекрытие вентиля в процессе коммутации отсутствуют, т.е. R_k (фиктивное активное

сопротивление, падение напряжения на котором эквивалентно уменьшению среднего значения напряжения выпрямителя в результате перекрытия тиристоров из-за наличия индуктивностей L_{ϕ} в фазах) равно нулю.

Силовая цепь системы управляемый выпрямитель – двигатель в этом случае может быть представлена однофазной эквивалентной схемой, изображенной на рис. 1.7, которая содержит ЭДС переменного тока $e(t)$, ЭДС вращения двигателя $E(\omega)$, эквивалентное сопротивление и индуктивность силовой цепи

$$R = R_{ц.дв} + R_{\phi} \quad \text{и} \quad L = L_{ц.дв} + L_{\phi},$$

где $R_{\phi} = R_{2\phi}$ и $L_{\phi} = L_{2\phi}$ – для нулевых и однофазной мостовой схем выпрямления;

$R_{\phi} = 2 \cdot R_{2\phi}$ и $L_{\phi} = 2 \cdot L_{2\phi}$ – для трехфазной мостовой схемы.

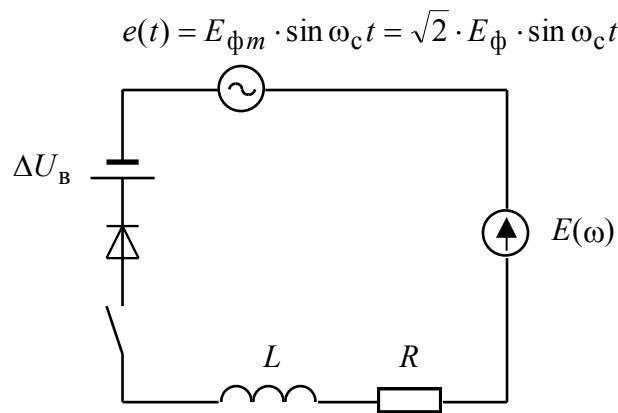


Рис. 1.7. Схема замещения управляемого выпрямителя в режиме прерывистого тока

Внешние характеристики преобразователя $U_d(I_d)$ и электромеханические характеристики привода $\omega(I_d)$ при работе выпрямителя в режиме прерывистого тока существенно нелинейны (рис. 1.8) и не могут быть записаны в общем виде. Их можно определить численными методами. Расчет ведется следующим образом: задаются значением угла управления α , при котором рассчитывается требуемая характеристика, и, изменяя значения углового интервала λ в пределах от 0 до $\frac{2\pi}{m_B}$ радиан, определяют параметры характеристики:

- среднее значение выпрямленного тока (А):

$$I_d = I_a = i \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_\phi}{R} ; \quad (1.1)$$

- значение угловой скорости вращения двигателя ($\text{рад}/\text{с}$):

$$\omega = \frac{\varepsilon \cdot \sqrt{2} \cdot E_\phi - \Delta U_B}{c} ; \quad (1.2)$$

- среднее значение напряжения выпрямителя (В):

$$U_d = \varepsilon \cdot \sqrt{2} \cdot E_\phi - \Delta U_B + I_d \cdot R_{ц.дв} ; \quad (1.3)$$

- среднее значение выпрямленной ЭДС (В):

$$E_d = \varepsilon \cdot \sqrt{2} \cdot E_\phi - I_d \cdot R_{2\phi} \text{ или } E_d = \varepsilon \cdot \sqrt{2} \cdot E_\phi, \quad (1.4)$$

где $E_\phi = E_{2\phi}$ в нулевых и однофазной мостовой схемах, а $E_\phi = E_{2л}$ в трехфазной мостовой схеме выпрямления;

- значение ЭДС вращения двигателя в относительных единицах:

$$\varepsilon = \cos \Theta \cdot \frac{\sin(\nu_0 - \Theta) - \sin(\nu_0 - \Theta + \lambda) \cdot \exp(\lambda \cdot \text{ctg} \Theta)}{1 - \exp(\lambda \cdot \text{ctg} \Theta)}, \quad (1.5)$$

$$\varepsilon = \frac{E + \Delta U_B}{\sqrt{2} \cdot E_\phi} ;$$

- значение тока в относительных единицах:

$$i = \frac{m_B}{2\pi} \cdot [\cos \nu_0 - \cos(\lambda + \nu_0) - \lambda \cdot \varepsilon], \quad (1.6)$$

$$i = \frac{I}{\frac{\sqrt{2} \cdot E_\phi}{R}} ;$$

где $\nu_0 = \alpha + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m_B} \right)$ – угол управления от начала положительной полуволны синусоиды фазной ЭДС (рад);

α – угол управления от точки естественной коммутации (рад);

$$\Theta = \text{arctg} \left(\frac{\omega_c \cdot L}{R} \right).$$

В режиме идеального холостого хода ($I_{ср} = 0$) ЭДС E_d , выпрямленное напряжение U_d и скорость двигателя ω достигают своих максимальных значений, зависящих от угла управления:

$$E_{dxx} = \sqrt{2} \cdot E_\phi = E_{\phi m}; \quad (1.7)$$

$$U_{dxx} = \sqrt{2} \cdot E_{\phi} - \Delta U_B; \quad (1.8)$$

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{\phi} - \Delta U_B}{c}, \quad (1.9)$$

если $\nu_0 \leq \pi/2$ или $\alpha \leq \pi/m_B$, и

$$E_{dxx} = \sqrt{2} \cdot E_{\phi} \cdot \cos\left(\nu_0 - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2} \cdot E_{\phi} \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{m_B}\right); \quad (1.10)$$

$$U_{dxx} = \sqrt{2} \cdot E_{\phi} \cdot \cos\left(\nu_0 - \frac{\pi}{2}\right) - \Delta U_B; \quad (1.11)$$

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{\phi} \cdot \cos\left(\nu_0 - \frac{\pi}{2}\right) - \Delta U_B}{c}, \quad (1.12)$$

если $\nu_0 > \pi/2$ или $\alpha > \pi/m_B$.

При значении угла проводимости $\lambda = 2\pi/m_B$ наступает режим начально-непрерывного тока, являющийся граничным между режимами прерывистого и непрерывного токов (рис. 1.8, а, б). В этом режиме нет интервалов нулевого тока, но нет и процесса коммутации. Построение граничной характеристики, представляющей собой множество точек с координатами $I_{гр}$ и $U_{дгр}$ или $I_{гр}$ и $\omega_{гр}$, осуществляется по той же методике: задаваясь значением $\lambda = 2\pi/m_B$ необходимо изменять угол управления α от 0 до 180° .

Следует отметить особенность работы управляемого выпрямителя в режиме прерывистого тока: очередной тиристор можно включить подачей управляющего импульса только в тот момент, когда ЭДС вращения двигателя окажется меньше мгновенного значения переменной ЭДС.

Регулировочные характеристики управляемого выпрямителя и тиристорного преобразователя в целом в режиме прерывистого тока также оказываются существенно нелинейными (рис.1.9). Они могут быть построены графическим способом или рассчитаны численными методами как зависимости $I_d(\alpha)$, затем $I_d(U_{уп})$ и, наконец, $\Delta E_{дi}(U_{уп})$, где $\Delta E_{дi} = I_d \cdot R_{яц}$, при постоянстве значения ЭДС (скорости вращения) двигателя $E = \text{const}$. При этом в зоне прерывистых токов существенно уменьшается коэффициент усиления преобразователя (рис. 1.9, б, в), он также нелинейно зависит от величины средневыпрямленного тока и его снижение характеризуется отношением:

$$\frac{\Delta\alpha_{\text{н}}}{\Delta\alpha_{\text{п}}} \text{ или } \frac{\Delta U_{\text{уп.н}}}{\Delta U_{\text{уп.п}}},$$

где $\Delta\alpha_{\text{н}}$ и $U_{\text{уп.н}}$, $\Delta\alpha_{\text{п}}$ и $U_{\text{уп.п}}$ – интервалы изменения угла и напряжения управления соответственно в непрерывном и дискретном преобразователе, обеспечивающие нарастание выпрямленного тока от нуля до значения граничного тока в дискретном преобразователе при $E = \text{const}$.

1.3.2.2. Статические и динамические характеристики реверсивных тиристорных преобразователей в режиме непрерывного тока

Однополярная проводимость тиристорных выпрямителей не позволяет получить реверсивный преобразователь с помощью одного комплекта тиристоров без применения контактных переключателей. Поэтому реверсивные тиристорные преобразователи практически всегда состоят из двух комплектов (групп) тиристоров, каждый из которых проводит ток нагрузки в одном из направлений. Управление комплектами вентилей может быть раздельное и совместное.

Преобразователи с раздельным управлением.

Группы тиристоров при раздельном управлении не работают одновременно, поэтому статические и динамические характеристики реверсивного преобразователя не отличаются от характеристик нереверсивного преобразователя. Специфика реверсивного преобразователя проявляется лишь в моменты переключения групп, когда нагрузка отключается от одной группы и подключается к другой. Эта специфика определяется характером согласования регулировочных характеристик (рис. 1.10) групп тиристоров и величиной временной паузы при переключении.

Согласование характеристик определяется выбором начальных углов управления:

- $\alpha_{1\text{нач}} = \alpha_{2\text{нач}} = 90^\circ$. Характеристики согласованы в области непрерывных токов (рис. 1.10, а). В области прерывистых токов имеет место неоднозначность характеристик, что является причиной значительного скачка напряжения преобразователя при каждом переключении групп.

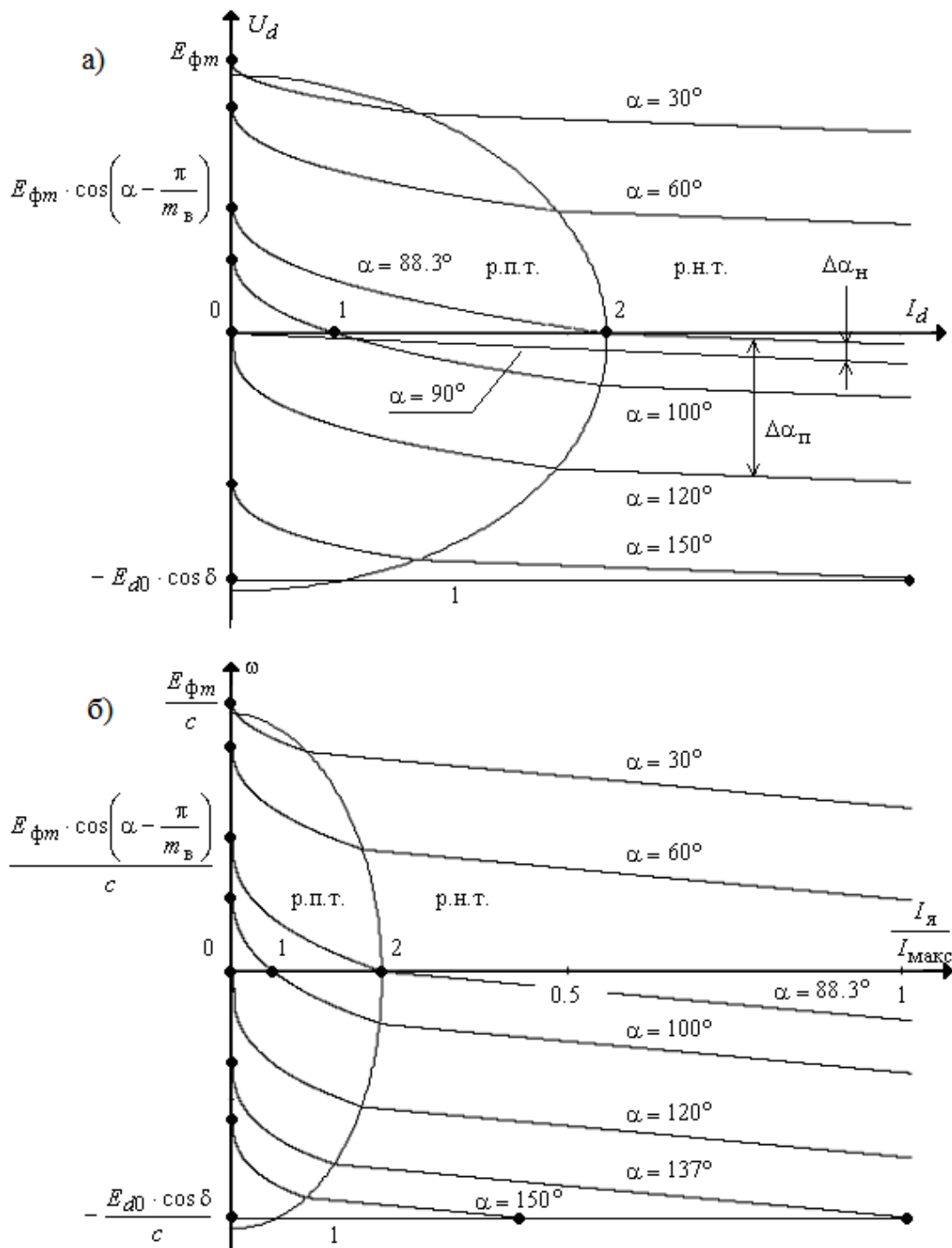


Рис. 1.8. Статические характеристики системы тиристорный преобразователь-двигатель: а) внешние характеристики преобразователя; б) электромеханические характеристики двигателя

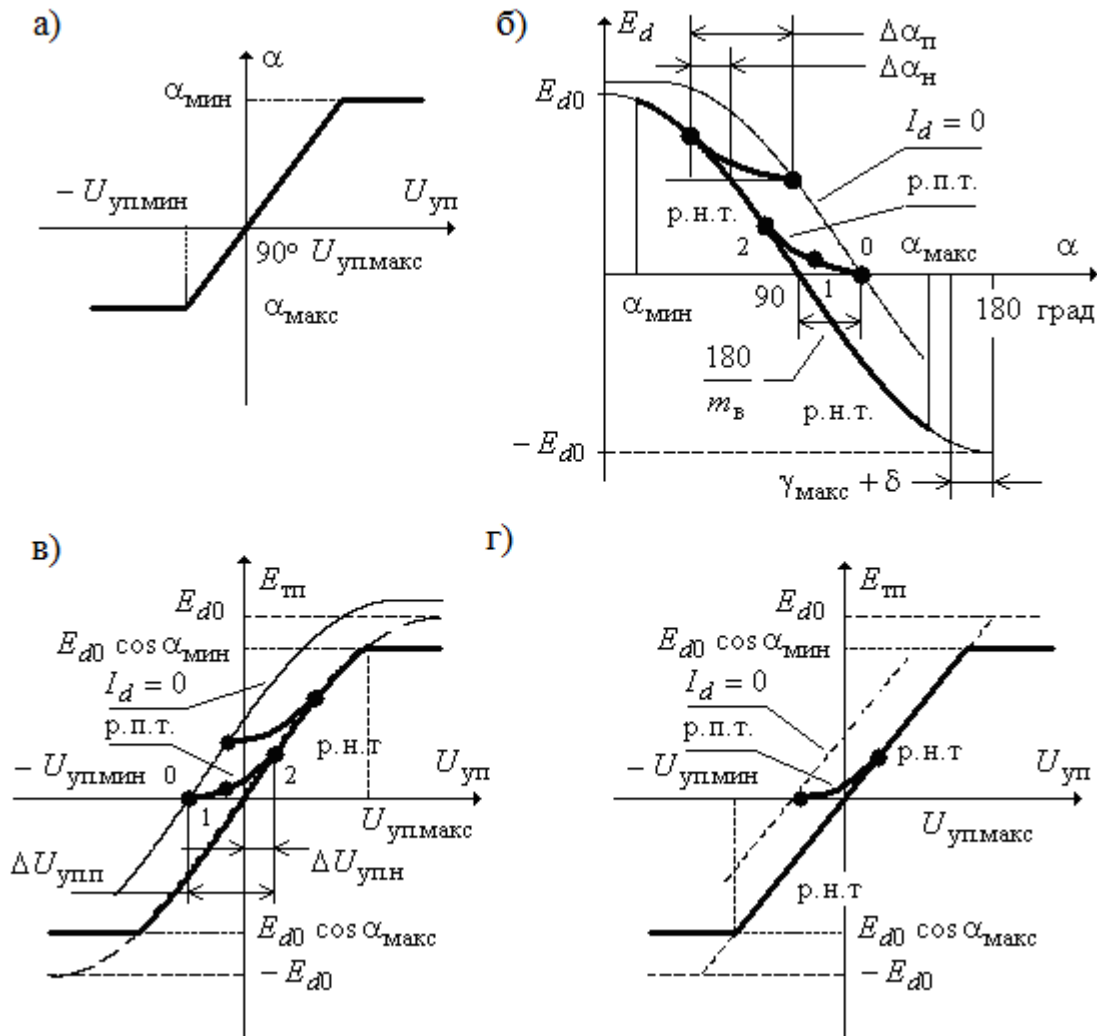


Рис. 1.9. Статические характеристики системы тиристорный преобразователь – двигатель: а) – регулировочные характеристики СИФУ $\alpha(U_{уп})$; б) регулировочные характеристики управляемого выпрямителя $E_d(\alpha)$; в), г) регулировочные характеристики тиристорного преобразователя $E_{тп}(U_{уп})$ соответственно при СИФУЛ и СИФУА

- $\alpha_{1нач} = \alpha_{2нач} = 90^\circ + \frac{180^\circ}{m_b}$. Характеристики согласованы в области

прерывистых токов и разведены в области непрерывных токов (рис. 1.10, б). В зоне сигналов управления ΔU_y преобразователь работает в режиме прерывистых токов. В преобразователях средней и большой мощности это относительно малые по величине токи, которые практически не создают момент двигателя. Поэтому система автоматического регулирования электропривода в этой зоне оказывается практически

разомкнутой до момента входа преобразователя в зону непрерывных токов, когда ток и момент двигателя начинают быстро нарастать в соответствии с управляющим сигналом.

- $\alpha_{1\text{нач}} = \alpha_{2\text{нач}} > 90^\circ + \frac{180^\circ}{m_b}$. В характеристике реверсивного преобразователя появляется зона нечувствительности.

Наличие паузы t_3 при переключении групп снижает динамические качества реверсивного преобразователя с раздельным управлением.

Гармонический сигнал на входе преобразователя вызывает соответствующую реакцию лишь при частотах сигнала, не превышающих

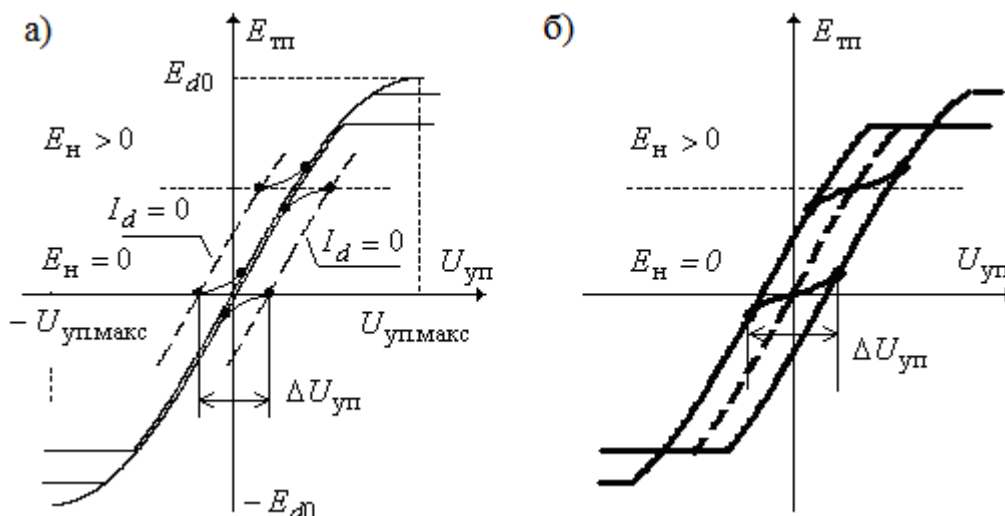


Рис. 1.10. Регулировочные характеристики тиристорного преобразователя с раздельным управлением (СИФУЛ): а) – при согласовании $\alpha_{\text{нач}} = 90^\circ$; б) – при согласовании $\alpha_{\text{нач}} = 120^\circ$

значение $f_y < \frac{1}{2 \cdot t_3}$, вне зависимости от амплитуды этого сигнала.

Практически применяются следующие параметры настройки преобразователей с раздельным управлением:

- Начальный угол $\alpha_{\text{нач}} = 120^\circ$ и $t_3 \leq 0.001\text{с}$ для следящих и регулируемых электроприводов с повышенными требованиями к регулировочным и динамическим характеристикам. Обязательно применение устройств линеаризации характеристик преобразователя в режиме прерывистых токов.

- Начальный угол $\alpha_{\text{нач}} > 90^\circ$, практически $\alpha_{\text{нач}} = (100 \div 115)^\circ$, и $t_3 = (2 \div 7) \cdot 10^{-3}\text{с}$, для электроприводов средней и большой мощности и электроприводов общепромышленного назначения. Возможно применение

адаптивных регуляторов тока при значительной зоне прерывистых токов для следящих электроприводов и регулируемых электроприводов, работающих при холостом ходе, например, при ударной нагрузке.

- Начальный угол $\alpha_{\text{нач}} > 90^\circ$ (практически $\alpha_{\text{нач}} = 95^\circ$) для систем возбуждения электрических машин.

Поскольку комплекты вентиля реверсивного тиристорного преобразователя с раздельным управлением не работают одновременно, все полученные результаты анализа работы нереверсивных преобразователей справедливы и для реверсивных с раздельным управлением. Внешние характеристики управляемого выпрямителя и электромеханические характеристики привода для каждой группы аналогичны приведенным на рис. 1.9.

Преобразователь с совместным управлением.

Регулировочные характеристики преобразователя $E_{\text{тп}}(U_{\text{уп}})$ и электромеханические характеристики привода $\omega(I_{\text{я}})$ при работе в выпрямительном и инверторном режимах представлены на рис. 1.11. При совместном управлении группами тиристоров образуются замкнутые контуры, по которым под действием разности ЭДС групп может протекать, минуя цепь нагрузки, уравнивающий ток. Для того чтобы исключить протекание постоянного тока в уравнительном контуре в установившихся режимах работы, необходимо, учитывая его одностороннюю проводимость, выполнить условие: средняя ЭДС инверторной группы $E_{\text{ди}}$ должна быть равна или больше средней ЭДС выпрямительной группы $E_{\text{дв}}$:

$$E_{\text{ди}} \geq E_{\text{дв}}. \quad (1.13)$$

Теперь только различие (по величине и по форме) переменных составляющих ЭДС групп $e_{\text{~и}}$ и $e_{\text{~в}}$ вызывает появление однополярного пульсирующего уравнивающего тока с периодом повторения, равным интервалу дискретности преобразователя $T = \frac{2\pi}{m_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{с}}}$. Для ограничения величины тока в допустимых пределах в уравнительные контуры включают дополнительные индуктивности – уравнительные реакторы.

Условию (1.13) соответствует следующее согласование углов управления тиристорами групп реверсивного преобразователя:

$$\alpha_1 + \alpha_2 \geq 180^\circ. \quad (1.14)$$

Идеальное координирование регулировочных характеристик групп тиристорov достигается при согласованном управлении:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ \quad (1.15)$$

и абсолютной симметрии силовых схем и систем управления групп преобразователя (рис. 1.11, а). При согласованном управлении по уравнительному контуру всегда протекает ток, носящий начально-непрерывный характер, что исключает режим прерывистого тока нагрузки (заменяется режимом переменного тока). В результате регулировочная характеристика преобразователя однозначна. Внешние характеристики преобразователя и электромеханические характеристики привода линейны, в том числе и в области малых токов (рис. 1.11, б), а преобразователь в любой момент готов без каких-либо задержек реверсировать ток. Таким образом, реверсивный тиристорный преобразователь с совместным согласованным управлением группами эквивалентен по своим статическим характеристикам непрерывным реверсивным устройствам (например, генератору постоянного тока).

Однако при согласованном управлении уравнительный ток имеет максимальное значение. Разведение углов управления (рассогласованное управление)

$$\alpha_1 + \alpha_2 > 180^\circ \quad (1.16)$$

приводит к уменьшению уравнительного тока, но схема приобретает свойства преобразователя с отдельным управлением: регулировочные характеристики оказываются разведенными, появляется зона прерывистого тока и внешние характеристики преобразователя и электромеханические характеристики привода в зоне малых нагрузок оказываются нелинейными.

В переходных режимах группы преобразователя могут оказаться несогласованными между собой по двум причинам:

- из-за различного быстродействия систем управления группами (что малосущественно для современных СИФУ);
- из-за неполной управляемости вентиляей.

Неполная управляемость проявляется в разной скорости протекания процессов в группах при их быстром переходе из выпрямительного режима в инверторный и наоборот: ЭДС группы, переходящей в инверторный режим, изменяется по синусоиде фазного напряжения проводящего ток тиристора, тогда как ЭДС группы, переходящей в выпрямительный режим, следует непосредственно за управляющим сигналом. Следствием такого рассогласования является появление динамического уравнительного тока, величина которого значительно (в 5...15 раз) превосходит статический уравнительный ток. Для

предотвращения динамического уравнительного тока необходимо ограничить скорость изменения угла управления на уровне:

$$\left| \frac{d\alpha}{dt} \right| \leq \omega_c. \quad (1.17)$$

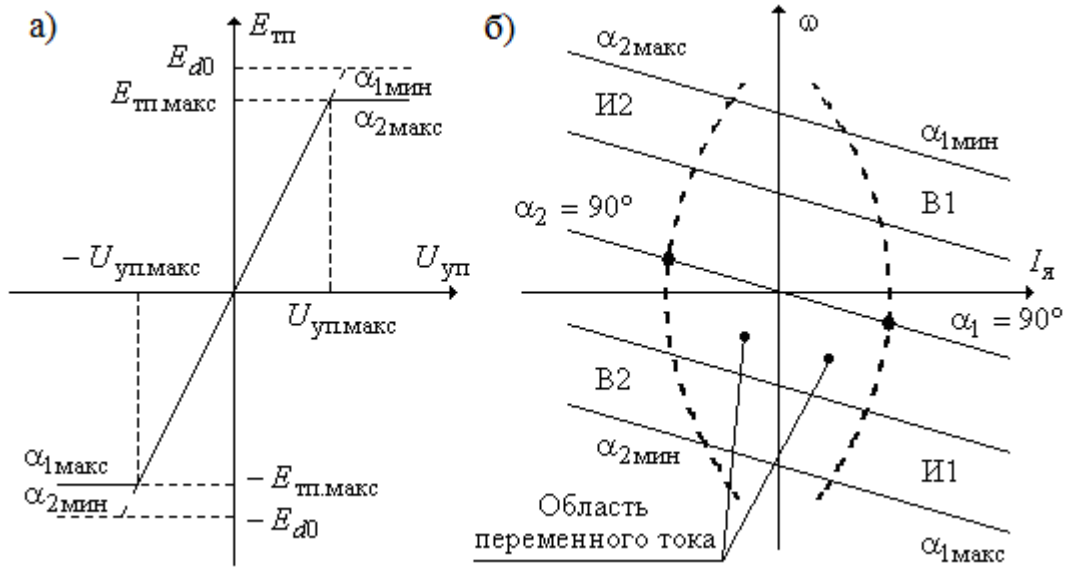


Рис. 1.11. Статические характеристики системы тиристорный преобразователь-двигатель с совместным согласованным управлением ($\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$): а) регулировочная характеристика преобразователя с СИФУА; б) электромеханические характеристики привода; В – выпрямитель; И – инвертор

Более высокое быстродействие реверсивного тиристорного преобразователя с совместным управлением группами не может быть реализовано без появления динамического уравнительного тока.

Ограничение скорости изменения угла управления чаще всего осуществляется косвенным путем через ограничение скорости изменения управляющего напряжения на входе системы управления преобразователя. В простейшем случае это достигается установкой апериодического фильтра с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{T_\phi p + 1}, \quad (1.18)$$

где

$$T_\phi \geq \frac{\alpha_{макс} - \alpha_{мин}}{\omega_c}. \quad (1.19)$$

Диапазон изменения T_{ϕ} составляет: 0,006...0,008 с. Постоянная времени в передаточной функции преобразователя в этом случае определяется по выражению

$$T_{\text{тп}} = T_{\text{сифу}} + T_{\phi}. \quad (1.20)$$

Установка инерционного фильтра на входе тиристорного преобразователя приводит к снижению его динамических свойств и, следовательно, реализуемого на его основе электропривода. При реализации быстродействующих систем электропривода более целесообразно ограничивать непосредственно величину производной напряжения управления на входе СИФУ (электропривод серии ЭТб), выбрав ее из условия:

$$\text{для СИФУЛ} \quad \frac{2 \cdot \omega_c \cdot U_{\text{оп.макс}}}{\pi} > \left| \frac{dU_y}{dt} \right| > 4 \cdot U_{\text{оп.макс}} \cdot f_{\text{рзп}}; \quad (1.21)$$

$$\text{для СИФУА} \quad \omega_c \cdot U_{\text{оп.макс}} > \left| \frac{dU_y}{dt} \right| > 2 \cdot \pi \cdot U_{\text{оп.макс}} \cdot f_{\text{рзп}}, \quad (1.22)$$

где $f_{\text{рзп}}$ – требуемая полоса пропускания замкнутого контура скорости (Гц).

Ограничение динамического уравнительного тока может быть достигнуто применением регулятора тока. Однако автоматическое регулирование уравнительного тока оказывается, с точки зрения динамических характеристик преобразователя, эквивалентно отдельному управлению группами.

Особенностью преобразователей с совместным управлением является то, что обе группы одновременно подключены к цепи нагрузки (рис. 1.11) и при реверсе тока имеет место коммутация групп, т.е. одновременное протекание токов групп (ток в одной из них уменьшается, а в другой возрастает). Это обстоятельство, способствует ускорению переходных процессов тока в сравнении с преобразователями с отдельным управлением. С другой стороны, это приводит к тому, что силовая цепь преобразователя характеризуется переменной структурой, поэтому она не может быть представлена апериодическим звеном с постоянными параметрами.

Параметры силовой цепи для отдельной группы тиристоров (рис. 1.12) находятся по формулам

$$R_{\text{тп}} = R_{\phi} + R_{\kappa} + R_y; \quad (1.23)$$

$$L_{\text{тп}} = L_{\phi} + k_{\text{нас}} \cdot L_y, \quad (1.24)$$

где R_{ϕ} , L_{ϕ} и R_{κ} определяются по выражениям, в зависимости от схемы управляемого выпрямителя;

R_{γ} и L_{γ} – активное сопротивление и индуктивность уравнивательных реакторов в цепи протекания тока нагрузки;

$k_{\text{нас}}$ – коэффициент насыщения уравнивательных реакторов: для ненасыщающихся реакторов $k_{\text{нас}}=1$; для насыщающихся реакторов $k_{\text{нас}}=0,3 \div 0,5$.

В режиме, когда ток проводит только одна группа тиристорov, параметры якорной цепи для преобразователя с совместным управлением находятся по выражениям:

$$R_{\text{яц}} = R_{\text{тп}} + R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{др}} + 0.1 \cdot R_{\text{дв.гор}} ; \quad (1.25)$$

$$L_{\text{яц}} = L_{\text{тп}} + L_{\text{дв}} + L_{\text{др}} . \quad (1.26)$$

Эти значения параметров следует использовать при расчетах переходных процессов в электроприводе.

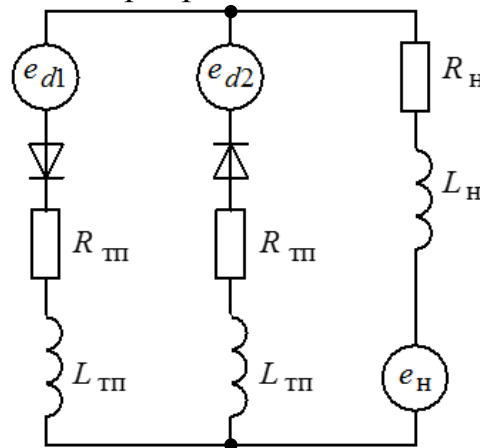


Рис. 1.12. Схемы замещения силовой цепи реверсивного тиристорного преобразователя с совместным управлением группами

В режиме, когда обе группы преобразователя работают параллельно, параметры якорной цепи определяются следующим образом:

$$R_{\text{яц}} = \frac{R_{\text{тп}}}{2} + R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{др}} + 0.1 \cdot R_{\text{дв.гор}} ; \quad (1.27)$$

$$L_{\text{яц}} = \frac{L_{\text{тп}}}{2} + L_{\text{дв}} + L_{\text{др}} . \quad (1.28)$$

Найденные параметры следует использовать при проверке устойчивости системы регулирования привода.

Практически применяются следующие значения начальных углов настройки преобразователей с совместным управлением:

- $\alpha_{\text{нач}} = 90^\circ$ для электроприводов, к управляемости которых предъявляются высокие требования;
- $\alpha_{\text{нач}} > 90^\circ$ (практически до 135°) с целью уменьшения уравнивающего тока.

1.3.2.3. Характеристика тиристорного преобразователя в зависимости от способа управления

Сравнительная оценка тиристорных преобразователей с совместным и раздельным управлением для электроприводов постоянного тока с точки зрения затрат на реализацию эксплуатационных свойств, приведена в табл. 1.2.

Кратко сформулируем основные недостатки и достоинства тиристорных преобразователей в зависимости от способа управления.

Для преобразователей с совместным управлением.

Недостатки:

- наличие уравнивающих токов и, как следствие, необходимость установки уравнивающих реакторов, дополнительная загрузка трансформатора и тиристоров;
- необходимость ограничения скорости изменения управляющего сигнала.

Достоинства:

- отсутствие режимов прерывистого тока и, как следствие, линейные характеристики преобразователя и привода;
- естественный процесс реверса тока при изменении полярности управляющего сигнала.

Для преобразователей с раздельным управлением.

Недостатки:

- наличие режимов прерывистого тока и, как следствие, нелинейные характеристики преобразователя и привода;
- необходимость выработки сигнала управления процессом переключения групп;
- временная пауза при реверсировании.

Достоинство: нет уравнивающих токов и уравнивающих реакторов.

Таблица 1.2

Преобразователи с совместным управлением	Преобразователи с отдельным управлением
Капитальные вложения	
<p>Дроссели нужны в любом случае.</p> <p>Наличие уравнивающих токов увеличивает установленную мощность</p>	<p>Дроссели могут потребоваться для ограничения пульсаций тока.</p> <p>Некоторое усложнение схемы управления</p>
Потери в преобразователе	
<p>Уравнивающие токи увеличивают потери</p>	<p>Нет уравнивающих токов</p>
Качество регулирования	
<p>Непрерывный ток может поддерживаться во всех рабочих режимах, коэффициент усиления остается постоянным, управление непрерывное</p>	<p>Прерывистый ток снижает коэффициент усиления. Снижение коэффициента усиления ухудшает быстродействие. Имеется пауза в управлении</p>
Надежность	
<p>Так как один мост всегда работает инвертором, высока вероятность опрокидывания или прорыва инвертора.</p> <p>Аварийные токи между мостами из-за сбоя в системе фазового управления в некоторой степени ограничены дросселями</p>	<p>Инвертирование имеет место только в течение рекуперативного торможения.</p> <p>Сбой в системе управления тиристорами приводит к короткому замыканию</p>

1.3.2.4. Рекомендации по применению способов управления реверсивными тиристорными преобразователями

При современном уровне развития электроники тиристорные преобразователи с отдельным управлением обеспечивают практически одинаковые статические и динамические характеристики привода, что и преобразователи с совместным управлением. Поэтому областью

целесообразного применения тиристорных преобразователей с совместным управлением следует считать:

- системы следящего электропривода;
- системы регулируемого электропривода, работающего на холостом ходу с резко переменной нагрузкой.

Однако при этом равнозначные результаты могут быть получены и в случае применения преобразователей с отдельным управлением при линейаризации характеристик преобразователя в режиме прерывистого тока или при применении адаптивного регулятора тока.

1.3.3. Области применения реверсивных тиристорных преобразователей

1.3.3.1. Электропривод металлорежущих станков

Неоспоримые преимущества регулируемых электроприводов с вентильными преобразователями привели к их широкому применению в различных отраслях народного хозяйства, в том числе и в станкостроении [3].

В настоящее время регулируемый электропривод с тиристорным преобразователем в сочетании с широкорегулируемым при постоянной мощности двигателем постоянного тока (ДПТ) в механизмах главного движения и высокомоментными ДПТ в механизмах подачи является одним из основных технических средств повышения эффективности и качества технологических процессов в станках с ЧПУ. В связи с этим как в нашей стране, так и за рубежом разрабатывается и выпускается серийно значительное количество тиристорных электроприводов, предназначенных для механизмов главного движения и подач металлообрабатывающих станков.

Основной особенностью современных разработок является широкое применение микроэлектронной интегральной элементной базы, которая позволяет не только существенно сократить габариты тиристорных преобразователей, но и резко повысить надежность при одновременном усложнении схем, обеспечивая новые качественные показатели приводов. Заметно резкое снижение габаритов и массы, наблюдается переход к выполнению соединений методом печать — печать, применению многослойных печатных плат и использованию технологии производства ЭВМ.

Промышленные серии электроприводов постоянного тока можно классифицировать по различным признакам следующим образом:

- способу регулирования частоты вращения двигателя: однозонные (регулирование изменением напряжения якоря до номинальной частоты вращения); двухзонные (регулирование изменением напряжения якоря — I зона и регулирование ослаблением магнитного потока от n_n до n_{max} — II зона);

- числу рабочих квадрантов привода: двухквadrантные (нереверсивные); четырехквadrантные (реверсивные);

- исполнению силовой схемы в цепи якоря: однофазная; трехфазная несимметричная (мостовая, нулевая); трехфазная симметричная (мостовая, нулевая); трехфазная неуправляемая мостовая схема; шестифазная схема;

- структуре привода: система с суммирующим усилителем; система подчиненного регулирования, имеющая регулятор скорости и регулятор тока;

- назначению: регулируемый привод (с обратной связью по частоте вращения); следящий привод (с обратной связью по положению).

По комплектации электрооборудование станков разделяется на следующие группы:

1. Комплектные электроприводы для механизмов главного движения и отдельно для механизмов подач станков, включающие: преобразователь, электродвигатель со встроенным тахогенератором (возможно и с датчиком пути — резольвером), силовой трансформатор и реакторы (последние два элемента могут отсутствовать). Обычно комплект поставляется без шкафа управления. Преобразователь, силовой трансформатор и другие элементы устанавливаются в шкафы управления, изготавливаемые станкозаводами. Изготовитель комплекта гарантирует только заданные характеристики электроприводов. Указанный способ комплектации получил наибольшее применение в станках средних и малых размеров.

2. Комплекты электрооборудования станков, включающие систему ЧПУ, преобразователи для электроприводов главного движения и подач станков и электроавтоматику станков. Дополнительно станкозаводы получают электродвигатели со встроенными тахогенераторами, датчики пути и электрооборудование, устанавливаемое на станке. Изготовитель комплекта гарантирует заданные характеристики электроприводов и систем управления. Такой способ комплектации наиболее приемлем для станков с ЧПУ, особенно для сложных многооперационных станков с инструментальными магазинами.

3. Комплектные устройства управления, включающие преобразователи для электроприводов главного движения и подачи станков и электроавтоматику станков. Дополнительно станкозаводы получают электродвигатели со встроенными тахогенераторами, датчики пути и электрооборудование, устанавливаемое на станке. Изготовитель комплекта гарантирует заданные характеристики электроприводов и электроавтоматики. Указанный способ комплектаций применяется в основном в тяжелых станках.

Основные требования, предъявляемые к станочным электроприводам.

Требования к электроприводам и системам управления станками определяются технологией обработки, конструктивными возможностями станка и режущего инструмента.

Основными технологическими требованиями являются обеспечение: самого широкого круга технологических режимов обработки с использованием современного режущего инструмента; максимальной производительности; наибольшей точности обработки; высокой чистоты обрабатываемой поверхности; высокой степени повторяемости размеров деталей в обрабатываемой партии (стабильности).

Удовлетворение всем этим и другим требованиям зависит от характеристик станка и режущего инструмента, мощности главного привода и электромеханических свойств приводов подачи и систем управления.

При всем многообразии станков требования, предъявляемые к приводам, определяются главным образом не тем, к какой группе относится станок, а для какого движения предназначен привод: главного, подачи или вспомогательного. Именно это определяет мощность, способ и диапазон регулирования скорости, необходимую плавность регулирования, требования к динамике, жесткости и стабильности характеристик.

1.3.3.2. Электроприводы подъемных кранов

В мировой практике электропривода изготавливаются и совершенствуются специализированные серии электрических машин и аппаратов, отвечающих особым требованиям эксплуатации крановых механизмов. В отличие от большинства электроприводов производственных механизмов крановый электропривод, как правило, не имеет наперед заданного производственного цикла. Режим его работы зависит от многих факторов, а нагрузка и знак ее изменяются в весьма

широких пределах. Поэтому крановое электрооборудование должно удовлетворять следующим особым условиям эксплуатации:

- изменению нагрузки в широком диапазоне значений и направления движения;
- большому диапазону регулирования скорости при различных значениях и направлениях нагрузки;
- высокой частоте включений;
- постоянному чередованию периодов работы и пауз;
- значительному внешнему механическому воздействию на электрооборудование, находящееся на движущихся частях кранов;
- большой вероятности различных перегрузок;
- повышенным требованиям к надежности устройств отключения и торможения электропривода.

Одним из важнейших факторов, определяющих специфику кранового электропривода является процесс работы крановых механизмов в условиях производственных помещений, где находятся люди и ценное оборудование. Перечисленные выше условия относятся полностью к электрооборудованию грузоподъемных кранов всех типов и назначений, а также могут быть распространены на малые грузоподъемные средства-тельферы и кран-балки.

Системы с тиристорными управляемыми выпрямителями (реверсивными преобразователями) постоянного тока для кранов имеют три исполнения:

- с реверсивным выпрямительным устройством, в котором используются два встречно включенных выпрямителя и якорь исполнительного электродвигателя, получая питание от одного выпрямителя, работает в режиме потребления энергии при угле регулирования до 90° и в режиме рекуперации при противоположном направлении вращения и угле регулирования свыше 90° , при питании от второго выпрямителя осуществляются также два режима, но при противоположном направлении тока, благодаря чему обеспечивается работа во всех четырех квадрантах механических характеристик;
- с нереверсивным выпрямительным устройством, для изменения направления тока используется контактный реверс главной цепи автоматически без тока, когда напряжение на выводах электродвигателя становится выше напряжения, создаваемого выпрямителем или по команде оператора при закрытом выпрямителе;
- с нереверсивным выпрямительным устройством, которое обеспечивает работу электродвигателя в режимах потребления энергии и

рекуперации при изменении направления вращения (I и IV квадранты), а для обеспечения работы во II и III квадрантах осуществляется изменение направления тока в обмотке возбуждения электродвигателя.

1.3.3.3. Электропривод прокатного производства

В металлургической промышленности прокатное производство, являющееся одним из основных технологических процессов обработки металла давлением, наиболее широко использует системы автоматизированного электропривода.

Технологические и конструктивные особенности станов.

Реверсивные клетки могут иметь, помимо горизонтальных прокатных валков, пару вспомогательных вертикальных валков для обжатия боковых граней заготовки.

Такие клетки называются универсальными (слябинги, некоторые толстолистовые и балочные станы).

Различают групповой и индивидуальный приводы прокатных валков.

Основные преимущества индивидуального привода валков перед групповым состоят в увеличении предельной мощности, которая может быть приложена к каждому валку; уменьшении суммарного момента инерции, приходящегося на единицу мощности привода; отсутствии шестеренной клетки, потери мощности в которой могут достигать 5 % мощности привода; отсутствии необходимости в точном подборе диаметра валков. Уменьшение момента инерции в свою очередь дает ряд преимуществ: снижается продолжительность прокатки вследствие увеличения допустимых ускорений и замедлений; сокращается расход энергии на тонну проката и на нагрев электрических машин; менее опасными становятся срывы при захвате металла; скорость захвата из-за изменения условий захвата может быть увеличена, что приводит к возрастанию средней скорости прокатки и, следовательно, к росту производительности стана.

Основными недостатками индивидуального привода в сравнении с групповым являются: увеличение количества электрооборудования; усложнение схемы управления, связанное с необходимостью регулирования соотношения скоростей и выравнивания нагрузок двигателей; увеличение в некоторых случаях размеров машзала, так как угол наклона шпинделей не должен превышать 6...8°, вследствие чего двигатели должны быть удалены от клетки на большое расстояние.

Системы питания главных электроприводов реверсивных станов горячей прокатки.

Питание прокатных двигателей реверсивных станов осуществляется от генераторов или от управляемых вентильных преобразователей. При вентильном приводе для питания якоря двигателя может применяться как неревверсивный, так и реверсивный вентильный преобразователь. В первом случае реверс двигателя осуществляется изменением направления тока возбуждения двигателя с помощью реверсивного тиристорного возбуждателя двигателя. Во втором случае реверс двигателя достигается изменением полярности напряжения на якоре двигателя. Первый вариант дешевле, однако приводит к непроизводительной потере времени, даже при значительных форсировках возбуждения двигателя.

Наибольшее распространение получили реверсивные преобразователи для питания якоря двигателя. Повышенные капитальные вложения в этом случае компенсируются улучшенными динамическими показателями привода, так как реверсивный преобразователь позволяет осуществлять управление без потерь времени на изменение направления магнитного потока двигателя. В этих преобразователях используются перекрестная или встречно-параллельные реверсивные схемы.

Перекрестные схемы получили распространение, когда применялись в основном многоанодные ртутные вентили. В настоящее время в связи с распространением тиристоров чаще изменяется встречно-параллельная схема, имеющая лучшие технико-экономические показатели.

1.4. Принципиальная электрическая схема станда

Принципиальная электрическая схема представлена на рис. 1.1 [1].

Источник GA - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Тиристорный преобразователь/регулятор TP, включенный как реверсивный тиристорный преобразователь, питает регулируемым напряжением обмотку якоря двигателя постоянного тока D1, работающего с независимым возбуждением.

Блоки дросселей BL1 и BL2 ограничивают уравнивающий ток реверсивного преобразователя TP.

Трехфазная трансформаторная группа TT преобразует напряжение источника GA в пониженное напряжение, подаваемое на тиристорный преобразователь/регулятор TP.

Блок BB1 выпрямляет однофазное сетевое напряжение для питания обмотки возбуждения двигателя D1.

Блок BB2 выпрямляет однофазное напряжение снимаемое с блока AT для подачи в статорную цепь нагрузочной машины D2.

Преобразователь угловых перемещений DD генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения IB электромашинного агрегата.

Машина переменного тока D2, работает в режиме генератора и обеспечивает нагрузку на валу исследуемого двигателя. Автотрансформатор АТ питает статорную обмотку машины D2 регулируемым напряжением.

С помощью мультиметров блока ВМ контролируются ток и напряжение якоря двигателя D1, а также токи, протекающие через тиристоры блока ТР.

1.5. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования системы реверсивного тиристорного электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения:

- проверка работоспособности стенда;
- снятие электромеханической $\omega = f(I)$ и механической $\omega = f(M)$ характеристик двигателя D1 при угле управления $\alpha = 30^\circ$;
- построение электромеханической $\omega = f(I)$ и механической $\omega = f(M)$ характеристик двигателя D1 при изменении напряжения U_1 на якоре двигателя;
- снятие регулировочной характеристики $\omega = f(U_1)$;
- определение координат и параметров системы электропривода в статических и переходных режимах.

1.6. Проверка работоспособности стенда

Убедиться, что предохранители всех блоков исправны!

Проверку осуществлять по схеме рис. 1.1. Для этого необходимо проделать следующее:

- Убедиться, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Соединить гнезда «ТК» источника ГА.
- Подключить гнезда защитного заземления "⊕" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника ГА.
- Соединить вилки питания напряжения 220В устройств, используемых в эксперименте, сетевыми шнурами с розетками удлинителя.

- Подключить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Установить переключатели блоков дросселей ВЛ в положение «0,5 Гн».
- Перевести переключатели номинальных фазных напряжений вторичных полуобмоток трансформатора ТТ в положение «127 В».
- Включить выключатели «СЕТЬ» тиристорного преобразователя регулятора ТР, блока мультиметров ВМ, указателя частоты вращения ИВ.
- Установить по индикатору преобразователя ТР значение угла управления α равное 100 градусов, вращая его регулировочную рукоятку.
- Нажать кнопку «РЕВЕРСИВНЫЙ 3Ф ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ» на лицевой панели преобразователя ТР и удерживать ее до тех пор, пока не загорится расположенный рядом с ней светодиод.
- Включить выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора АТ.
- Повернуть регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ в крайнее левое положение.
- Включить источник ГА. О наличии фазных напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Разогнать двигатель D1, вращая регулировочную рукоятку тиристорного преобразователя ТР.

1.7. Снятие электромеханической $\omega = f(I_1)$ и механической $\omega = f(M_1)$ характеристик электропривода при угле управления $\alpha = 30^\circ$ преобразователя ТР

Электромеханическую $\omega = f(I_1)$ и механическую $\omega = f(M_1)$ характеристики снимать при номинальных параметрах двигателя D1 и минимальном угле управления α° .

- Подготовить стенд к работе по пункту 1.6.
- Установить угол управления $\alpha = 30^\circ$, вращая регулировочную рукоятку преобразователя ТР.
- Изменять ток якоря I_1 (до 1 А) двигателя D1 и заносить показания амперметра А1 и вольтметра V блока ВМ, а также указателя ИВ частоты вращения в табл. 1.3, вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ.

Таблица 1.3

I_1, A								
$U_1, \text{В}$								
$n, \text{мин}^{-1}$								

• По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник ГА нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

• Вычислить значения угловой частоты вращения ω по выражению (1.13) и электромагнитного момента M_1 двигателя по формуле (1.14) и занести полученные результаты в табл. 1.4, используя данные табл. 1.3.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}. \quad (1.13)$$

$$M_1 = \frac{60}{2\pi n} (U_1 - 65 \cdot I_1) \cdot I_1. \quad (1.14)$$

Таблица 1.4

$M_1, \text{Н} \cdot \text{м}$								
$\omega, \text{с}^{-1}$								

Привести пример расчета.

• Построить электромеханическую $\omega = f(I_1)$ и механическую $\omega = f(M_1)$ характеристики системы по данным табл. 1.3 и табл. 1.4.

1.8. Снятие электромеханической $\omega = f(I_1)$ и механической $\omega = f(M_1)$ характеристик двигателя D1 при изменении напряжения U_1 на якоре двигателя

Характеристики $\omega = f(I_1)$ и $\omega = f(M_1)$ снимать при различном напряжении питания U_1 двигателя D1, устанавливаемого вращением регулировочной рукоятки преобразователя ТР, т.е. изменением угла регулирования α .

• Подготовить стенд к работе по пункту 1.6.
 • Установить угол управления $\alpha = 40^\circ$, вращая регулировочную рукоятку преобразователя ТР.

• Изменять ток якоря I_1 (до 1 А) двигателя D1, вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ и заносить показания

амперметра А1 и вольтметра V блока ВМ, а также указателя ИВ частоты вращения в таблицу, аналогичную табл. 1.3.

- Прodelать опыт для больших значений угла управления α° (по заданию преподавателя).

- По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

- Вычислить значение угловой скорости вращения ω двигателя D1 по выражению (1.13) и его электромагнитного момента M_1 по формуле (1.14) и занести полученные результаты в таблицы, аналогичные табл. 1.4, используя данные полученных таблиц, аналогичных табл. 1.3.

- Построить механическую $\omega = f(M_1)$ и электромеханическую $\omega = f(I_1)$ характеристики системы по данным таблиц, аналогичных табл. 1.3 и табл. 1.4.

1.9. Снятие регулировочной характеристики $\omega = f(U_1)$

Снятие регулировочной характеристики $\omega = f(U_1)$ осуществлять в соответствии с ниже приведенной последовательности:

- Подготовить стенд к работе по пункту 1.6.
- Установить ток I_1 якоря двигателя D1 равным 0,5 А (амперметр А1) и поддерживать его в ходе эксперимента с помощью автотрансформатора АТ, вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ.
- Изменять угол управления α° в диапазоне $30 \dots 170^\circ$ и заносить показания вольтметра V блока ВМ и указателя ИВ в табл. 1.5, вращая регулировочную рукоятку преобразователя ТР.

Таблица 1.5

$U_1, В$							
$n, \text{мин}^{-1}$							

- По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

• Построить регулировочную характеристику $\omega = f(U_1)$, по данным табл. 1.5.

1.10. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.
3. Таблицы опытных данных и характеристики $\omega = f(I_1)$ для всех опытов на одном графике; $\omega = f(M_1)$ для всех опытов на другом графике.
4. Показатели регулирования скорости вращения двигателя (диапазон, точность, плавность).
5. Таблица опытных данных и график $\omega = f(U_1)$.
6. Краткие выводы.

1.11. Контрольные вопросы

- 1.11.1. Описать структуру и принцип действия реверсивного тиристорного электропривода.
- 1.11.2. Каковы достоинства и недостатки системы РТП-ДПТ?
- 1.11.3. Изобразить электромеханические $\omega = f(I_1)$ и механические $\omega = f(M_1)$ характеристики системы реверсивного тиристорного электропривода при различных углах управления α° .
- 1.11.4. Перечислить условия при которых система РТП-ДПТ переходит в режим прерывистого тока?
- 1.11.5. Привести формулы для определения координат граничных значений скорости вращения ($\omega_{гр}$) и тока ($I_{гр}$).

Литература

1. Карпеш М.А., Красногорцев И.Л., Сенигов П.Н. Силовая электроника. Руководство по выполнению базовых экспериментов. СЭ.001 РБЭ (911). – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2003. – 172 с.
2. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 4. Тиристорные преобразователи для электроприводов постоянного тока: учебное пособие /Л.С. Удут, Н.В., Кояин, О.П. Мальцева. – Издание 2-е переработанное и дополненное. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.
3. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

4. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –416 с.

5. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.

6. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. пособие для студ. Учреждений сред. проф. Образования. – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.

7. Электротехника: Учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова. – Челябинск: Изд-во Ю УрГУ, 2005. – 639 с.

8. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. 1980. – 339 с.

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕВЕРСИВНОГО ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С УПРАВЛЕНИЕМ ОТ КОМПЬЮТЕРА

2.1. Цель работы

Исследование электромеханических $\omega = f(I)$, динамических $\omega = f(t)$ характеристик, параметров, показателей и режимов работы реверсивного тиристорного электропривода при управлении от компьютера.

2.2. Оборудование стенда (перечень аппаратуры)

Аппаратная часть комплекса выполнена по блочному (модульному) принципу и содержит:

- составной лабораторный стол со встроенными контейнерами для хранения проводников и методических материалов, рамами для установки необходимых в эксперименте функциональных блоков, выкатной полкой для клавиатуры компьютера и подставкой для системного блока последнего;

- спроектированные натурные аналоги элементов выпрямительно-инверторных преобразователей;

- источники питания;

- нагрузки;

- измерительные преобразователи и приборы;

- IBM-совместимый персональный компьютер со встроенной платой ввода/вывода информации фирмы National Instruments [1].

Питание комплекса осуществляется от трехфазной электрической сети напряжением 380 В с нейтральным и защитным проводниками.

Параметры стенда:

- Потребляемая мощность В·А, не более.....1000

- Габариты (длина/ ширина/ высота), мм.....2750×900×1600

- Масса, кг, не более.....250

Программная часть комплекса включает:

- программную среду персонального компьютера (Windows 98/2000/XP);

- комплект специальных программ.

2.2.1. Назначения и описания функциональных блоков

Перечень функциональных блоков приводится в соответствии с рис. 2.1.

- Преобразователь угловых перемещений (DD). Предназначен для преобразования скорости вращения электрических машин в сигнал цифрового вида.

- Трехфазный источник питания (GA). Предназначен для питания комплекта трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.

- Тиристорный преобразователь / регулятор (TP). Предназначен для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока (режим преобразователя) и трехфазного асинхронного двигателя (режим регулятора). Преобразует трехфазное напряжение синусоидального тока в напряжение постоянного тока, а также в трехфазное напряжение переменной величины. Выходное напряжение регулируется вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ).

- Регулируемый автотрансформатор (AT). Предназначен для получения регулируемого однофазного напряжения.

- Выпрямитель (BB2). Предназначен для неуправляемого преобразования энергии трехфазного переменного тока в энергию постоянного тока.

- Блок диодов (BB1). Предназначен для моделирования диодов.

- Преобразовательный трансформатор (TT). Предназначен для преобразования трехфазного или однофазного переменного напряжения в переменное напряжение других параметров. Регулируется ступенчато вручную.

- Блок дросселей (BL). Предназначен для моделирования индуктивности. Регулируется ступенчато вручную.

- Указатель частоты вращения (IV). Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в аналоговой форме. Имеет выходные гнезда для подключения к ПЭВМ.

- Блок датчиков тока и напряжения (BM). Предназначен для получения нормированных гальванически не связанных с сетью сигналов, пропорциональных токам и напряжениям.

- Коннектор (KK). Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам платы ввода/вывода PCI 6024E (PCI 6023E) персонального компьютера.

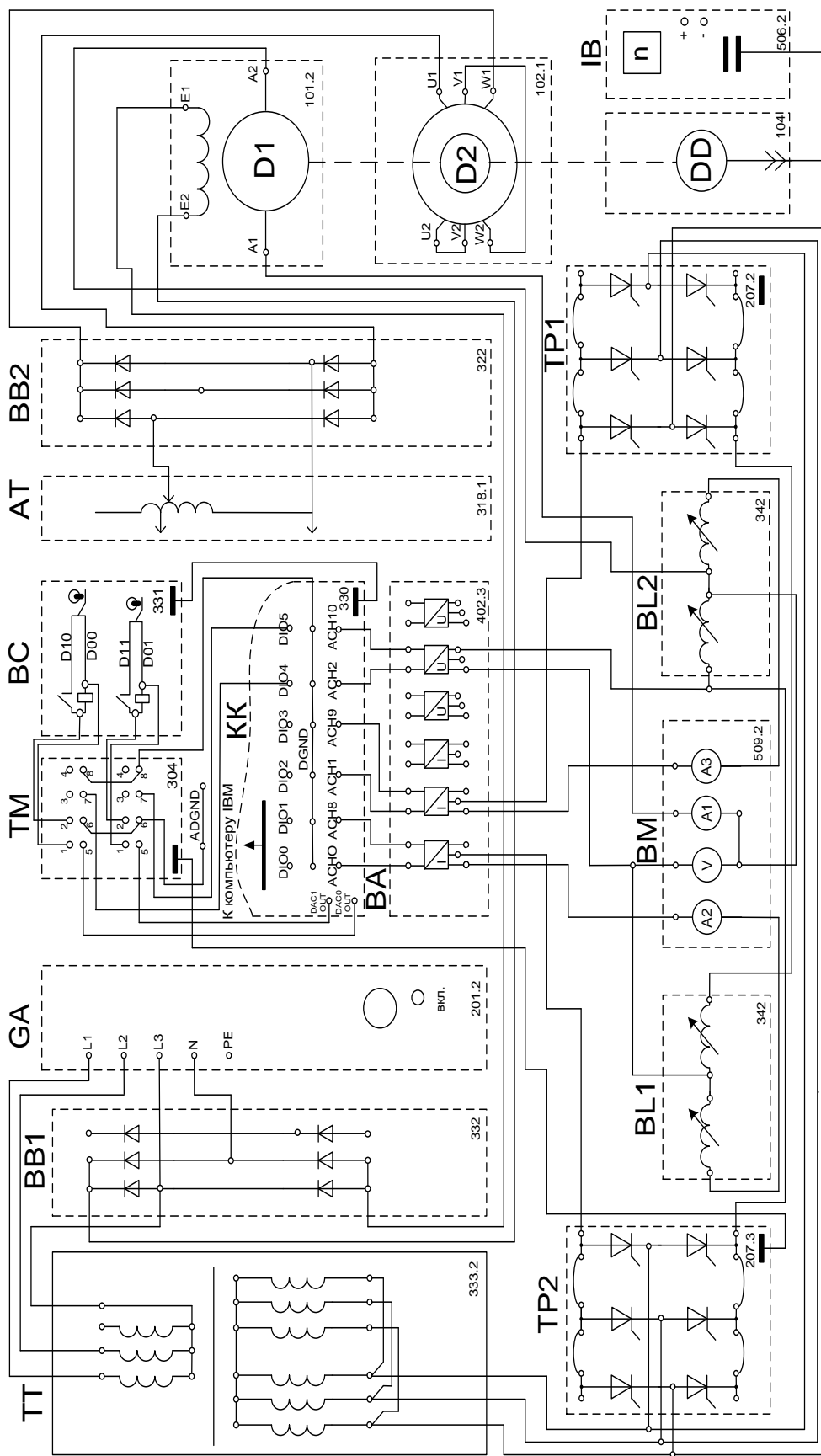


Рис. 2.1. Принципиальная электрическая схема реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока

- Блок ввода/вывода цифровых сигналов (BC). Предназначен для ввода сигналов типа «сухой контакт» и вывода сигналов через контакты промежуточного реле.

- Персональный компьютер (IBM). Предназначен для сбора, обработки и отображения данных режима работы комплекса, а также для автоматизированного управления последним.

- Исследуемая машина постоянного тока (D1, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением):

$$P_H = 90 \text{ Вт}; \quad \eta_n = 57,2 \%;$$

$$U_H = 220 \text{ В}; \quad \cos \varphi_n = 0,73;$$

$$I_H = 0,56 \text{ А}; \quad R_{\text{я}} = 86 \text{ Ом};$$

$$n_H = 1500 \text{ об/мин}; \quad R_{\text{о.в.}} = 1,15 \text{ кОм.}$$

$$I_{\text{вн}} = 0,2 \text{ А};$$

- Нагрузочная машина переменного тока (D2, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$P_H = 120 \text{ Вт}; \quad \cos \varphi_n = 0,66;$$

$$U_H = 220 \text{ В}; \quad x_1 = 0,087 \text{ о.е.};$$

$$I_H = 0,44/ 0,76 \text{ А}; \quad R_1 = 0,18 \text{ о.е.};$$

$$n_H = 1350 \text{ об/мин}; \quad x_2' = 0,15 \text{ о.е.};$$

$$\eta_n = 63 \%; \quad R_2' = 0,150 \text{ о.е.}$$

Исследуемая и нагрузочная машины жестко соединены между собой и представлены в виде электромашинного агрегата, дополненного маховиком и преобразователем угловых перемещений.

2.2.2. Обозначения и параметры исследуемой аппаратуры

Обозначение и параметры изучаемой схемы приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
GA	Трехфазный источник питания	201.2	~400 В; 16 А

Продолжение таблицы 2.1

ТТ	Преобразовательный трансформатор	333.2	Первичная обмотка: У – 380 В / 320 В·А; 2 вторичные полуобмотки: 0,5 А каждая / номинальные фазные напряжения: 42, 73, 127 В
ВВ1	Блок диодов	332	2 А / 800 В 6 диодов
ТР1, ТР2	Тиристорный преобразователь / регулятор	207.2 207.3	~3×400 В / 2 А 6 тиристоров
ВЛ1, ВЛ2	Блоки дросселей	342	2×3 Гн / 0,5 А
АТ	Регулируемый автотрансформатор	318.1	0...240 В / 2 А
ВВ2	Выпрямитель	322	Трехфазный мост 3×400 В / 2 А
ТМ	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд
ВМ	Блок мультиметров	509.2	2 мультиметра ≈0...1000 В; ≈0...10 А ≈; 0...20 МОм
ВМ	Блок датчиков тока и напряжения	402.3	3 измерительных преобразователя «ток-напряжение» 5А / 1А / 5 В; 3 измерительных преобразователя «напряжение-напряжение» 1000 В / 100 В / 5 В
ІВМ	Персональный компьютер	550	ІВМ совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура

BC	Блок ввода-вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выходов
IB	Указатель частоты вращения	506.2	-2000...0...2000 мин ⁻¹
D1	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт, -220 В, 1500 мин ⁻¹
D2	Асинхронный двигатель	106	120 Вт, ~220 В, 1350 мин ⁻¹
DD	Преобразователь угловых перемещений вала	104	6 выходных каналов, 1000 имп./оборот, 0...6000 мин ⁻¹

2.2.3. Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра

Для измерения трех базовых электрических величин (напряжения, тока и омического сопротивления) используется мультиметр. Схемы подключения мультиметра для измерения этих величин приведены на рис. 2.2, рис. 2.3, рис. 2.4. До его подключения к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- установить род тока (постоянный/переменный);
- выбрать диапазон измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильно подсоединить зажимы мультиметра к измеряемой цепи.

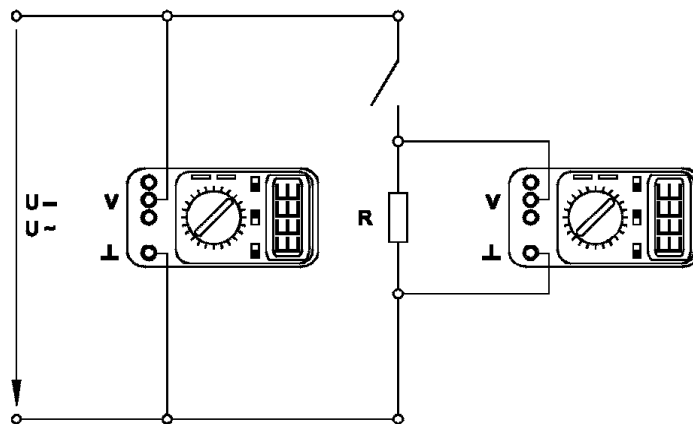


Рис. 2.2. Схема присоединения мультиметра (как вольтметра) для измерения напряжения

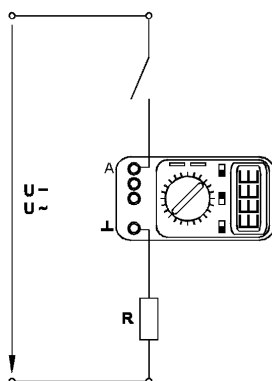


Рис. 2.3. Схема присоединения мультиметра (как амперметра) для измерения тока

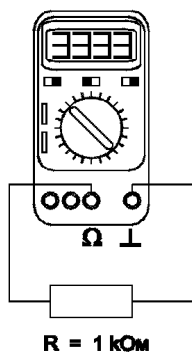


Рис. 2.4. Схема присоединения мультиметра (как омметра) для измерения омического сопротивления

2.2.4. Программное обеспечение «Силовая электроника»

В программное обеспечение учебного лабораторного комплекса «Силовая электроника» входит универсальная программа «ВП Преобразовательная техника» и 8 специализированных программ.

Для работы этих программ необходимо наличие установленного драйвера Ni-DAQ платы PCI 6023E или PCI 6024E версии не ниже 7.0.1 с включенной поддержкой Microsoft Visual Basic.

В работе используется программа «Реверсивный преобразователь.exe», ее возможности:

- Все виртуальные рукоятки можно вращать или путем «поворота» их указателем мышки, или используя клавиши со стрелками, PageUp, PageDown, Home, End, или вращая колесико мышки (в двух последних случаях необходимо вначале «ткнуть» мышкой в интересующий элемент управления, т.е. выделить его).

- Задать определенное значение величины, связанной с виртуальной рукояткой также можно путем ввода этого значения в соответствующее поле в середине рукоятки (если поле имеется).

- Осциллограф может работать в режиме отображения мгновенных или средних значений величин. Переключать режим его работы можно, используя виртуальный скользящий переключатель.

- Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществлять обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

- Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

- Двигать и масштабировать осциллограммы можно только при незапущенном управлении (виртуальная кнопка «Запустить управление» должна быть активна, кнопка «Остановить управление» - неактивна).

2.3. Общие сведения

2.3.1. Реверсивные тиристорные преобразователи

Реверсивным является преобразователь, через который выпрямленный ток может протекать в обоих направлениях. Так как вентили пропускают ток только в одном направлении, то для изменения направления тока при одном комплекте вентилях необходимо применять переключатель в главной цепи либо использовать два комплекта (группы) вентилях, каждый из которых работает в своем направлении [2].

При применении специальных полупроводниковых приборов-симисторов, через которые ток протекает в обоих направлениях, в реверсивном преобразователе используется только один комплект приборов. Все реверсивные преобразователи делятся на два класса: однокомплектные и двухкомплектные [3].

Однокомплектные преобразователи с переключателями имеют такие же силовые схемы, как и нереверсивные преобразователи.

Двухкомплектные преобразователи выполняются по встречно-параллельной или перекрестной схеме. При встречно-параллельной схеме обе вентильные группы питаются от общей обмотки трансформатора. В перекрестной схеме каждая вентильная группа питается от отдельной

обмотки, т.е. имеется два нереверсивных преобразователя, включенных перекрестно по отношению к нагрузке.

Система тиристорный преобразователь–двигатель постоянного тока (ТП–ДПТ) осуществляет преобразование энергии переменного тока в энергию постоянного тока и обратное преобразование для питания двигателя.

Уравнение электромеханической характеристики электропривода (ЭП) в системе ТП–ДПТ

$$\omega = \frac{E_{d\max} \cos \alpha - \Delta U_B - R_{я\Sigma} I_{я}}{c},$$

а механической

$$\omega = \frac{E_{d\max} \cos \alpha - \Delta U_B}{c} - \frac{R_{я\Sigma} M}{c^2},$$

где $R_{я\Sigma} = R_{э.пр} + R_p + R_{я}$;

R_p – сопротивление обмотки сглаживающего реактора,

$R_{я}$ – сопротивление обмотки якоря,

$R_{э.пр}$ – эквивалентное сопротивление преобразователя.

Односторонняя проводимость вентильного преобразователя затрудняет осуществление реверса в таких системах. На практике применяется изменение полярности на выводах якоря с помощью двух групп вентильного преобразователя (рис. 2.5).

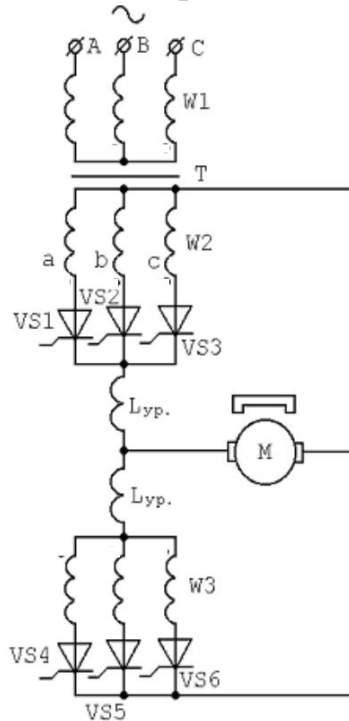


Рис. 2.5. Двухкомлектная перекрестная нулевая схема

Для приводов, где требуется максимально быстрое действие при реверсе, а также необходимы двигательный и тормозной режимы при одном и том же направлении вращения, применяются схемы с двумя комплектами вентиля, каждый из которых проводит ток в одном направлении, благодаря чему создается эффект двухсторонней проводимости преобразователей в целом [4].

При работе электропривода в двигательном режиме один из комплектов работает как выпрямитель, а при рекуперации работает в режиме инвертора.

Выпрямительный режим. Выпрямление предназначено для преобразования переменного тока в постоянный и заключается в том, что нагрузка циклически переключается с одной фазы источника переменного напряжения на другую. Такое переключение, осуществляемое вентилями, называется коммутацией [3].

В неуправляемом выпрямителе в каждый момент времени проводит тот вентиль, у которого выше потенциал анода. Очередной вентиль начинает проводить в точке естественного отпирания.

В управляемом выпрямителе отпирание очередного вентиля в общем случае производится со сдвигом на угол регулирования α° (рис. 2.6) по отношению к точке естественного отпирания. Поэтому в интервале $0 - \alpha^\circ$ проводит вентиль у которого потенциал анода ниже, чем у вентиля, который откроется при угле α° .

Выпрямленным напряжением U_d является напряжение между положительным и отрицательным зажимами выпрямителя. Выпрямленный ток I_d – ток нагрузки выпрямителя, проходящий от положительного зажима к отрицательному. Значения U_d и I_d определяются по выражениям 2.1–2.4:

- среднее значение выпрямленного тока (А)

$$I_d = I_a = i \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot E_\phi}{R} ; \quad (2.1)$$

- значение угловой скорости вращения двигателя (рад/с)

$$\omega = \frac{\varepsilon \cdot \sqrt{2} \cdot E_\phi - \Delta U_B}{c} ; \quad (2.2)$$

- среднее значение напряжения выпрямителя (В)

$$U_d = \varepsilon \cdot \sqrt{2} \cdot E_\phi - \Delta U_B + I_d \cdot R_{ц.дв} ; \quad (2.3)$$

- среднее значение выпрямленной ЭДС (В)

$$E_d = \varepsilon \cdot \sqrt{2} \cdot E_\phi - I_d \cdot R_{2\phi} \text{ или } E_d = \varepsilon \cdot \sqrt{2} \cdot E_\phi, \quad (2.4)$$

где $E_\phi = E_{2\phi}$ в нулевых и однофазной мостовой схеме, $E_\phi = E_{2л}$ в трехфазной мостовой схемах выпрямления;

- значение ЭДС вращения двигателя в относительных единицах

$$\varepsilon = \cos\Theta \cdot \frac{\sin(\nu_0 - \Theta) - \sin(\nu_0 - \Theta + \lambda) \cdot \exp(\lambda \cdot \text{ctg}\Theta)}{1 - \exp(\lambda \cdot \text{ctg}\Theta)}, \quad (2.5)$$

$$\varepsilon = \frac{E + \Delta U_B}{\sqrt{2} \cdot E_\phi},$$

где λ – угловой интервал проводимости вентиля [5].

Заданными обычно бывают средние значения выпрямленного напряжения и тока. Выпрямленное напряжение пульсирует, причем число пульсаций p за период зависит от числа фаз m вторичной обмотки трансформатора и схемы соединения вентиля [3].

Для простых нулевых схем $p = m$. Для сложных нулевых и мостовых схем, состоящих из параллельного или последовательного соединения n простых схем, напряжения питания которых сдвинуты по фазе на угол $2\pi/mn$, $p = mn$.

Для всех схем период пульсации составляет $2\pi/p$. Если $p = m$, то период пульсации $2\pi/m$; если $p = 2m$, то период пульсации π/m .

Для уменьшения периода пульсации, т.е. для увеличения периодичности, в простых схемах прибегают к увеличению числа фаз m . Однако одновременно с этим уменьшается период открытого состояния вентиля, что ухудшает его использование. В сложных схемах добиваются увеличения периодичности без уменьшения времени работы каждого вентиля, что предопределило широкое применение этих схем.

Среднее значение выпрямленного напряжения U_d равно высоте прямоугольника с основанием, равным длительности периода пульсации рис. 2.6.

На рис. 2.6 представлены диаграммы напряжение на вторичных обмотках трансформатора e_{2a} , e_{2b} , e_{2c} ; выпрямленное напряжение U_d ; ток i_d , протекающий по вентилям катодной группы (расположен выше оси абсцисс), ток вентилях анодной группы (расположен ниже оси абсцисс) и напряжение на тиристоре, максимальное значение прямого и обратного напряжений на тиристоре $U_{впр.макс}$, $U_{вобр}$; γ – период коммутации тиристоров; Θ – ось времени, рад.

Зависимость среднего выпрямленного напряжения E_d от угла регулирования α° называется регулировочной характеристикой (рис. 2.7) и

при индуктивной нагрузке ($x_d=\infty$) является косинусоидой. В случае активной нагрузки ($x_d=0$) характеристика отличается от косинусоиды.

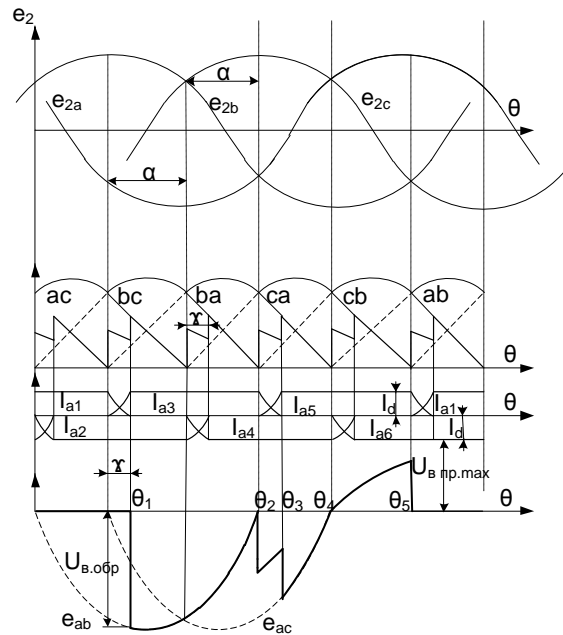


Рис. 2.6. Диаграммы напряжения преобразователя в выпрямительном режиме

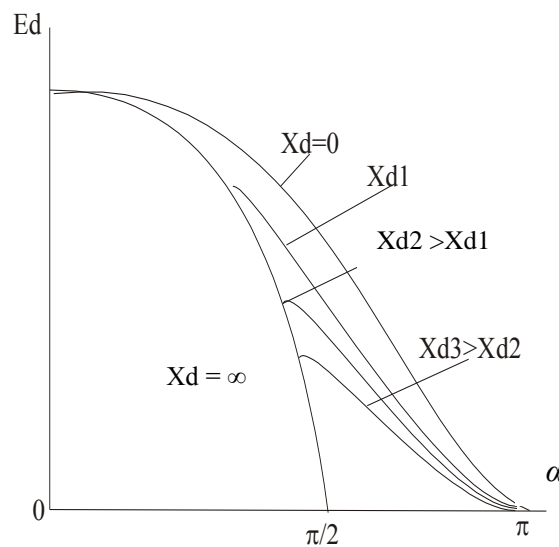


Рис. 2.7. Регулировочная характеристика преобразователя в выпрямительном режиме

Инверторный режим. Инвертор служит для преобразования постоянного тока в переменный. При работе преобразователя в

инверторном режиме энергия из цепи нагрузки передается в питающую сеть, т.е. в противоположном направлении по сравнению с выпрямительным режимом. Поэтому при инвертировании ток и ЭДС обмотки трансформатора направлены встречно, а при выпрямлении – согласно.

При инвертировании источником тока является ЭДС нагрузки (машина постоянного тока, индуктивность), которая должна превышать напряжение инвертора.

Как в инверторном, так и в выпрямительном режимах ток в преобразователе протекает в одном и том же направлении. Перевод преобразователя из выпрямительного режима в инверторный достигается изменением полярности ЭДС нагрузки и увеличением угла α° при индуктивной нагрузке сверх $\pi/2$. Инвертирование возможно только в управляемых преобразователях. Диаграммы напряжений инвертора представлены на рис. 2.8.

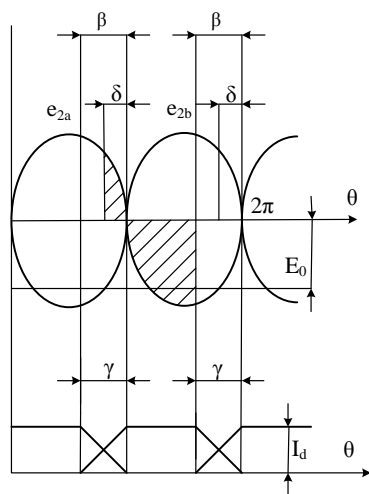


Рис. 2.8. Диаграммы напряжений преобразователя в режиме инвертора
Здесь E_0 - ЭДС источника постоянного тока; I_d - постоянная составляющая потребляемого инвертором тока; Θ - ось времени, рад.

В теории зависимых инверторов чаще пользуются не углом управления α° , как принято в теории управляемых выпрямителей, а углом опережения β° , связанным с углом управления α° соотношением $\alpha^\circ + \beta^\circ = \pi$.

При учёте индуктивных сопротивлений рассеяния силового трансформатора коммутация тока с одного тиристора на другой будет происходить не мгновенно, а в течение коммутационного интервала γ , в течение которого оба тиристора открыты и проводят ток. В результате на

восстановление управляющих свойств выходящего из работы тиристора остаётся только интервал δ , который определяется как $\delta = \beta - \gamma$.

В инверторе коммутация должна заканчиваться таким образом, чтобы закрывающийся вентиль успел восстановить свои запирающие свойства, пока на вентиле имеется отрицательное напряжение. Если этого не произойдет, то вентиль после появления на нем положительного напряжения может снова отпереться, так как к нему прикладывается прямое напряжение. Это приведет к опрокидыванию инвертора, при котором возникнет аварийный ток, так как ЭДС машины постоянного тока и трансформатора совпадут по направлению (режим КЗ при двойном напряжении).

Внешние характеристики инвертора представлены на рис. 2.9 и отличаются от характеристик выпрямителя тем, что с ростом нагрузки напряжение не падает, а увеличивается.

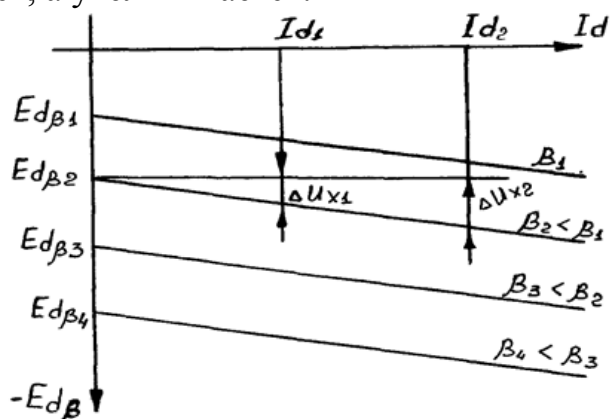


Рис. 2.9. Внешние характеристики преобразователя в режиме инвертора

2.3.2. Статические, динамические характеристики и режимы работы реверсивных тиристорных электроприводов

В реверсивных преобразователях используется два основных принципа управления комплектами вентиляй: совместное и отдельное.

Совместное управление предусматривает подачу от системы импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристорами импульсов управления одновременно на тиристоры обеих комплектов – VS1, VS3, VS5 (катодная группа) и VS2, VS4, VS6 (анодная группа). Схема реверсивного преобразователя изображена на рис. 2.10.

При этом за счет наличия угла сдвига между импульсами управления двух комплектов тиристоров, близкого к π , один из них работает в выпрямительном режиме, а другой, работая в инверторном режиме, ток не проводит. Для обеспечения такого управления между

средними значениями ЭДС выпрямителя и инвертора должно существовать соотношение $E_{ср.и} > E_{ср.в}$, однако за счет разности мгновенных значений ЭДС между комплектами тиристоров протекает уравнивающий ток. Для его ограничения предусмотрены уравнивательные реакторы $L-1$ и $L2$.

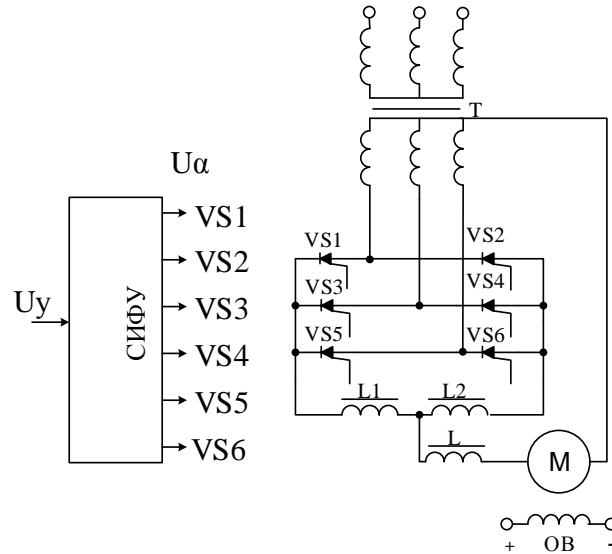


Рис.2.10. Схема реверсивного преобразователя системы ТП–ДПТ

Регулировочные характеристики преобразователя $E_{тп}(U_{уп})$ и электромеханические характеристики привода $\omega(I_{я})$ при работе в выпрямительном и инверторном режимах представлены на рис. 2.10. При совместном управлении группами тиристоров образуются замкнутые контуры, по которым под действием разности ЭДС групп может протекать, минуя цепь нагрузки, уравнивающий ток [5]. Для того чтобы исключить протекание постоянного тока в уравнительном контуре в установившихся режимах работы, необходимо, учитывая его одностороннюю проводимость, выполнить условие: средняя ЭДС инверторной группы $E_{ди}$ должна быть равна или больше средней ЭДС выпрямительной $E_{дв}$:

$$E_{ди} \geq E_{дв} . \quad (2.6)$$

Теперь только различие (по величине и по форме) переменных составляющих ЭДС групп $e_{\approx и}$ и $e_{\approx в}$ вызывает появление однополярного пульсирующего уравнивающего тока с периодом повторения, равным интервалу дискретности преобразователя $T = \frac{2\pi}{m_b \cdot \omega_c}$. Для ограничения величины уравнивающего тока в допустимых пределах в уравнивательные контуры включают дополнительные индуктивности – реакторы.

Условию (2.6) соответствует следующее условие согласования углов управления тиристорами групп реверсивного преобразователя:

$$\alpha_1 + \alpha_2 \geq 180^\circ. \quad (2.7)$$

Идеальное согласование регулировочных характеристик групп тиристорov достигается при согласованном управлении

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ \quad (2.8)$$

и абсолютной симметрии силовых схем и систем управления групп преобразователя (рис. 2.11,а). При согласованном управлении по уравнительному контуру всегда протекает ток, носящий начально-непрерывный характер, что исключает режим прерывистого тока нагрузки (заменяется режимом переменного тока). В результате регулировочная характеристика преобразователя однозначна. Внешние характеристики преобразователя и электромеханические характеристики привода линейны в том числе и в области малых токов (рис. 2.11,б), а преобразователь в любой момент готов без каких-либо задержек реверсировать ток. Таким образом, реверсивный тиристорный преобразователь с совместным согласованным управлением группами эквивалентен по своим статическим характеристикам непрерывным реверсивным устройствам (например, генератору постоянного тока).

Однако при согласованном управлении уравнительный ток имеет максимальное значение. Разведение углов управления (рассогласованное управление)

$$\alpha_1 + \alpha_2 > 180^\circ \quad (2.9)$$

приводит к уменьшению уравнительного тока, но схема приобретает свойства преобразователя с раздельным управлением: регулировочные характеристики оказываются разведенными, появляется зона прерывистого тока и внешние характеристики преобразователя и электромеханические характеристики привода в зоне малых нагрузок оказываются нелинейными.

В переходных режимах группы преобразователя могут оказаться несогласованными между собой по двум причинам:

- из-за различного быстродействия систем управления группами (что малосущественно для современных СИФУ);
- из-за неполной управляемости вентиляей.

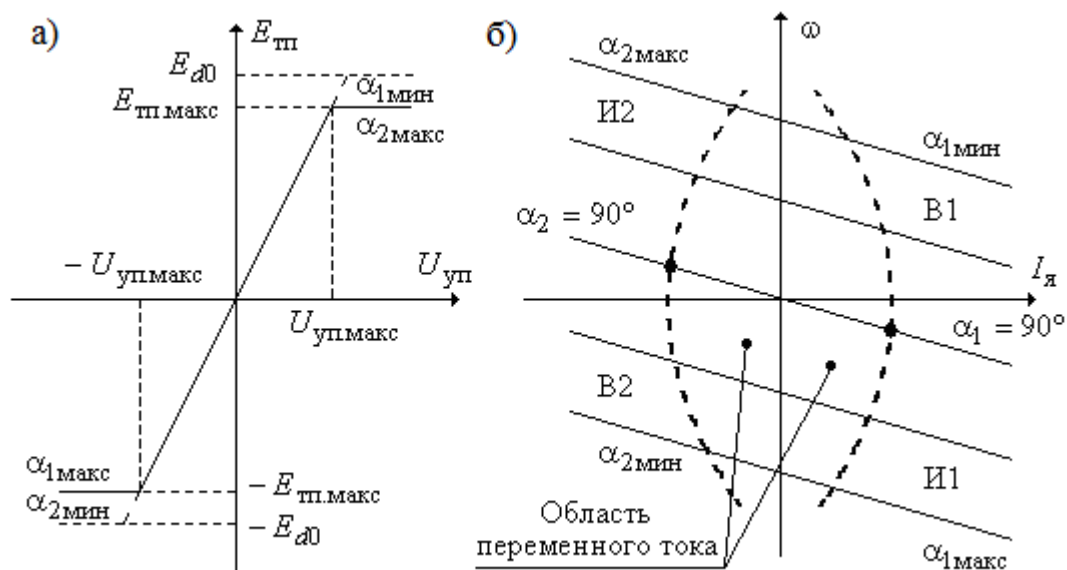


Рис. 2.11. Статические характеристики системы тиристорный преобразователь – двигатель с совместным согласованным управлением ($\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$):

- а) – регулировочная характеристика преобразователя с СИФУА;-
 б) – электромеханические характеристики привода; В – выпрямитель; И – инвертор

Неполная управляемость проявляется в разной скорости протекания процессов в группах при их быстром переходе из выпрямительного режима в инверторный и наоборот: ЭДС группы, переходящей в инверторный режим, изменяется по синусоиде фазного напряжения проводящего ток тиристора, тогда как ЭДС группы, переходящей в выпрямительный режим, следует непосредственно за управляющими сигналом. Следствием такого рассогласования является появление динамического уравнивающего тока, величина которого значительно (в 5...15 раз) превосходит статический уравнивающий ток. Для предотвращения динамического уравнивающего тока необходимо ограничить скорость изменения угла управления на уровне

$$\left| \frac{d\alpha}{dt} \right| \leq \omega_c, \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.10)$$

Более высокое быстродействие реверсивного тиристорного преобразователя с совместным управлением группами не может быть реализовано без появления динамического уравнивающего тока.

Ограничение скорости изменения угла управления чаще всего осуществляется косвенным путем, через ограничение скорости изменения управляющего напряжения на входе системы управления преобразователя.

В простейшем случае это достигается установкой апериодического фильтра с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{T_{\phi} p + 1}, \quad (2.11)$$

где

$$T_{\phi} \geq \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\omega_c}, \text{ с.} \quad (2.12)$$

Практически достаточно $T_{\phi} = 0.006 \div 0.008$ с. Постоянная времени в передаточной функции преобразователя в этом случае определяется по выражению

$$T_{\text{гп}} = T_{\text{сифу}} + T_{\phi}. \quad (2.13)$$

Установка инерционного фильтра на входе тиристорного преобразователя приводит к снижению его динамических свойств и, следовательно соответствующих показателей электропривода. При создании быстродействующих систем более целесообразно ограничивать непосредственно величину производной напряжения управления на входе СИФУ (электропривод серии ЭТб), выбрав ее из условия:

$$\text{для СИФУЛ} \quad \frac{2 \cdot \omega_c \cdot U_{\text{оп.макс}}}{\pi} > \left| \frac{dU_y}{dt} \right| > 4 \cdot U_{\text{оп.макс}} \cdot f_{\text{рзп}}; \quad (2.14)$$

$$\text{для СИФУА} \quad \omega_c \cdot U_{\text{оп.макс}} > \left| \frac{dU_y}{dt} \right| > 2 \cdot \pi \cdot U_{\text{оп.макс}} \cdot f_{\text{рзп}}, \quad (2.15)$$

где $f_{\text{рзп}}$ – требуемая полоса пропускания замкнутого контура скорости (Гц).

Ограничение динамического уравнивающего тока может быть достигнуто применением регулятора тока. Однако автоматическое регулирование уравнивающего тока оказывается, с точки зрения динамических характеристик преобразователя, эквивалентно отдельному управлению группами.

Особенностью преобразователей с совместным управлением является то, что обе группы одновременно подключены к цепи нагрузки (рис. 2.11) и при реверсе тока имеет место коммутация групп, т.е. одновременное протекание токов групп (ток в одной из них уменьшается, а в другой возрастает). Это обстоятельство, между прочим, способствует ускорению переходных процессов тока в сравнении с преобразователями с отдельным управлением. С другой стороны, это приводит к тому, что силовая цепь преобразователя характеризуется переменной структурой,

поэтому она не может быть представлена апериодическим звеном с постоянными параметрами.

Параметры силовой цепи для отдельной группы тиристорov (рис. 2.12) рассчитываются по формулам:

$$R_{\text{ТП}} = R_{\text{ф}} + R_{\text{к}} + R_{\text{у}}, \quad (2.16)$$

$$L_{\text{ТП}} = L_{\text{ф}} + k_{\text{нас}} \cdot L_{\text{у}}, \quad (2.17)$$

где $R_{\text{ф}}$, $L_{\text{ф}}$ и $R_{\text{к}}$ определяются по выражениям, в зависимости от схемы управляемого выпрямителя;

$R_{\text{у}}$ и $L_{\text{у}}$ – активное сопротивление и индуктивность уравнивающих реакторов в цепи протекания тока нагрузки;

$k_{\text{нас}}$ – коэффициент насыщения уравнивающих реакторов: для ненасыщающихся реакторов $k_{\text{нас}} = 1$; для насыщающихся $k_{\text{нас}} = 0.3 \div 0.5$.

В режиме, когда ток проводит только одна группа тиристорov, параметры якорной цепи для преобразователя с совместным управлением находятся по выражениям:

$$R_{\text{яц}} = R_{\text{ТП}} + R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{др}} + 0.1 \cdot R_{\text{дв.гор}} ; \quad (2.18)$$

$$L_{\text{яц}} = L_{\text{ТП}} + L_{\text{дв}} + L_{\text{др}} . \quad (2.19)$$

Эти значения параметров следует использовать при расчетах переходных процессов в электроприводе.

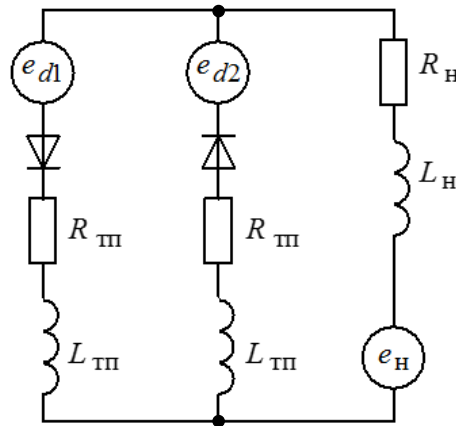


Рис. 2.12. Схемы замещения силовой цепи реверсивного тиристорного преобразователя с совместным управлением группами

В режиме, когда обе группы преобразователя работают параллельно, параметры якорной цепи определяются следующим образом:

$$R_{\text{яц}} = \frac{R_{\text{ТП}}}{2} + R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{др}} + 0.1 \cdot R_{\text{дв.гор}} ; \quad (2.20)$$

$$L_{яц} = \frac{L_{тп}}{2} + L_{дв} + L_{др} . \quad (2.21)$$

Найденные параметры следует использовать при проверке устойчивости системы регулирования привода.

Практически применяются следующие значения начальных углов настройки преобразователей с совместным управлением:

- Начальный угол $\alpha_{нач} = 90^\circ$ для электроприводов, к управляемости которых предъявляются высокие требования.
- Начальный угол $\alpha_{нач} > 90^\circ$ (практически до 135°) с целью уменьшения уравнительного тока.

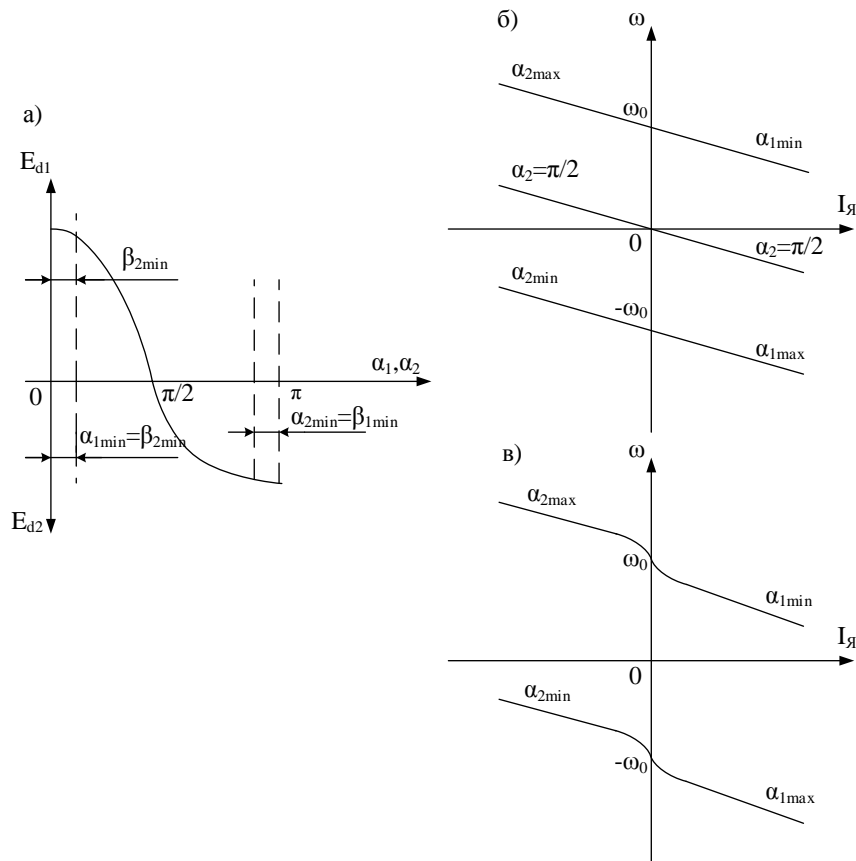


Рис. 2.13. Регулировочные и электромеханические характеристики реверсивного электропривода ТП–ДПТ: а) регулировочная характеристика при линейном согласовании углов управления; б) электромеханические характеристики при совместном управлении; в) электромеханические характеристики электропривода при совместном управлении и нелинейном согласовании углов управления

Раздельное управление используется для полного исключения уравнительных токов между комплектами тиристорov реверсивного

преобразователя. Сущность его состоит в том, что импульсы управления подаются только на один из комплектов, который должен в данный момент проводить ток. На второй комплект импульсы не поступают, и он не работает (закрыт).

Управление преобразователем осуществляется в этом случае с помощью специального логического переключающего устройства (ЛПУ). Это устройство, осуществляя контроль за током преобразователя, обеспечивает включение в работу и выключение комплектов тиристоров с небольшой паузой в 5...10 мс. Вследствие этого вблизи оси скорости имеет место режим прерывистых токов, что отражается в нелинейности электромеханических характеристик двигателя.

Группы тиристоров при отдельном управлении не работают одновременно, поэтому статические и динамические характеристики реверсивного преобразователя не отличаются от характеристик нереверсивного преобразователя. Специфика реверсивного преобразователя проявляется лишь в моменты переключения групп, когда нагрузка отключается от одной группы и подключается к другой. Эта специфика определяется характером согласования регулировочных характеристик групп тиристоров и величиной временной паузы при переключении.

Согласование характеристик осуществляется выбором начальных углов управления:

- $\alpha_{1нач} = \alpha_{2нач} = 90^\circ$. Характеристики согласованы в области непрерывных токов (рис. 2.14,а). В области прерывистых токов имеет место неоднозначность характеристик, что является причиной значительного скачка напряжения преобразователя при каждом переключении групп.

- $\alpha_{1нач} = \alpha_{2нач} = 90^\circ + \frac{180^\circ}{m_B}$. Характеристики согласованы в области

прерывистых токов и разведены в области непрерывных (рис. 2.14,б). В зоне сигналов управления ΔU_y преобразователь работает в режиме прерывистых токов. В преобразователях средней и большой мощности это относительно малые по величине токи, которые практически не создают момент двигателя. Поэтому система автоматического регулирования электропривода в этой зоне оказывается практически разомкнутой до момента входа преобразователя в зону непрерывных токов, когда ток и момент двигателя начинают быстро нарастать в соответствии с управляющим сигналом.

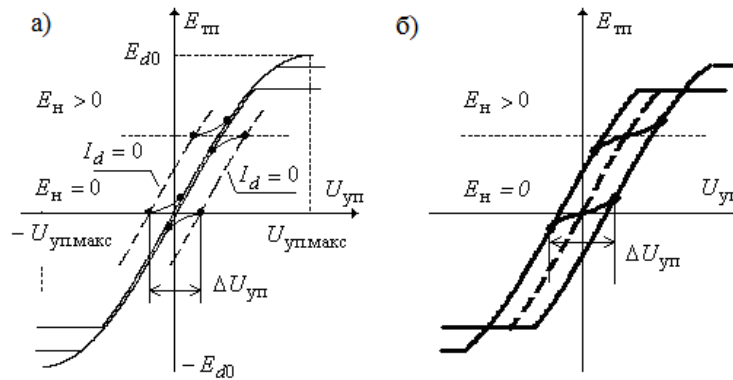


Рис. 2.14. Регулировочные характеристики тиристорного преобразователя с раздельным управлением (СИФУЛ): а) при согласовании $\alpha_{\text{нач}} = 90^\circ$; б) при согласовании $\alpha_{\text{нач}} = 120^\circ$

- $\alpha_{1\text{нач}} = \alpha_{2\text{нач}} > 90^\circ + \frac{180^\circ}{m_B}$. В характеристике реверсивного преобразователя появляется зона нечувствительности.

Наличие паузы t_3 при переключении групп снижает динамические качества реверсивного преобразователя с раздельным управлением. Гармонический сигнал на входе преобразователя вызывает соответствующую реакцию лишь при частотах сигнала, не превышающих значение $f_y < \frac{1}{2 \cdot t_3}$, вне зависимости от амплитуды этого сигнала.

При этом применяются следующие параметры настройки преобразователей с раздельным управлением.. Согласование характеристик определяется выбором начальных углов управления:

- $\alpha_{\text{нач}} = 120^\circ$ и $t_3 \leq 0.001$ с для следящих и регулируемых электроприводов с повышенными требованиями к регулировочным и динамическим характеристикам. Обязательно применение устройств линеаризации характеристик преобразователя в режиме прерывистых токов.

- $\alpha_{\text{нач}} > 90^\circ$, практически $\alpha_{\text{нач}} = (100 \div 115)^\circ$, и $t_3 = (2 \div 7) \cdot 10^{-3}$ с, для электроприводов средней и большой мощности и электроприводов общепромышленного назначения. Возможно применение адаптивных регуляторов тока при значительной зоне прерывистых токов для следящих электроприводов и регулируемых электроприводов, работающих при холостом ходе, например, при ударной нагрузке.

- $\alpha_{\text{нач}} > 90^\circ$ (практически $\alpha_{\text{нач}} = 95^\circ$) для систем возбуждения электрических машин.

Поскольку комплекты вентиляей реверсивного тиристорного преобразователя с раздельным управлением не работают одновременно, все полученные результаты анализа работы нереверсивных преобразователей справедливы и для реверсивных с раздельным управлением. Внешние характеристики управляемого выпрямителя и электромеханические характеристики привода для каждой группы аналогичны приведенным на рис. 2.9.

2.3.3. Характеристика тиристорного преобразователя в зависимости от способа управления

Сравнительная оценка тиристорных преобразователей с совместным и раздельным управлением для электроприводов постоянного тока с точки зрения затрат на реализацию эксплуатационных свойств, приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Преобразователи с совместным управлением	Преобразователи с раздельным управлением
Капитальные вложения	
Дроссели нужны в любом случае. Наличие уравнивающих токов увеличивает установленную мощность	Дроссели могут потребоваться для ограничения пульсаций тока. Некоторое усложнение схемы управления
Потери в преобразователе	
Уравнивающие токи увеличивают потери	Нет уравнивающих токов
Качество регулирования	
Непрерывный ток может поддерживаться во всех рабочих режимах, коэффициент усиления остается постоянным, управление непрерывное	Прерывистый ток снижает коэффициент усиления. Снижение коэффициента усиления ухудшает быстродействие. Имеется пауза в управлении

Надежность	
<p>Так как один мост всегда работает инвертором, высока вероятность опрокидывания или прорыва инвертора.</p> <p>Аварийные токи между мостами из-за сбоя в системе фазового управления в некоторой степени ограничены дросселями</p>	<p>Инвертирование имеет место только в течение рекуперативного торможения.</p> <p>Сбой в системе управления тиристорами приводит к короткому замыканию</p>

Кратко сформулируем основные недостатки и достоинства тиристорных преобразователей в зависимости от способа управления.

Для преобразователей с совместным управлением.

Недостатки:

- наличие уравнивающих токов и, как следствие, необходимость установки реакторов, дополнительная нагрузка трансформатора и тиристорov;
- необходимость ограничения скорости изменения управляющего сигнала.

Достоинства:

- отсутствие режимов прерывистого тока и, как следствие, линейные характеристики преобразователя и привода;
- естественный процесс реверса тока при изменении полярности управляющего сигнала.

Для преобразователей с отдельным управлением.

Недостатки:

- наличие режимов прерывистого тока и, как следствие, нелинейные характеристики преобразователя и привода;
- необходимость выработки сигнала управления процессом переключения групп;
- временная пауза при реверсировании.

Достоинство: нет уравнивающих токов и уравнивающих реакторов.

2.3.4. Энергетические показатели тиристорного электропривода

Для оценки энергетических показателей регулируемого электропривода постоянного тока с вентильным преобразователем рассмотрим зависимости КПД и коэффициента мощности установки от

скорости. Коэффициент полезного действия системы ТП–Д может быть определен по выражению:

$$\eta_{\text{ТП-Д}} = \frac{E_d - \Delta U_B - R_{\Sigma} I_{\text{я}}}{E_d - x_{\text{т}} I_{\text{я}} / 2\pi}. \quad (2.22)$$

Учитывая, что числитель полученного выражения пропорционален угловой скорости двигателя, можно записать

$$\eta_{\text{ТП-Д}} = \frac{\omega}{\omega + \frac{\Delta U_B + (R_{\text{т}} + R_{\text{я}} + R_{\text{р}}) I_{\text{я}}}{c}}, \quad (2.23)$$

или в относительных единицах

$$\eta_{\text{ТП-Д}} = \frac{\omega_*}{\omega_* + \Delta\omega_* + R_{\text{я}*} M_*}, \quad (2.24)$$

где:

$\Delta\omega_* = \Delta U_B / c\omega_0$ – относительное значение падения скорости, обусловленное падением напряжения на вентилях ΔU_B ;

$R_{\text{я}}' = R_{\text{я}} + R_{\text{т}} + R_{\text{р}}$ ($R_{\text{т}}$ – приведенное к вторичной обмотке активное сопротивление обмоток фазы трансформатора, $R_{\text{р}}$ – сопротивление обмотки сглаживающего реактора) [6].

Значение КПД (η) системы ТП–Д зависит как от нагрузки на валу двигателя, так и от скорости при регулировании. В случае постоянного момента на валу со снижением скорости будет иметь место уменьшение коэффициента полезного действия. Следует отметить, что заметное влияние на КПД установки может оказать мощность потерь в управляемых вентилях, равная $\Delta P_B = \Delta U_B I_{\text{я}}$. В случае использования тиристорных преобразователей относительно падение напряжения на вентилях составляет доли процента. На рис. 2.15 показаны зависимость КДП системы ТП–Д от скорости при номинальной нагрузке на валу двигателя и так же для сравнения представлена зависимость КДП для системы Г–Д. Сравнение показывает, что КДП тиристорного электропривода заметно выше системы Г–Д.

Коэффициент мощности системы ТП–Д определяется двумя факторами: углом сдвига φ_1 первой гармонической составляющей тока, потребляемого вентильным преобразователем из сети, относительно напряжения сети и коэффициентом искажения ν того же тока

$$\lambda = \nu \cos\varphi_1, \quad (2.25)$$

где

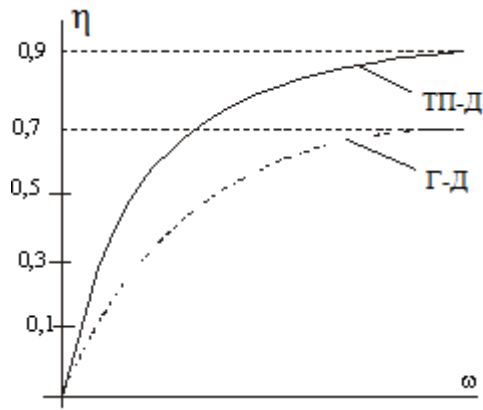


Рис. 2.15. Зависимость $\eta=f(\omega)$ системы ТП–Д от скорости при $M_C=M_H$.
 $\cos\varphi_1 \approx \cos(\alpha+\gamma/2)$;

$$v = \frac{I_1}{I}$$

(I – действующее значение тока, потребляемого преобразователем из сети; I_1 – действующее значение первой гармонической составляющей того же тока).

Из приведенных выражений (2.25) следует, что коэффициент мощности электропривода, выполненного по системе ТП–Д, зависит от скорости вращения при регулировании и от нагрузки на валу. Снижение скорости и соответственно увеличение угла регулирования α , а также увеличение тока нагрузки, связанное с ростом v , приводит к уменьшению коэффициента мощности установки.

На рис. 2.16 приведены зависимости коэффициентов мощности систем ТП–Д и Г–Д от скорости при номинальной нагрузке на валу двигателя. Сопоставление указанных зависимостей показывает, что по коэффициенту мощности система электропривода ТП–Д уступает системе Г–Д. С целью повышения значения λ применяются методы искусственной коммутации вентилях и специальные фильтры высших гармонических составляющих.

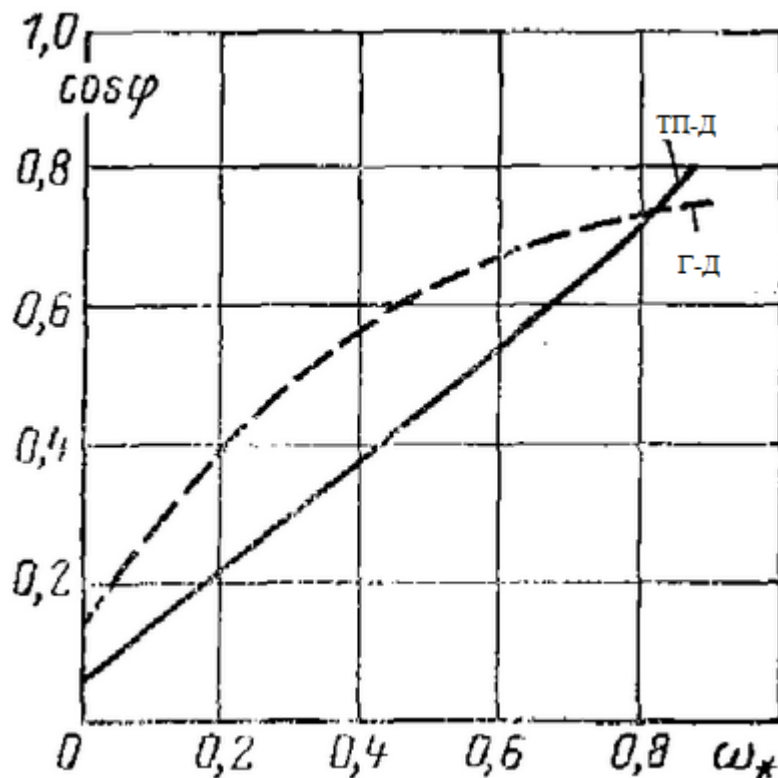


Рис. 2.16. Зависимость коэффициента мощности систем ТП-Д и Г-Д от скорости при $M_C=M_H$

2.3.5. Области применения реверсивных тиристорных преобразователей

2.3.5.1. Электроприводы подъемных кранов

Системы с тиристорными управляемыми выпрямителями (реверсивными преобразователями) постоянного тока ТП—ДПТ для кранов имеют три исполнения:

- с реверсивным выпрямительным устройством, в котором используются два встречно включенных выпрямителя и якорь исполнительного электродвигателя, получая питание от одного выпрямителя, работает в режиме потребления энергии при угле регулирования до 90° и в режиме рекуперации при противоположном направлении вращения и угле регулирования свыше 90° , при питании от второго выпрямителя осуществляются также два режима, но при противоположном направлении тока, благодаря чему обеспечивается работа во всех четырех квадрантах механических характеристик;

- с нереверсивным выпрямительным устройством, для изменения направления тока используется контактный реверс главной цепи

автоматически без тока, когда напряжение на выводах электродвигателя становится выше напряжения, создаваемого выпрямителем или по команде оператора при закрытом выпрямителе;

- с нереверсивным выпрямительным устройством, которое обеспечивает работу электродвигателя в режимах потребления энергии и рекуперации при изменении направления вращения (I и IV квадранты), а для обеспечения работы во II и III квадрантах осуществляется изменение направления тока в обмотке возбуждения электродвигателя.

Первая система является наиболее универсальной, но в то же время она имеет наибольшие габариты преобразователя. Наиболее эффективным является использование этой системы в интервале мощностей 100...300 кВт. Вторая система имеет наименьшие массогабаритные показатели, но возможность ее применения ограничивается конструктивными параметрами контактного переключающего устройства при мощности ЭП выше 100 кВт. Третья система обладает рядом недостатков, связанных с необходимостью реверсирования обмотки возбуждения, и применяется в основном для мощных электроприводов (мощностью выше 300 кВт), имеющих малую частоту включений (крупные разливные краны).

Во всех системах ТП–ДПТ применяется устройство для регулирования потока возбуждения электродвигателя.

Основные требования к электроприводам подъемных кранов.

В отличие от большинства электроприводов производственных механизмов крановый, как правило, не имеет наперед заданного производственного цикла. Режим его работы зависит от многих факторов, а нагрузка и знак ее изменяются в весьма широких пределах. Поэтому крановое электрооборудование должно удовлетворять следующим особым условиям эксплуатации:

- Регулирование скорости и момента двигателей в соответствии с определенным набором механических характеристик.

- Ограничение динамических нагрузок в элементах механической части электропривода (ускорений и моментов).

- Повышенная надежность и безопасность работы крановых установок. Для защиты ЭП крановых механизмов используют специальные комплектные устройства – защитные панели, осуществляющие максимальную, нулевую и конечную защиты, а так же нулевую блокировку.

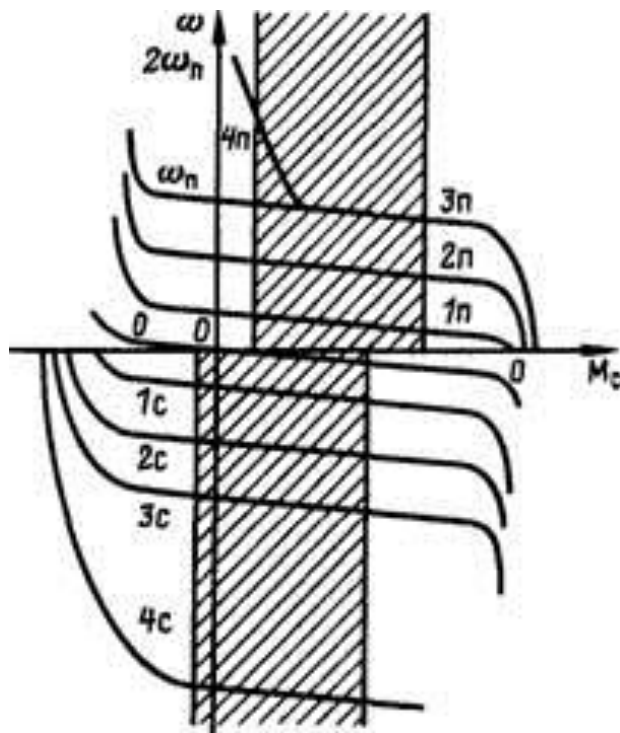


Рис. 2.17. Механические характеристики электроприводов подъема по системе ТП–ДПТ

- Использование по возможности максимально простых схем ЭП, что обусловлено массивностью крановых установок и стремление поддерживать невысокую стоимость их эксплуатации. Вместе с тем характерными особенностями развития массовых крановых установок является повышение их производительности путем увеличения средних скоростей движения при одновременном снижении установочных скоростей для повышения точности останова. Это обуславливает увеличение диапазона регулирования скорости.

- Упрощение управления краном с целью уменьшения утомляемости крановщиков.

- Формирование специальных динамических режимов в некоторых кранах (автоматическое успокоение колебаний грузов на перегружателях и башенных кранах, синхронизация опор крупных козловых кранов и т.д.).

- Повышенная точность останова для ряда крановых установок, для обеспечения которой в ряде случаев необходимо применение позиционных ЭП.

2.3.5.2. Электропривод металлорежущих станков

Неоспоримые преимущества регулируемых электроприводов с вентильными преобразователями привели к их широкому применению в различных отраслях народного хозяйства, в том числе и в станкостроении [4].

В настоящее время регулируемый электропривод с тиристорным преобразователем в сочетании с широкорегулируемым при постоянной мощности ДПТ в механизмах главного движения и высокомоментными двигателями в механизмах подачи является одним из основных технических средств повышения эффективности и качества технологических процессов в станках с ЧПУ.

В электроприводах подач двигатель осуществляет перемещение инструмента или изделия для обеспечения процесса резания. Применение получил ДПТ, позволяющий осуществлять электрическое регулирование скорости подачи. В последние годы широкое распространение получили высокомоментные двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, рассчитанные на установку непосредственно на холодный винт, что существенно сократило механическую часть привода, снизило его момент инерции и повысило КПД.

Для повышения производительности станков перемещение исполнительных органов в зону обработки осуществляется на быстрых ходах теми же электродвигателями подачи.

Основные требования, предъявляемые к станочным электроприводам:

- Обеспечение самого широкого круга технологических режимов обработки с использованием современного режущего инструмента.

- Максимальная производительность.
- Наибольшая точность обработки.
- Высокая чистота обрабатываемой поверхности.
- Реализация максимальной степени повторяемости размеров деталей в обрабатываемой партии. Выполнение этого требования приводит к необходимости иметь высокостабильный привод с большой равномерностью перемещения и апериодическим переходным процессом при изменении скорости.

- Высокая надежность как относительно сохранения параметров, так и безаварийности и ремонтпригодности. Повышению надежности работы электроприводов в значительной степени способствуют наличие технологических запасов по параметрам отдельных электронных элементов и схемным решениям, корректный монтаж электрооборудования,

своевременное проведение профилактических мероприятий и установка необходимой системы диагностики, позволяющей быстро определять и устранять неисправности.

2.3.5.3. Электропривод горнодобывающих машин

Электроприводы экскаваторов.

Современный одноковшовый экскаватор – маневренная и подвижная горная машина, предназначенная для землеройных работ на строительстве и разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Экскаватор содержит комплект электрифицированных механизмов, рассчитанных на длительную работу в тяжелых условиях. Эти машины, начиная с ковшей в 2,5 м³, изготавливаются как электрические лопаты, и как драглайны.

В электроприводах подъемного механизма, напорного механизма, поворотного механизма и тягового драглайна наиболее широкое применение имеет ДПТ.

Совокупность электротехнических изделий, располагаемых на экскаваторе, вместе с внешним подключаемым высоковольтным оборудованием системы электроснабжения необходимо объединять в электротехнический комплекс.

Применяемые для экскаваторов электротехнические изделия должны обладать повышенной перегрузочной способностью и механической прочностью. Оборудование должно удовлетворять конкретным требованиям, которые наиболее существенны для определенных категорий экскаваторов, включая условия серийного или индивидуального производства, динамические, конструктивные или экономические факторы, показатели надежности, стоимость и т.д.

Электроприводы буровых установок.

Основными потребителями электроэнергии в нефтяной и газовой промышленности являются механизмы для разведочного и эксплуатационного бурения нефтяных и газовых скважин; для добычи нефти и газа (насосные и компрессорные установки, электрообезвоживающие и электрообессоливающие установки). К главным механизмам буровых установок относятся буровые насосы, ротор и буровая лебедка [6].

Выбор привода и некоторых основных параметров электроприводов для главных механизмов представляет собой комплексную задачу, что определяется следующими обстоятельствами. Для питания разных электроприводов используются одни и те же источники электроэнергии:

высоковольтная электрическая линия для электрических буровых установок и автономная электростанция для установок, предназначенных для неэлектрифицированных районов. Электродвигатели на каждой конкретной установке должны выполняться на одинаковое напряжение. Особое значение это приобретает при применении наиболее перспективных систем тиристорного электропривода.

Рекомендуется применять в зависимости от класса буровой установки для привода насосов: для установок сверхглубокого бурения – глубоко регулируемый электропривод по системе Г–Д или ТП–ДПТ; для установок глубокого бурения – электропривод с регулированием скорости на 20...50% вниз от номинальной на базе асинхронных двигателей.

2.4. Принципиальная электрическая схема стенда

Принципиальная электрическая схема представлена на рис. 2.1 [1].

Источник GA – источник (генератор) синусоидального напряжения промышленной частоты.

Тиристорные преобразователи/регуляторы TP1 и TP2, включенные по схеме реверсивного тиристорного преобразователя, питают регулируемым напряжением обмотку двигателя постоянного тока D1, работающего с независимым возбуждением.

Блоки дросселей BL1 и BL2 ограничивают уравнивающий ток преобразователей TP1 и TP2.

Трехфазная трансформаторная группа ТТ преобразует напряжение источника GA в пониженное напряжение, подаваемое на тиристорные преобразователи/регуляторы TP1 и TP2.

Блок ВВ1 выпрямляет однофазное сетевое напряжение для питания обмотки возбуждения двигателя D1.

Блок ВВ2 выпрямляет однофазное напряжение, снимаемое с блока АТ, для подачи в статорную цепь нагрузочной машины D2.

Преобразователь угловых перемещений DD генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения IB электромашинного агрегата.

Машина переменного тока D2, работает в режиме генератора и обеспечивает нагрузку на валу исследуемого двигателя. Автотрансформатор АТ питает статорную обмотку машины D2 регулируемым напряжением.

С помощью мультиметров блока ВМ контролируются ток и напряжение якоря двигателя D1, а также токи, протекающие через тиристоры блоков TP1 и TP2.

Терминал ТМ служит для разветвления на отдельные проводники кабеля, подключенного к источнику ТР1 или ТР2.

Блок ВС служит для усиления цифровых сигналов.

Коннектор КК выполняет функцию связующего звена между компьютером IBM, блоком датчиков тока и напряжения ВА, указателем частоты вращения ИВ и блоком ввода-вывода цифровых сигналов ВС.

Компьютер IBM используется в режиме информационно-измерительной и управляющей системы.

2.5. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования системы реверсивного тиристорного электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения:

- проверка работоспособности стенда;
- снятие электромеханической $\omega = f(I)$ и механической $\omega = f(M)$ характеристик двигателя D1 при угле управления $\alpha=30^\circ$;
- построение электромеханической $\omega = f(I)$ и механической $\omega = f(M)$ характеристик двигателя D1 при изменении напряжения U_1 на якоре двигателя;
- снятие регулировочной характеристики $\omega = f(U_1)$;
- построение характеристик переходных процессов $\omega = f(t)$, $I = f(t)$, $M = f(t)$ при пуске, торможении, реверсе, сбросе - набросе нагрузки;
- определение координат и параметров системы электропривода в статических и переходных режимах.


2.6. Проверка работоспособности стенда

Убедиться, что предохранители всех блоков исправны!

Проверку осуществлять по схеме рис. 2.1. Для этого необходимо проделать следующее:

- Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

В ходе работы ток якоря двигателя D1 (ток нагрузки I_1), показываемый амперметром А1 блока ВМ, не должен превышать 0,5А!

- Соединить гнезда «ТК» источника ГА.
- Подключить гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника ГА.

- Соединить вилки питания устройств 220 В, используемых в эксперименте, сетевыми шнурами с розетками удлинителя.
- Подключить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Установить переключатели: блоков дросселей VL в положение «3 Гн», номинальных фазных напряжений вторичных полуобмоток трансформатора ТТ в положение «73 В».
- Перевести регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ в крайнее левое положение.
- Установить тумблеры делителей напряжения коннектора КК в положение «1:1».
- Привести в рабочее состояние персональный компьютер IBM, войти в каталог с программным обеспечением учебного комплекса и запустить прикладную программу «Реверсивный преобразователь.exe».
- Включить выключатели «СЕТЬ» тиристорных преобразователей TP, блока мультиметра VM, указателя частоты вращения IV, блока датчиков тока и напряжения ВА, регулировочного автотрансформатора АТ, блока ввода-вывода цифровых сигналов ВС.
- Переключить преобразователь в режим автоматического управления, нажав кнопку «УПРАВЛЕНИЕ» на лицевой панели преобразователя TP1. Аналогично поступить с преобразователем TP2.
- Нажать кнопку «3Ф ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ» на лицевой панели преобразователя TP1 и удерживать ее до тех пор, пока не загорится расположенный рядом с ней светодиод. Аналогично поступить с преобразователем TP2.
- Включить источник GA. О наличии фазных напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Задать параметры управления преобразователем, нажав для этого соответствующую виртуальную кнопку. В открывшемся окне выбрать вариант управления комплектами вентиля (например, совместное), а также установить начальный угол управления для каждого комплекта вентиля (например, 90^0 для обоих преобразователей). Последнюю операцию выполнять, вращая виртуальную рукоятку и одновременно наблюдая на цифровом индикаторе соответствующего преобразователя текущее значение начального угла управления. Во время установки начального угла управления импульсы управления автоматически снимаются с обоих комплектов вентиля.
- Установить в этом же окне скорость изменения уставки напряжения управления, например, оставить значение по умолчанию. Если не

требуется ограничивать скорость изменения уставки напряжения управления, то задать ее достаточно большой (например, 1000 В/с).

- Закрывать окно параметров управления.

2.7. Снятие электромеханической $\omega = f(I_1)$ и механической $\omega = f(M_1)$ характеристик двигателя D1 для угла управления $\alpha = 30^\circ$ преобразователя TP при совместном управлении и индуктивности дросселей «3 Гн»

Электромеханическую $\omega = f(I_1)$ и механическую $\omega = f(M_1)$ характеристики системы снимать при минимальном угле управления α и номинальных параметрах двигателя D1. Для этого:

- Подготовить стенд к работе по пункту 2.6.
- Установить переключатели блоков дросселей ВЛ в положение «3 Гн».
- Выставить угол управления $\alpha = 30^\circ$, вращая регулировочную рукоятку преобразователя TP1.
- Запустить управление преобразователем, нажав для этого соответствующую виртуальную кнопку или выбрав нужный пункт из главного меню программы. Вращая виртуальную регулировочную рукоятку «Напряжение управления», наблюдать за изменением токов и напряжения схемы на дисплеях блока мультиметра ВМ, виртуальных цифровых индикаторах и виртуальном осциллографе, а также за изменением частоты и направления вращения двигателя D1 по указателю ИВ.
- Изменять ток якоря I_1 (до 1 А) двигателя D1, ток тиристоров I_T , вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ и заносить показания амперметров А1, А2 и вольтметра V блока ВМ, а также указателя ИВ частоты вращения в табл. 2.3.
- Остановить управление тиристорными преобразователями, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Импульсы управления с преобразователей снимутся.

Таблица 2.3

$I_1, \text{ А}$								
$I_T, \text{ А}$								
$U_1, \text{ В}$								
$n, \text{ мин}^{-1}$								

- По завершению эксперимента повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

- Вычислить значения угловой частоты вращения ω по выражению (2.22) и электромагнитного момента M_1 двигателя по формуле (2.23), используя данные табл. 2.3 и занести полученные результаты в табл. 2.4.

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}; \quad (2.22)$$

$$M_1 = \frac{60}{2\pi n} (U_1 - 65 \cdot I_1) \cdot I_1. \quad (2.23)$$

Таблица 2.4

$M_1, \text{Н} \cdot \text{м}$								
$\omega, \text{с}^{-1}$								

Привести пример расчета.

- Построить электромеханическую $\omega = f(I_1)$ и механическую $\omega = f(M_1)$ характеристики системы по данным табл. 2.3 и табл. 2.4.

2.8. Снятие электромеханической $\omega = f(I_1)$ и механической $\omega = f(M_1)$ характеристик двигателя D1 для угла управления $\alpha=30^\circ$ преобразователя ТР при раздельном управлении и индуктивности дросселей «1,5 Гн»

Электромеханическую $\omega = f(I_1)$ и механическую $\omega = f(M_1)$ характеристики системы снимать при минимальном угле управления α и номинальных параметрах двигателя D1. Для этого:

- Подготовить стенд к работе по пункту 2.6.
- Установить переключатели блоков дросселей ВЛ в положение «1,5 Гн».
- Выставить угол управления $\alpha = 30^\circ$, вращая регулировочную рукоятку преобразователя ТР1.
- Запустить управление преобразователем, нажав для этого соответствующую виртуальную кнопку или выбрав нужный пункт из главного меню программы. Вращая виртуальную регулировочную рукоятку «Напряжение управления», наблюдать за изменением токов и

напряжения схемы на дисплеях блока мультиметра ВМ, виртуальных цифровых индикаторах и виртуальном осциллографе, а также за изменением частоты и направления вращения двигателя D1 по указателю ИВ.

- Изменять ток якоря I_1 (до 1 А) двигателя D1, ток тиристорных I_T , вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ, и заносить показания амперметров А1, А2 и вольтметра V блока ВМ, а также указателя ИВ частоты вращения в таблицу, аналогичную табл. 2.3.

- Остановить управление тиристорными преобразователями, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Импульсы управления с преобразователей снимутся.

- По завершении эксперимента повернуть сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник ГА нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя.

- Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

- Вычислить значения угловой частоты вращения ω по выражению (2.22) и электромагнитного момента M_1 двигателя по формуле (2.23), используя данные таблицы, аналогичной табл. 2.3, и занести полученные результаты в таблицу, аналогичную табл. 2.4.

Привести пример расчета.

- Построить электромеханическую $\omega = f(I_1)$ и механическую $\omega = f(M_1)$ характеристики системы, по данным таблиц, аналогичным табл. 2.3. и табл. 2.4.

2.9. Снятие электромеханической $\omega = f(I_1)$ и механической $\omega = f(M_1)$ характеристик двигателя D1 при изменении напряжения U_1 на якоре для отдельного управления и индуктивности дросселей «3 Гн»

Электромеханическую $\omega = f(I_1)$ и механическую $\omega = f(M_1)$ характеристики снимать при различном напряжении питания U_1 двигателя D1, устанавливаемого вращением регулировочной рукоятки преобразователя ТР1, т.е. изменением угла регулирования α° . Для этого:

- Подготовить стенд к работе согласно пункту 2.6.

- Выставить переключатели блоков дросселей ВЛ в положение «3 Гн».

- Установить угол управления $\alpha = 40^\circ$, вращая регулировочную рукоятку преобразователя ТР1.

- Запустить управление преобразователем, нажав для этого соответствующую виртуальную кнопку или выбрав нужный пункт из главного меню программы. Вращая виртуальную регулировочную рукоятку «Напряжение управления», наблюдать за изменением токов и напряжения схемы на дисплеях блока мультиметра ВМ, виртуальных цифровых индикаторах и виртуальном осциллографе, а также за изменением частоты и направления вращения двигателя D1 по указателю ИВ.

- Изменять ток якоря I_1 (до 1 А) двигателя D1, ток тиристорov I_T , вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ, и заносить показания амперметров А1, А2 и вольтметра V блока ВМ, а также указателя ИВ частоты вращения в таблицу, аналогичную табл. 2.3.

- Прodelать опыт для больших значений угла управления α° (по заданию преподавателя).

- Остановить управление тиристорными преобразователями, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Импульсы управления с преобразователей снимутся.

- По завершении эксперимента повернуть сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя.

- Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

- Вычислить значение угловой скорости вращения ω двигателя D1 по выражению (2.22) и его электромагнитного момента M_1 по формуле (2.23), используя данные полученных таблиц, аналогичных табл. 2.3, и занести полученные результаты в таблицы, аналогичные табл. 2.4.

Привести пример расчета.

- Построить электромеханическую $\omega = f(I_1)$ и механическую $\omega = f(M_1)$ характеристики системы по данным таблиц, аналогичным табл. 2.3. и табл. 2.4.

2.10. Снятие электромеханической $\omega = f(I_1)$ и механической $\omega = f(M_1)$ характеристик двигателя D1 при изменении напряжения U_1 на якоре для отдельного управления и индуктивности дросселей «1,5 Гн»

Характеристики $\omega = f(I_1)$ и $\omega = f(M_1)$ снимать при различном напряжении питания U_1 двигателя D1, устанавливаемого вращением регулировочной рукоятки преобразователя TP1, т.е. изменением угла регулирования α° . Для этого:

- Подготовить стенд к работе по пункту 2.6.
- Установить переключатели блоков дросселей BL в положение «1,5 Гн».
- Выставить угол управления $\alpha = 40^\circ$, вращая регулировочную рукоятку преобразователя TP1.
- Запустить управление преобразователем, нажав для этого соответствующую виртуальную кнопку или выбрав нужный пункт из главного меню программы. Вращая виртуальную регулировочную рукоятку «Напряжение управления», наблюдать за изменением токов и напряжения схемы на дисплеях блока мультиметра BM, виртуальных цифровых индикаторах и виртуальном осциллографе, а также за изменением частоты и направления вращения двигателя D1 по указателю IB.
- Изменять ток якоря I_1 (до 1 А) двигателя D1, ток тиристорных I_T , вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора AT, и заносить показания амперметров A1, A2 и вольтметра V блока BM, а также указателя IB частоты вращения в таблицу, аналогичную табл. 2.3.
- Провести опыт для больших значений угла управления α° (по заданию преподавателя).
- Остановить управление тиристорными преобразователями, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Импульсы управления с преобразователей снимутся.
- По окончании эксперимента сначала у автотрансформатора AT, а затем у преобразователя TP повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора AT. Отключить источник GA нажатием на кнопку - грибок и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя.
- Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

- Вычислить значение угловой скорости вращения ω двигателя D1 по выражению (2.22) и его электромагнитного момента M_1 по формуле (2.23) используя данные полученной таблицы, аналогичной табл. 2.3 и занести полученные результаты в таблицу, аналогичную табл. 2.4.

Привести пример расчета.

- Построить механическую $\omega = f(M_1)$ и электромеханическую $\omega = f(I_1)$ характеристики системы, по данным таблиц, аналогичных табл. 2.3 и табл. 2.4.

2.11. Снятие регулировочной характеристики $\omega = f(U_1)$

Снятие регулировочной характеристики $\omega = f(U_1)$ осуществлять в ниже приведенной последовательности. Для этого:

- Подготовить стенд к работе согласно пункту 2.6.
- Установить ток якоря I_1 двигателя D1 равным 0,5 А (амперметр А1), вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ и поддерживать его в ходе эксперимента с помощью автотрансформатора АТ.
- Изменять угол управления α° в диапазоне $30^\circ \dots 170^\circ$, вращая регулировочную рукоятку преобразователя ТР1 и заносить показания вольтметра V блока ВМ и указателя ИВ в табл. 2.5.

Таблица 2.5


$U_1, \text{В}$								
$n, \text{мин}^{-1}$								

- По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

- Построить регулировочную характеристику $\omega = f(U_1)$ по данным табл. 2.5.

2.12. Определение координат и параметров электропривода в переходных режимах (пуск, торможение, реверс, сброс – наброс нагрузки)

2.12.1. Рекомендации по использованию программы «Регистратор режимных параметров машины ДПТ»

- Для определения координат точек на графиках использовать отображаемые на экране текущие координаты указателя мыши.
- Масштабирование производить путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществлять обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Графики относительно осей координат двигать путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- Очищать область построения механической характеристики нажатием на соответствующую виртуальную кнопку  или клавишу «Пробел».

2.12.2. Снятие характеристик переходных процессов $\omega = f(t)$, $I_1 = f(t)$, $M_1 = f(t)$ при пуске, торможении, реверсе, сбросе-набросе нагрузки

Опыты по исследованию переходных процессов пуска, торможения и реверса при работе на холостом ходу и под нагрузкой, сброса-наброса нагрузки проводить по заданию преподавателя. Для этого:

- Подготовить стенд к работе по пункту 2.6.
- Установить ток I_1 якоря двигателя D1 равным 0,5 А, вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ.
- Организовать переходный процесс, например, сброс-наброс нагрузки двигателя D1. Для чего нажать соответствующую кнопку «ВКЛ.» автотрансформатора АТ и спустя 5 с – соответствующую кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ.
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени $\omega = f(t), I_1 = f(t), U_1 = f(t)$.
- Остановить управление тиристорными преобразователями сразу после завершения переходного процесса, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Импульсы управления с преобразователей снимутся.

- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.

- По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. При обработке графиков переходных процессов на каждой характеристике необходимо отметить:

- максимальное значение тока во время переходных процессов $I_{\text{макс}}$;
- установившиеся начальное и конечное значения тока и скорости $I_{\text{н}}$, $I_{\text{к}}$, $\omega_{\text{н}}$, $\omega_{\text{к}}$;
- время переходного процесса, $t_{\text{пп}}$;
- при сбросе и набросе величину выброса и проседания скорости;
- относительную величину пульсаций тока – $\delta I\% = I/I_{\text{уст}}$, здесь I – абсолютная величина размаха пульсаций тока, $I_{\text{уст}}$ – установившееся после переходного процесса значение тока. Во время переходного процесса отметить наибольший размах пульсаций и найти $\delta I\%_{\text{макс}}$. После окончания переходного процесса пульсации принимают постоянное значение $\delta I\%_{\text{уст}}$.

- Результаты анализа занести в табл. 2.6.

Таблица 2.6

№ п.п	Параметр переходного процесса								Название переходного процесса (пуск, торможение и т.д.)
	$t_{\text{пп}}$, мс	$\omega_{\text{уст}}$, с ⁻¹	$\omega_{\text{нач}}$, с ⁻¹	$I_{\text{нач}}$, мА	$I_{\text{уст}}$, мА	$\delta I_{\text{уст}}$, %	$\delta I_{\text{макс}}$, %	$I_{\text{макс}}$, мА	
1									
...									
6									

2.13. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.

3. Таблицы опытных данных и характеристики $\omega = f(I_1)$ для всех опытов на одном графике; $\omega = f(M_1)$ для всех опытов на другом графике.

4. Таблица опытных данных и график $\omega = f(U_1)$.

5. Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, тока $I_1 = f(t)$ и момента $M_1 = f(t)$ при пуске, останове, реверсе и сбросе – набросе нагрузки на соответствующих (естественной и искусственных) характеристиках при различных способах управления тиристорным преобразователем.

6. Определение координат и параметров системы электропривода в статических и переходных режимах работы.

7. Краткие выводы.

2.14. Контрольные вопросы

2.14.1. Описать структуру и принцип действия реверсивного тиристорного электропривода.

2.14.2. Перечислить достоинства и недостатки системы РТП-ДПТ.

2.14.3. Изобразить механические и электромеханические характеристики $\omega = f(I_1)$ и $\omega = f(M_1)$ изучаемой системы при различных углах управления α .

2.14.4. Назвать условия при которых система РТП-ДПТ переходит в режим прерывистого тока.

2.14.5. Привести формулы для определения координат граничных значений скорости вращения ($\omega_{гр}$) и тока ($I_{гр}$).

2.14.6. Изобразить графики переходных процессов $\omega=f(t)$ и $I=f(t)$ в системе электропривода:

- при пуске;
- при торможении (останове);
- при сбросе и набросе нагрузки;
- при реверсе.

2.14.7. Назвать причину отсутствия перерегулирования на графике переходного процесса по скорости.

2.14.8. По какой траектории изменяются значения скорости и тока во время переходного процесса?

2.14.9. Назвать способы определения времени переходного процесса.

2.14.10. Как определить электромеханическую постоянную времени переходного процесса?

2.14.11. От каких параметров зависит постоянная времени тиристорного электропривода постоянного тока?

Литература

1. Карпеш М.А., Красногорцев И.Л., Сенигов П.Н. Силовая электроника. Руководство по выполнению базовых экспериментов. СЭ.001 РБЭ (911). – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2003. – 172 с.

2. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. 1980. – 339 с.

3. Большаков Я.М., Крупович В.И., Самовер М.Л. Справочник по проектированию электропривода, силовых и осветительных установок. – М.: Мастерство: Энергия, 1975. – 728 с.

4. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

5. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 4. Тиристорные преобразователи для электроприводов постоянного тока: учебное пособие / Л.С. Удут, Н.В., Кояин, О.П. Мальцева. – Издание 2-е переработанное и дополненное. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.

6. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.4. Использование электрической энергии / Под общ. Ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 9-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 696 с.

7. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.

8. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.

9. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. пособие для студ. Учреждений сред. проф. Образования. – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.

10. Электротехника: Учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова. – Челябинск: Изд-во Ю УрГУ, 2005. – 639 с.

11. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Мастерство: Высшая школа, 2000. – 368 с.

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ДВИГАТЕЛЬ» ПОСТОЯННОГО ТОКА В СХЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

3.1. Цель работы

Исследование энергетических показателей, статических и динамических характеристик электропривода постоянного тока на основе выпрямительно-инверторного преобразователя.

3.2. Оборудование стенда (перечень аппаратуры)

Аппаратная часть комплекса выполнена по блочному (модульному) принципу и содержит:

- составной лабораторный стол со встроенными контейнерами для хранения проводников и методических материалов, рамами для установки необходимых в эксперименте функциональных блоков, выкатной полкой для клавиатуры компьютера и подставкой для системного блока последнего;

- спроектированные с учебными целями натурные аналоги элементов выпрямительно-инверторных преобразователей;

- источники питания;

- нагрузки;

- измерительные преобразователи и приборы;

- IBM-совместимый персональный компьютер со встроенной платой ввода/вывода информации фирмы National Instruments [1].

Питание комплекса осуществляется от трехфазной электрической сети напряжением 380 В с нейтральным и защитным проводниками.

Параметры стенда:

- Потребляемая мощность В·А, не более.....1000

- Габариты (длина/ ширина/ высота), мм.....2750×900×1600

- Масса, кг, не более.....250

Программная часть комплекса включает:

- программную среду персонального компьютера (Windows 98/2000/XP);

- комплект специальных программ.

3.2.1. Назначения и описания функциональных блоков

Перечень функциональных блоков приводится в соответствии с рис. 3.1 и табл.3.1.

- Блок диодов (BD). Предназначен для моделирования диодов.
- Блок датчиков тока и напряжения (BA). Предназначен для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых цепях постоянного и переменного тока, и гальванически с последними не связанных.
- Блок дросселей (LA). Предназначен для моделирования индуктивности. Регулируется ступенчато вручную.
- Блок мультиметров (BM). Предназначен для измерения токов, напряжений, омических сопротивлений. Цифровой с жидкокристаллическим дисплеем.
- Указатель частоты вращения (IB). Предназначен для отображения частоты вращения электрических машин в электромашинном агрегате в аналоговой форме.
- Преобразователь угловых перемещений (DD). Предназначен для преобразования скорости вращения электрических машин в сигнал цифрового вида.
- Трехфазная трансформаторная группа (TT). Предназначена для преобразования однофазного или трехфазного напряжения.
- Тиристорный преобразователь/регулятор (TP). Предназначен для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока (режим преобразователя) и трехфазного асинхронного двигателя (режим регулятора). Преобразует трехфазное напряжение синусоидального тока в напряжение постоянного тока, а также в трехфазное напряжение переменной величины. Выходное напряжение регулируется вручную или дистанционно/автоматически (от ПЭВМ).
- Выпрямитель (BB). Предназначен для неуправляемого преобразования энергии трехфазного переменного тока в энергию постоянного тока.
- Коннектор (KK). Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам/выходам платы сбора данных PCI 6024E персонального компьютера.
- Персональный компьютер (IBM). Предназначен для дистанционного или автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.
- Регулируемый автотрансформатор (AT). Предназначен для преобразования и регулирования напряжения на вторичной обмотке.

• Трехполюсный выключатель (QA). Предназначен для ручного или дистанционного / автоматического (от ПЭВМ) включения / отключения электрических цепей.

• Исследуемая машина постоянного тока (D1, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением):

$$P_H = 90 \text{ Вт}; \quad \eta_H = 57,2 \text{ \%};$$

$$U_H = 220 \text{ В}; \quad \cos \varphi_H = 0,73;$$

$$I_H = 0,56 \text{ А}; \quad R_{\text{я}} = 86 \text{ Ом};$$

$$n_H = 1500 \text{ об/мин}; \quad R_{\text{о.в.}} = 1,15 \text{ кОм.}$$

$$I_{\text{вн}} = 0,2 \text{ А};$$

• Нагрузочная машина переменного тока (D2, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$P_H = 120 \text{ Вт}; \quad \cos \varphi_H = 0,66;$$

$$U_H = 220 \text{ В}; \quad x_1 = 0,087 \text{ о.е.};$$

$$I_H = 0,44 / 0,76 \text{ А}; \quad R_1 = 0,18 \text{ о.е.};$$

$$n_H = 1350 \text{ об/мин}; \quad x_2' = 0,15 \text{ о.е.};$$

$$\eta_H = 63 \text{ \%}; \quad R_2' = 0,150 \text{ о.е.}$$

Исследуемая и нагрузочная машины жестко соединены между собой и представлены в виде электромашинного агрегата, дополненного маховиком и преобразователем угловых перемещений.

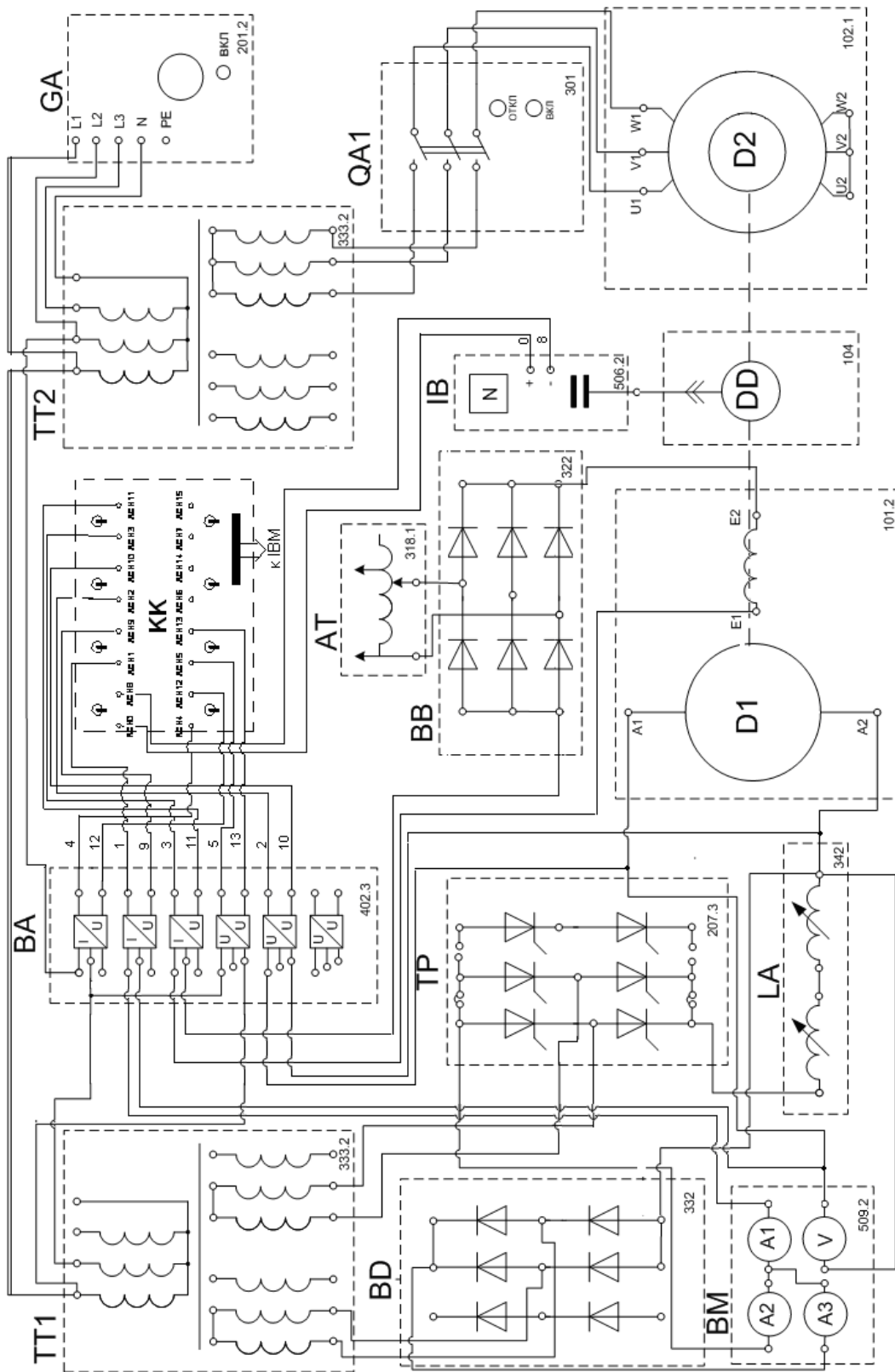


Рис. 3.1. Электрическая схема соединений лабораторного стенда

3.2.2. Обозначения и параметры исследуемой аппаратуры

Обозначение и параметры изучаемой схемы приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
GA	Трехфазный источник питания	201.2	~ 400 В; 16 А
ТТ1, ТТ2	Трехфазная трансформаторная группа	333.2	Первичная обмотка: У – 380 В / 320 В·А; 2 вторичные полуобмотки: 0,5 А каждая / номинальные фазные напряжения: 42, 73, 127 В
BD	Блок диодов	332	2 А / 800 В 6 диодов
TP	Тиристорный преобразователь / регулятор	207.3	~ 3×400 В / 2 А 6 тиристоров
LA	Блок дросселей	342	2×3 Гн / 0,5 А
AT	Регулируемый автотрансформатор	318.1	0...240 В / 2 А
BB	Выпрямитель	322	Трехфазный мост 3х400 В / 2 А
BA	Блок датчиков тока и напряжения	509.2	3 измерительных преобразователя "ток-напряжение" 5А / 1А / 5 В; 3 измерительных преобразователя "напряжениенапряжение" 1000 В / 100 В / 5 В
KK	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
IBM	Персональный компьютер	550	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI 6024E

QA	Трехполюсный выключатель	301	$\sim 400 \text{ В} / 10 \text{ А}$
IB	Указатель частоты вращения	506.2	$-2000 \dots 0 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$
D1	Машина постоянного тока	101.2	90 Вт, $\sim 220 \text{ В}$, 1500 мин^{-1}
D2	Асинхронный двигатель	102,1	120 Вт, $\sim 220 \text{ В}$, 1350 мин^{-1}
DD	Преобразователь угловых перемещений вала	104	6 выходных каналов, 1000 имп./оборот, $0 \dots 6000 \text{ мин}^{-1}$
BM	Блок мультиметров	509.2	4 мультиметра: $0 \dots 1000 \text{ В}$; $0 \dots 10 \text{ А}$; $0 \dots 20 \text{ МОм}$

3.2.3. Подготовка и проведение измерений с помощью электронного мультиметра

Для измерения трех базовых электрических величин (напряжения, тока и омического сопротивления) используется мультиметр. Схемы подключения мультиметра для измерения этих величин приведены на рис. 3.2, рис. 3.3, рис. 3.4. До его подключения к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- установить род тока (постоянный/переменный);
- выбрать диапазон измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильно подсоединить зажимы мультиметра к измеряемой цепи.

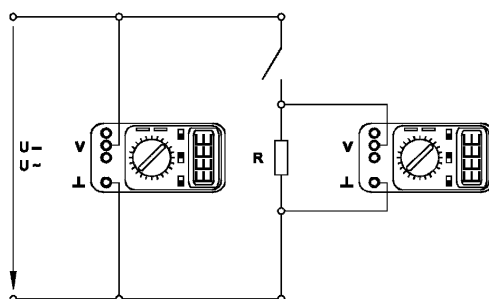


Рис. 3.2. Схема присоединения мультиметра (как вольтметра) для измерения напряжения

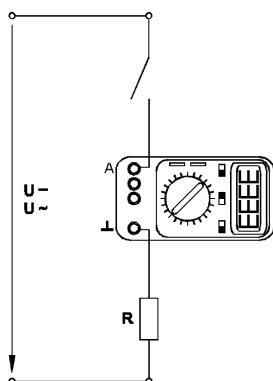


Рис. 3.3. Схема присоединения мультиметра (как амперметра) для измерения тока

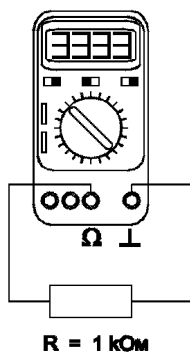


Рис. 3.4. Схема присоединения мультиметра (как омметра) для измерения омического сопротивления

3.2.4. Описание программного обеспечения

В программное обеспечение учебного лабораторного комплекса «Силовая электроника» входит универсальная программа «ВП Преобразовательная техника» и 8 специализированных программ.

Для работы этих программ необходимо наличие установленного драйвера Ni-DAQ платы PCI 6023E или PCI 6024E версии не ниже 7.0.1 с включенной поддержкой Microsoft Visual Basic.

В работе используется программа «ВП Преобразовательная техника.exe».

При работе с вышеуказанной программой необходимо выбрать режим работы каналов, а именно переключатели режимов работы каналов:

- входов АСН0-АСН8 и АСН1-АСН9 установить в положение «3А/3В»,
- входов АСН2-АСН10 – в положение «600В/3В»,
- остальных входов – в положение «Откл».

В главном меню программы выберите пункт «Приборы II». В появившемся окне в раскрывающемся списке одного из двух имеющихся измерительных каналов выберите пункт «Активная мощность P». В двух полях ввода, расположенных слева от вышеупомянутого списка, выберите необходимые входы платы – АСН0-АСН8 и АСН1-АСН9.

3.3. Общие сведения

Выпрямительно-инверторный преобразователь (блоки VD и TP) предназначен для выпрямления однофазного переменного тока частотой 50 Гц в постоянный для питания тяговых двигателей постоянного тока в режиме тяги и для преобразования постоянного тока в однофазный переменный ток частотой 50 Гц в режиме рекуперативного торможения электровоза (рис 3.1).

Тяговый двигатель D1 в режиме рекуперации работает как генератор постоянного тока с независимым возбуждением. Рекуперативное торможение осуществляется путем инвертирования постоянного тока тяговых двигателей (инвертор TP), работающих генераторами, в переменный ток промышленной частоты.

Тяговый двигатель электровоза работает на выпрямленном пульсирующем токе. Для снижения пульсаций выпрямленного тока в цепи тяговых двигателей установлены сглаживающие реакторы LA.

3.3.1. Однофазный мостовой неуправляемый выпрямитель

Схема представляет собой мост из вентилей VD1-VD2 (рис. 3.5), в одну диагональ которого включена нагрузка, а в другую – переменное напряжение e_2 . В положительном полупериоде открыты вентили VD1-VD3, в отрицательном – VD2-VD4. Ток в нагрузке протекает в одном и том же направлении в течение обоих полупериодов, поэтому эта схема относится к двухполупериодным схемам выпрямления [ЛХ].

Силовой трансформатор здесь не является принципиально необходимым и нужен только для создания требуемой величины напряжения e_2 на входе выпрямителя, соответствующего заданной величине выпрямленного напряжения E_d , а также для обеспечения гальванической развязки между питающей сетью и нагрузкой выпрямителя.

При анализе коммутационных процессов в схеме (рис. 3.5) выпрямителя следует подчеркнуть, что при отсутствии индуктивного сопротивления в цепи нагрузки перекрытия анодных токов вентилей, а следовательно, и коммутационных процессов не будет. Это связано с тем,

что вентили вступающей в работу диагонали моста не могут открыться до тех пор, пока в индуктивном сопротивлении X_a не исчезнет ЭДС самоиндукции, поддерживающая убывающий ток вентилей выходящей из работы диагонали моста. При наличии X_d вентили вступающей в работу диагонали открываются раньше и вместе с еще открытыми вентилями выходящей из работы диагонали образуют коммутационный контур, куда входят ЭДС e_2 , X_a и все четыре открытых вентилей моста (рис. 3.6), что отображается интервалом коммутации γ .

При работе двухполупериодного выпрямителя на противо ЭДС, в зависимости от величины X_d и от величины E_0 возможны три режима:

- прерывистых токов, когда $\lambda < \pi$;
- гранично-непрерывный, при $\lambda = \pi$;
- непрерывного тока.

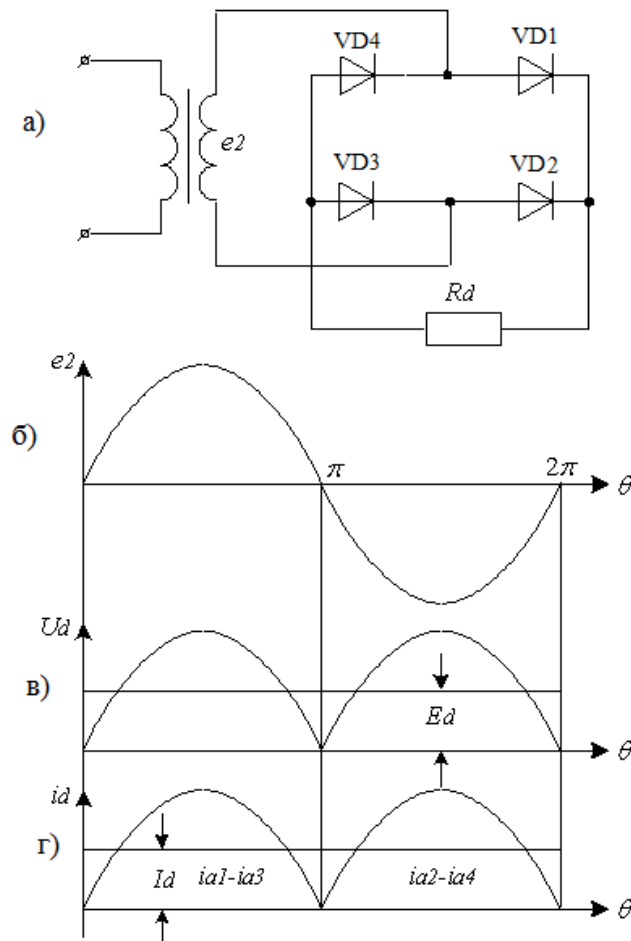


Рис. 3.5. Однофазный мостовой неуправляемый выпрямитель (активная нагрузка): а) схема силовой части; б) временные диаграммы

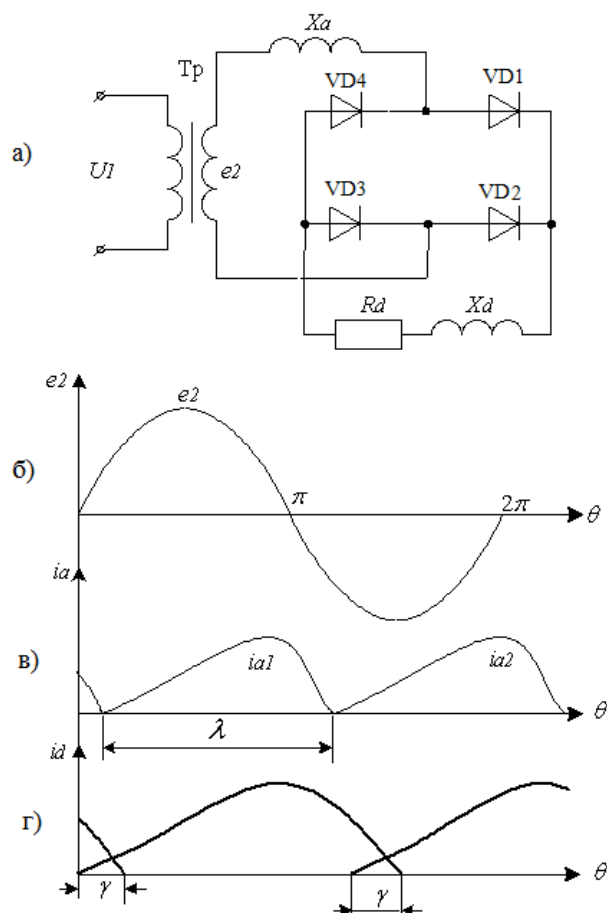


Рис. 3.6. Однофазный мостовой неуправляемый выпрямитель (активно-индуктивная нагрузка): а) схема силовой части; б) временные диаграммы

3.3.2. Однофазный зависимый инвертор

Рассмотрим работу однофазных зависимых инверторов на примере двухполупериодного зависимого инвертора со средней точкой (в данной работе применяется мостовая схема).

В схемном отношении зависимый инвертор аналогичен управляемому выпрямителю. Его единственным отличием от такой же схемы управляемого выпрямителя является противоположная полярность источника E_0 , в результате чего при протекании в цепи тока i_a , ЭДС E_0 выступает не в роли противо ЭДС (потребителя энергии), как это было в управляемом выпрямителе, а в роли источника энергии, так как направление тока i_a и E_0 совпадают. А для того, чтобы поток энергии был направлен в питающую сеть, необходимо, чтобы этот же ток i_a протекал по вторичной обмотке трансформатора, преодолевая противо ЭДС e_2 .

В схеме (рис. 3.7) предположим, что начиная с $\theta = 0$, ток проводит тиристор VT2. При достаточно большой величине X_d ток i_a на интервале

будет непрерывным (рис. 3.7,в) и будет протекать от источника E_0 , преодолевая против ЭДС e_{2b} вторичной обмотки трансформатора, и поток энергии направлен из источника E_0 в питающую сеть. Если тиристор VT1 будет открыт до точки π , то на интервале $(\pi \dots 2\pi)$ возникает, как было отмечено выше, аварийный режим, и инвертор «опрокидывается». Во избежание этого тиристор VT2 надо обязательно закрыть до точки π . Поэтому в точке $(\pi - \beta)$ система управления открывает тиристор VT1.

В этот момент времени в цепи тиристора VT1 имеет место согласное включение e_{2a} и E_0 , поэтому в интервале $(\pi - \beta) \dots \pi$ ток i_{a1} будет протекать под действием суммы $(e_{2a} + E_0)$, а в точке π полярность e_2 изменится на противоположную и ток i_{a1} будет протекать, преодолевая против ЭДС e_{2a} , т.е. поток энергии будет снова направлен из E_0 в питающую сеть. Одновременно с открытием тиристора VT1 выключается тиристор VT2 (при условии $x_a = 0$), т.к. к нему будет приложена суммарная ЭДС $(e_{2a} + e_{2b})$ в запирающем направлении в течение интервала β . Поскольку тиристор закрывается не мгновенно, а в течение времени $t_{\text{вык}}$, определяемого из его паспортных данных, то длительность интервала β должна быть не менее $\omega \cdot t_{\text{вык}}$; $\beta \geq \omega \cdot t_{\text{вык}}$.

Угол β называется углом опережения. Точку $(\pi - \beta)$ можно обозначить так же, как угол α° (рис. 3.7,б), известный как угол управления.

Отсюда зависимость между этими двумя углами $\alpha + \beta = \pi$. Мгновенное значение против ЭДС $e_{d\beta}$ (показано жирной линией), создаваемой вторичной обмоткой трансформатора протеканию тока $i_d = i_{a1} = i_{a2}$, потребляемого от источника постоянного тока E_0 , представлена на рис. 3.7,в.

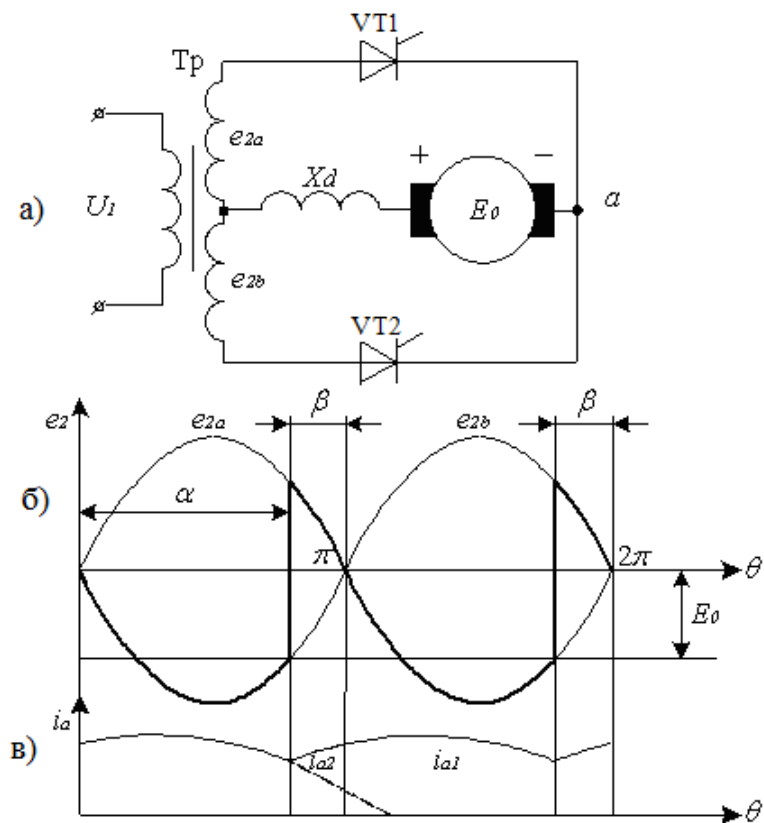


Рис. 3.7. Двухполупериодный зависимый инвертор со средней точкой: а) схема силовой части; б), в) временные диаграммы

3.3.3. Области применения выпрямительно-инверторных преобразователей

Двигатели постоянного тока (ДПТ) обеспечивают большие пределы регулирования частоты вращения при высоких энергетических показателях и механических характеристиках, удовлетворяющих требованиям большинства механизмов. ДПТ используются на транспорте (электровозы, тепловозы, трамваи, троллейбусы, мотор-колеса), в станках, прокатных станах, кранах, судовых установках и др. Двигатели постоянного тока широко применяются также в авиации, автомобилях, тракторах и космической техники.

Комплект электрооборудования тягового типа КИ-3002 предназначен для использования в качестве тягового электропривода троллейбуса (рис. 3.8) с тиристорно-импульсной системой управления: 1 - электродвигатель тяговый типа ДК-211БМ; 2 - реактор сглаживающий РС; 3 - электродвигатель вспомогательный типа ДК-662; 4 - блок защиты БЗ; 5 - блок конденсаторов фильтра БКФ; 6 - блок силовых резисторов БСР-1; 7 - блок резисторов ослабления поля БРОП; 8 - блок управления БУ;

9 - блок контакторов силовых БКС; 10 - блок контакторов вспомогательных БКВ; 11 - контроллер бесконтактный КБ; 12 - установка вентильная УВ [3].

Комплект электрооборудования осуществляет приведение в движение, регулирование тяги и электрическое торможение троллейбуса и обеспечивает в эксплуатации следующие режимы работы:

- плавный автоматический безреостатный пуск с регулированием тока тягового электродвигателя и его рекуперативное и реостатное торможение, независимое от наличия напряжения в контактной сети при шести ступенях пуска и шести ступенях торможения;
- реверсирование направления вращения тягового электродвигателя при движении троллейбуса назад без электрического торможения;
- движение троллейбуса вперед и назад при прямой и обратной полярностях напряжения контактной сети.

Тяговый электродвигатель (ТЭД) предназначен для привода ведущих колес троллейбуса, представляет собой четырехполюсную машину постоянного тока последовательного возбуждения с дополнительной независимой обмоткой возбуждения, которая подключается к аккумуляторной батарее в начале электрического торможения с целью облегчения перехода электродвигателя в генераторный режим.

Установка вентильная УВ предназначена для размещения и защиты от внешнего влияния силовых элементов тиристорно-импульсной системы управления. Выдвижная часть УВ - блок силовой вентильный БСВ. В БСВ смонтированы тиристоры и диоды с охладителями, защитные РС-цепи, шунтирующие резисторы, модули управления, коммутирующие и токоограничивающие дроссели, коммутирующий конденсатор, подзарядные резисторы.

БСВ обеспечивает режим пуска и реостатно-рекуперативного торможения тягового электродвигателя и ослабление поля его обмотки последовательного возбуждения.

В состав блока управления входят четыре блока:

- питания (БП);
- датчиков измерительных (БД);
- выходных усилителей (БВУ);
- информационно-логический (ИЛБ).

Регулятор напряжения (РН) предназначен для управления блоками стабилизатора напряжения (СН) и инвертора напряжения (ИН) БП. В регуляторе РН вырабатываются управляющие сигналы для инвертора ИН и стабилизатора СН.

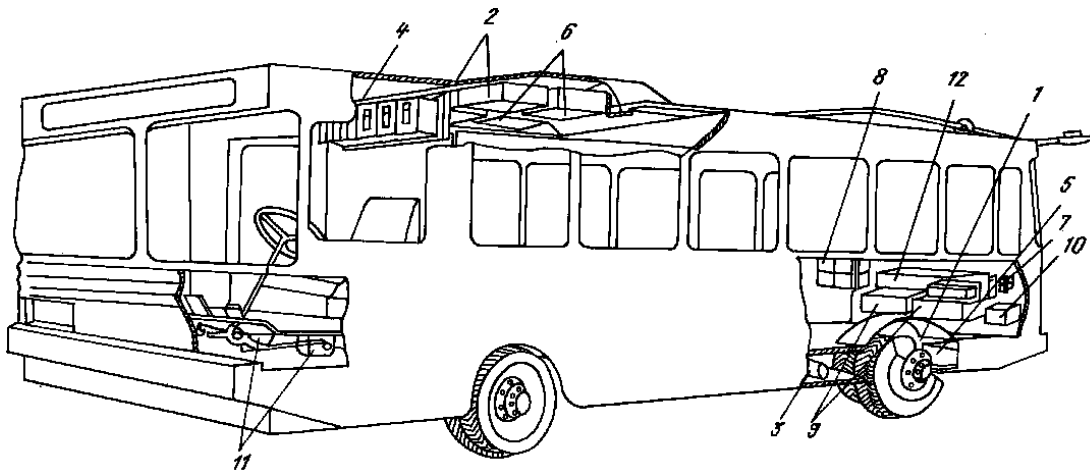


Рис 3.8. Схема размещения тягового электрооборудования комплекта типа КИ-3002 на троллейбусе

Блок датчиков измерительных БД объединяет четыре унифицированных измерительных датчика ДИ и плату индикации напряжения сети ИНС.

Датчик измерительный предназначен для измерения сигналов постоянного тока с потенциальным разделением высоковольтных и низковольтных цепей комплекта электрооборудования.

В блоке датчиков БД содержатся 4 измерительных датчика ДИ, которые могут непосредственно присоединяться к стандартному шунту с номинальным выходным напряжением 45 мВ. Для использования в качестве датчиков напряжения необходимо применение добавочных сопротивлений, установленных вне датчиков, в блоке защиты БЗ.

Информационно-логический блок ИЛБ предназначен для реализации информационно-логических функций по восприятию команд с пульта управления троллейбусом ПУТ и контроллеров хода и торможения, аналоговых сигналов о токе якоря тягового электродвигателя, напряжений контактной сети, конденсаторов фильтра и дискретных сигналов о структуре модуля силового МС и обработке требуемых режимов троллейбуса.

Контроллер бесконтактный КБ (тормозной, ходовой) предназначен для задания уровней тока ТЭД при пуске и торможении, обеспечивает регулирование тягового и тормозного усилия на валу электродвигателя троллейбуса.

Контроллер представляет собой цилиндрический металлический корпус, в котором вращается приводной вал. Этот вал через зубчатый сектор передает вращение центральному валу контроллера, на котором установлена металлическая маска для программного включения и выключения трех бесконтактных датчиков в функции угла поворота.

Блок защиты предназначен для защиты от аварийных токов и создания необходимой полярности напряжения на установке вентильной. БЗ содержит автоматические выключатели, предохранители, переключатель полярности напряжения и резисторы. Устанавливается в один из отсеков шкафа с электрооборудованием.

Блок контакторов силовых БКС предназначен для коммутации силовой цепи и цепи управления и выбора режимов установки вентильной для хода вперед и назад, торможения и выбега.

Блок контакторов вспомогательных БКВ предназначен для зарядки конденсатора фильтра, форсировки самовозбуждения ТЭД в начале режима торможения, управления отопителями троллейбуса, включения питания двигателя вентилятора и блока управления.

Блок силовых резисторов БСР-1 предназначен для рассеивания энергии реостатного торможения ТЭД троллейбуса. Блок состоит из двух ящиков, соединенных между собой перемычками. Каждый ящик состоит из четырех элементов типа КФ, имеющих форму цилиндра и изготовленных из фехральной ленты, намотанной на ребро и смонтированной на фарфоровых изоляторах, укрепленных на стальных держателях. Элементы в ящиках расположены по четыре в один ряд. В одном из ящиков расположен диод VD, улучшающий прерывание тока резисторов, которому препятствует паразитная индуктивность резисторов. БСР располагается на крыше троллейбуса и охлаждается набегающим потоком воздуха.

3.5. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования системы однофазных мостовых неуправляемого выпрямителя и инвертора при работе на машину постоянного тока (моделирует работу электровоза):

- проверка работоспособности стенда;
- получение зависимости потребляемой мощности от нагрузки

$P_{\text{потр}} = f(I_1)$ (моделирует движение электровоза “в гору”);

- получение зависимости отдаваемой в сеть мощности от нагрузки

$P_{\text{отд}} = f(I_1)$ (моделирует движение электровоза “под гору”);

- снятие электромеханической $\omega = f(I)$ и механической $\omega = f(M)$

характеристик двигателя D1 при регулировании потока возбуждения Φ_B ;

- снятие внешней характеристики выпрямителя $U_B = f(I_B)$;
- снятие входной характеристики инвертора $U_{\text{и}} = f(I_{\text{и}})$;

- снятие характеристик переходных процессов $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ при пуске, торможении, набросе-сбросе нагрузки.

3.6. Проверка работоспособности стенда

Убедиться, что предохранители всех блоков исправны [1]!

Проверку осуществлять по схеме рис. 3.1. Для этого необходимо проделать следующее:

- Убедиться, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

В ходе работы ток якоря двигателя D1 (ток нагрузки I_1), показываемый амперметром A1 блока ВМ, не должен превышать 0,5А!

- Соединить гнезда защитного заземления "⊕" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника GA.

- Подключить вилки питания устройств 220 В, используемых в эксперименте, сетевыми шнурами с розетками удлинителя.

- Соединить аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

- Установить переключатели: блока дросселей LA в положение «3 Гн», номинальных фазных напряжений вторичных полуобмоток трансформаторов ТТ1 и ТТ2 соответственно в положение «42 В» и «73 В».

- Переключить тумблеры делителей напряжения коннектора КК в положение «1:1».

- Привести в рабочее состояние персональный компьютер IBM, войти в каталог с программным обеспечением учебного комплекса и запустить прикладную программу «ВП Преобразовательная техника.exe».

- Выбрать в главном меню программы пункт «Приборы II». В появившемся окне, в раскрывающемся списке одного из двух имеющихся измерительных каналов, выбрать пункт «Активная мощность P». В двух полях ввода, расположенных слева от вышеупомянутого списка, выбрать необходимые входы платы – АСН4-АСН12 и АСН5-АСН13.

- Включить выключатели «СЕТЬ» тиристорного преобразователя (регулятора) ТР, указателя частоты вращения ИВ, блока датчиков тока и напряжения ВМ.

- Установить, вращая регулировочную рукоятку преобразователя ТР, значение угла управления α равное 150° .

- Нажать кнопку «3Ф ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ» на лицевой панели преобразователя ТР

и удерживать ее до тех пор, пока не загорится расположенный рядом с ней светодиод.

- Включить выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора АТ.
- Повернуть регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ в крайнее правое положение.
- Установить мультиметры на соответствующие пределы измерений токов и напряжений.
- Включить источник ГА. О наличии фазных напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.
- После завершения разгона двигателя D1, изменять выходное напряжение автотрансформатора АТ и установить частоту вращения этого двигателя равной 1500 мин^{-1} по указателю ИВ.
- Установить тумблер на лицевой панели выключателя QA в положение «РУЧН.» и включить там же выключатель «СЕТЬ».

3.7. Определение зависимости потребляемой двигателем D1 мощности от нагрузки $P_{\text{потр}} = f(I_1)$

Снятие зависимости потребляемой двигателем D1 мощности $P_{\text{потр}}$ от величины тока I_1 якоря осуществлять следующим образом:

- Подготовить стенд к работе по пункту 3.6.
- Включить выключатель QA нажатием на кнопку «ВКЛ.»
- Изменять ток якоря I_1 (до 0,5А) двигателя D1, регулируя нагрузку установкой номинальных фазных напряжений вторичных полуобмоток трансформатора ТТ1 с помощью соответствующего переключателя (имитация изменения крутизны подъема железнодорожного пути), и заносить показания амперметра А1 блока ВМ, а также активной мощности P_1 по виртуальному прибору компьютера ИВМ в табл. 3.4.
- По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник ГА нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

Таблица 3.4

$P_{\text{потр}}, \text{Вт}$								
$I_1, \text{А}$								

- Построить зависимость $P_{\text{потр}} = f(I_1)$ по данным табл. 3.4.

3.8. Получение зависимости отдаваемой двигателем D1 в сеть мощности от нагрузки $P_{\text{отд}} = f(I_1)$

Снятие зависимости отдаваемой двигателем в сеть питания D1 мощности $P_{\text{отд}}$ от величины тока I_1 якоря электрической машины осуществлять следующим образом:

- Подготовить стенд к работе по п. 3.6.
- Включить выключатель QA нажатием на кнопку «ВКЛ.».
- Повернуть регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ в крайнее левое положение (тем самым получить минимальное значение потока возбуждения Φ_B).

• Изменять ток якоря I_1 (до 0,5А) двигателя D1, регулируя нагрузку установкой номинальных фазных напряжений вторичных полуобмоток трансформатора ТТ1 с помощью соответствующего переключателя (имитация изменения крутизны уклона железнодорожного пути), заносить показания амперметра А1 блока ВМ, а также активной мощности P_1 по виртуальному прибору компьютера IBM в таблицу, аналогичную табл. 3.4.

• По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

- Построить зависимость $P_{\text{отд}} = f(I_1)$, по данным таблицы, аналогичной табл. 3.4.

3.9. Снятие электромеханической $\omega = f(I_1)$ и механической $\omega = f(M_1)$ характеристик двигателя D1 при изменении потока возбуждения Φ_B

Характеристики $\omega = f(I_1)$ и $\omega = f(M_1)$ снимать при изменении потока Φ_B обмотки возбуждения двигателя D1, устанавливаемого вращением регулировочной рукоятки автотрансформатора АТ:

- Подготовить стенд к работе по пункту 3.6.
- Включить выключатель QA нажатием на кнопку «ВКЛ.».

- Изменять ток якоря I_1 (до 0,5А) двигателя D1, регулируя нагрузку установкой номинальных фазных напряжений вторичных полуобмоток трансформатора ТТ1 с помощью соответствующего переключателя, и заносить показания амперметра А1 и вольтметра V блока ВМ, а также указателя ИВ в табл. 3.5.

- Повернуть регулировочную рукоятку автотрансформатора АТ в крайнее левое положение (тем самым получить минимальное значение потока возбуждения Φ_B).

- По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

Таблица 3.5

I_1, A								
U_1, B								
$n, \text{мин}^{-1}$								

- Вычислить значение угловой скорости вращения ω двигателя D1 по выражению, используя данные таблиц, аналогичных табл. 3.5:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

и его электромагнитного момента M_1 по формуле:

$$M_1 = \frac{60}{2\pi n} (U_1 - 65 \cdot I_1) \cdot I_1,$$

занести полученные результаты в таблицу, аналогичную табл. 3.6.

Таблица 3.6

$M_1, H \cdot m$								
ω, c^{-1}								

Привести пример расчёта.

- Построить электромеханическую $\omega = f(I_1)$ и механическую $\omega = f(M_1)$ характеристики двигателя D1, по данным табл. 3.5, табл. 3.6 и таблицам, аналогичным табл. 3.5 и 3.6.

3.10. Получение внешней характеристики $U_B = f(I_B)$ выпрямителя ВД

Исследование внешней характеристики $U_B = f(I_B)$ выпрямителя ВД осуществлять следующим образом:

- Подготовить стенд к работе по пункту 3.6.
- Включить выключатель QA нажатием на кнопку «ВКЛ.».
- Изменять ток выпрямителя I_B (до 0,5А) преобразователя ВД, регулируя нагрузку установкой номинальных фазных напряжений вторичных полуобмоток трансформатора ТТ1 с помощью соответствующего переключателя, и заносить показания амперметра А3 и вольтметра V блока ВМ в табл. 3.7 при постоянном возбуждении.
- По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

Таблица 3.7

нагрузка \ показатели	ХХ	42В	73В	127В
I_B, A				
U_B, A				

- Построить зависимость $U_B = f(I_B)$, по данным табл. 3.7.

3.11. Снятие входной характеристики инвертора $U_{и} = f(I_{и})$ изменением угла управления α°

Снятие входной характеристики $U_{и} = f(I_{и})$ инвертора ТР1 осуществлять следующим образом:

- Подготовить стенд к работе по пункту 3.6.
- Добиться показаний на амперметре А2 блока ВМ, вращая регулировочную рукоятку преобразователя ТР1.
- Изменять ток инвертора $I_{и}$ преобразователя ТР, регулируя нагрузку установкой номинальных фазных напряжений вторичных полуобмоток трансформатора ТТ1 с помощью соответствующего

переключателя, и заносить показания амперметра А2 и вольтметра V блока ВМ в табл. 3.8.

- Прodelать опыты для уменьшенных значений угла управления α° преобразователя ТР, при этом показания приборов записывать в табл. 3.8.

- По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР1 повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.

Таблица 3.8

угол α°	нагрузка				
	показатели	XX	42В	73В	127В
	$I_{и}, А$				
	$U_{и}, А$				
	$I_{и}, А$				
	$U_{и}, А$				
...

- Построить зависимости $U_{и} = f(I_{и})$ по данным табл. 3.8.


3.12. Определение координат и параметров электропривода в переходных режимах (пуск, торможение, реверс, сброс – наброс нагрузки)

3.12.1. Рекомендации по использованию программы «Регистратор режимных параметров машины ДПТ»

- Для определения координат точек на графиках использовать отображаемые на экране текущие координаты указателя мыши.

- Масштабирование производить путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществлять обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

- Графики относительно осей координат двигать путем нажатия и удержания на соответствующем объекте правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

- Очищать область построения механической характеристики нажатием на соответствующую виртуальную кнопку  или клавишу «Пробел».

3.12.2. Снятие характеристик переходных процессов $\omega = f(t)$, $I_1 = f(t)$, $M_1 = f(t)$ при пуске, торможении, набросе - сбросе нагрузки

Опыты по исследованию переходных процессов пуска, торможения при работе на холостом ходу и под нагрузкой, наброса-сброса нагрузки проводить по заданию преподавателя. Для этого:

- Подготовить стенд к работе по пункту 3.6.
- Организовать переходный процесс наброса-сброса нагрузки двигателя D1, для чего нажать кнопку «ВКЛ.» и, спустя 5 с, кнопку «ОТКЛ.» выключателя QA .
- Наблюдать изменение координат и параметров электропривода в реальном времени $\omega = f(t), I_1 = f(t), M_1 = f(t)$.
- Остановить управление тиристорным преобразователем сразу после завершения переходного процесса, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Импульсы управления с преобразователей снимутся.
- Увеличить размеры интересующих графиков, скопировать их в буфер обмена.
- Запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти.
- По завершении эксперимента сначала у автотрансформатора АТ, а затем у преобразователя ТР повернуть регулировочные рукоятки в крайнее левое положение, нажать кнопку «ОТКЛ.» автотрансформатора АТ. Отключить источник GA нажатием на кнопку - гриб и последующим поворотом в левое положение ключа выключателя. Разомкнуть выключатели «СЕТЬ» всех задействованных в эксперименте блоков.
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. При обработке графиков переходных процессов на каждой характеристике необходимо отметить:
 - максимальное значение тока во время переходных процессов $I_{\text{макс}}$;
 - установившиеся начальное и конечное значения тока и скорости $I_{\text{н}}$, $I_{\text{к}}$, $\omega_{\text{н}}$, $\omega_{\text{к}}$;
 - время переходного процесса, $t_{\text{пт}}$;
 - при сбросе и набросе величину выброса и проседания скорости;

– относительную величину пульсаций тока – $\delta I\% = I/I_{уст}$, здесь I – абсолютная величина размаха пульсаций тока, $I_{уст}$ – установившееся после переходного процесса значение тока. Во время переходного процесса отметить наибольший размах пульсаций и найти $\delta I\%_{макс}$. После окончания переходного процесса пульсации принимают постоянное значение $\delta I\%_{уст}$.

- Результаты анализа занести в табл. 3.9.

Таблица 3.9

№п. П.	Параметр переходного процесса								Название переходного процесса (пуск, торможение и т.д.)
	$t_{пп}$, мс	$\omega_{уст}$, с ⁻¹	$\omega_{нач}$, с ⁻¹	$I_{нач}$, Нм	$I_{уст}$, Нм	$\delta I_{уст}$, %	$\delta I_{макс}$, %	$I_{макс}$, Нм	
1									
...									
6									

3.13. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.
3. Таблицы опытных данных и характеристики $P_{потр} = f(I_1)$, $P_{отд} = f(I_1)$.
4. Таблицы опытных данных и характеристики $\omega = f(I_1)$, $\omega = f(M_1)$.
5. Таблицы опытных данных и характеристики $U_B = f(I_B)$, $U_{и} = f(I_{и})$.
6. Графики переходных процессов скорости $\omega = f(t)$, тока $I_1 = f(t)$ и момента $M_1 = f(t)$ при пуске, останове и сбросе – набросе нагрузки на соответствующих (основной и искусственных) характеристиках при различных способах управления тиристорным преобразователем.
7. Определение координат и параметров системы электропривода в статических и переходных режимах работы.
8. Краткие выводы.

3.14. Контрольные вопросы

3.14.1. Изобразить механическую характеристику ДПТ НВ $\omega = f(M_1)$, отметить на ней зоны работы двигателя в двигательном и генераторном режимах, объяснить условия, при которых двигатель работает в двигательном и генераторном режиме.

3.14.2. Пояснить назначение инвертора на электровозе. В каком режиме работы двигателя он используется и для чего?

3.14.3. Нарисовать эпюры напряжения, поясняющие работу инвертора в данной системе.

3.14.4. Объяснить различие активной и реактивной мощностей.

3.14.5. Привести формулы для определения координат граничных значений скорости вращения ($\omega_{гр}$) и тока ($I_{гр}$).

3.14.6. Изобразить графики переходных процессов $\omega=f(t)$ и $I=f(t)$ в системе электропривода:

- при пуске;
- при торможении (останове);
- при сбросе и набросе нагрузки.

3.14.7. Назвать причину отсутствия перерегулирования на графике переходного процесса по скорости.

3.14.8. По какой траектории изменяются значения скорости и тока во время переходного процесса?

3.14.9. Назвать способы определения времени переходного процесса.

3.14.10. Как определить электромеханическую постоянную времени переходного процесса?

Литература

1. Карпеш М.А., Красногорцев И.Л., Сенигов П.Н. Силовая электроника. Руководство по выполнению базовых экспериментов. СЭ.001 РБЭ (911). – Челябинск: ООО «Учебная техника», 2003. – 172 с.

2. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. 1980

3. <http://www.laborant.ru/eltech/10/2/2/11-95.htm>.

4. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.

5. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

6. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.

7. Электровоз ВЛ 80^Р. Руководство по эксплуатации./ Под ред. Б.А. Тушканова. – М.: Транспорт, 1985. – 541 с.
8. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

4.1. Цель работы

Исследование электромеханических $\omega=f(I_1)$, механических $\omega=f(M_1)$ характеристик при различных режимах работы и энергетических показателей асинхронного короткозамкнутого двигателя.

4.2. Оборудование стенда

Лабораторный стенд состоит из приборного блока с комплектом измерительных приборов в отдельном корпусе (тип К540) и электромеханического агрегата, включающего исследуемый асинхронный двигатель и нагрузочный двигатель постоянного тока [6].

Агрегат и блок соединены между собой двумя силовыми кабелями и одним измерительным. Измерительный комплект и приборный блок связаны измерительным кабелем.

Технические данные исследуемого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД с к.з.ротором, М1), рис. 4.1:

тип АИР-56А2У3;

$P_H=0,18$ кВт;

$U_H=380/220$ В (Y/ Δ);

$I_H=0,52/0,89$ А (Y/ Δ);

$n_H=2730$ об/мин;

$\eta_H=68\%$;

$\cos \varphi_H=0,78$;

режим работы S1;

$R_1=51,3$ Ом; $X_1=39,5$ Ом; $R_2=45,7$ Ом; $X_2=43,2$ Ом.

Технические данные нагрузочного двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ, М2):

тип Д-200;

$P_H=0,2$ кВт; $U_H=27$ В; $I_H=10$ А; $n_H=2750$ об/мин; $M_H=0,69$ Нм.

4.3. Перевод обозначений элементов оборудования и принципиальной электрической схемы на лицевой панели приборного блока

Перевод обозначений элементов оборудования осуществлять по схеме лицевой панели (рис. 4.1):

POWER	Энергия
SUPPLY VOLTAGE	Напряжение питания
ARMATURE VOLTAGE	Напряжение якоря
ARMATURE CURRENT	Ток якоря
EXCITING CURRENT	Ток возбуждения
CURRENT SOURCE	Источник тока
AC MOTOR STUDY	Исследуемый АД
TEST MOTOR	Исследуемый двигатель
BRAKE MOTOR	Тормозной двигатель
CURRENT BRAKING	Тормозной ток
TACHOMETER	Тахометр
SPEED, rad/s	Скорость, рад/с
HAND CONTROL	Ручное управление
PHOTOELECTRIC	Фотоэлектрический
TRANSDUCER	преобразователь
CMPT	Компьютер
ON	Включено
OFF	Выключено

4.4. Общие сведения

Наиболее широко распространенным типом электродвигателей в электроприводах являются асинхронные двигатели (АД) в силу их простоты и дешевизны.

Асинхронной машиной называется двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна обмотка (первичная) получает питание от электрической сети с постоянной частотой, а вторая обмотка (вторичная) замыкается накоротко или на сопротивление. Токи во вторичной обмотке появляются в результате электромагнитной индукции. Их частота является функцией угловой скорости ротора, которая, в свою очередь, зависит от вращающего момента, приложенного к валу [Л].

Наибольшее распространение получили асинхронные машины с трехфазной симметричной разноименнополюсной обмоткой на статоре, питаемой от сети переменного тока, и с трехфазной или многофазной симметричной разноименнополюсной обмоткой на роторе.

Машины такого исполнения называют просто «асинхронными машинами», в то время как асинхронные машины иных исполнений относятся к «специальным асинхронным машинам».

Асинхронные машины используются в основном как двигатели; в качестве генераторов они применяются крайне редко.

Разноименнополюсная обмотка ротора асинхронного двигателя может быть короткозамкнутой (беличья клетка) или фазной (присоединяется к контактным кольцам). Наибольшее распространение имеют дешевые в производстве и надежные в эксплуатации двигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе, или короткозамкнутые двигатели. Эти двигатели обладают жесткой механической характеристикой (при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной их частота вращения уменьшается всего на 2...5 %).

Двигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе обладают также довольно высоким начальным пусковым вращающим моментом. Их основные недостатки: трудность осуществления плавного регулирования частоты вращения в широких пределах; потребление больших токов из сети при пуске (в 5...7 раз превышающих номинальный ток).

Двигатели с фазной обмоткой на роторе или двигатели с контактными кольцами избавлены от этих недостатков ценой усложнения конструкции ротора, что приводит к их заметному удорожанию по сравнению с короткозамкнутыми двигателями (примерно в 1,5 раза). Поэтому двигатели с контактными кольцами на роторе находят применение лишь при тяжелых условиях пуска, а также при необходимости плавного регулирования частоты вращения.

Двигатели с контактными кольцами иногда применяют в каскаде с другими машинами. Каскадные соединения асинхронной машины позволяют плавно регулировать частоту вращения в широком диапазоне при высоком коэффициенте мощности, однако из-за значительной стоимости не имеют сколько-нибудь заметного распространения. В двигателях с контактными кольцами выводные концы обмотки ротора, фазы которой соединяются обычно в звезду, присоединяются к трем контактными кольцам. С помощью щеток, соприкасающихся с кольцами, в цепь обмотки ротора можно вводить добавочное сопротивление или дополнительную ЭДС для изменения пусковых или рабочих свойств машины; щетки позволяют также замкнуть обмотку накоротко.

В большинстве случаев добавочное сопротивление вводится в обмотку ротора только при пуске двигателя, что приводит к увеличению пускового момента и уменьшению пусковых токов и облегчает пуск

двигателя. При работе асинхронного двигателя пусковой реостат должен быть полностью выведен, а обмотка ротора замкнута накоротко. Иногда АД снабжаются специальным устройством, которое позволяет после завершения пуска замкнуть между собой контактные кольца и приподнять щетки. В таких двигателях удается повысить КПД за счет исключения потерь от трения колец о щетки и электрических потерь в переходном контакте щеток.

Выпускаемые заводами асинхронные двигатели предназначаются для работы в определенных условиях с определенными техническими данными, называемыми номинальными. К числу номинальных данных асинхронных двигателей, которые указываются в заводской табличке машины, укрепленной на ее корпусе, относятся: механическая мощность, развиваемая двигателем, частота сети, линейное напряжение статора, линейный ток статора, частота вращения ротора; коэффициент мощности; коэффициент полезного действия.

Если у трехфазной обмотки статора выведены начала и концы фаз и она может быть включена в звезду или треугольник, то указываются линейные напряжения и токи для каждого из возможных соединений в виде дроби.

Кроме того, для двигателя с контактными кольцами приводятся напряжение на разомкнутых кольцах при неподвижном роторе и линейный ток ротора в номинальном режиме.

Номинальные данные АД варьируются в широких пределах. Номинальная мощность — от долей ватта до десятков тысяч киловатт. Номинальная синхронная частота вращения $60f_{\text{ср}}$ при частоте сети 50 Гц от 3000 до 500 об/мин и менее в особых случаях; при повышенных частотах — до 100 000 об/мин и более (номинальная частота вращения ротора обычно на 2...5 % меньше синхронной; в микродвигателях — на 5...20 %). Номинальное напряжение — от 24 В до 10 кВ (большие значения при больших мощностях).

Номинальный КПД асинхронных двигателей возрастает с ростом их мощности и частоты вращения; при мощности более 0,5 кВт он составляет 0,65...0,95, в двигателях малой мощности 0,2...0,65.

Номинальный коэффициент мощности АД, равный отношению активной мощности к полной мощности, потребляемой из сети, также возрастает с ростом мощности и частоты вращения двигателей; при мощности более 1 кВт он составляет 0,7...0,9; в двигателях малой мощности 0,3...0,7.

Трехфазные коллекторные машины переменного тока являются разновидностью асинхронных машин, у которых можно получить более широкий диапазон регулирования частоты вращения. Развитие их началось в начале XX в., когда были выявлены невысокие регулировочные возможности бесколлекторных асинхронных двигателей. В это время было предложено большое количество различных типов машин, но вследствие высокой стоимости, сложности их обслуживания, а также невысокой надежности широкого применения они не нашли. Из известных трехфазных коллекторных двигателей в настоящее время иногда находит применение трехфазный параллельный коллекторный двигатель с питанием со стороны ротора. Этот двигатель был предложен в 1910г. почти одновременно немецкими электротехниками Х. Шраге и Р. Рихтером. Поэтому этот двигатель чаще называется двигателем Шраге-Рихтера [7].

В настоящее время двигатели Шраге-Рихтера иногда применяются в полиграфической, текстильной и некоторых других отраслях промышленности. В этих двигателях используется принцип регулирования частоты вращения путем введения в цепь каждой фазы ротора АД добавочной ЭДС частоты скольжения. Одновременно с этим имеется возможность регулировать и $\cos \varphi$.

Если в машинах двойного питания добавочная ЭДС получалась от преобразователя частоты, то в двигателе Шраге-Рихтера для этой цели используется коллектор. В трехфазных двигателях коллектор является преобразователем ЭДС частоты сети в ЭДС частоты скольжения.

На рис. 4.2 показана схема двигателя Шраге-Рихтера. По сравнению с обычным асинхронным двигателем он имеет обращенную конструкцию. Его трехфазная первичная обмотка 1 располагается на роторе и питается от сети через контактные кольца. Вторичная обмотка 2 располагается на статоре. Каждая обмотка этой фазы соединена со щетками, передвигающимися по коллектору, расположенному на роторе. К коллектору подсоединяется обмотка 3, которая размещается в тех же пазах, что и обмотка 1 ротора. В обмотке 3 наводится ЭДС за счет трансформаторной связи ее с обмоткой 1. Щетки каждой фазы статора могут сдвигаться или раздвигаться, что осуществляется при помощи подвижных траверс (рис. 4.3).

Применяя правила правой и левой руки, можно установить, что вследствие обращенной конструкции машины электромагнитный момент, приложенный к ротору, будет направлен в сторону, противоположную вращению поля, т. е. ротор и поле будут вращаться в разные стороны.

Частота вращения ротора n в общем случае не будет равна частоте вращения поля n_1 .

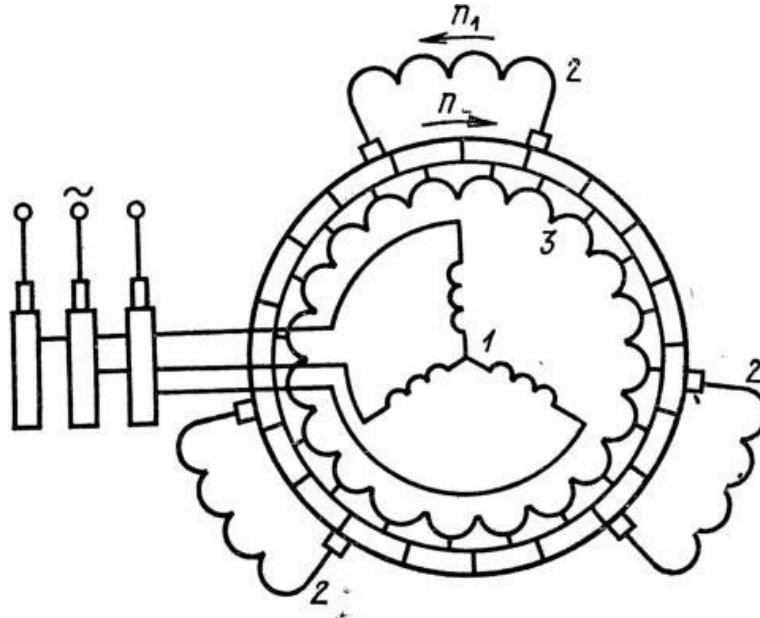


Рис. 4.2.Схема двигателя Шраге-Рихтера

Скольжение ротора относительно поля определяется известным выражением $s = (n_1 - n) / n_1$.

В пространстве относительно неподвижных щеток магнитное поле машины будет перемещаться с частотой вращения n_{1s} . Вследствие этого ЭДС на щетках будет иметь частоту скольжения f_{1s} , а ее значение и фаза будут зависеть от размера и направления сдвига щеток относительно друга.

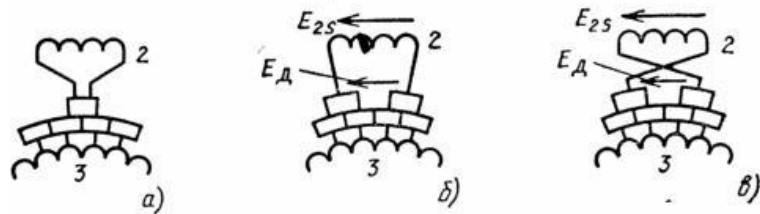


Рис. 4.3. Характерные положения щеток на коллекторе

Эта ЭДС будет иметь ту же частоту, что и ЭДС в обмотке 2. На рисунке показаны три наиболее характерных положения щеток на коллекторе. В первом случае (рис. 4.3,а) обе щетки каждой фазы стоят на одной коллекторной пластине. В этом случае в цепь обмотки 2 никакой добавочной ЭДС не вводится и машина работает как обычный

асинхронный двигатель. Так как линии вращающегося магнитного поля пересекают проводники обмоток статора и ротора в одном и том же направлении, то в любой момент времени ЭДС статора E_{2s} и ЭДС на щетках E_d при положении их на коллекторе во втором случае (рис. 4.3,б), будут направлены встречно. Поэтому при таком положении щеток частота вращения будет ниже основной. При положении щеток в третьем положении (рис. 4.3,в) ЭДС будут суммироваться, частота вращения будет выше основной.

У этого двигателя, сдвигая и раздвигая щетки, можно менять частоту вращения. Обычно диапазон регулирования частоты вращения у таких двигателей не превышает 1...3. Если щетки перемещать несимметрично относительно осей обмоток фаз 2, то одновременно с частотой вращения можно у двигателя регулировать $\cos \varphi$.

При любом положении щеток механические характеристики двигателя имеют вид, аналогичный механическим характеристикам АД. Условия коммутации у двигателя Шраге-Рихтера получаются значительно хуже, чем у двигателей постоянного тока.

Двигатель Шраге-Рихтера не имеет дополнительных полюсов, а кроме того, в коммутируемых секциях помимо реактивной ЭДС индуцируется трансформаторная ЭДС e_T .

Трансформаторная ЭДС индуцируется вращающимся магнитным полем. Электродвижущая сила e_T не зависит от нагрузки машины, существует при неподвижном роторе и сдвинута по фазе относительно реактивной ЭДС. Значением трансформаторной ЭДС ограничивается предельная мощность двигателей Шраге-Рихтера. Поэтому эти двигатели не строятся на мощности свыше 200...250 кВт.

4.4.1. Режимы работы и статические характеристики асинхронного электропривода с короткозамкнутым ротором

Для электропривода с асинхронным короткозамкнутым двигателем при работе в двигательном и тормозных режимах приближенно характеристики могут быть рассчитаны, если известны основные технические данные двигателя и параметры его обмоток. Расчеты выполняют, как правило, на основе Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя [2].

Механические характеристики АД в режимах двигательном, торможения противовключением и рекуперативного (генераторного) торможения можно определить по формуле Клосса:

$$M = \frac{2M_K(1 + as_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2as_K},$$

где M_K – максимальный (критический) момент АД;

$$M_K = \frac{3U_1^2}{2\omega_0(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_K^2})},$$

где U_1 – напряжение фазы статора;

R_1 – активное сопротивление фазы статора;

$X_K = X_1 + X_2'$ – индуктивное сопротивление к.з. фазы двигателя (X_1 ,

X_2' – индуктивные сопротивления фазы статора и приведенное фазы ротора);

ω_0 – угловая синхронная скорость вращения;

знак «+» – двигательный режим и торможение противовключением;

знак «-» – рекуперативное торможение;

$a = R_1/R_2'$ – коэффициент (R_2' – приведенное активное сопротивление фазы ротора);

$$s_K = \frac{R_2'}{\pm \sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \text{ – критическое скольжение;}$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \text{ – скольжение двигателя,}$$

где ω , n – текущие скорости вращения ротора.

На рис. 4.4 приведены механические характеристики АД в различных режимах работы.

При скольжении $s = 1 \div 0$ – двигательный режим (I квадрант);

$s \geq 1$ – режим торможения противовключением (IV квадрант);

$s \leq 0$ – режим рекуперативного (генераторного) торможения (II квадрант);

$s \leq 1$ – режим динамического торможения (III квадрант).

Характерные точки механической характеристики в режимах двигательном, рекуперативном и противовключении следующие:

$s = 0$, $\omega = \omega_0$, $M = 0$ – точка идеального холостого хода (синхронная скорость вращения);

$s = 1$, $\omega = 0$, $M = M_{K3} = M_{II}$ – точка короткого замыкания;

$s = s_{KD}$, $M = M_{KD}$, $s = s_{KG}$, $M = M_{KG}$ – точки экстремума;

$s \rightarrow \pm\infty$, $\omega \rightarrow \mp\infty$, $M \rightarrow 0$ – асимптота механической характеристики, которой является ось скорости.

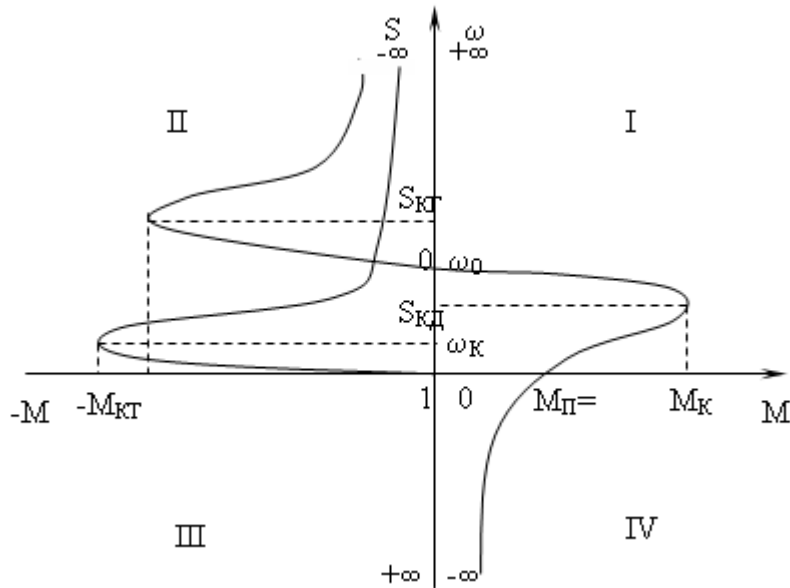


Рис. 4.4. Механические характеристики режимов работы АД

Механическую характеристику АД при динамическом торможении можно рассчитать по следующим формулам:

$$M \approx \frac{2M_{KT}}{\frac{\omega}{\omega_{KT}} + \frac{\omega_{KT}}{\omega}}, \quad (4.1)$$

где $M_{KT} = \frac{3(K_{CX}I_{\Pi})^2 X_0^2}{2\omega_0(X_0 + X_2)}$, – максимальный (критический) момент при динамическом торможении ;

K_{CX} – коэффициент, зависящий от способа соединения обмотки статора ($K_{CX}=0,816$, если обмотка статора соединена Y, и $K_{CX}=0,472$, если обмотка статора соединена Δ);

I_{Π} – величина постоянного тока;

$$X_0 \approx X_{\mu} = \sqrt{\left(\frac{U_1}{I_0}\right)^2 - R_1^2} - X_1, \quad - \quad \text{индуктивное сопротивление}$$

намагничивающего контура в начальной части кривой намагничивания АД;

I_0 – ток намагничивающей цепи АД;

$$\omega_{KT} = \omega_0 \frac{R_2}{X_0 + X_2} \quad - \quad \text{критическая скорость при динамическом}$$

торможении.

Выражения для расчета электромеханических характеристик АД выглядят следующим образом:

Ток фазы статора:

$$I_1 \approx \sqrt{I_0^2 + B(I_2')^2}, \quad (4.2)$$

где $e = 1 + \frac{2I_0 X_b}{U_1}$ – коэффициент.

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_K^2}} \text{ – приведенный ток фазы ротора.}$$

Электромеханические характеристики АД изображены на рис. 4.5.

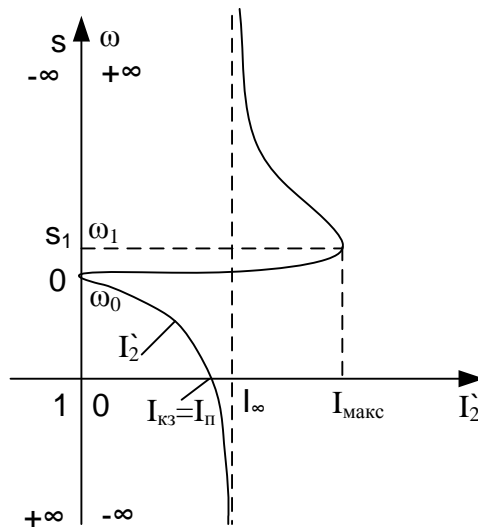


Рис. 4.5. Электромеханические характеристики АД

Характерные точки электромеханической характеристики:

$s=0, \omega=\omega_0, I_2'=0$ – точка идеального холостого хода (синхронная скорость вращения);

$s=1, \omega=0, I_2'=I_{кз}$ – точка короткого замыкания;

$s_1=-R_2'/R_1, \omega_1=\omega_0(1+s_1), I_2'=I_{макс}=U/X_K$ – точка максимального значения тока ротора, лежащая в области отрицательных скольжений;

$s \rightarrow \pm\infty, \omega \rightarrow \mp\infty, I_2' \rightarrow I_{макс} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}$ – асимптотическое значение

тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости.

Скорость вращения в электроприводе с асинхронным двигателем регулируется изменением частоты f и величины U питающего напряжения, числа пар полюсов $P_{п}$, активного сопротивления статора R_1 , активного

сопротивления ротора R_2' , индуктивного сопротивления статора X_1 и ротора X_2' .

На рис. 4.6 показаны электромеханические естественная и искусственные характеристики при различных способах регулирования:

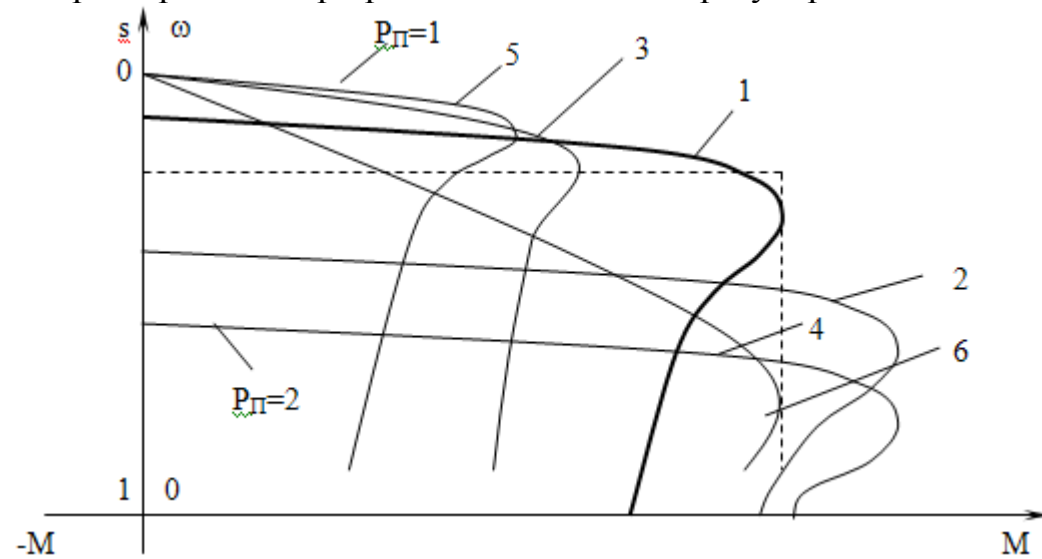


Рис. 4.6. Естественная и искусственные механические характеристики АД:
 1 – естественная ($U = U_H, f = f_H, r_1, r_2', x_1, x_2', 2P_{\pi} = 2$); 2 – искусственная ($f < f_H$);
 3 – искусственная ($U < U_H$); 4 – искусственная ($2P_{\pi} = 4$); 5 – искусственная
 ($R_1 > r_1, X_K > x_1, X_K > x_2'$); 6 – искусственная ($R_2' > r_2'$)

АД с короткозамкнутым ротором наиболее просты по конструкции и надежны в эксплуатации, имеют высокие технические показатели. Так, например, у асинхронных двигателей общепромышленного применения перегрузочная способность составляет $\frac{M_M}{M_H} = 1,7 \dots 2,5$. Главные недостатки

АД с к.з. ротором – излишняя чувствительность к напряжению питания ($M \sim U_1^2$) и трудность регулирования скорости вращения.

4.4.2. Энергетические показатели асинхронного электропривода

Важным в энергетическом отношении характеристиками АД являются зависимость коэффициент полезного действия η и коэффициента мощности $\cos\phi$, от нагрузки на его валу. КПД двигателя равен отношению мощности отдаваемой двигателем с вала P_B к мощности, потребляемой двигателем из сети P_1 :

$$\eta = P_B / P_1 = P_B / (P_B + \Delta P),$$

где ΔP – потери мощности в двигателе [3, 4].

Потери мощности определяются по выражению:

$$\Delta P = \Delta P_{обм1} + \Delta P_{обм2} + \Delta P_{ст1} + \Delta P_{ст2} + \Delta P_{мех.}$$

Потери мощности в двигателе можно разделить на две части.

Первая часть почти не зависит от нагрузки и называется постоянными потерями:

$$\Delta P_K = \Delta P_{ст1} + \Delta P_{ст2} + \Delta P_{мех}.$$

Вторая часть зависит от нагрузки и является переменными потерями:

$$\Delta P_v = \Delta P_{обм1} + \Delta P_{обм2}.$$

Коэффициент мощности двигателя равен отношению активной P_1 мощности, потребляемой двигателем из сети, к полной S_1 мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}. \quad (4.3)$$

Реактивная мощность Q складывается из мощности Q_Γ , обусловленной главным магнитным потоком, и мощности Q_p , определенной потоками рассеяния:

$$Q_\Gamma = I_0^2 x_0, \quad Q_p = I_1^2 x_1 + I_2^2 x_2,$$

где x_0 – индуктивное сопротивление, обусловленное главным магнитным потоком;

x_1, x_2 – индуктивные сопротивления, определенные потоками рассеяния обмоток статора и ротора.

Поскольку главный магнитный поток намного больше потоков рассеяния и почти не зависит от нагрузки, реактивная мощность, потребляемая двигателем из сети, мало зависит от нагрузки и, как следует из выражения (4.3), $\cos \varphi$ существенно изменяется, при изменении нагрузки на валу двигателя.

Из рис. 4.7 видно, что при малых нагрузках $\cos \varphi$ довольно низкий, что является в энергетическом отношении весьма невыгодным.

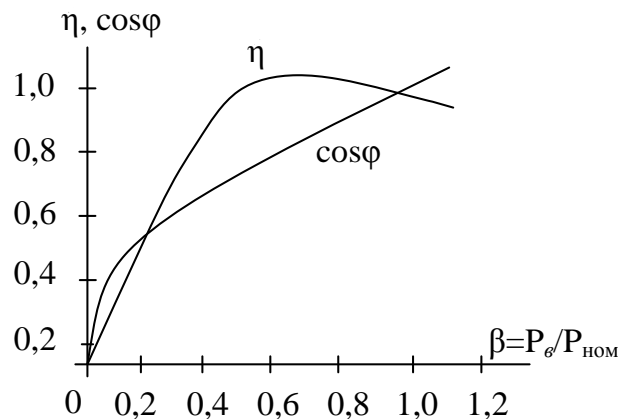


Рис. 4.7. Энергетические характеристики асинхронного электропривода

Коэффициент мощности АД в двигательном режиме:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{\left[B + \left[\frac{I_0}{I_2} \right]^2 \right] \times \left[1 + \left[\frac{x_K}{R_1 + \frac{R_2'}{s}} \right]^2 \right]}}$$

Параметры B , I_0 , I_2 , x_K , R_1 , R_2' – из выражений (4.1, 4.2).

4.5. Принципиальная электрическая схема стенда

На рис. 4.1 показана принципиальная электрическая схема стенда. Автомат QF1 (установлен на левой боковой панели приборного блока) подает напряжение 380 В на первичные обмотки трансформатора.

К статору АД через контакты двух контакторов К1 и К2 подводится соответственно линейное напряжение 380 В от питающей сети или 110 В от вторичных обмоток трансформатора. В цепь статора включен комплект К540, представляющий собой набор приборов (амперметр А, вольтметр V, ваттметр W), измеряющих соответственно фазные ток, напряжение и активную мощность.

При динамическом торможении в две фазы статора от выпрямителя поступает постоянный ток возбуждения $I_{\Pi}=0,6$ или $0,8$ А. Также от выпрямителя на якорь ДПТ НВ подается напряжение, ступенчато регулируемое переключателем S1. В цепь якоря включено добавочное сопротивление R3. Значения сопротивлений определяются по выражению $R=0,5 \cdot N$ (Ом), где N – номер положения переключателя R3.

Скорость вращения ДНВ можно регулировать ступенчато, изменяя напряжение якоря или добавочное сопротивление потенциометром R3, и плавно, регулируя ток возбуждения ДПТ НВ потенциометром R4. Реверсирование ДПТ НВ выполняется по цепи возбуждения переключателем S4.

Согласное или встречное включение двигателей М1 и М2 устанавливаем по изменению скорости вращения предварительно включенного двигателя, если после пуска другого двигателя скорость возросла – двигатели включены согласно, если скорость снизилась – двигатели включены встречно.

4.5.1. Назначение аппаратуры на стенде

4.5.1.1. Коммутационно – защитная

Состав аппаратуры:

- QF1 – автоматический выключатель – подает (снимает) напряжение на первичные обмотки трансформатора, защищает электрооборудование стенда от тока короткого замыкания $I_{кз}$;

- QF2 – автоматический выключатель в цепи якоря ДНВ, включает (выключает) и защищает от токов КЗ и недопустимой перегрузки нагрузочный двигатель.

4.5.1.2. Коммутационная

Состав аппаратуры:

- K1, K2 – контакторы, выполняют пуск и останов АД при напряжениях 380 В и 110 В;

- S1 – переключатель, коммутирует питание цепи якоря ДПТ НВ;

- S2 – переключатель, обеспечивает двухступенчатую коммутацию цепи постоянного тока АД при динамическом торможении (0,6 и 0,8А);

- S3 – переключатель режимов работы ДПТ НВ (двигательного и динамического торможения);

- S4 – переключатель, реверсирует ток в обмотке возбуждения ДНВ;

- S5 – переключатель цепей катушек контакторов K1, K2;

- S6 – кнопочный выключатель «Стоп»;

- S7 – кнопочный выключатель «Пуск»;

- S8 – переключатель способов управления электроприводом (ручное, компьютерное);

- S9 – переключатель пределов измерения тока якоря ДПТ НВ (10 А или 20 А);

- R3 – переключатель добавочных сопротивлений в цепи якоря ДНВ.

4.5.1.3. Измерительная

Состав аппаратуры:

- PV1 – вольтметр, для фиксации напряжения на якоре ДПТ НВ;

- PA1 – амперметр, для измерения тока статора АД при динамическом торможении;

- PA2 – амперметр, для фиксации тока якоря ДПТ НВ;

- PA3 – амперметр, для измерения тока возбуждения ДПТ НВ;

- ТАСНОМЕТЕР – цифровой тахометр с фотоимпульсным преобразователем.

- Комплект измерительный К 540 предназначен для измерения силы тока, напряжения и мощности в одно-, трёх- и четырёх проводных цепях переменного тока при равномерной и неравномерной нагрузках фаз (рис. 4.1 и на внутренней стороне крышки комплекта).

Конечные значения диапазонов измерений, встроенных в комплект амперметра и вольтметра указаны в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Амперметр	Конечные значения диапазонов измерений силы тока и напряжения	А	0,1	0,25	0,5	1,0	2,5	5	10	25	50
Вольтметр		В	15	30	75	150	300	450	600		

Номинальные напряжения встроенного в комплект ваттметра, а также номинальные токи и конечные значения диапазонов измерений ваттметра указаны табл. 4.2.

Таблица 4.2

Номинальный ток, А	Конечные значения диапазонов измерений мощности, кВт, при номинальных напряжениях						
	15В	30В	75В	150В	300В	450В	600В
0,1	0,0015	0,003	0,0075	0,015	0,03	0,045	0,06
0,25	0,00375	0,0075	0,0188	0,0375	0,075	0,1125	0,15
0,5	0,0075	0,015	0,0037	0,075	0,5	0,225	0,3
1,0	0,015	0,03	0,075	0,15	0,3	0,45	0,6
2,5	0,0375	0,075	0,1875	0,375	0,75	1,125	1,5
5	0,075	0,5	0,375	0,75	1,5	2,25	3
10	0,15	0,3	0,75	1,5	3	4,5	6
25	0,375	0,75	1,875	3,75	7,5	11,25	15
50	0,75	1,5	3,75	7,5	15	22,5	30

В комплект встроены: амперметр и вольтметр электромагнитной системы, ваттметр ферродинамической системы, фазоуказатель.

Для обеспечения измерений как в трёхпроводных, так и в четырёхпроводных цепях трёхфазного тока схема параллельных цепей комплекта имеет искусственный нуль. Две ветви образуются специальными сопротивлениями, третья ветвь – параллельными цепями вольтметра и ваттметра.

Амперметр и последовательная цепь ваттметра подключены ко вторичной обмотке встроенного трансформатора тока с номинальным током вторичной обмотки 5А. Первичная обмотка трансформатора с помощью переключателя SA1 (см. лицевую панель комплекта) включается в любую фазу. Переключение из одной фазы в другую происходит без разрыва цепей фаз, в промежуточном положении «N» переключателя входные и выходные зажимы комплекта соответствующих фаз закорачиваются («A↓» с «A↑» и т.д.).

На лицевой панели комплекта помещены таблицы с ценами делений приборов по току, напряжению и мощности на всех диапазонах измерений.

Действительное значение измеряемого тока (I) в А, напряжения (U) в В и мощности (P) в Вт определять по формулам:

$$I = \beta_I \cdot \alpha_I; \quad U = \beta_U \cdot \alpha_U; \quad P = \beta_P \cdot \alpha_P;$$

где β_I , β_U , β_P – цена деления амперметра, вольтметра и ваттметра соответственно в А/дел, В/дел, Вт/дел (помещены на лицевой панели комплекта);

α_I , α_U , α_P – отсчет по шкале амперметра, вольтметра и ваттметра в делениях.

4.6. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования электропривода:

- проверка работоспособности стенда и подготовка к работе комплекта К 540;
- определение коэффициента связи C_2 нагрузочного двигателя;
- нахождение момента потерь ΔM агрегата (АД + ДНВ);
- снятие характеристик $\omega=f(I_1)$, $\omega=f(M_1)$, $\eta=f(P_2)$, $\cos\phi=f(P_2)$ в двигательном режиме;
- снятие характеристик $\omega=f(I_1)$, $\omega=f(M_1)$, $\eta=f(P_1)$, $\cos\phi=f(P_1)$ в режиме рекуперативного торможения;

- снятие характеристик $\omega=f(I_1)$, $\omega=f(M_1)$ при торможении противовключением;

- снятие характеристики $\omega=f(M_1)$ при динамическом торможении;

- определение показателей регулирования скорости вращения.

4.7. Проверка работоспособности стенда и подготовка к работе комплекта К 540

Переключатель S8 на левой секции лицевой панели установить в положение «*HAND CONTROL*».

4.7.1. Подготовка к работе комплекта К 540

- Установить переключатель номинальных токов XS1 в положение «1А» (см. лицевую панель комплекта), переключатель SB1 в положение « $U_{\phi\downarrow}$ » – измерение напряжения и мощности со стороны генератора или в положение « $U_{\phi\uparrow}$ » – измерение напряжения и мощности со стороны нагрузки, переключатели полярности ваттметра SB2 и номинальных напряжений SB3 соответственно в положение «+» и «300V».

- Перед измерениями необходимо установить переключатель фаз SA1 в положение фазы, в которой следует произвести измерения.

- При малых отклонениях указателей приборов выбрать нужный предел переключением диапазонов измерений.

ВНИМАНИЕ! Следите при измерениях за показаниями амперметра и вольтметра и не перегружайте их.

4.7.2. Пуск и останов АД при питающем напряжении

$$U_{1Л}=U_n=380В$$

Процедура проверки:

- установить автоматы QF1 и QF2 – в нижние положения;

- перевести переключатели S1, S2 и S5 в нейтральное, S3 – в нижнее, S9 – в правое положения;

- включить автомат QF1 на боковой панели приборного блока (должен загореться индикатор «POWER»);

- установить в измерительном комплекте К540 переключатель токов XS1 в положение «1А», а переключатель напряжения SB3 – в положение «300V»;

- перевести переключатель S5 в положение «3~380V»;

- запустить АД нажатием кнопочного выключателя S7, при этом $\omega=311\dots313$ рад/с;

- выключить АД нажатием кнопочного выключателя S6.

4.7.3. Пуск и останов АД при $U_{1л}=110$ В

Процедура проверки:

- установить переключатель S5 в положение «3~110 V» и включить АД кнопочным выключателем S7, при этом $\omega \approx 286 \dots 300$ рад/с;
- выключить АД кнопочным выключателем S6.

4.7.4. Включение в цепь статора АД источника постоянного тока

Процедура проверки:

- переключая S2 в правое и левое положения, убедиться по показаниям амперметра PA1, что в цепь статора поступает ток 0,6 или 0,8 А.

4.7.5. Реостатный пуск ДПТ НВ

Процедура проверки:

- установить ток возбуждения ДНВ $I_{B2}=I_{B2МАКС}$ (амперметр PA3) потенциометром R4;
- перевести переключатель R3 в положение «10»;
- установить переключатель S3 в верхнее положение, а S1 – в положение «1»;
- включить автомат QF2 – должен произойти пуск ДНВ, ток якоря $I_2=(1,5 \dots 1,8$ А) по амперметру PA2, $\omega \approx 250 \dots 260$ рад/с.

4.7.6. Регулирование скорости ДПТ НВ

Процедура проверки:

- вывести R3 в положение «0», при этом скорость должна возрасти до ≈ 380 рад/с;
- уменьшить ток возбуждения до 0,4А потенциометром R4, при этом скорость должна возрасти до 700...800 рад/с;
- переключить S1 – в положение «2», при этом скорость должна уменьшиться до 210...240 рад/с;
- отключить ДНВ автоматом QF2.

4.8. Определение коэффициента связи C_2 нагрузочного двигателя M_2

Величины исследуемого асинхронного двигателя имеют индекс для параметров статора «1» и ротора «2» со штрихом, а нагрузочного двигателя постоянного тока (ДНВ) – индекс «2».

Электромагнитный момент АД:

$$M_1 = M_2 \pm \Delta M ,$$

где M_2 – электромагнитный момент ДПТ НВ;

ΔM – момент потерь агрегата (АД+ДПТ НВ);

знак «+» – двигательный режим АД;

знак «-» – тормозной режим АД.

Электромагнитный момент ДПТ НВ:

$$M_2 = C_2 \cdot I_2 ,$$

где C_2 – коэффициент связи ДНВ;

I_2 – ток якоря ДНВ.

$$C_2 = K_2 \cdot \Phi_2 = E_2 / \omega ,$$

здесь E_2 , ω – ЭДС нагрузочного двигателя и скорость вращения агрегата.

Для определения C_2 следует вращать ДПТ НВ на х.х. исследуемым двигателем, поддерживая постоянным ток возбуждения ДНВ, и измеряя E_2 и ω .

Для этого необходимо:

- установить ток (амперметр РА3) возбуждения ДПТ НВ $I_{B2}=1,4\text{A}=\text{const}$;
- выключить автомат QF2;
- произвести пуск АД п. 4.7.2, при $U_H=380$ В и замерить ω' и E_2' (вольтметром PV1);
- произвести пуск АД п. 4.7.3, при $U_{1Л}=110$ В и замерить ω'' , E_2'' ;
- остановить АД .

$$C_2 = 0,5(E_2' / \omega' + E_2'' / \omega'') .$$

4.9. Определение момента потерь агрегата (АД+ДПТ НВ)

Нагрузочным двигателем вращать, регулируя скорость, отключенный АД и записывать ток якоря I_2 и скорость двигателя ω , в табл. 4.3. Для этого необходимо:

- перевести переключатель S9 в положение «10А»;
- установить ток возбуждения $I_{B2}=1,4$ А и осуществить реостатный пуск двигателя (п. 4.7.5);
- записать значения скоростей вращения ω и тока якоря ДПТ НВ I_2 , изменяя добавочное сопротивление переключателем R3 в цепи якоря двигателя из положения «10» в положение «0» или сопротивлением R4 в цепи обмотки возбуждения, устанавливая различные напряжения питания якоря переключателем S1;

- переключить регулировочные рукоятки реостатов R3, R4 в исходное положение по окончании опыта.

Таблица 4.3

ω	c^{-1}									Примечания
I_2	А									$I_{B2}=1,4$ А
ΔM	Н·м									$\Delta M=C_2 \cdot I_2$

Привести пример расчета.

- построить по данным табл. 4.3 характеристику момента потерь $\omega = f(\Delta M)$.

4.10. Характеристики $\omega=f(I_1)$, $\omega=f(M_1)$, $\eta=f(P_2)$, $\cos\phi=f(P_2)$ АД в двигательном режиме

Характеристики снимать при $U_{1Л}=U_H=380$ В и $U_{1Л}=110$ В. Порядок выполнения работы при $U_{1Л}=110$ В:

- установить переключатель S5 в положение «3~110 В»,
- перевести автомат QF2 – в положение «OFF», переключатель S3 – в положение «⊥», S9 – в положение «10А», R3 – в положение «10»;
- установить ток возбуждения ДПТ НВ $I_{B2}=1,4$ А;
- перевести переключатели на измерительном комплекте в цепи статора АД SB3, XS1, SB1, SB2 соответственно в положение «75V», «1А», «Уф↑», «-»;
- запустить АД кнопочным выключателем S7;
- записать в табл. 4.4 показания приборов при работе АД на х.х.;
- включить автомат QF2 и записать показания приборов: PA4 (ток I_1), PW1 (мощности $P_{1А}$, $P_{1В}$, $P_{1С}$), PA2 (ток I_2), SPEED (скорость ω) в табл. 4.4;
- повторить измерения, постепенно уменьшая сопротивление R3 и, если необходимо, R4 до «0».

При $U_{1Л}=380$ В работа выполняется аналогично, но:

- установить переключатель S5 в положение «3~380 В», а переключатель SB3 на измерительном комплекте в цепи статора АД – в положение «300V»;
- перевести переключатели SB3, XS1, SB1, SB2 на измерительном комплекте в цепи статора АД соответственно в положение «300V», «1А», «Уф↑», «-»;
- переключить регулировочные рукоятки реостатов R3, R4 по окончании опыта в исходное положение;

Таблица 4.4

ω	c^{-1}									Примечания
I_1	А									$U_{1л}=110$ В, $I_{2в}=1,4$ А, $C_2=...$ Вс, ΔM – по данным п.4.9
$P_{1А}$	Вт									
$P_{1В}$	Вт									
$P_{1С}$	Вт									
I_2	А									
M_2	Нм									
P_2	Вт									
ΔM	Нм									
M_1	Нм									
η	%									
$\cos\phi$										

Привести пример расчета.

- построить по данным табл. 4.4 характеристики: $\omega=f(I_1)$, $\omega=f(M_1)$, $\eta=f(P_2)$, $\cos\phi=f(P_2)$.

Формулы для расчетов:

$$M_2 = C_2 \cdot I_2 ; M_1 = M_2 + \Delta M ; P_2 = M_2 \cdot \omega ; \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% ; \cos\phi = \frac{P_1}{3U_1I_1} ;$$

$$P_1 = P_{1А} + P_{1В} + P_{1С} .$$

По условиям нагрева АД и ДПТ НВ не допускается при $U_H=380$ В ток якоря ДПТ НВ свыше 10 А, поэтому характеристики АД снимать лишь на рабочем участке.

4.11. Характеристики $\omega=f(I_1)$, $\omega=f(M_1)$, $\eta=f(P_1)$, $\cos\phi=f(P_1)$ АД в режиме рекуперативного торможения

Рекуперативное торможение (генераторный режим) АД исследовать при $U_{1л}=380$ В и $U_{1л}=110$ В. Порядок выполнения работы при $U_{1л}=110$ В:

- перевести переключатель S5 в положение «3~110 В», S3 – в положение «27 В», S9 – в положение «20 А», S1 – в положение «1», переключатель R3 – в положение «10», автомат QF2 – в положение «OFF»;
- изменить полярность ваттметра переключателем SB2 в генераторном режиме;
- установить ток возбуждения ДПТ НВ $I_{В2}=1,4$ А;
- перевести переключатели SB3, XS1, SB1, SB2 на измерительном комплекте в цепи статора АД в положение соответственно «75V», «1А», «Uф↓», «-»;

- запустить АД кнопочным выключателем S7, отметить скорость ω и направление вращения двигателя;
- включить ДПП НВ по п. 4.7.5;
- установить переключателем S4 направление вращения согласно с АД п. 4.1.5;
- записать показания приборов: PA4 (ток I_1), PW1 (мощности P_{1A} , P_{1B} , P_{1C}), PA2 (ток I_2), SPEED (скорость ω) в таблицу, аналогичную табл. 4.4, уменьшая сопротивление R3 и, если необходимо, R4 до «0»; при этом получить минимальный ток статора $I_{1\text{МИН}}$ (синхронная скорость ω_0 АД), при котором совершается переход из двигательного режима в генераторный;
- ток якоря ДПП НВ должен быть $I_2 \leq 10$ А;
- переключить регулировочные рукоятки реостатов R3, R4 по окончании опыта в исходное положение;
- выполнять расчеты по формулам раздела 4.10 и результаты занести в таблицу, аналогичную табл. 4.4 и построить зависимости $\omega=f(I_1)$, $\omega=f(M_1)$, $\eta=f(P_1)$, $\cos\phi=f(P_1)$, учитывая, что:

$$M_1 = M_2 - \Delta M .$$

При $U_{1Л}=U_H=380$ В опыт проводится аналогично:

- перевести переключатель S5 в положение «3~380 V», S3 – в положение «27 V», S9 – в положение «20 А», S1 - в положение «1», R3 – в положение «10», автомат QF2 – в положение «OFF»;
- выставить переключатели SB3, XS1, SB1, SB2 на измерительном комплекте в цепи статора АД соответственно в положение «300V», «1А», «Uф↓», «-»;
- переключить регулировочные рукоятки реостатов R3, R4 по окончании опыта в исходное положение.

4.12. Характеристики $\omega=f(I_1)$, $\omega=f(M_1)$, $\eta=f(P_1)$, $\cos\phi=f(P_1)$ АД в режиме противовключения

Характеристики снимать при напряжении $U_{1Л}=110$ В, для чего:

- перевести переключатель S5 в положение «3~110 V», S3 – в положение «27 V», S9 – в положение «10 А», S1 - в положение «2», R3 – в положение «3», автомат QF2 – в положение «OFF»;
- установить ток возбуждения ДПП НВ $I_{B2}=1,4$ А;
- перевести переключатели SB3, XS1, SB1, SB2 на измерительном комплекте в цепи статора АД соответственно «75V», «1А», «Uф↑», «-»;

- запустить АД кнопочным выключателем S7, установить направление вращения и выключить;
- включить ДПТ НВ, скоммутировав автомат QF2; переключателем S4 установить направление вращения противоположное АД;
- запустить АД, записать показания приборов: PA4 (ток I_1), PW1 (мощности P_{1A} , P_{1B} , P_{1C}), PA2 (ток I_2), SPEED (скорость ω) в таблицу, аналогичную табл. 4.4;
- повторить измерения в диапазоне скорости 0...300 рад/с, изменяя скорость ДНВ сопротивлением R3 и, если необходимо, R4 и напряжением на якоре (с помощью переключателя S1);
- выполнять расчеты по формулам раздела 4.10 и результаты занести в таблицу, аналогичную табл. 4.4 и построить зависимости $\omega=f(I_1)$, $\omega=f(M_1)$, $\eta=f(P_1)$, $\cos\phi=f(P_1)$, учитывая, что $M_1 = M_2 - \Delta M$;
- переключить регулировочные рукоятки реостатов R3, R4 по окончании опыта в исходное положение.

4.13. Характеристика $\omega=f(M_1)$ АД в режиме динамического торможения

Режим динамического торможения исследовать при 2-х значениях постоянного тока в обмотках статора: 0,6 А и 0,8 А.

Для этого:

- перевести переключатель S2 в левое положение, S3 – в положение «+27V», S1 – в положение «2», S9 – в положение «10A», R3 – в положение «3», QF2 – в положение «OFF»;
- установить ток возбуждения ДНВ $I_{B2}=1,4A$;
- запустить ДНВ п. 4.7.5;
- занести показания приборов: PA2 (ток I_2), SPEED (скорость ω) в табл. 4.5;
- повторить измерения в 6...8 точках в диапазоне скоростей 0...300 рад/с, изменяя скорость ДНВ потенциометром R3 и напряжением на якоре (с помощью переключателя S1);
- провести измерения при правом положении переключателя S2;
- по окончании опыта регулировочные рукоятки реостатов R3, R4 переключить в исходное положение.

Таблица 4.5

ω	c^{-1}							Примечания
I_2	A							$I_1 = \dots$ A=const,
ΔM	H·м							$I_{B2} = 1,4A = \text{const}$,
M_2	H·м							$M_2 = C_2 \cdot I_2$,
M_1	H·м							ΔM – по данным п.4.9.

Привести пример расчета.

- построить по данным табл. 4.5 характеристику $\omega = f(M_1)$.

Формулы для расчетов:

$$M_2 = C_2 \cdot I_2 ; M_1 = M_2 - \Delta M .$$

4.14. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.
3. Таблицы опытных данных и характеристики $\omega = f(I_1)$ для всех опытов на одном графике, $\omega = f(M_1)$ для всех опытов на другом графике в том числе и для опыта п.4.9 «Определение момента потерь агрегата», а также характеристики $\eta = f(P_1, P_2)$ и $\cos\varphi = f(P_1, P_2)$ в различных режимах работы.
4. Определение координат и параметров системы электропривода.
5. Краткие выводы.

4.15. Контрольные вопросы

- 4.15.1. Преимущества и недостатки асинхронного электропривода с короткозамкнутым ротором.
- 4.15.2. Как экспериментальным путем определить коэффициент связи $S = k \cdot \Phi$ нагрузочного двигателя и момент потерь агрегата (АД+ДПТ НВ)?
- 4.15.3. Почему при синхронной скорости ток ротора равен нулю, а ток статора отличен от нуля?
- 4.15.4. Почему формы характеристик $\omega = f(I_1)$ и $\omega = f(M_1)$ исследуемого электропривода существенно различаются?
- 4.15.5. Как определяется КПД и коэффициент мощности асинхронного электропривода?
- 4.15.6. Перечислить способы получения различных тормозных режимов и реверса исследуемого электропривода?
- 4.15.7. Как экспериментально определить электромагнитный момент асинхронного электропривода?

4.15.8. Что такое «скольжение» двигателя? Доказать значение скольжений в различных режимах.

4.15.9. Почему при динамическом торможении и противовключении теряет смысл КПД машины? Как определяется КПД при рекуперативном торможении?

Литература

1. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.

2. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

3. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Мастерство; Высшая школа, 2000. – 368 с.

4. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

5. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.

6. Исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Методические указания по проведению лабораторных работ. Уфимский институт автоматизации и электромеханики. Приложение. 1999. – 53 с.

7. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для ВУЗов. – СПб.: Питер. 2010. – 350 с.

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

5.1. Цель работы

Изучение методов автоматизированного управления пуском и торможением в функции скорости вращения, тока и времени двигателя постоянного тока независимого возбуждения одним из двух возможных вариантов.

5.2. Оборудование стенда

Лабораторный стенд состоит из приборного блока и электромеханического агрегата, включающего высокомоментный, исполнительный двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и сочлененной с ротором инерционной массы, необходимой для затягивания переходных процессов [7].

Агрегатный блок соединен между собой силовым и измерительным кабелями. Питание стенда осуществляется от сети переменного тока 380 В, 50 Гц.

Технические данные исследуемого двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ, рис. 5.1):

$P_n = 0.49$ кВт;	$n_m = 2000$ мин ⁻¹ ;
$U_n = 60$ В;	$M_m = 19$ Нм;
$M_n = 4.4$ Нм;	$I_m = 65$ А;
$I_n = 12$ А;	$M_m/M_n = 4$;
$n_n = 1000$ мин ⁻¹ ;	$J = 5.4 \cdot 10^{-3}$ кгм ² ;

Дополнительные приборы, необходимые для проведения экспериментов:

- двухлучевой осциллограф с запоминанием;
- ПЭВМ типа *IBM PC*.

Принципиальная электрическая схема стенда с лицевой панелью приборного блока, изображена на рис. 5.1.

Основные технические данные компьютерной программы «SAFV.EXE»:

- диапазон измерения сигнала тока якоря, А ± 30 ;
- диапазон измерения сигнала тахогенератора, рад/с ± 150 ;

- диапазон изменения времени переходного процесса, мс 10..1000;
- частота измерений (для переходных процессов), Гц > 1000;
- время вывода графиков на печать, мин < 3;
- вид выходных данных графики.

5.3. Перевод обозначений элементов оборудования и принципиальной электрической схемы на лицевой панели приборного блока

Перевод обозначений элементов оборудования осуществляется по схеме лицевой панели (рис. 5.1):

<i>POWER</i>	Энергия
<i>SUPPLY VOLTAGE</i>	Напряжение питания
<i>ARMATURE CURRENT</i>	Ток якоря
<i>SPEED, rad/s</i>	Скорость, рад/с
<i>TIMER</i>	Таймер, реле времени
<i>TIMER SELECTOR</i>	Выбор таймера
<i>START</i>	Пуск
<i>STOP</i>	Останов
<i>ON</i>	Включено
<i>OFF</i>	Выключено
<i>MOTOR</i>	Двигатель постоянного тока
<i>MANUAL CONTROL</i>	Ручное управление
<i>STARTING REGIM</i>	Режим пуска
<i>SET T1, T2</i>	Устройство задания времени <i>T1, T2</i>
<i>RESET</i>	Сброс
<i>CONTROLLER</i>	Управляющее устройство
<i>COMPUTER</i>	Компьютер

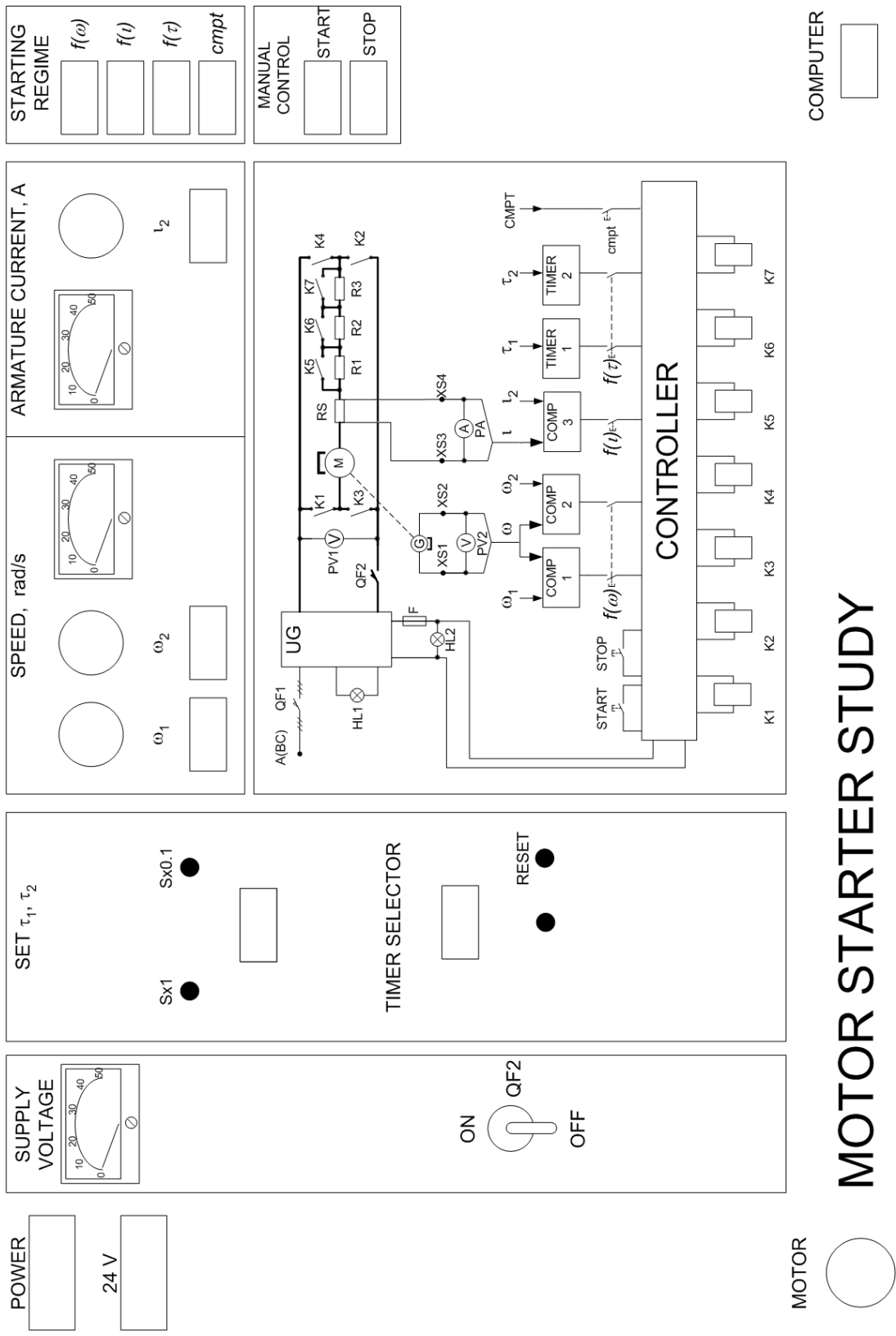


Рис. 5.1.1. Лицевая панель и принципиальная электрическая схема стенда

5.4. Общие сведения

Свойства двигателя постоянного тока, так же как и генераторов, определяются способом возбуждения и схемой включения обмоток возбуждения. По способу возбуждения можно разделить двигатели постоянного тока на двигатели с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением.

Электрические машины постоянного тока обратимы, то есть, возможна их работа в качестве двигателей или генераторов.

Например, если в системе управления с использованием генератора в обратной связи отсоединить генератор от первичного двигателя и подвести напряжение к обмоткам якоря и возбуждения, то якорь начнет вращаться и машина будет работать как двигатель постоянного тока, преобразуя электрическую энергию в механическую. Машины независимого возбуждения наиболее полно удовлетворяют основным требованиям к исполнительным двигателям: самоторможение при снятии управления, широкий диапазон регулирования частоты вращения, линейность механических и регулировочных характеристик, устойчивость работы во всем диапазоне вращения, малая мощность управления, высокое быстродействие, малые габариты и масса.

5.5. Принципы построения релейно-контакторных схем

Релейно-контакторные устройства нашли наибольшее применение при автоматизации процессов пуска, торможения, реверсирования, а также поддержании скорости вращения электрических двигателей. Принципы построения релейно-контакторных схем управления электроприводами можно пояснить на примере пусковой диаграммы и диаграммы торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), рис. 5.2. [2, 5]

Из пусковой диаграммы следует, что автоматическое выведение ступеней пускового реостата при пуске должно происходить в определенные моменты времени (t_1 , t_2), соответствующие определенным значениям скорости вращения (ω_1 , ω_2) и определенной величине тока (I_2).

По пусковой диаграмме не составит большого труда воспроизвести механические (электромеханические) характеристики при введенных дополнительных (пусковых) сопротивлениях (рис. 5.3). На данном рисунке приведены характеристики ДПТ НВ в двигательном режиме и режиме динамического торможения.

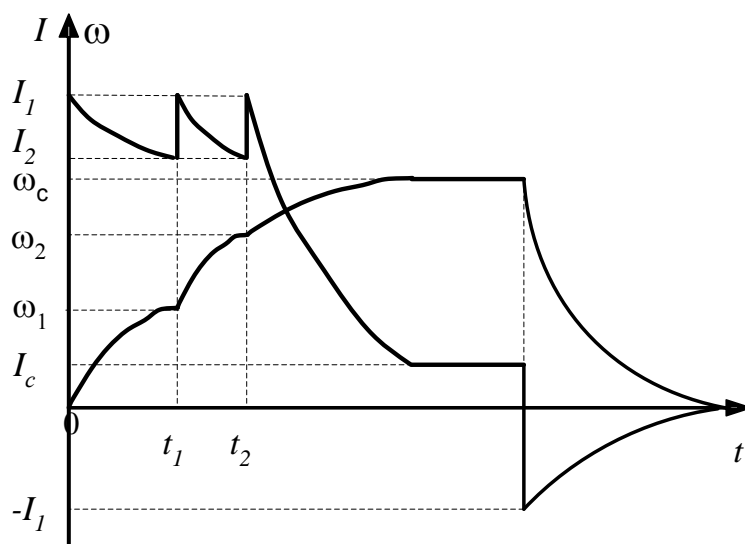


Рис. 5.2. Диаграмма двухступенчатого пуска и динамического торможения ДПТ НВ

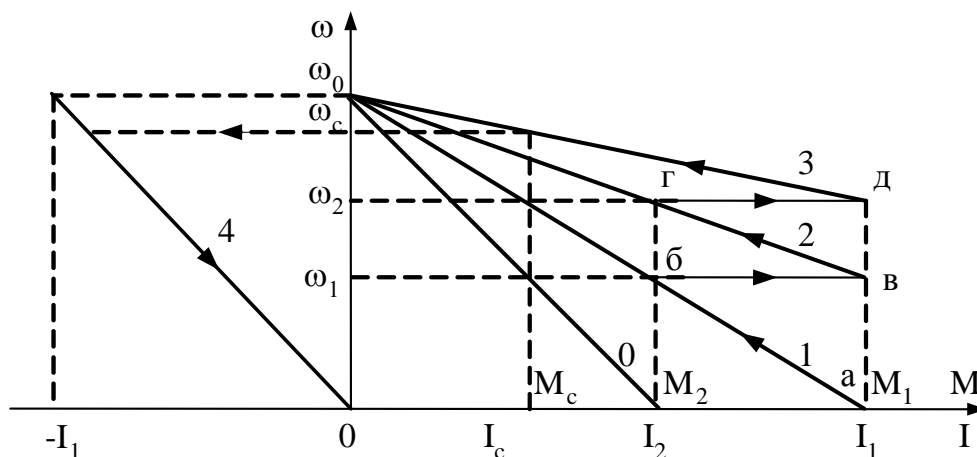


Рис. 5.3. Электромеханические (механические) характеристики ДПТ НВ

Как видно из рис. 5.3, если пуск двигателя будет производиться без введенных сопротивлений в цепь якоря, т.е. по естественной характеристике (3), то пусковой ток I_1 будет намного больше максимально- допустимого. Чтобы избежать перегрузки двигателя по току, пуск целесообразно проводить по искусственным характеристикам (1, 2) при введении дополнительных сопротивлений в цепь якоря.

Выражение для естественной электромеханической характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{U_n - R_{\text{я}} I}{C}, \quad (5.1)$$

где коэффициент связи C определяется по паспортным данным двигателя.

Наиболее простым способом регулирования величины сопротивления R является ступенчатое шунтирование частей пускового реостата. На рис. 5.4 приведена схема управления двухступенчатым пуском и динамическим торможением ДПТ НВ.

Динамическое торможение производится путем отключения якорной обмотки двигателя от сети (выключатель S_1 в нижнее положение) и одновременным шунтированием этой обмотки тормозным сопротивлением R_T . Формула для динамического торможения из формулы (5.1) при $U_H=0$:

$$\omega = -\frac{R_{яТ} I}{C}, \text{ где } R_{яТ} = R_{я} + R_T. \quad (5.2)$$

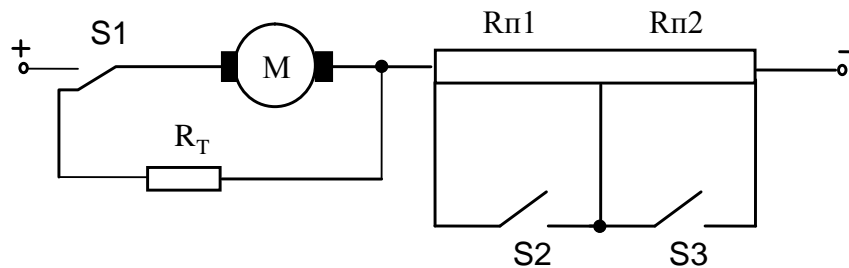


Рис. 5.4. Схема управления двухступенчатым пуском и динамическим торможением ДПТ НВ

Процесс пуска начинается коммутацией переключателя S_1 в верхнее положение. При этом ток достигает значение $I_1 = I_{доп}$ (рис. 5.2, рис. 5.3). По мере разгона двигателя из-за возросшей ЭДС, ток уменьшается. Это соответствует движению по механической характеристике рис. 5.3 (характеристика 1) из точки «а» в точку «б», при $R_{яц} = R_{я} + R_{П1}$, $R_{П} = R_{П1} + R_{П2}$.

По истечению времени t_1 (рис. 5.2) ток двигателя достигает значения I_2 , скорость – ω_1 . В этот момент выключателем S_2 шунтируется часть сопротивления $R_{П}$, которая составляет $R_{П1}$. Это соответствует переходу с механической характеристики 1 (т. «б») на характеристику 2 (т. «в»). Ток двигателя снова возрастает до значения I_1 . Дальнейший разгон идет по характеристике 2 из т. «в» в т. «г» при $R_{яц} = R_{я} + R_{П2}$.

По истечению времени t_2 ток двигателя достигает значения I_2 , скорость – ω_2 . В этот момент выключателем S_3 шунтируется часть сопротивления $R_{П}$, которая составляет $R_{П2}$. Это соответствует переходу двигателя с механической характеристики 2, т. «г» на естественную 3 т.

«д». Ток двигателя опять возрастает до значения I_1 . Разгон двигателя идет по естественной характеристике и завершается при достижении скорости ω_c , а сопротивление $R_{яц} = R_я$.

В режиме динамического торможения ток достигает значения $-I_1 = -I_{доп}$ (рис. 4.3), где R_T определяется по выражению 5.2.

5.6. Аналитический метод расчета сопротивлений ступеней пускового реостата и момента (тока) переключения

Обычно, момент (ток) переключения пусковых сопротивлений $M_2(I_2)$ – переход с характеристики 1 на характеристику 2 и с характеристики 2 на характеристику 3 –, как правило, выбирают на 30% больше номинального M_c (рис. 5.3) [4].

Для любых соседних характеристик отношение их сопротивлений (λ) – величина постоянная. Если взять, например, характеристики 1 и 2, то можно записать, приравняв величины ЭДС соседних характеристик, в момент переключения ступеней пускового реостата $R_{п}$:

$$E_{т.б} = U_H - I_2 R_{яц1}; \quad E_{т.в} = U_H - I_1 R_{яц2},$$

где: $R_{яц1}, R_{яц2}$ – сопротивления ступеней пусковых реостатов.

Так как $E_{т.б}, E_{т.в}$, то:

$$\frac{R_{яц1}}{R_{яц2}} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{M_1}{M_2} = \lambda.$$

Тогда $\frac{R_{яц2}}{R_я} = \lambda$ или $R_я = \frac{R_{яц2}}{\lambda} = \frac{R_{яц1}}{\lambda^2}$.

В итоге для любого числа ступеней пускового реостата z :

$$R_я = \frac{R_{яц1}}{\lambda^z} \quad \text{или} \quad R_{яц1} = R_я \lambda^z.$$

С другой стороны, сопротивление первой пусковой ступени:

$$R_{яц1} = \frac{U_H}{I_1},$$

откуда

$$\lambda = \sqrt[z]{\frac{U_H}{R_я I_1(M_1)}} = \sqrt[z]{\frac{1}{R_я^* I_1^*(M_1^*)}}$$

и ток (момент) переключения

$$I_2(M_2) = I_1(M_1) \sqrt[z]{\frac{R_{я} I_1(M_1)}{U_H}}; \quad I_2^*(M_2^*) = I_1^*(M_1^*) \sqrt[z]{R_{я}^* I_1^*(M_1^*)}.$$

Если известны I_2 и z , то, построив вспомогательную характеристику 0, аналогично получим:

$$\lambda = \sqrt[z+1]{\frac{U_H}{R_{я} I_2(M_2)}} = \sqrt[z+1]{\frac{1}{R_{я}^* I_2^*(M_2^*)}}$$

и пик тока

$$I_1(M_1) = I_2(M_2) \sqrt[z+1]{\frac{U_H}{R_{я} I_2(M_2)}}; \quad I_1^*(M_1^*) = I_2^*(M_2^*) \sqrt[z]{\frac{1}{R_{я}^* I_2^*(M_2^*)}}.$$

Добавочные сопротивления пусковых ступеней секций определяются следующим образом:

$$R_{\Pi 1} = R_{яц1} - R_{яц2} = \frac{U_H}{I_1} \cdot \frac{\lambda - 1}{\lambda};$$

$$R_{\Pi 2} = R_{яц2} - R_{яц3} = \frac{U_H}{I_1} \cdot \frac{\lambda - 1}{\lambda^2} \quad \text{и т. д.}$$

5.7. Аналитический метод расчета сопротивления динамического торможения

Сопротивление якорной цепи в режиме динамического торможения при допустимом токе якоря I_1 (рис. 5.3) определяется из уравнения (5.2):

$$R_{ят} = \frac{\omega_{нач} \cdot C}{I_1}.$$

Если двигатель до начала торможения работал на скорости близкой к скорости холостого хода (работа двигателя без нагрузки), то начальная скорость $\omega_{нач} = \omega_0$. При этом:

$$R_{ят} = \frac{\omega_0 \cdot C}{I_1} = \frac{U_H}{I_1}.$$

Сопротивление R_T динамического торможения определяется по формуле:

$$R_T = R_{ят} - R_{я} = \frac{U_H}{I_1} - R_{я}.$$

5.8. Типовые узлы релейно-контакторного управления пуском и торможением ДПТ НВ

5.8.1. Управление в функции скорости вращения (ЭДС)

Управление по принципу скорости основано на прямом или косвенном контроле скорости. Первый осуществляется с помощью специальных устройств контроля скорости вращения. Использование тахогенераторов в данных системах нецелесообразно из экономических соображений [2, 5].

Скорость вращения двигателя обычно контролируется косвенно, путем измерения величин, однозначно связанных со скоростью. Для двигателей постоянного тока такой величиной является ЭДС якоря, которая при неизменном потоке пропорциональна скорости вращения двигателя.

Узел схемы автоматического пуска и торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения в функции ЭДС изображен на рис. 5.5.

Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки КнП, а торможение КнС. Контакторы КУ1, КУ2 настроены на определенные значения напряжения втягивания. В начальный момент пуска напряжение на катушках коммутационных аппаратов равно лишь падению напряжения в цепи якоря. По мере увеличения угловой скорости двигателя его ЭДС возрастает. При определенной скорости ω_1 напряжение на катушке контактора КУ1 достигает такого значения, при котором коммутационный аппарат срабатывает и своим контактом шунтирует первую ступень пускового резистора. При достижении скорости ω_2 срабатывает контактор КУ2, в результате чего пусковой резистор оказывается полностью зашунтированным. Пуск двигателя заканчивается и он работает на естественной характеристике.

Для управления торможением служит реле РТ. При торможении отключается контактор КЛ, при этом замыкается цепь питания реле РТ и коммутационного аппарата КТ. Якорь двигателя замыкается на тормозной резистор R3. При уменьшении ЭДС двигателя до напряжения отпускания реле РТ происходит размыкание контакта КТ и динамическое торможение заканчивается.

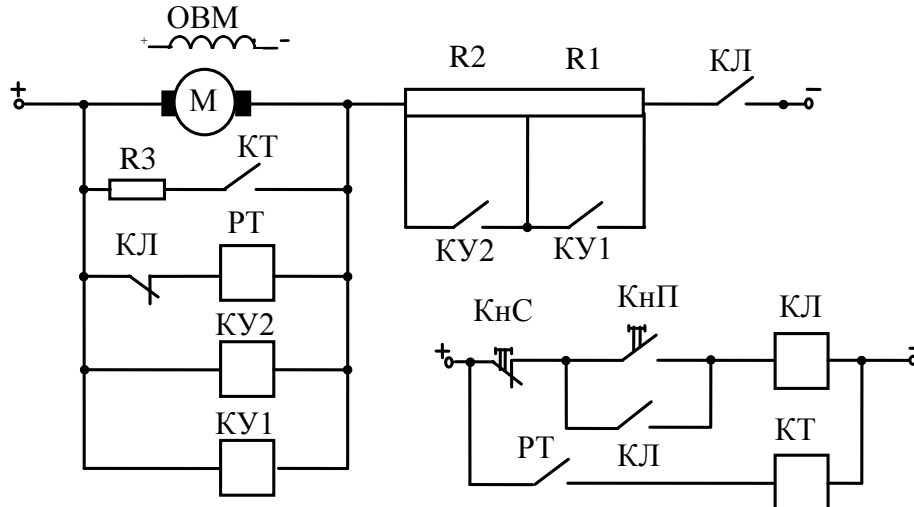


Рис. 5.5. Узел схемы автоматического пуска и торможения двигателя в функции скорости вращения (ЭДС) якоря двигателя

5.8.2. Управление в функции тока

Используя токовое реле или контактор с токовой катушкой, можно управлять процессом пуска. На рис. 5.6 приведена схема автоматического пуска двигателя в функции тока.

При включении линейного контактора КЛ получает питание катушка токового реле 1РУ. Собственное время включения реле 1РУ меньше, чем коммутационного аппарата углового ускорения 1У и, следовательно, размыкающий контакт 1РУ разомкнется раньше, чем успеет включиться контактор 1У. Поэтому пуск двигателя начинается при полностью введенном пусковом сопротивлении (резисторы R1 и R2).

Ток отпущания реле 1РУ равен току переключения I_2 , что приводит к срабатыванию 1У и шунтированию первой ступени пускового резистора и катушки токового реле 1РУ. Замыкание блок-контакта 1У в цепи катушки контактора 2У подготавливает включение последнего.

Катушка коммутационного аппарата 2У не подключается к сети, т. к. реле 2РУ имеет меньше время срабатывания, чем контактор 2У. По мере увеличения скорости ток спадает до значения I_2 , реле 2РУ отпадает, замыкая свой контакт в цепи 2У. Последний включается и своими контактами выводит оставшуюся ступень R_2 пускового реостата. Двигатель выходит на естественную характеристику и по ней разгоняется до установившейся скорости.

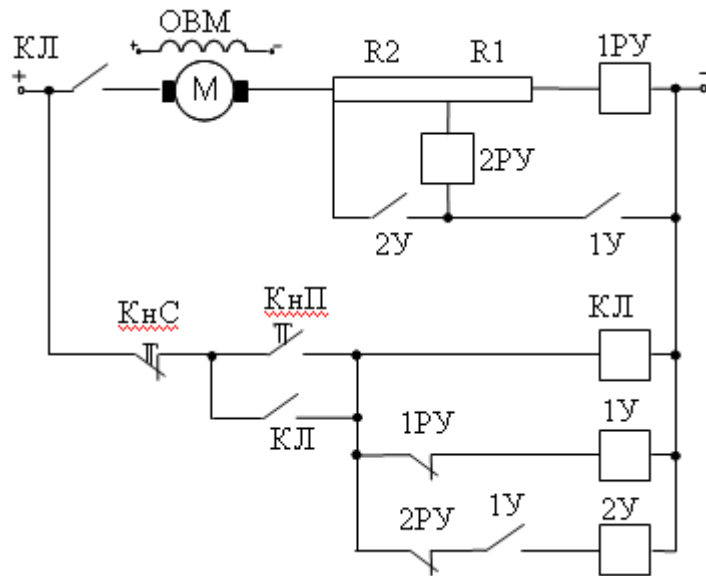


Рис. 5.6. Узел схемы автоматического пуска двигателя в функции тока якоря

5.8.3. Управление в функции времени

Для управления двигателем в функции времени часто применяется электромагнитное реле времени. Схема управления двигателем (рис. 5.7) в функции времени обеспечивает автоматизированный пуск и динамическое торможение. При нажатии кнопки КнП срабатывает контактор КЛ, его замыкающий вспомогательный контакт включает реле РУ2 и РУ1, контакты которых поочередно через определенное время замыкаются и подают напряжение на катушки контакторов КУ1 и КУ2. Контакты КУ1 и КУ2 шунтируют ступени пускового резистора [4].

Выдержка времени каждого реле ускорения (РУ1, РУ2) определяется временем работы двигателя на данной ступени ускорения.

Из уравнения механического равновесия:

$$M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = M_j, \quad (5.3)$$

где J_Σ – момент инерции привода;

M_c – статический момент, приведенный к валу двигателя;

M – вращающий момент двигателя;

M_j – динамический момент.

Интегрируя это уравнение можно определить время разгона двигателя:

$$t_p = J_\Sigma \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M - M_c} = J_\Sigma \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_j}. \quad (5.4)$$

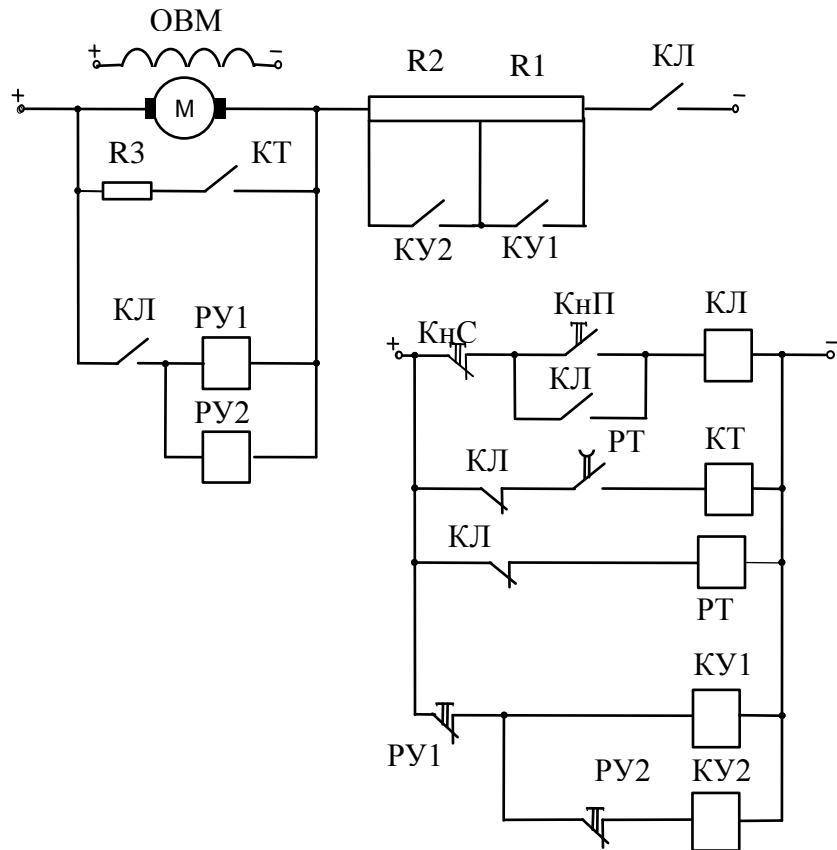


Рис.5.7. Узел схемы автоматического пуска и торможения двигателя в функции времени

Динамический момент при линейной механической характеристике и $M_c = \text{const}$ линейно зависит от скорости. Воспользовавшись диаграммой рис. 5.8 можно найти эту зависимость из подобия треугольников АВС и ОВЕ:

$$\frac{OE}{BE} = \frac{AC}{BC},$$

или

$$\frac{M_j - M_{j2}}{\omega_2 - \omega} = \frac{M_{j1} - M_{j2}}{\omega_2 - \omega_1}, \quad (5.5)$$

где: $M_{j1} = M_1 = M_c$; $M_{j2} = M_2 - M_c$; $M_j = M - M_c$.

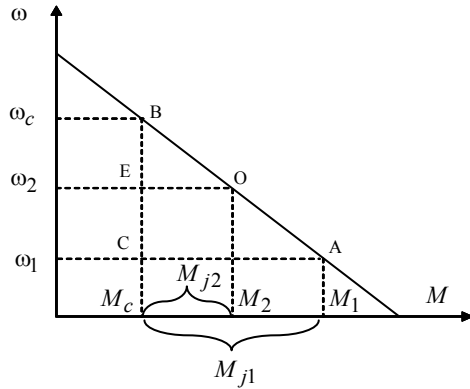


Рис. 5.8. Диаграмма для определения времени разгона ДПТ НВ
Из выражения (5.5)

$$M_j = M_{j2} + \frac{M_{j1} - M_{j2}}{\omega_2 - \omega_1} \omega_2 - \frac{M_j - M_{j2}}{\omega_2 - \omega_1} \omega_1 = \alpha - \beta \omega, \quad (5.6)$$

где α и β постоянные коэффициенты:

$$\alpha = M_{j2} + \frac{M_{j1} - M_{j2}}{\omega_2 - \omega_1}, \quad \beta = \frac{M_{j1} - M_{j2}}{\omega_2 - \omega_1}.$$

Подставляя (5.3) в (5.4) получим:

$$t_p = J_\Sigma \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{\alpha - \beta \omega} = J_\Sigma \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \ln \frac{\alpha - \beta \omega_1}{\alpha - \beta \omega_2} = J_\Sigma \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{j1} - M_{j2}} \cdot \ln \frac{M_{j1}}{M_{j2}}. \quad (5.7)$$

При нажатии кнопки КнС осуществляется торможение двигателя. Размыкается цепь питания контактора КЛ, якорь двигателя отключается от сети, вспомогательным контактом КЛ подается питание в цепь катушки реле времени РТ, ее контакт замыкается и реле начинает отсчет времени. Одновременно через контакты КЛ и РТ получает питание катушка коммутационного аппарата КТ, его силовой контакт присоединяет якорь двигателя к тормозному резистору R3. По окончании выдержки времени реле РТ своим размыкающим контактом отключает контактор КТ, чем и заканчивается динамическое торможение двигателя.

Кроме электромагнитных реле времени для управления автоматизированными приводами в функции времени применяют также электронные реле времени (таймеры).

5.9. Области применения ДПТ НВ

Двигатели постоянного тока обеспечивают большие пределы регулирования частоты вращения при высоких энергетических показателях и механических характеристиках, удовлетворяющих

требованиям большинства механизмов. Двигатели постоянного тока используются на транспорте (электровозы, тепловозы, трамваи, троллейбусы, мотор-колеса), в станках, прокатных станах, кранах, судовых установках и др. Двигатели постоянного тока широко применяются также в авиации, автомобилях, тракторах и космической техники.

5.9.1. Электропривод карьерного экскаватора

В карьерных экскаваторах типа ЭКГ или ЭШ используется большое количество систем, разнообразных по назначению и принципу работы. Практически все известные на сегодня схемы преобразования энергии, такие как гидравлика, пневматика, электропривод, электроника, нашли применение на этих машинах. Первичной и главной ступенью преобразования энергии, а в современных тяжелых экскаваторах это электрическая энергия, поступающая в экскаватор через высоковольтную питающую цепь, является электропривод [3].

Классически для привода главных механизмов применяются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, питаемые от регулируемых генераторов (система Г–Д) или регулируемых статических тиристорных преобразователей (система ТП–ДПТ).

При использовании системы Г–Д ряд исполнительных механизмов по условиям производственного процесса работает с частыми и большими перегрузками, приводящими к полной остановке. Это механизмы напора и черпания одноковшевых экскаваторов, винты ледоколов, нажимные винты, линейки, поёмные столы, ножницы процетных станков и др. При этом возможно возникновение недопустимых моментов по условиям прочности рабочего механизма.

Применение максимальной защиты не может дать положительных результатов, так как перегрузки будут вызывать частые отключения двигателя, нарушающие нормальный режим работы. Необходим электропривод, который при остановке двигателя вследствие перегрузки имел бы ограниченный ток короткого замыкания (ток упора) и развивал при этом момент, допустимый с точки зрения прочности механизма.

В целях сохранения производительности рабочей машины необходимо, чтобы до предельного момента двигатель работал на жесткой характеристике с малой крутизой, а при подходе к моменту упора скорость двигателя и механизма уменьшалась до нуля. Вид подобной идеальной «экскаваторной» характеристики изображен на рис. 5.9.

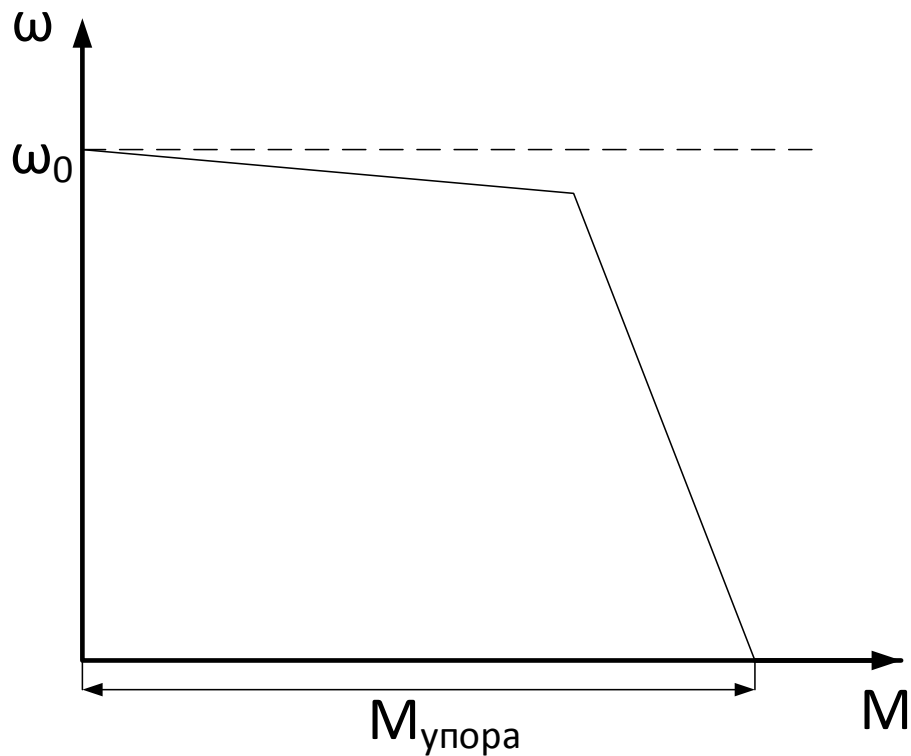


Рис. 5.9. Экскаваторная характеристика системы Г–Д

Двигатель с экскаваторной (саморазгружающейся) характеристикой подразумевает работу с номинальной частотой вращения вплоть до стопорного максимального момента, по достижении которого двигатель останавливается, но не теряет усилие на приводном валу. То есть когда, к примеру, груженный ковш упирается в неподвижный массив и усилия, развиваемого подъемной лебедкой, недостаточно для внедрения ковша, не должно происходить «опрокидывание» двигателя, т. е. падение оборотов и снижение момента на валу двигателя. Для сохранения наибольшей производительности экскаватора желательно, чтобы двигатель работал с постоянной наибольшей частотой вращения до момента начала стопорения (наибольшей нагрузки). Это означает, что механическая характеристика (зависимость частоты вращения от момента на валу двигателя) должна быть жесткой, состоять из рабочего участка с минимальной линейной зависимостью частоты вращения от момента и нерабочего участка, соответствующего падению частоты вращения при максимальном моменте стопорения. К такому экскаваторному режиму наиболее близок режим работы двигателей постоянного тока.

Обмотка возбуждения двигателя постоянного тока в виде главных магнитных полюсов располагается в статоре, на обмотку якоря (ротора)

ток поступает через щетки и коллектор – аппарат, который преобразует постоянную ЭДС питающей сети в переменную ЭДС обмотки якоря.

Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока возможно тремя способами: изменением сопротивления обмотки якоря, подводимого напряжения или потока возбуждения (тока возбуждения). Изменение сопротивления обмотки якоря для регулирования невыгодно, так как не экономично и сильно смягчает механическую характеристику. Регулирование изменением потока возбуждения применимо при малых моментах нагрузки. Момент двигателя прямо пропорционален потоку возбуждения, а кроме того, обрыв в цепи возбуждения может привести к работе двигателя вразнос при отсутствии значимой нагрузки на валу, так как частота вращения обратно пропорциональна потоку возбуждения.

Регулирование частоты вращения изменением питающего напряжения требует источника с регулируемым напряжением.

Питание двигателей постоянного тока (главных приводов экскаватора) длительный период времени осуществлялось от генераторов постоянного тока (система Г–Д). Это достаточно надежная и простая в управлении система электропривода, она используется уже много десятилетий в приводах карьерных экскаваторов.

В простейшей системе Г–Д изменение питающего напряжения (выходного напряжения генератора) происходит путем изменения тока возбуждения в независимой обмотке возбуждения генератора (например, с помощью реостата в цепи возбуждения). Снижение питающего напряжения приводит к снижению частоты вращения двигателя при сохранении рабочего момента и жесткости рабочих характеристик.

Для привода генераторов используется сетевой двигатель. Обычно преобразовательный агрегат включает в себя один или несколько сетевых двигателей, которые вращают генераторы. Каждый генератор обеспечивает привод соответствующего механизма – привод подъема, напора (тяги для драглайнов), поворота, хода, открытия днища ковша (для ЭКГ). В агрегат может входить генератор собственных нужд, питающий постоянным током обмотки возбуждения двигателей и генераторов. В качестве сетевого двигателя используются мощные асинхронные (ЭКГ-5А) или синхронные двигатели переменного тока (ЭКГ-10, ЭКГ-15, ЭШ-11.70 и т. д.).

Индивидуальный привод основных механизмов автоматизирован. Машинист управляет только частотой вращения и проводит реверсирование двигателя в процессе копания. Остальные процессы регулирования (стабилизация частоты вращения и ограничение

предельной нагрузки, формирование экскаваторной характеристики) происходят автоматически. В основу принципа автоматизации управления отдельного механизма положена специальная система автоматического регулирования (САР). Регулятором здесь выступает силовой магнитный усилитель (он заменяет управляющий реостат в цепи возбуждения в простейшей схеме). В САР генератор является одновременно усилительным и исполнительным элементом, двигатель – объектом регулирования, а регулируемой величиной является частота вращения двигателя. При управлении машинист, желая установить определенную частоту двигателя, воздействует на цепь возбуждения генератора, т. е. изменяет величину тока в его обмотке возбуждения посредством командоконтроллера. Для поддержания заданного режима в САР присутствует обратная связь, обеспечивающая корректирующее воздействие на магнитные усилители и далее на ток в цепи возбуждения генератора.

Более прогрессивной считается схема, в которой питание обмотки возбуждения генератора (двигателя) осуществляется посредством тиристорного преобразователя. При такой схеме не требуется задействовать генератор собственных нужд, призванный питать обмотки возбуждения электромашин и привода малой мощности (открытия днища ковша). Основными преимуществами тиристорных возбудителей являются малая инерционность и более высокий КПД по сравнению с силовыми магнитными усилителями. Тиристор преобразует переменный ток в постоянный с регулированием выпрямленного напряжения. Ток управления тиристора регулируется сельсинным командоаппаратом.

Так же возможен вариант использования вместо генератора тиристорного преобразователя. Однако применение силовых тиристорных преобразователей для электропривода главных приводов приводит к снижению коэффициента мощности энергетической установки экскаватора, появлению дополнительных гармоник и колебаний напряжения в сети, что снижает качество электроснабжения карьера. Чтобы уменьшить негативное влияние работы ТП на сеть, на экскаваторах используются фильтрокомпенсирующие устройства.

Другим перспективным направлением является применение импульсного способа изменения какого-либо параметра двигателя – напряжения, сопротивления в цепях статора или ротора. Изменяя длительность импульса, достигают изменения средней частоты вращения.

Сегодня мировые лидеры производства электрических экскаваторов, такие как Bucyrus International Inc. с входящими в ее состав Marion и

Ransomes-Rapier, а также P&H предлагают экскаваторы с электроприводом, выполненным по разным схемам: Г–Д, ТП–ДПТ.

5.9.2. Электропривод скоростного лифта

Электроприводы первых отечественных скоростных лифтов (скорость 2,5 и 3,5 м/с) выполняли по системе Г–Д. Управление системой электропривода имело несколько модификаций: электромашинное без промежуточного магнитного усилителя (ПМУ), электромашинное с ПМУ и управлением с помощью силового магнитного усилителя.

Формирование диаграммы движения обеспечивалось за счёт жёстких и гибких обратных связей, контролирующих скорость, ускорение и рывок лифта через электрические параметры системы (напряжение генератора, ток двигателя, их производные и т.д.).

Для поддержания необходимой точности регулирования скорости независимо от направления движения, величины и характера нагрузки требуется высокий коэффициент усиления. При этом для достижения устойчивости системы, состоящей из инерционных элементов, требуются различные стабилизирующие связи. При диапазоне регулирования 1:25 и высокой точности остановки неизбежно приходится менять параметры обратных связей в зоне точной остановки из-за нелинейности элементов и недостаточной точности регулирования на нижних пределах скорости. В итоге система управления не является бесконтактной, и при этом не обеспечивается совместное выполнение требований: точность регулирования скорости, выдерживание диаграммы движения, точность остановки, независимость от нагрузки.

Система электропривода тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д) является наиболее совершенной по динамическим показателям и позволяет максимально использовать высокие регулировочные свойства элементов управления.

Сочетание быстродействующей системы регулирования, безынерционной силовой части и рационального схемного решения в целом позволяет построить оптимальные по быстродействию приводы. Это означает повышение производительности установки при высоком комфорте движения. Наличие преобразователя снижает уровень шума. Отсутствие вращающихся преобразовательных агрегатов, надлежащий выбор и расчет бесконтактных элементов и необходимая их защита позволяют повысить надежность системы в целом.

Для скоростных лифтов принят реверсивный электропривод постоянного тока по системе РТП–Д с транзисторными устройствами

управления, построенный по принципу системы с последовательной коррекцией и подчиненным регулированием параметров электропривода с задатчиком интенсивности на входе.

Блок-схема силовой части главного привода представлена на рис.5.9.

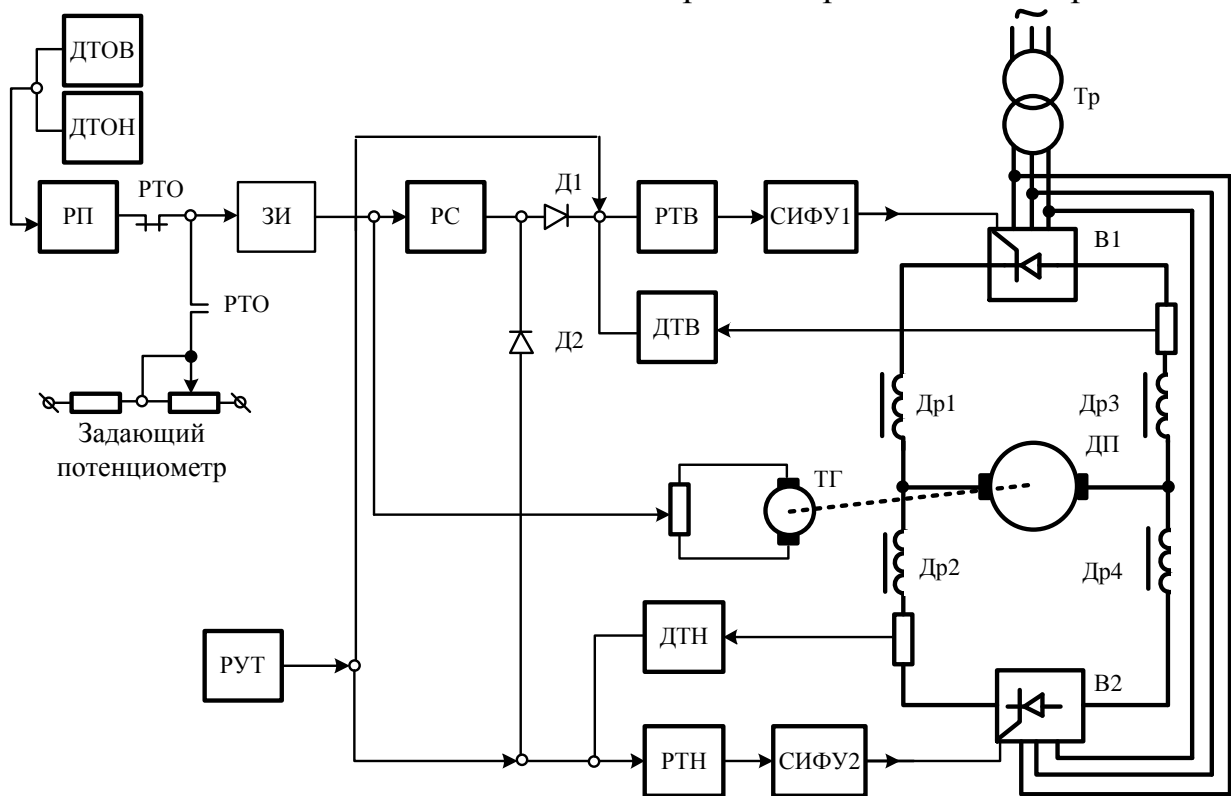


Рис.5.9. Блок-схема системы РТП-Д

Где: В1, В2 – первая и вторая группы тиристоров; Д1, Д2 – диоды; ДП – подъёмный двигатель; Др1 – Др4 – токоограничивающие дроссели; ДТВ, ДТН – датчики тока «вверх» и «вниз»; ЗИ – узел задания интенсивности; РП – регулятор положения; РТВ, РТН – регуляторы тока «вверх» и «вниз»; РТО – контакты реле точной остановки; РС – регулятор скорости; РУТ – регулятор уравнивающего тока; СИФУ1, СИФУ2 – системы импульсно-фазового управления первой и второй групп тиристоров; ТГ – тахогенератор; Тр – трансформатор.

Силовая часть реверсивного тиристорного преобразователя состоит из двух управляемых мостовых схем, соединенных встречно-параллельно.

Для питания обеих тиристорных групп используют специальный трехфазный трансформатор с одной вторичной обмоткой.

Для ограничения уравнивающего тока преобразователя применены четыре уравнивающих дросселя, рассчитанных так, что они не насыщаются при протекании через них уравнивающих токов и

насыщаются от токов нагрузки. Таким образом, уравнивающие токи в каждом режиме работы ограничиваются двумя дросселями.

Для каждой группы реверсивного преобразователя имеется отдельная система импульсно-фазового управления. Каждая система состоит из блоков питания, синхронизации и с шестью блокинг-генераторами. Каждый блокинг-генератор управляет своим плечом преобразователя, образуя канал управления.

Схема построена по принципу систем с последовательной коррекцией и подчиненным регулированием параметров. Отличительной особенностью таких систем является отдельное подчиненное регулирование основных параметров электропривода с задатчиком интенсивности на входе и числом регуляторов, равных числу регулируемых параметров. На вход каждого регулятора подаются сигнал заданной и обрабатываемой величин. Система строится так, что предыдущий регулятор вырабатывает сигнал-задание последующему регулятору и т.д.

Применение задатчика интенсивности на входе при безынерционной аппаратуре позволяет наиболее полно использовать преимущества преобразователей с тиристорами как практически безынерционных приборов.

Для системы регулирования привода лифта следует различать два режима работы: регулирование скорости, когда сигнал поступает из схемы автоматики, и регулирование положения (или режим точной остановки), когда сигнал подается от датчика точной остановки ДТО.

Переключение каналов регулирования осуществляется контактным реле РТО при входе лифта в зону точной остановки.

Основными узлами канала регулирования скорости являются: задающий потенциометр, узел задания интенсивности переходных процессов, регулятор скорости РС, регуляторы тока РТВ, РТН, узел задания уравнивающих токов, узел ограничителя сигнала управления преобразователя, элементы обратных связей по току и скорости.

На задающем потенциометре с помощью контактов реле (направления движения, ускорения, нормальной работы и определения скорости) формируются сигналы задания скорости лифта в различные моменты времени.

Сигналы выбора направления, уровня скорости, начала разгона и торможения поступают из схемы автоматики.

Кроме того, на задающем потенциометре собрана цепочка, служащая для задания начального тока в главной цепи, который

соответствует величине срабатывания реле контроля тока. Необходимо отметить, что в схеме типового лифта предусмотрена так же возможность использования датчика загрузки кабины для задания начального тока двигателя и снятия тормоза. В этом случае вышеупомянутая цепочка из схемы исключается.

С задающего потенциометра сигнал скачком поступает на вход узла задания интенсивности ЗИ, состоящего из блока задатчика интенсивности и апериодического звена РС, включенного на его выход. Темп изменения выходного напряжения блока задатчика определяет величину ускорения или замедления лифта. Звено РС на своем выходе в начальной и конечной стадиях переходного процесса преобразует линейные изменения напряжения ЗИ в экспоненциальное, определяя величину рывка в начале и конце разгона (торможения).

Регулятор скорости построен на базе блока усилителя постоянного тока. Наличие в обратной связи регулятора цепочки РС делает систему астатической по нагрузке, то есть установившаяся скорость не зависит от величины и характера нагрузки. Параметры регулятора выбирают из условий «компенсации» в контуре регулирования скорости электромеханической постоянной привода. На входе РС сравнивается сигнал задания скорости, поступающий с выхода апериодического звена и сигнал фактической скорости, выдаваемый тахогенератором. При высоких коэффициенте усиления и быстродействии системы фактическая скорость повторяет задающий сигнал звена РС. Выход РС ограничен по величине с помощью стабилизаторов.

Сигнал с выхода РС через разделительные диоды Д1 и Д2 подаётся на вход регуляторов тока РТВ и РТН в зависимости от полярности выходного напряжения. На вход регулятора тока, кроме сигнала задания, пропорционального току двигателя, подаются сигналы обратной связи по току соответствующей тиристорной группы и задания уравнивающего тока.

Регуляторы тока выполнены с интегрально-пропорциональной характеристикой. Причём параметры РС-цепочки обратной связи регуляторов выбраны их условия «компенсации» электромагнитной постоянной времени главной цепи. Т.к. ток двигателя пропорционален заданию регулятора тока или, что то же самое, выходному напряжению регулятора скорости, то ограничение выхода РС соответствует токоограничению двигателя (токовой отсечке).

Источником сигнала обратной связи по скорости является тахогенератор. На выходе тахогенератора включается фильтр.

Обратная связь по току преобразователя осуществляется с помощью шунтов, установленных в каждой тиристорной группе и усиливаются датчиками ДТВ и ДТН на выходе которых установлены фильтры для сглаживания высокочастотных пульсаций, связанных с работой датчиков тока. При подходе кабины лифта к точной остановке система автоматики осуществляет необходимые переключения: отключает задающий потенциометр, меняет параметры РС-звена на выходе блока ЗИ с помощью контактов реле РТО и подключает через регулятор положения РП узел точной остановки ДТО.

Схема датчиков точной остановки включает в себя два индуктивных датчика ДТОВ и ДТОН, магнитный усилитель и электромагнитное реле РТО.

Индуктивные датчики с диагонали моста выдают сигнал на регулятор положения РП. Магнитный усилитель, имеющий релейную характеристику, отключает реле РТО при подходе к датчикам точной остановки в режиме нормальной работы лифта. Во всех остальных случаях реле РТО включено.

5.10. Выбор принципов автоматизированного управления ДПТ

Сравнение принципов управления может производиться на основе анализа работы электроприводов в условиях отклонения напряжения питающей сети U , статического момента M_C , момента инерции J_Σ и температуры t^0 , C от расчетных значений [2, 5].

В качестве примера рассмотрим работу схемы управления пуском ДНВ по принципу времени при отклонении статического момента M_C . На рис. 5.10 пунктирными линиями показана пусковая диаграмма при повышенном статическом моменте $M'_C > M_C$. Двигатель начинает ускоряться по первой ступени пусковой характеристики. За время, равное уставке времени первого реле ускорения (рассчитанное на M_C), двигатель разгоняется только до скорости $\omega'_1 < \omega_1$. Аналогично проходит работа двигателя на второй ступени. Пусковая диаграмма принимает вид а, б', в', г', д'; пики моментов возрастут и средний пусковой момент увеличится.

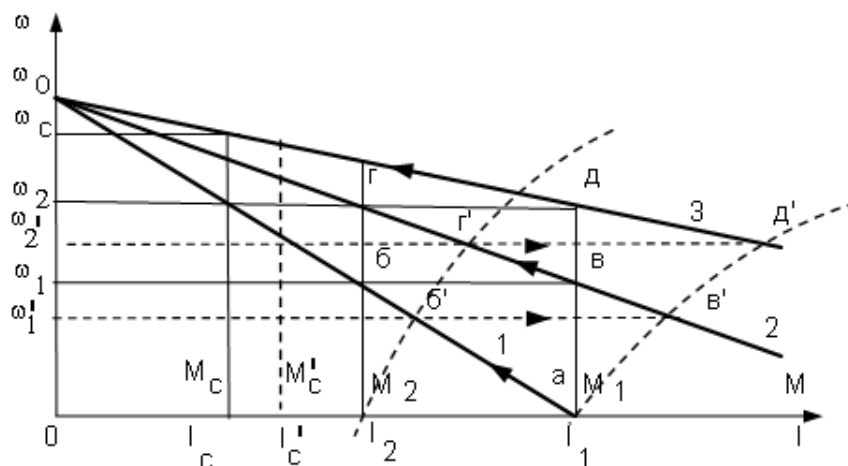


Рис. 5.10. Пусковая диаграмма при повышенном статическом моменте

Общее время пуска двигателя, определяемое суммой выдержек времени реле ускорений остается неизменным. Оно достигается, как видно из рассматриваемого примера, за счет возрастания пиков моментов (токов). Это приводит к необходимости применения максимальной защиты. В схемах управления, построенных в функции времени, любое увеличение нагрузки не может привести к длительной работе ДНВ с включенными пусковыми сопротивлениями и тем самым исключается аварийный режим, связанный с их перегревом. Для этого принципа можно отметить следующие особенности: простота, надежность работы схем, однотипность реле для любых мощностей и напряжений двигателей.

Для схем, действующих по принципу скорости, характерным является простота и наглядность; возможность несрабатывания контактов ускорения и работа двигателя при введенных сопротивлениях в случае пуска при пониженном напряжении, при перегретых катушках контакторов ускорения и при перегрузках привода; увеличение пиков тока и возможность одновременного срабатывания контакторов ускорения в случаях пуска при повышенном напряжении и при холодных катушках коммутационных аппаратов; возможность одновременного срабатывания контакторов при небольшом нарушении регулирования. В силу указанных особенностей принцип скорости используется редко, однако, он находит большое применение при управлении торможением двигателей.

К особенностям схем, работающих по принципу тока, относятся простота; отсутствие влияния температуры катушек контакторов и реле на их работу; возможность прекращения ускорения на промежуточной ступени при пуске двигателя с перегрузкой, пониженная надежность вследствие возможности перегревания сопротивлений во время пуска. Принцип управления по току применяется главным образом для

автоматизации пуска двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

При выполнении данной лабораторной работы каждому студенту необходимо по заданию проанализировать влияние одного из отклонений U , M_c , J_Σ , и $t^\circ(C)$ нагрева катушек и пусковых сопротивлений на

процессы пуска, торможения (табл. 5.1), при анализе принять $T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}} = 0$.

Таблица 5.1

Управление / Отклонение	$U \uparrow$	$U \downarrow$	$J_\Sigma \uparrow$	$J_\Sigma \downarrow$	$M_c \uparrow$	$M_c \downarrow$	$t^\circ, C \uparrow$	$t^\circ, C \downarrow$
t, c	a	a'	b	b'	c	c'	d	d'
$\omega, \text{рад/с}$	e	e'	f	f'	g	g'	h	h'
i, A	s	s'	k	k'	l	l'	m	m'

5.11. Описание работы схемы

Управление коммутацией контакторов осуществляет устройство управления (контроллер), представляющее собой электронный блок, реализованный на аналоговых и цифровых микросхемах серий К140, К561 (К564). На вход контроллера подаются сигналы пропорциональные току якоря и скорости двигателя, сигналы с таймеров Т1, Т2 и переключателей, расположенных на передней панели стенда.

Сигналы пропорциональные току якоря и скорости двигателя преобразуются (усиливаются и фильтруются) в контроллере. Для усиления выходных сигналов управления в контроллере используются силовые ключи, реализованные на транзисторах.

В исходном состоянии (устанавливается после включения питания стенда) контроллер выдает сигналы на размыкание контактов К1...К6.

5.12. Исследование процессов автоматизированного пуска и торможения ДНВ с помощью компьютерной программы «SAFV.EXE» на ПЭВМ типа IBM PC

Внимание! Для проведения исследования необходимо, чтобы к разъему *COMPUTER* был подключен специализированный кабель, соединяющий приборный блок с компьютером.

Особенностью компьютерной программы «SAFV.EXE», реализованной на языке программирования ПАСКАЛЬ, является возможность работы исследуемой системы в двух режимах:

- управление автоматизированным процессом пуска и торможения с последующей регистрацией на ПЭВМ (информационно-измерительный режим);
- управление автоматизированным процессом пуска и торможения от ПЭВМ (режим управления).

5.12.1. Назначение управляющих клавиш компьютерной программы SAFV.EXE

- F1 - клавиша возврата в меню выбора режима;
- F2 - клавиша прорисовки новой координатной сетки;
- F3 - клавиша пуска двигателя и записи переходных процессов при пуске;
- F4 - клавиша торможения двигателя и записи переходных процессов при торможении;
- F5 - клавиша записи переходных процессов при пуске и торможении двигателя (ручное управление);
- F6 - клавиша печати данных на принтере;
- F7 - клавиша редактирования максимальных значений времени, скорости, тока, задающих масштаб координатной сетки;
- F10 - клавиша выхода в операционную систему (при печати эта клавиша досрочно прекращает вывод данных на принтер).

5.13. Программа расчетного и экспериментального исследования электропривода

Общая для обоих вариантов расчетная часть:

- расчет естественных электромеханических $\omega = f(I_1)$ и механических $\omega = f(M_1)$ характеристик электропривода по паспортным данным;
 - определение значений сопротивлений ступеней пусковых резисторов R1, R2 и тормозного сопротивления R_T аналитическим методом;
 - расчет времени отключения ступеней пускового резистора и времени торможения.

Анализ влияния отклонения одного из параметров U , M_c , J_Σ и $t^0(C)$ на процессы пуска и торможения по заданию преподавателя (варианты брать из табл. 5.1).

Порядок экспериментального исследования автоматизированных процессов электропривода по первому варианту (с использованием осциллографа с запоминанием):

- проверка работоспособности стенда;
- снятие осциллограммы скорости $\omega = f(t)$ при пуске и определение с её помощью величины момента инерции привода;
- снятие осциллограмм тока якоря $I_1 = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при пуске в функции скорости;
- снятие осциллограмм тока якоря $I_1 = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при пуске в функции тока;
- снятие осциллограмм тока якоря $I_1 = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при пуске в функции времени;
- снятие осциллограмм тока якоря $I_1 = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при торможении в функции скорости.

Порядок экспериментального исследования автоматизированных процессов электропривода по второму варианту (с использованием компьютера):

- проверка работоспособности стенда;
- зарисовка характеристик и $\omega = f(t)$ при пуске и определение с её помощью величины момента инерции привода;
- зарисовка характеристик тока якоря $I = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при пуске в функции скорости с компьютерным и ручным управлением;
- зарисовка характеристик тока якоря $I = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при пуске в функции тока с компьютерным и ручным управлением;
- зарисовка характеристик тока якоря $I = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при пуске в функции времени с компьютерным и ручным управлением;
- зарисовка характеристик тока якоря $I = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при торможении в функции скорости.

5.14. Проверка работоспособности стенда

Для этого необходимо:

- перевести автоматический выключатель QF2 в положение OFF;
- включить автоматический выключатель QF1 на левой боковой панели приборного блока (загорается световой индикатор “POWER”);

- установить в начальное состояние таймеры τ_1 , τ_2 , для этого следует нажать кнопку RESET (при этом на цифровом индикаторе времени должна гореть только десятичная точка);
- проверить возможность установки времени, используя кнопки Sx1 и Sx0.1;
- установить произвольное время срабатывания T_1 таймера;
- нажать кнопки: START (при этом показания индикатора времени должны уменьшаться, а после уменьшения до нуля должно индицироваться установленное время); задания ω_1 и удерживая ее повернуть ручку потенциометра, расположенного над ней, при этом стрелка прибора PV2 (SPEED) должна отклоняться;
- аналогично проверить возможность задания ω_2 и I_2 ;
- выключить и повторно включить автоматический выключатель QF1 (это необходимо для возврата контроллера в начальное состояние, которое было до нажатия кнопки START, т.к. кнопка STOP при выключенном QF2 не действует);
- включить автоматический выключатель QF2 (вольтметр PV1 должен показать напряжение питания двигателя 45 ± 4 В).

5.15. Исследование процессов автоматизированного пуска и торможения ДПТ НВ с помощью осциллографа с запоминанием

5.15.1. Экспериментальное определение момента инерции электропривода

Механическая постоянная времени определяет длительность переходного процесса электропривода и находится по формуле:

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} R_{яц}}{C^2},$$

где J_{Σ} - суммарный момент инерции электропривода.

$$J_{\Sigma} = J + J_{\text{мех}},$$

где J - момент инерции электродвигателя;

$J_{\text{мех}}$ – момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя.

Характеристика переходного процесса при пуске ДПТ НВ из неподвижного состояния изображена на рис. 5.11. Здесь с помощью приведенной характеристики известным способом определяется время

переходного процесса $t_{\text{ПП}}$, которое примерно равно трехкратному значению электромеханической постоянной времени T_M .

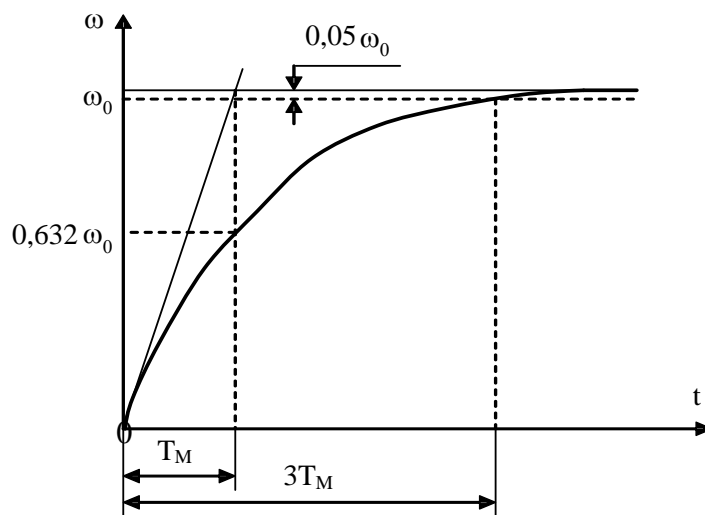


Рис. 5.11. Характеристика переходного процесса при пуске ДПТ НВ из неподвижного состояния

Для этого необходимо:

- установить время срабатывания реле времени 100 с (для блокировки коммутации пускового резистора);
- подключить информационный и общий входы осциллографа к гнездам XS1, XS2 и произвести пуск ДПТ НВ нажатием кнопки START;
- зарисовать осциллограмму скорости двигателя $\omega = f(t)$ при пуске до установившейся скорости;
- рассчитать на основании полученной осциллограммы значение суммарного момента инерции по вышеприведённой формуле.

5.15.2. Снятие осциллограмм тока якоря $I_1 = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при пуске в функции скорости

Для этого необходимо:

- произвести проверку работоспособности стенда по п. 5.14;
- нажать кнопки: $f(\omega)$ на блоке *STARTING REGIM* лицевой панели стенда; задания скорости ω_1 и удерживая ее выставить по прибору PV2 (SPEED) скорость переключения ω_1 , поворачивая ручку потенциометра ω_1 , отпустить кнопку;
- подключить информационный и общий входы осциллографа к гнездам XS3, XS4;

- произвести пуск двигателя, нажав кнопку START (зарисовать осциллограмму);
- осуществить торможение двигателя, нажав кнопку STOP;
- подключить информационный и общий входы осциллографа к гнездам XS1, XS2;
- произвести пуск двигателя, нажав кнопку START (зарисовать осциллограмму);
- осуществить торможение двигателя, нажав кнопку STOP.

5.15.3. Снятие осциллограмм тока якоря $I_1 = f(t)$ и скорости

$\omega = f(t)$ двигателя при пуске в функции тока

Для этого необходимо:

- произвести проверку работоспособности стенда по п. 5.14;
- нажать кнопки: $f(\omega)$ на блоке *STARTING REGIM* лицевой панели стенда; задания скорости i_2 , и удерживая ее выставить по прибору РА (ARMATURE CURENT) ток переключения, поворачивая ручку потенциометра i_2 , затем отпустить кнопку задания тока;
- подключить информационный и общий входы осциллографа к гнездам XS3, XS4;
- произвести пуск двигателя, нажав кнопку START (зарисовать осциллограмму);
- осуществить торможение двигателя, нажав кнопку STOP;
- подключить информационный и общий входы осциллографа к гнездам XS1, XS2;
- произвести пуск двигателя, нажав кнопку START (зарисовать осциллограмму);
- осуществить торможение двигателя, нажав кнопку STOP.

5.15.4. Снятие осциллограмм тока якоря $I_1 = f(t)$ и скорости

$\omega = f(t)$ двигателя при пуске в функции времени

Для этого необходимо:

- произвести проверку работоспособности стенда по п. 5.14;
- нажать кнопку $f(t)$ на лицевой панели приборного блока;
- установить на таймерах T_1 и T_2 рассчитанные значения времени отключения ступеней пускового резистора t_1 и t_2 (с помощью переключателя TIMER SELECT выбрать таймер, а кнопками Sx1 и Sx0.1 выставить соответственно секунды и десятые доли секунды);

- подключить информационный и общий входы осциллографа к гнездам XS3, XS4;
- произвести пуск двигателя, нажав кнопку START (зарисовать осциллограмму);
- осуществить торможение двигателя, нажав кнопку STOP;
- подключить информационный и общий входы осциллографа к гнездам XS1, XS2;
- произвести пуск двигателя, нажав кнопку START (зарисовать осциллограмму);
- осуществить торможение двигателя, нажав кнопку STOP.

5.15.5. Снятие осциллограмм тока якоря $I_1 = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ двигателя при торможении в функции скорости

Для этого необходимо:

- произвести проверку работоспособности стенда по п. 5.14;
- осуществить пуск двигателя в функции любого из трех параметров (п. 4.13.2; п. 4.13.3; п. 4.13.4);
- произвести торможение двигателя нажатием кнопки STOP и зарисовать осциллограммы тока $I_1 = f(t)$ и скорости $\omega = f(t)$ последовательно подключая входы осциллографа к соответствующим гнездам XS3, XS4 и XS1, XS2.

5.16. Исследование процессов автоматизированного пуска и торможения ДПТ НВ с помощью IBM PC

5.16.1. Выбор режима работы ДПТ НВ

После появления меню выбора режима, клавишами управления курсором выбирается режим управления двигателем (в функции тока, времени или скорости). Выбор заканчивается нажатием клавиши ENTER.

После выбора режима необходимо задать исходные данные для управления пуском и торможением. Например, при управлении по скорости двигателя следует задать значения скорости переключений ω_1 , ω_2 и скорости окончания торможения (отключения тормозного резистора). Задание численных значений осуществляется с помощью клавиш управления курсором и цифровых клавиш. Ввод чисел заканчивается нажатием клавиши ENTER. Для того чтобы вернуться в меню выбора режимов необходимо нажать клавишу ESC.

5.16.2. Управление пуском и торможением двигателя и зарисовка переходных процессов

Для этого необходимо произвести проверку работоспособности стенда по пункту 5.14 и исследовать переходные процессы в системе автоматизированного пуска и торможения по следующему алгоритму:

Для управления пуском и торможением двигателя и регистрации переходных процессов (после задания максимальных значений координатной сетки, выбора режимов и задания исходных данных) необходимо нажать клавишу F2. При этом на экран выводится система координат, в верхней строке которой располагается справочная информация: значения тока, скорости, времени на одно деление масштабной сетки графика, а также режим работы: работы: $u=f(t)$, $u=f(\omega)$, $u=f(i)$.

При управлении пуском и торможением от ПЭВМ (кнопка *cmpt* на стенде нажата) для записи переходных процессов следует нажать одну из клавиш F3 и F4. При этом ПЭВМ, осуществляет управление пуском и торможением ДПТ НВ с одновременной регистрацией переходных процессов по току якоря и скорости двигателя.

Если ПЭВМ используется в информационно-измерительном режиме (кнопка *cmpt* на стенде отжата), то для записи процессов пуска и торможения двигателя следует нажимать клавишу F5.

Для сравнения характеристик методов управления пуском и торможения ДПТ НВ на один график можно выводить несколько переходных процессов.

Для вложения полученных графиков в лабораторный отчет возможны два способа вывода информации:

- вывод на принтер;
- запись на дискету.

Внимание!

С помощью стандартной программы проверьте дискету на отсутствие вирусов.

После того как закончено построение графика на экране, для вывода его на печать нужно заправить в принтер бумагу и нажать клавишу F6.

Процедура записи информации на дискету:

- нажать клавишу «ALT» + «Print Screen» (запись информации в буфер);
- нажать клавишу «ALT» + «TAB» (выход из программы без потери текущей информации);

- поместить в «Paint» содержимое буфера и сохранить текущую информацию (в программе «Paint», в командной строке выбрать меню «Файл», затем «Сохранить как», набрать имя файла и сохранить на «Рабочем столе». Свернуть все окна, навести курсор мыши на сохраняемый файл, нажать правую кнопку мыши, в появившемся контекстном меню выбрать «Отправить» – «Диск 3,5(A)»);
- вернуться в текущую программу «Safv.exe»;
- Анализировать запомненные временные зависимости координат и параметров электропривода. При обработке графиков переходных процессов на каждой характеристике необходимо отметить:
 - максимальное значение тока во время переходных процессов $I_{\text{макс}}$;
 - установившиеся начальное и конечное значения тока и скорости $I_{\text{н}}, I_{\text{к}}, \omega_{\text{н}}, \omega_{\text{к}}$;
 - время переходного процесса, $t_{\text{пп}}$;
 - при сбросе и набросе величину выброса и проседания скорости;
 - относительную величину пульсаций тока – $\delta I\% = I/I_{\text{уст}}$, здесь I – абсолютная величина размаха пульсаций тока, $I_{\text{уст}}$ – установившееся после переходного процесса значение тока. Во время переходного процесса отметить наибольший размах пульсаций и найти $\delta I\%_{\text{макс}}$. После окончания переходного процесса пульсации принимают постоянное значение $\delta I\%_{\text{уст}}$.
- Результаты анализа занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

№п. п.	Параметр переходного процесса								Название переходного процесса (пуск, торможение и т.д.)
	$t_{\text{пп}}$, мс	$\omega_{\text{уст}}$, с ⁻¹	$\omega_{\text{нач}}$, с ⁻¹	$I_{\text{нач}}$, мА	$I_{\text{уст}}$, мА	$\delta I_{\text{уст}}$, %	$\delta I_{\text{макс}}$, %	$I_{\text{макс}}$, мА	
1									
...									
6									

5.17. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда с краткими пояснениями.

3. Расчетные естественные, пусковые и тормозные характеристики электропривода.

4. Рассчитать выдержки времени на отключение пусковых ступеней.

5. Анализ влияния отклонений одного из параметров U , M_c , J_Σ , и t °(C) нагрева катушек и пусковых сопротивлений на процессы пуска и торможения (задание по табл. 5.1).

По первому варианту экспериментов:

- определить момент инерции привода по пусковой характеристике $\omega = f(t)$;

- осциллограммы характеристик $\omega = f(t)$ и $I_1 = f(t)$ пуска и торможения при автоматизированном управлении в функции скорости вращения, тока и времени.

По второму варианту экспериментов:

- определить момент инерции привода по пусковой характеристике $\omega = f(t)$;

- графики переходных процессов $\omega = f(t)$ и $I_1 = f(t)$ пуска и останова при автоматизированном управлении в функции скорости вращения, тока и времени.

5.18. Контрольные вопросы

5.18.1. Указать назначение систем логического управления.

5.18.2. Охарактеризовать режимы работы систем логического управления.

5.18.3. Показать графически и аналитически, как влияет на управляемый режим работы отклонение питающей сети при разных принципах управления.

5.18.4. Объяснить графически и аналитически, как влияет на управляемый режим работы отклонение статического момента при разных принципах управления.

5.18.5. Изобразить графически и аналитически, как влияет на управляемый режим работы отклонение температуры нагрева катушек реле, контакторов и пусковых сопротивлений при разных принципах управления.

5.18.6. Представить графически и аналитически, как влияет на управляемый режим работы отклонение момента инерции привода при разных принципах управления.

5.18.4. Назвать элементы принципиальной схемы, введение которых определяется принципом управления.

5.18.8. Какие средства применяются для защиты электроприводов от аварийных режимов работы?

5.18.9. В чем сущность управления по принципу времени? Привести схему его реализации.

5.18.10. Пояснить способ управления по принципу скорости и привести схему его реализации.

5.18.11. В чем сущность управления по принципу тока? Привести схему его реализации.

5.18.12. Что подразумевается под выражением «ступени ускорения»?

Литература

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода М.: Энергоатомиздат, 1981, – 546 с.

2. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами М.: Высшая школа, 1949. – 318 с.

3. Справочник по автоматизированному электроприводу/Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского.– М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

4. Г. П. Хализев. Электропривод и основы управления; М., “Высшая школа”; 1968. – 336 с.

5. Щукин А. И. Автоматическое управление электроприводами М.; Энергия, 1964, – 488 с.

6. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

7. Исследование процессов автоматизированного пуска и торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Методические указания по проведению лабораторной работы. Уфимский институт автоматики и электромеханики. 1999 г. 32 с.

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

6.1. Цель работы

Исследование статических характеристик и способов регулирования скорости асинхронного электропривода при частотном управлении в системе электрооборудования промышленности.

6.2. Оборудование стенда (перечень аппаратуры)

Лабораторный стенд представляет собой частотно-регулируемый асинхронный электропривод с нагрузочным комплектным электроприводом постоянного тока, системы преобразователь частоты–асинхронный двигатель (ПЧ-АД). Функциональная схема лабораторной установки приведена на рис. 6.1 [3, 4].

В состав лабораторной установки входит:

- преобразователь частоты модели EI – 9001 «ВЕСПЕР»;
- электромеханический агрегат, состоящий из жёстко соединённых асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором серии 6А80В6У3 (или серии АОЛ2-11-4У3) и высокомоментного двигателя постоянного тока (ДПТ) типа 1ПИ12.11 с возбуждением от постоянных магнитов и встроенным тахогенератором ТГ;
- тиристорный электропривод типа «КЕМЕК» для создания нагрузочного момента.

Асинхронный двигатель с помощью кабеля подключён к частотному преобразователю модели EI – 9001 «ВЕСПЕР». Управление нагрузочным ДПТ осуществляется от тиристорного преобразователя (ТП) «КЕМЕК».

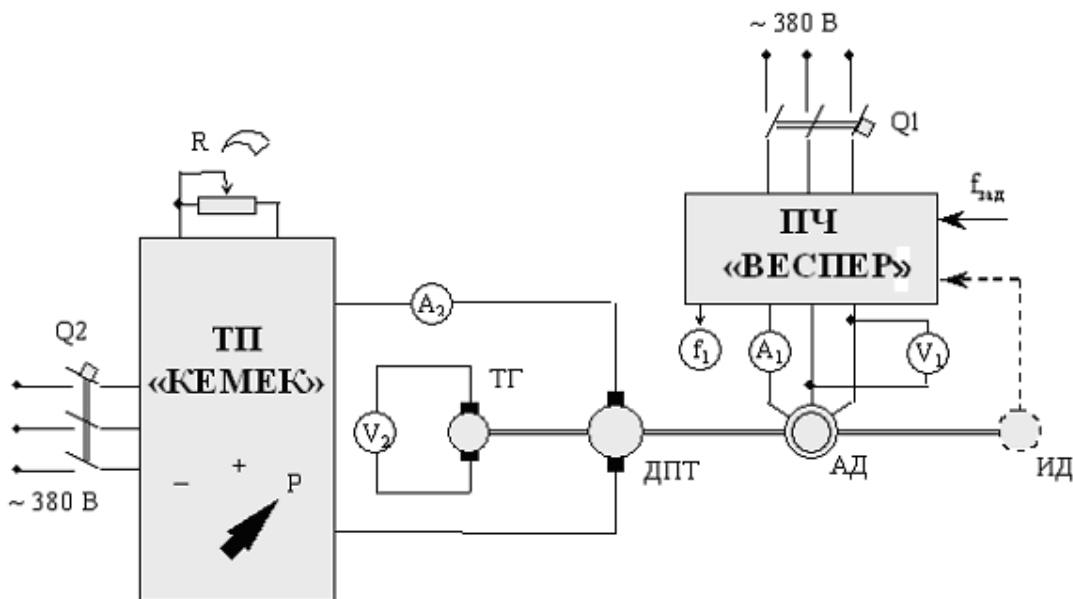


Рис. 6.1. Функциональная схема лабораторной установки

Технические данные исследуемого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

Тип двигателя 6А80В6УЗ

$P_H = 0,55$ кВт;

$U_H = 380$ В;

$I_H = 1,7$ А;

$n_H = 920$ об/мин;

$\eta_H = 70,5\%$;

$\cos\varphi = 0,7$;

$I_{II}/I_H = I_{II}^* = 7$;

$M_{II}/M_H = M_{II}^* = 1,8$;

$M_{max}/M_H = M_{max}^* = 2,2$;

$M_{min}/M_H = M_{min}^* = 1,6$.

Тип двигателя АОЛ2-11-4УЗ

$P_H = 0,6$ кВт;

$U_H = 380$ В;

$I_H = 1,7$ А;

$n_H = 1350$ об/мин;

$\eta_H = 72\%$;

$\cos\varphi = 0,76$;

$I_{II}/I_H = I_{II}^* = 7$;

$M_{II}/M_H = M_{II}^* = 1,8$;

$M_{max}/M_H = M_{max}^* = 2,2$;

$M_{min}/M_H = M_{min}^* = 1,5$.

Технические параметры нагрузочного двигателя постоянного тока типа 1ПИ1211 приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

P_H кВт	M_H Нм	I_H А	n_H об/мин	$R_{я}$ Ом	M_{max} Нм	U_H В	J кг·м ²
0,49	4,7	12	1000	0,61	33	60	0,0054

6.3. Общие сведения

Современный электропривод представляет собой конструктивное единство электромеханического преобразователя энергии (двигателя), силового преобразователя и устройства управления. Он обеспечивает

преобразование электрической энергии в механическую в соответствии с алгоритмом работы технологической установки. Современный этап развития привода характеризуется массовым переходом от нерегулируемого электропривода к регулируемому на основе достижений в области силовой и управляющей электроники. Большое разнообразие объектов, приводимых в движение электроприводом, широкий диапазон мощности и скорости вращения, трансформация совокупности требований к электроприводу в каждом конкретном применении приводит к соответствующему разнообразию структурных, конструктивных, схемотехнических решений, применяемых в различных электроприводах [1].

6.3.1. Статические характеристики и режимы работы системы ПЧ-АД

Известно, что в АД преобразование энергии происходит при несинхронном вращении ротора и магнитного поля статора. В двигательном режиме разница частот вращения ротора и поля статора в большинстве случаев мала, и составляет лишь несколько процентов [2].

Для исследования характеристик асинхронного двигателя запишем в комплексной форме систему уравнений, которыми описывается состояние обобщённой двухфазной модели АД:

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_1 &= \vec{I}_1 R_1 + j\vec{I}_1 X_1 + \vec{E}_1 \\ \vec{E}'_2 &= \vec{I}'_2 R'_{2\Sigma}/S + j\vec{I}'_2 X'_2 \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

где \vec{U}_1 – вектор напряжения фазы статора;

\vec{I}_1 – вектор тока статора;

R_1 – активное сопротивление фазы статора;

X_1 – индуктивное сопротивление фазы статора;

\vec{E}_1 – вектор ЭДС статора;

\vec{E}'_2 – вектор приведённой ЭДС ротора;

\vec{I}'_2 – вектор приведённого тока ротора;

$R'_{I\Sigma}$ – суммарное приведённое активное сопротивление фазы ротора;

S – абсолютное скольжение двигателя;

X'_2 – приведённое индуктивное сопротивление фазы ротора.

На основании системы уравнений (6.1) составлена схема замещения фазы АД и соответствующая векторная диаграмма (рис. 6.2 и рис. 6.3).

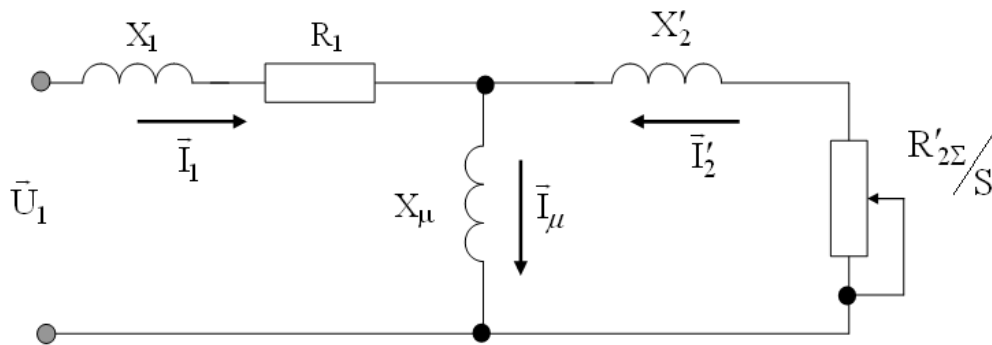


Рис. 6.2. Схема замещения фазы АД

Для получения выражений статических характеристик с помощью приведённой на рис. 6.3 схемы замещения определим вначале ток фазы ротора как функцию параметров двигателя:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + R'_{2\Sigma}/S\right)^2 + X_K^2}}, \quad (6.2)$$

где $X_K = X_1 + X'_2$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания фазы двигателя.

Активная электромагнитная мощность, передаваемая через воздушный зазор ротору двигателя, может быть записана в виде:

$$P_{12} = 3I_2'^2 R'_{2\Sigma}/S = \frac{3U_1^3 R'_{2\Sigma}/S}{\left(R_1 + R'_{2\Sigma}/S\right)^2 + X_K^2} \quad (6.3)$$

или же через электромагнитный момент и синхронную скорость вращения поля двигателя:

$$P_{12} = M \cdot \omega_0, \quad (6.4)$$

где M – электромагнитный момент двигателя;

ω_0 – угловая синхронная скорость вращения двигателя.

Приравниваем выражения (6.3) и (6.4) и, подставляя формулу (6.2) для тока, получаем уравнение механической характеристики двигателя в виде зависимости $M = f(S)$:

$$M = \frac{3U_1^2 R'_{2\Sigma}}{\omega_0 S \left[\left(R_1 + R'_{2\Sigma}/S\right)^2 + X_K^2 \right]}. \quad (6.5)$$

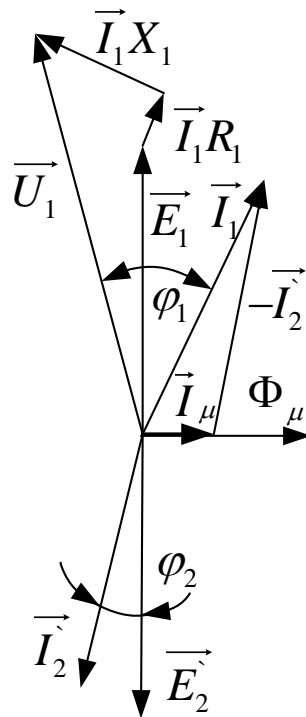


Рис. 6.3. Векторная диаграмма АД

Анализ данной функции показывает, что она имеет точки экстремума. Критическое скольжение, соответствующее экстремуму, может быть определено путём дифференцирования $M = f(S)$ по S и последующего приравнивания к нулю этой производной:

$$S_K = \pm \frac{R'_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}$$

где «+» – двигательный режим,
«-» – генераторный режим.

Подставив выражения критических скольжений для двигательного и генераторного режимов в уравнение (6.5) получаем соответственно критические моменты, развиваемые двигателем в двигательном и генераторном режимах:

$$M_K = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 S \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_K^2} \right]}$$

В соответствии с приведёнными формулами механическая характеристика асинхронного двигателя $M = f(S)$ имеет вид, показанный на рис. 6.4. Для правильного понимания особенностей статических режимов преобразования энергии в асинхронном двигателе нужно установить физические причины, определяющие характер зависимости

момента двигателя от скольжения. Зависимость, связывающая момент двигателя M , ток I_2' и результирующий магнитный поток Φ выглядит следующим образом:

$$M = k_M \cdot \Phi \cdot I_2' \cdot \cos\varphi_2$$

где φ_2 – угол между векторами ЭДС и током ротора.

Теоретически АД может работать в диапазоне изменения скольжения $S = -\infty \div +\infty$, но не при $S=0$, так как в этом случае $\omega = \omega_0$ и проводники ротора неподвижны относительно поля статора, ЭДС и токи в стержнях равны нулю и момент отсутствует. В зависимости от практически возможных скольжений различают несколько режимов работы АД: генераторный режим при $S < 0$, двигательный при $0 < S < 1$ и торможение противовключением при $S > 1$. В генераторном режиме ротор вращается в ту же сторону, что и поле статора, но с большей частотой. В двигательном – направления вращения поля статора и ротора совпадают, но ротор вращается медленнее статора. В тормозном режиме ротор вращается, но направление его вращения противоположно направлению вращения поля статора и машина создаёт тормозной момент.

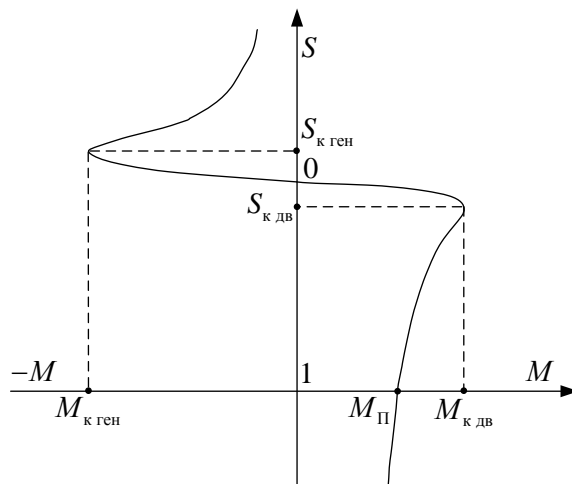


Рис. 6.4. Механическая характеристика асинхронного двигателя $M = f(S)$

6.3.2. Скалярное управление в системе ПЧ – АД

При частотном регулировании скорости АД самым простым является способ, основанный на изменении величины и частоты питающего напряжения [1].

На рис. 6.5 показаны искусственные характеристики АД при регулировании напряжения U_1 и неизменной частоте f_1 .

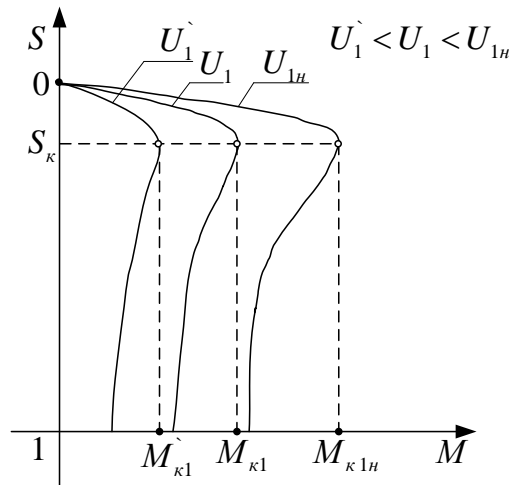


Рис. 6.5. Механические характеристики при $U_1 = \text{var}$ и $f_1 = \text{const}$

Критическое скольжение S_K остаётся неизменным, а критический момент M_K уменьшается пропорционально квадрату напряжения. К недостаткам данного способа следует отнести малый диапазон регулирования и малую жёсткость характеристик, особенно при работе на низких частотах.

Изменения частоты тока статора f_1 приводят к пропорциональному изменению синхронной скорости ω_0 , но одновременно при поддержании напряжения U_1 на постоянном уровне вызывают обратно пропорциональные изменения магнитного потока двигателя. В результате с увеличением частоты f_1 выше номинальной наблюдаем снижение критического момента и критического скольжения рис. 6.6.

Наиболее эффективные возможности управления АД обеспечиваются одновременным использованием в качестве управляющего воздействия в канале регулирования скорости – частоты f_1 , а в канале регулирования потока – напряжения U_1 .

В начале прошлого века академик Костенко М.П. предложил оригинальный способ регулирования скорости вращения АД. Для идеализированного двигателя (принимая $R_1=0$) справедлива следующая зависимость:

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \sqrt{\frac{M_C}{M_H}}$$

На основании сформулированного выражения можно регулировать скорость и момент, развиваемый АД.

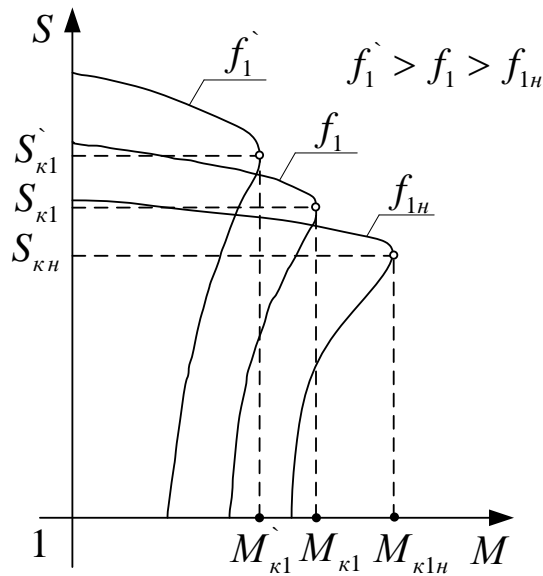


Рис. 6.6. Механические характеристики при $f_1 = \text{var}$ и $U_1 = \text{const}$

Широкое распространение получили способы частотного управления, основанные на законе поддержания постоянства соотношения между U_1 и f_1 . На рис. 6.7 представлены варианты интерпретаций различных законов управления:

а) $\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$; б) $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$; в) $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$.

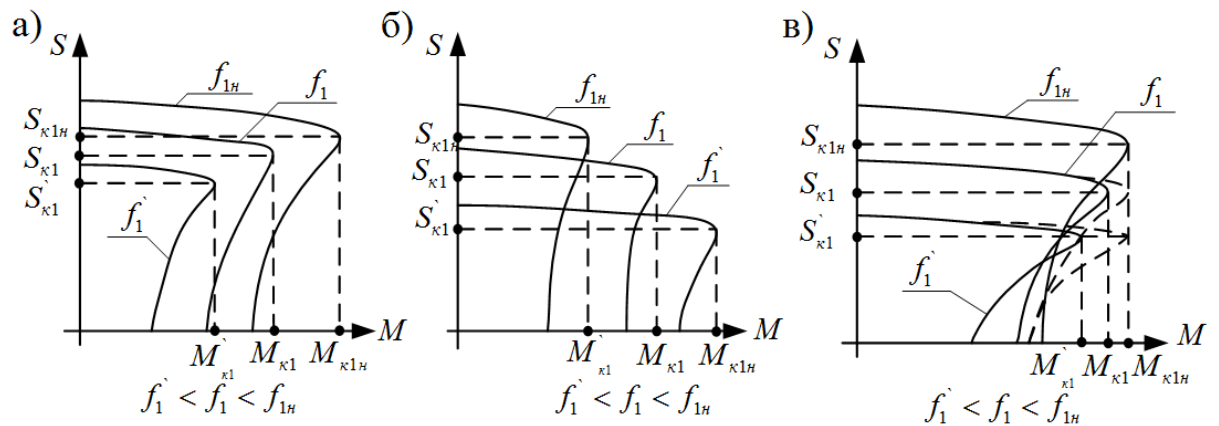


Рис. 6.7. Механические характеристики для различных законов частотного управления АД

При законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ можно получить семейство характеристик для механизмов, имеющих вентиляторную характеристику, когда момент, развиваемый АД увеличивается прямо пропорционально

квадрату частоты приложенного напряжения (рис. 6.7, а). При этом способе достигается получение больших моментов на высоких скоростях.

При использовании закона управления $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$ получаем семейство характеристик для механизмов, работающих с постоянной мощностью $P = \text{const}$. В данном случае критический момент АД обратно пропорционален частоте приложенного напряжения (рис. 6.7, б). Применение этого закона позволяет получить характеристики с высоким пусковым моментом.

При законе управления $U_1/f_1 = \text{const}$ теоретически предполагается получение семейства характеристик с постоянным моментом (рис. 6.7, в), пунктирные линии. В реальных условиях при малых частотах падение напряжения на активном сопротивлении статора R_1 приводит к нарушению оптимальности регулирования. Для обеспечения требуемой точности следует компенсировать падение напряжения на активном сопротивлении в статорной цепи.

На практике при создании скалярных систем частотного управления выполняют линейризацию зависимостей между частотой и напряжением. На рис. 6.8 представлена аппроксимация для трех законов управления на примере ПЧ модели EI 9001 «ВЕСПЕР»: а – $U_1/f_1^2 = \text{const}$, б – $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$, в – $U_1/f_1 = \text{const}$ соответственно.

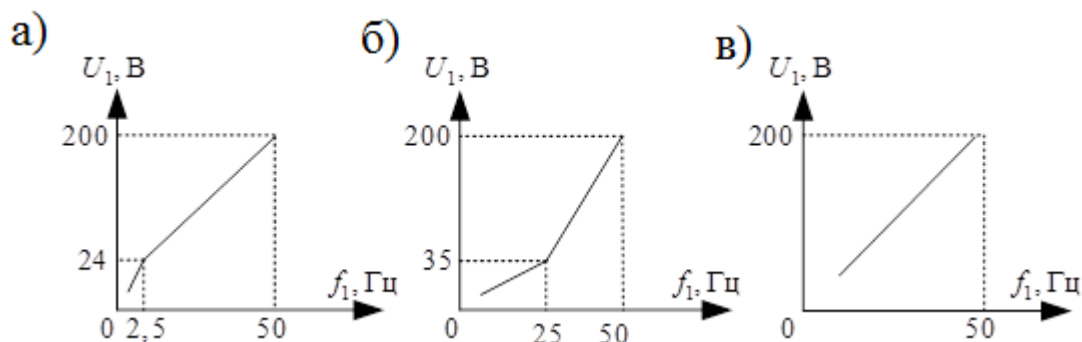


Рис. 6.8. Практическая реализация законов частотного управления скоростью для ПЧ модели EI9001 «ВЕСПЕР»

Упрощенная функциональная схема скалярной системы частотного регулирования скорости с промежуточным звеном постоянного тока приведена на рис. 6.9. Заданная частота поступает на вход устройства управления УУ, которое в соответствии с принятым законом регулирования скорости, током нагрузки и номинальным скольжением двигателя формирует частоту f_1 и амплитуду напряжения U_1 . Информация о частоте и амплитуде напряжения подаётся на ШИМ (широтно-импульсный модулятор) – преобразователь, генерирующий выходные

сигналы для инвертора (И). Сформированное таким образом переменное напряжение прикладывается к АД, который развивает требуемую угловую скорость. Дополнительную точность регулирования частоты вращения получают введением импульсного датчика скорости ИДС, устанавливаемого на валу двигателя, на рис. 6.9 (показано пунктиром). Контур обратной связи по скорости позволяет с высокой точностью поддерживать заданную скорость АД $\omega_{зад}$, компенсируя скольжение и влияние нагрузки на вал двигателя.

Электроприводы со скалярными системами частотного управления среди частотно-регулируемых электроприводов переменного тока отличаются относительной простотой и дешевизной. Но наряду с положительными качествами имеется ряд недостатков: низкие динамические показатели, отсутствие возможности точного регулирования момента на валу АД.

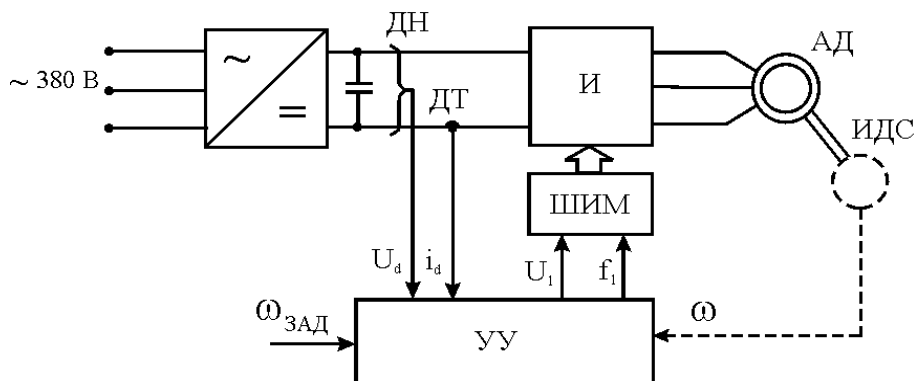


Рис. 6.9. Упрощенная функциональная схема скалярной системы частотного управления АД

6.3.3. Векторное управление в системе ПЧ – АД

Термин *векторное управление* означает, что переменные контролируются не только по амплитуде, но и по фазе. В асинхронных приводах из-за недоступности прямого измерения переменных в короткозамкнутом роторе (тока, потокосцепления) приходится пользоваться математическими моделями двигателя для оценки этих переменных. Модель двигателя сложна из-за перекрёстных связей между переменными и существенных нелинейностей. Применяя специальный метод управления, получивший название управления с ориентацией по полю (потокосцепление ротора), можно обойти эти проблемы и упростить сложную систему дифференциальных уравнений высокого порядка [1].

Суть метода состоит в раздельном управлении компонентами вектора тока статора i_{sq} и i_{sd} , являющимися проекциями результирующего вектора i_1 на вращающиеся оси q и d , связанные с потокоцеплением ротора Ψ_r . Известно, что электромагнитный момент АД пропорционален потокоцеплению ротора Ψ_r и составляющей тока статора по оси q . Если поддерживать неизменным потокоцепление ротора путём регулирования составляющей тока статора по оси d , то момент двигателя будет прямо пропорционален току i_{sq} , так, как и в обычных коллекторных двигателях постоянного тока.

Упрощенная функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением приведена на рис.6.10.

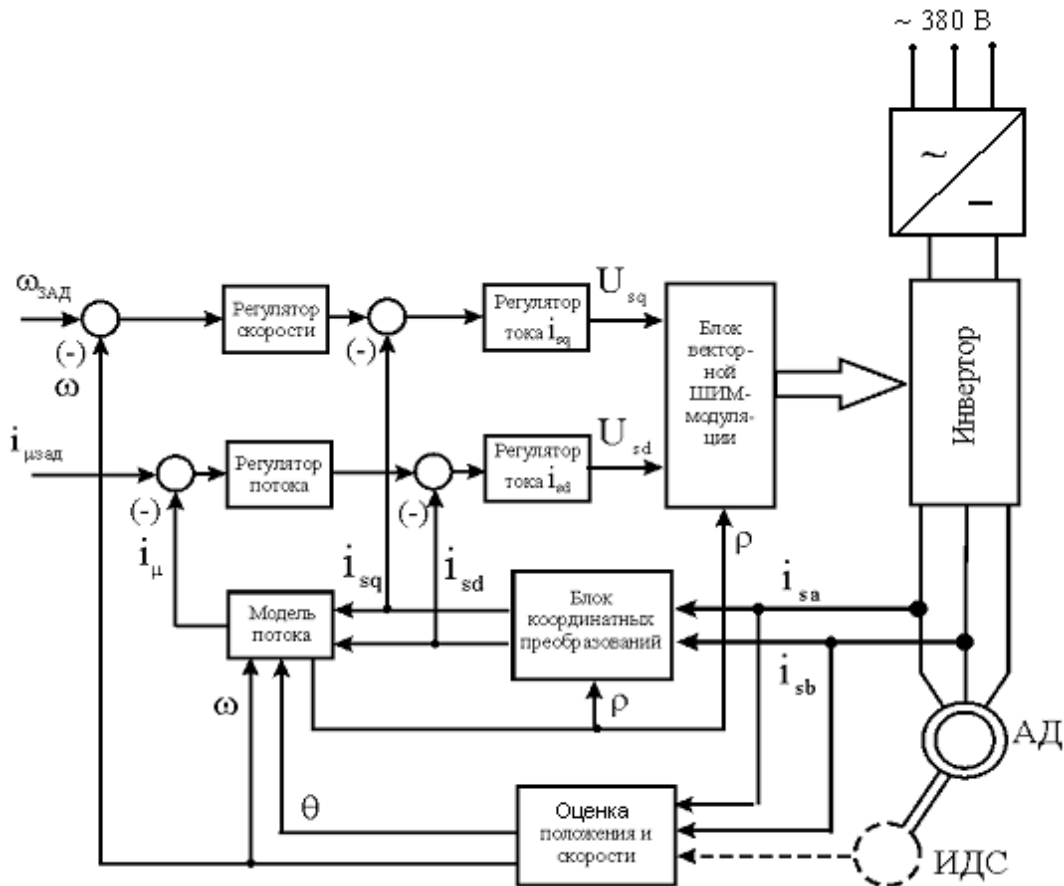


Рис. 6.10. Функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением

Привода с векторным управлением обеспечивают:

- полное управление моментом двигателя во всём диапазоне скоростей;
- лучшее качество регулирования момента и скорости;

- более высокую энергетическую эффективность двигателя и инвертора;
- раздельное управление потоком и моментом;
- значительную кратковременную перегрузку по моменту;
- работу привода во всех четырёх квадрантах.

6.3.4. Области применения частотного электропривода

Асинхронные двигатели наиболее часто применяются в промышленности и на транспорте из-за своей простоты и надёжности. Однако эффективное управление ими представляет собой довольно сложную задачу и требует создания специальных систем управления.

Для большинства общепромышленных приводов (насосы, вентиляторы, конвейеры, компрессоры и т.д.) требуется относительно небольшой диапазон регулирования скорости (до 1:10, 1:20) и относительно низкое быстродействие. При этом целесообразно использовать классические структуры скалярного управления. Переход к широкодиапазонным (до 1:10000), быстродействующим электроприводам станков, роботов и транспортных средств, требует применения более сложных структур векторного управления.

Наиболее перспективными и быстро развивающимися являются частотные электроприводы, применяемые в машиностроении, коммунальном хозяйстве, металлообработки, целлюлозно – бумажной промышленности и в металлургии.

6.3.4.1. Виды реализации изучаемой системы в подъемно-крановом оборудовании

В отличие от большинства электроприводов производственных механизмов крановый электропривод, как правило, не имеет наперед заданного производственного цикла. Режим его работы зависит от множества факторов, а нагрузка и её знак варьируются в весьма широких пределах. Поэтому крановое оборудование должно удовлетворять следующим особым условиям эксплуатации: изменению нагрузки в широких пределах значений и направления действия; большому диапазону регулирования скорости при различных значениях и направлениях нагрузки; высокой частоте включений; постоянному чередованию нагрузки; постоянному изменению периодов работы и пауз; значительному внешнему механическому воздействию на электрооборудование, находящемуся на движущихся частях кранов;

высокой вероятности больших перегрузок; повышенному требованию к надежности устройств отключения и торможения электропривода [5].

В крановых установках используются системы с тиристорными преобразователями частоты, что позволяет при применении АД с короткозамкнутым ротором получить большой диапазон регулирования и добиться высоких динамических показателей электропривода. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью относительно просты по электрической схеме и конструктивному исполнению, но могут быть использованы для формирования регулируемой частоты переменного тока в интервале 5...20 Гц при питании от сети промышленной частоты. В связи с этой особенностью преобразователя частоты с непосредственной связью (ПЧН) используются в трех вариантах: для системы с диапазоном регулирования выше 4:1 (механизмов горизонтального передвижения кранов) путем непосредственного питания через преобразователи короткозамкнутых АД.

Применение системы ПЧ-АД является единственным возможным вариантом для крановых механизмов, работающих в условиях, где невозможен доступ для обслуживания (агрессивные и радиоактивные среды). Недостатками системы являются: относительно высокая стоимость, сложная первоначальная наладка и квалифицированное обслуживание, а так же передача в сеть помех.

6.3.4.2. Варианты реализации частотного электропривода в жилищно-коммунальном хозяйстве

Схема применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода на водонапорных станциях приведена на рис. 6.11 [6].



Рис. 6.11. Схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода на водонапорных станциях

Основными потребителями электроэнергии в нашей стране являются производственные предприятия и объекты ЖКХ. Большая часть электроэнергии потребляется электроприводами насосов и вентиляторов.

Стоимость электроэнергии в общей сумме эксплуатационных расходов на водопроводно – канализационных предприятиях в случае использования поверхностных вод составляет 40...50%. При использовании подземных вод этот показатель увеличивается до 70...80%. Как показывает статистика, в процессе перекачки чистых и сточных вод нерационально расходуется 5...15% энергии. В отдельных случаях этот показатель возрастает до 20...50%. Насосным агрегатом называется насос с электроприводом и передаточным механизмом (муфтой, редуктором, шкивом). В совокупности с оборудованием, обеспечивающим его работу в требуемом режиме, он образует насосную установку. Сооружения, в состав которого входят одна или несколько насосных установок и вспомогательные системы, обеспечивающие работоспособность объекта в целом, называется насосной станцией.

Преобразователь частоты устанавливается между питающей сетью и электродвигателем, для обеспечения обратной связи. В напорный коллектор на выходе насосного агрегата устанавливается датчик давления. Плавное регулирование частоты и высокая точность поддержания давления в сетях водоснабжения позволяет: экономить электроэнергию (30...60%) и количество перекачиваемой воды, исключить гидроудары (существенно увеличивается срок службы трубопроводов и запорной арматуры), осуществить пуск агрегатов на номинальных токах (увеличивает срок службы электродвигателей и коммутационной аппаратуры), работать в автоматическом режиме по часам реального времени по запрограммированному графику.

К недостаткам частотного регулирования можно отнести необходимость поддержания в зимний период температуры не ниже - 5°C, а также необходимость защиты частотных преобразователей от прямого попадания влаги (по условиям эксплуатации влажность составляет до 98% без конденсата).

Применение частотно-регулируемого электропривода для канализационной насосной станции (рис. 6.12).

Канализационные насосные станции (КНС) систем водоотведения – это комплекс сооружений и оборудования, обеспечивающий отведение сточных вод в соответствии с нуждами потребления. КНС осуществляет подачу сточных вод на очистные сооружения, если рельеф местности не позволяет отводить эти воды самотеком. Строительство канализационных насосных станций позволяет также избежать большого заглубления самотечных коллекторов.



Рис. 6.12. Применение частотно-регулируемого электропривода для канализационной насосной станции

Применение частотно-регулируемого асинхронного ЭП с обратной связью по датчику уровня позволяет экономить электроэнергию (за счет стабилизации максимально допустимого уровня в приёмном резервуаре при больших потоках), устранить гидроудары в трубопроводах, уменьшить число коммутационных переключений в силовых цепях и цепях управления насосными агрегатами.

Применение частотно-регулируемого электропривода в котельных (рис. 6.13).

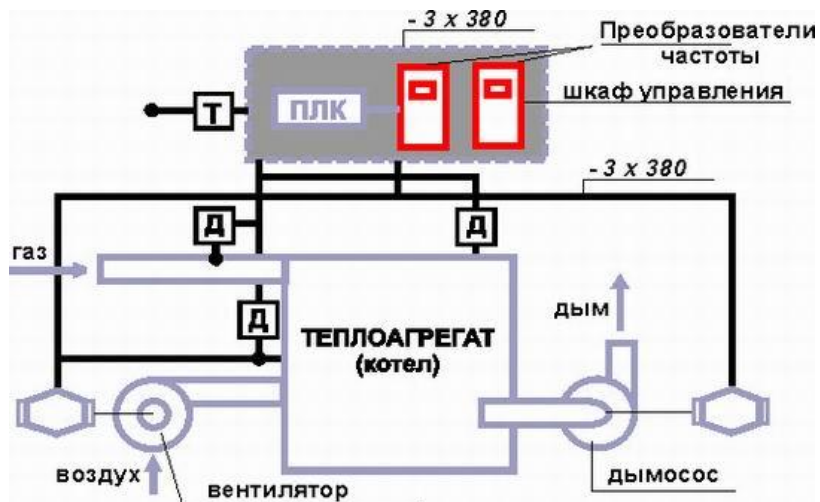


Рис. 6.13. Схема частотно-регулируемого электропривода в котельных

Котельные, как объекты коммунального хозяйства, рассчитываются таким образом, что позволяют обеспечить потребителей теплом в самое холодное время года. Однако, большую часть времени требуется нагрузка значительно меньше максимальной. Как правило, 95% времени котельные работают с избыточной производительностью. Согласование избыточной производительности и низкого потребления происходит за счет

отключения отдельных (параллельно работающих) котлов, а точная настройка — снижением производительности оставшихся в работе путем простого уменьшения потоков подаваемого воздуха, топлива и горячей воды задвижками (дресселирование). Тем не менее, технология дроссельного регулирования имеет ряд существенных недостатков: перерасход электроэнергии; повышенный износ технологического оборудования; необходимость постоянного контроля дежурным персоналом. Современные частотно-регулируемые электроприводы (ЧРЭП) и основанные на них системы автоматического управления механизмами котельных установок помогают устранить вышеперечисленные недостатки. Применение ЧРЭП эффективно для управления: мощными тягодутьевыми механизмами (вентиляторы, дымососы); мощными насосами (сетевые, подпиточные, рециркуляционные, мазутные и др.). Экономия денежных средств при применении частотно-регулируемого электропривода складывается из следующих составляющих: экономия потребления электроэнергии; использование вместо двухскоростного электродвигателя более дешевого односкоростного асинхронного электродвигателя; увеличение межремонтного периода работы электродвигателя и как следствие сокращение эксплуатационных затрат; поддержание оптимального соотношения «газ-воздух», при котором происходит наиболее полное использование потенциальной энергии сгорания газа при минимальных выбросах продуктов сгорания, что в конечном итоге приводит к экономии топливного газа.

Использование частотно-регулируемых приводов позволяет: решать задачу согласования режимных параметров и энергопотребления тягодутьевых механизмов котлов с изменяющимся характером нагрузки котлов, эффективно автоматизировать технологический процесс, экономить до 70% электроэнергии, идущей на приведение в действие дымососа и вентилятора, обеспечивать экономию топлива за счет оптимальной совместной работы вентилятора и дымососа. Плавный пуск электроприводов и полная защита электродвигателя позволяет увеличить межремонтный период, снизить аварийность оборудования.

6.3.4.3. Виды реализации изучаемой системы в деревообрабатывающей промышленности

Схема частотно-регулируемого электропривода в круглопильных станках приведена на рис. 6.14.

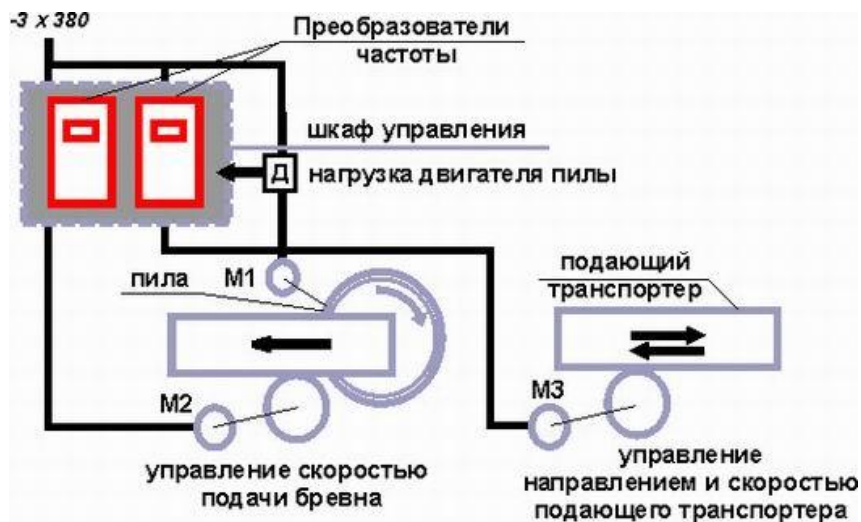


Рис. 6.14. Применение частотно-регулируемого привода в круглопильных станках

Круглопильный станок, предназначается для продольной, поперечной и смешанной распиловки и раскроя древесины и древесных материалов; режущий инструмент круглопильного станка — круглая пила. Основные элементы: пильный вал, станина, механизм подачи, приводы пильного вала и механизма подачи. Круглопильные станки бывают одно-, двух- и многопильные с ручной или автоматической подачей. Частота вращения круглых пил колеблется от 500 до 3000 об/мин, подача от 5 до 120 м/мин.

Частотный электропривод при использовании в механизмах с трудным пуском, например, в деревоперерабатывающей промышленности обеспечивает автоматическое регулирование скорости подачи распиливаемого бревна в зависимости от его толщины и твердости, синхронизацию скорости подачи следующего бревна, сокращение поломок и износа инструмента и электродвигателя, экономию электроэнергии.

6.3.4.4. Варианты реализации изучаемой системы частотного электропривода в общепромышленных установках

Схема частотно-регулируемого привода в компрессорных установках приведена на рис. 6.15.

Работа поршневого компрессора существенно отличается от работы механизмов с вентиляторной характеристикой, так как момент сопротивления на его валу можно считать постоянным. Однако производительность компрессора Q м³/мин зависит от числа оборотов его вала. При регулировании производительности компрессора изменением числа оборотов вала меняется и мощность, потребляемая из сети электродвигателем, приводящим компрессор в движение. На

промышленных предприятиях достаточно часто требуется регулировать производительность компрессорных установок за счёт регулирования скорости вращения электродвигателя. Из-за неравномерности потребления сжатого воздуха при работе компрессора иногда приходится открывать спускной клапан в ресивере компрессора. Применение частотно-регулируемого привода позволяет экономить электроэнергию, поддерживая оптимальное давление при минимальном расходе сжатого воздуха в системах пневматики.

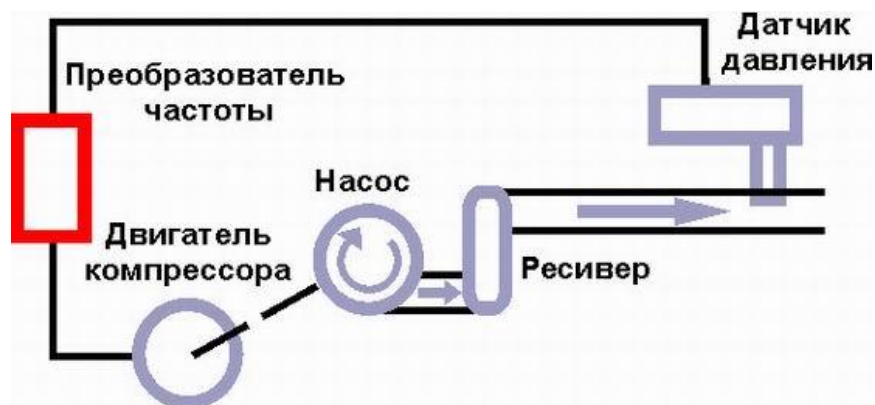


Рис. 6.15. Схема частотно-регулируемого привода в компрессорных установках

При использовании преобразователей частоты для управления винтовыми компрессорами можно получить экономию электроэнергии, сравнимую с экономией при управлении центробежными насосами (до 60%), снижение износа коммутационной аппаратуры (в связи с отсутствием больших пусковых токов), снижение утечки сжатого воздуха (за счет оптимизации давления в пневмосети), увеличение срока службы электродвигателя (из-за снижения его нагрузки и отсутствия тяжёлых пусковых режимов).

Применение частотно-регулируемого привода в системах вентиляции и кондиционирования воздуха (рис. 6.16).

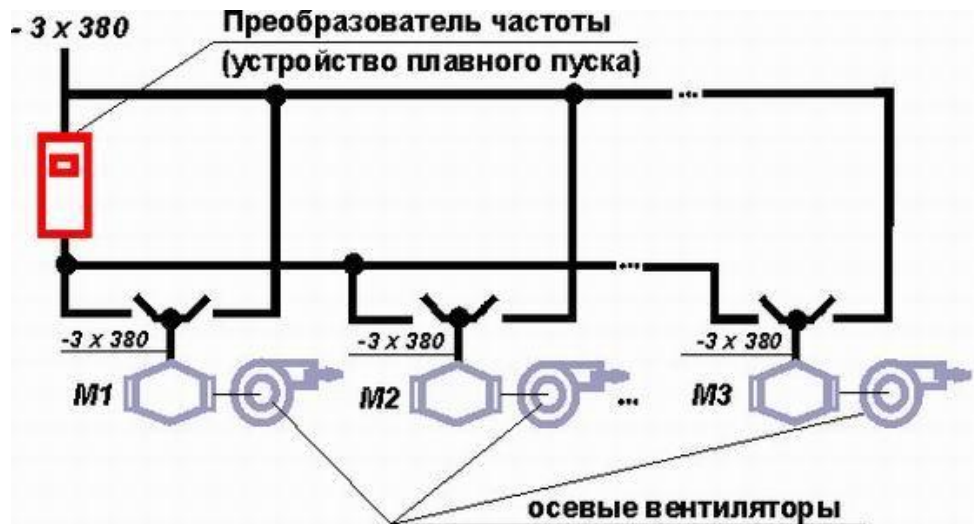


Рис. 6.16. Применение частотно-регулируемого привода в системах вентиляции и кондиционирования воздуха


Мощные вентиляторы используются как тягодутьевые механизмы в котлах, как механизмы вентиляции, как механизмы охлаждения мощных приводных двигателей и т.п. В момент прямого пуска вентилятора на его валу возникает большой динамический момент, что приводит к значительным механическим перегрузкам вала. Поэтому вентиляторные установки работают постоянно с минимальным количеством пусков и остановов, а регулирование производительности осуществляется заслонками на стороне нагнетания. При этом КПД вентиляторной установки снижается пропорционально регулированию производительности. Все вышесказанное приводит к существенному энергопотреблению. Применение частотно-регулируемого электропривода позволяет плавно с требуемой динамикой разгона запускать вентилятор. А работа электропривода в замкнутой системе управления по сигналам обратной связи (датчик температуры, газоанализатор и т.п.) делает возможным регулирование частоты вращения вентилятора (регулирование его производительности) по необходимости. Такая оптимизация приводит к снижению энергопотребления, увеличению межремонтных циклов технологического оборудования, уменьшению количества дежурного персонала.

6.4. Описание функциональной схемы стенда

Функциональная схема исследуемой системы приведена на рис. 6.1.

Питающее напряжение (трехфазная сеть 380В, 50 Гц) подаётся к ПЧ через автоматический выключатель Q1, а к ТП «Кемек» – с помощью автоматического выключателя Q2. Для регистрации тока, напряжения и

частоты используются: амперметр A_1 , вольтметр V_1 и частотомер f_1 функционально входящие в состав ПЧ «ВЕСПЕР». Задание на частоту вращения АД вводится в ПЧ в виде $f_{зад}$ с помощью соответствующих кнопок.

Потенциометром R , на лицевой панели тиристорного преобразователя, обозначенного символом , регулируется момент нагрузочной машины.

Ток нагрузочной машины фиксируется амперметром A_2 (I_2 – ток якоря ДПТ).

В качестве этого прибора задействован вольтметр, подключённый через шунт. Его градуировка выполнена таким образом, что $1В=1А$. Прибор расположен на лицевой панели ТП. Вольтметр V_2 подключается к специальным выводам « \perp » и « ω », расположенным на той же панели электропривода. Данный прибор позволяет измерить угловую скорость из расчёта $10 В = 2000$ об/мин.

Для проведения эксперимента дополнительно может использоваться комплект контрольно-измерительной аппаратуры, включающий универсальный цифровой вольтметр В7 – 16.

6.4.1. Устройство ПЧ модели Е1 – 9001 «ВЕСПЕР»

Частотный преобразователь позволяет реализовать скалярный и векторный способы управления АД. Силовой канал ПЧ собран по схеме с промежуточным звеном постоянного тока и трёхфазным инвертором. Выпрямленное напряжение поступает на инвертор, управляемый микропроцессорной системой регулирования, и далее к АД. Настройка и регулировка преобразователя производится в соответствии с номинальными параметрами АД и требованиями реализуемого технологического процесса. Изменение параметров и уставок ПЧ выполняется путём ввода и редактирования соответствующих констант, «защитных» в память микропроцессорной системы. Настройки преобразователя сохраняются после выключения питающего напряжения. Более подробные сведения о преобразователе частоты можно найти в [3, 4].

Для изменения и редактирования констант ПЧ служит специализированная панель управления, расположенная на верхней крышке преобразователя (рис. 6.17). На панели имеется жидкокристаллический дисплей (далее просто дисплей) и набор клавиш.

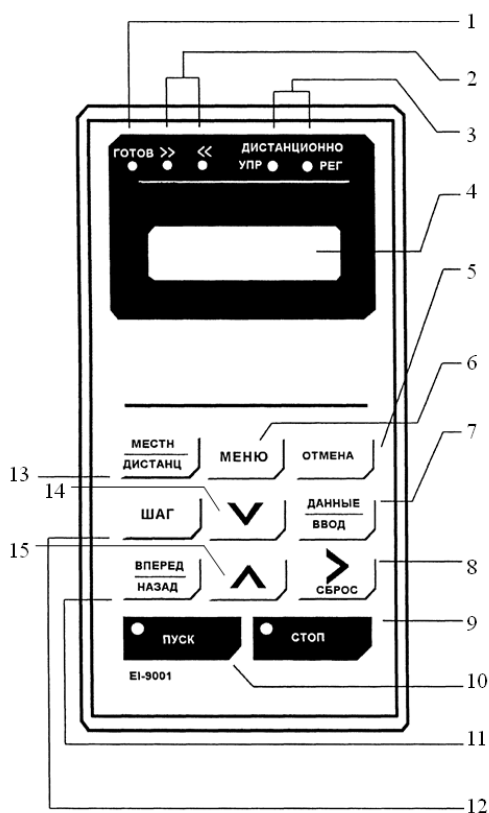


Рис.6.17. Внешний вид панели управления ПЧ «ВЕСПЕР»

Состав панели управления.

1. Световой индикатор «ГОТОВ» информирует о готовности к режиму вращения, горит только при выборе режима вращения, не горит в любом другом режиме.

2. Световой индикатор направления вращения:

- «>>» горит при вращении вперед;
- «<<» горит при обратном вращении.

3. Световой индикатор:

- «УПР» выбора задания на скорость вращения;
- «РЕГ» горит при выборе дистанционного метода управления опорной частотой от внешних клемм цепи управления.

4. Дисплей. Высвечивает устанавливаемые величины для каждой из функций или контролируемой величины частоты, тока, напряжения на выходе ПЧ и т. д.

5. Кнопка «ОТМЕНА» возвращает к состоянию, предшествующему нажатию кнопки ввода « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ ».

6. Кнопка «МЕНЮ» обеспечивает переход на самый верхний уровень списка констант.

7. Кнопка « $\frac{\text{ДААННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ » выбирает режим, группу, функцию или название константы. Показывает каждое текущее значение константы во время высвечивания её названия. При повторном нажатии выбранная величина записывается в память.

8. Кнопка выбора разряда « \blacktriangleright / СБРОС». Выбираемая цифра мигает. Возможен повторный набор при ошибке ввода. Данная кнопка используется также для сброса системы после срабатывания защиты в случае появления какой-либо неисправности (перегрев, перегрузка двигателя, перегрузка ПЧ и т.д.).

9. 10. Кнопки команд управления (используются только для пуска двигателя и его остановки):

- ПУСК. Горит красный световой индикатор при нажатии ПУСК.
- СТОП. Горит красный световой индикатор при нажатии СТОП.

11. Кнопка « $\frac{\text{ВПЕРЕД}}{\text{НАЗАД}}$ » позволяет выбрать требуемое направление вращения: вперед или назад.

12. При нажатии кнопки «ШАГ» возможен шаговый режим вращения.

13. Кнопка « $\frac{\text{МЕСТН}}{\text{ДИСТАНЦ}}$ » выбора режима работы: «местный» – позволяет вводить задание для опорной частоты с панели управления ПЧ, пользуясь клавиатурой и дисплеем; «дистанционный» – позволяет управлять заданием для опорной частоты от внешнего источника сигналов через дополнительные клеммы.

14. Кнопки поиска « \blacktriangle » и « \blacktriangledown » дают возможность выбрать нужный пункт в меню, режим, группу, функцию, константу или величину устанавливаемого значения.

6.5. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования электропривода:

- проверить работоспособность стенда;
- снять электромеханические $\omega=f(I_1)$ и механические характеристики $\omega=f(M_1)$ исследуемой замкнутой и разомкнутой системы при различных законах регулирования скорости АД;
- определить момент потерь ΔM агрегата (АД+ДПТ).

6.6. Проверка работоспособности стенда

6.6.1. Выбор структуры управления

Для установки требуемой структуры управления (скалярное в разомкнутой системе, скалярное в замкнутой системе, векторное в разомкнутой системе, векторное) необходимо нажать кнопку «МЕНЮ» на панели ПЧ, при этом показания дисплея изменятся на:



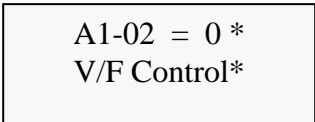
```
** Main Menu **
Operation*
```

Это соответствует переходу на самый верхний уровень списка констант ПЧ. Далее необходимо в главном меню «Main Menu» с помощью навигационных кнопок « \wedge » и « \vee » выбрать пункт «Initialize» и нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ »:



```
Select Language
Reserve
```

После входа в меню «Initialize» с помощью навигационных кнопок « \wedge » и « \vee » выбрать пункт «Control Method» и нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ »:



```
A1-02 = 0 *
V/F Control*
```

Пользуясь табл. 6.2 и навигационными кнопками, выбрать нужное значение для константы A1 – 02, т.е. требуемую структуру системы управления ПЧ.

После выбора требуемого значения константы A1 – 02 следует нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ », подтвердив ввод новой величины. При этом на экране дисплея на несколько секунд появляется надпись следующего содержания:

Таблица 6.2

Значение константы A1 – 02	Структура системы управления ПЧ «ВЕСПЕР»	Индикация на дисплее
0	Скалярное управление в разомкнутой системе	A1-02 = 0 V/F Control
1	Скалярное управление в системе с обратной связью	A1-02 = 1 V/F w/PG Fdbk
2	Векторное управление в разомкнутой системе	A1-02 = 2 Open Loop Vector
3	Векторное управление	A1-02 = 3 Flux Vector

Entry Accepted

После этого на дисплее появляется выбранная структура управления ПЧ.

Далее следует нажать кнопку «МЕНЮ» на панели ПЧ и вернуться в главное меню «Main Menu»:

Main Menu
Operation*

Если рассматривается работа скалярной системы, то дополнительно необходимо выбрать закон управления соотношением U_1/f_1 .

Для этого в главном меню «Main Menu» с помощью навигационных кнопок « \wedge » и « \vee » выбрать пункт «Programming» и нажать кнопку «ДААННЫЕ»:
«ВВОД»:

Group b
Application

После входа в меню «Programming» с помощью навигационных кнопок управления « \wedge » и « \vee » выбрать пункт «Group E» и нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ »:

Function E1
V/F Pattern

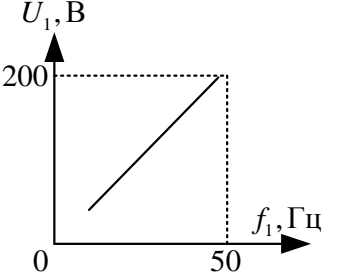
Среди констант списка «Function E1» кнопками управления выбираем «V/F Selection» и нажимаем кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ »:

E1-03 = 0*
50 HZ*

Пользуясь табл. 6.3 и навигационными кнопками, выбрать нужное значение для константы E1 – 03, т.е. требуемый закон регулирования соотношением U_1 и f_1 скалярной системы управления ПЧ.

Таблица 6.3

Значение константы E1 – 03	Закон управления соотношением U_1 и f_1	Линейная аппроксимация соотношения	Индикация на дисплее
4	$U_1 / f_1^2 = \text{const}$		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">E1-03 = 4 50 HZ VT 1</div>
9	$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const}$		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">E1-03 = 9 50 HZ HST 2</div>

0	$U_1/f_1 = \text{const}$		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> E1-03 = 0 50 HZ </div>
---	--------------------------	--	---

После выбора требуемого значения константы E1 – 03 следует нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ », подтвердив ввод новой величины. При этом на экране дисплея на несколько секунд появляется надпись следующего содержания:

Entry Accepted

После этого на экране дисплея появляется обозначение выбранного метода управления соотношением U_1 и f_1 .

Далее следует нажать кнопку «МЕНЮ» на панели управления ПЧ и вернуться к главному меню «Main Menu»:

Main menu
Operation*

Для более детального изучения возможностей настройки ПЧ следует обратиться к [3, 4].

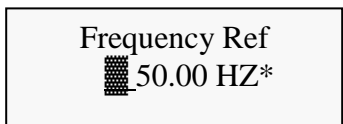
6.6.2. Пуск АД

Для запуска АД необходимо в главном меню «Main Menu» с помощью навигационных кнопок « \wedge » и « \vee » выбрать пункт «Operation» и нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ »:

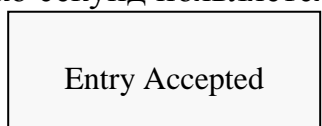
Frequency Ref
U1-01 = 50.00 HZ*

Сразу же после этого должен загореться светодиод «ГОТОВ», свидетельствующий о готовности привода к работе. После входа в меню

«Operation» с помощью навигационных кнопок « \wedge » и « \vee » выбрать пункт «Frequency Ref» и нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ » :



Пользуясь навигационными кнопками « \wedge », « \triangleright » и « \vee », задать нужное значение угловой частоты в Герцах. После этого следует нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ », подтвердив ввод новой величины. При этом на экране дисплея на несколько секунд появляется надпись:



Далее на экране появляется текущее значение заданной частоты вращения. Привод готов к пуску.

Для запуска необходимо нажать кнопку «ПУСК». АД начнёт вращаться с заданной частотой.

В случае возникновения аварийной ситуации привод нужно немедленно остановить нажатием кнопки «СТОП».

6.6.3. Изменение частоты вращения АД

Задание частоты вращения можно менять, не останавливая АД. Для этого, при работающем приводе, находясь в меню «Operation», с помощью навигационных кнопок « \wedge » и « \vee » необходимо выбрать пункт «Frequency Ref» и нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ ». Пользуясь

навигационными кнопками « \wedge », « \triangleright » и « \vee », задать нужную величину частоты. После установки требуемой частоты следует нажать кнопку « $\frac{\text{ДАННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ », подтвердив ввод новой величины. По окончании данной процедуры привод переходит на работу с другой скоростью.

6.6.4. Регистрация параметров АД

Для наблюдения за показаниями приборов (рис. 6.17), функционально входящих в состав ПЧ «ВЕСПЕР» (амперметр A_1 для измерения тока

статора I_1 , вольтметр V_1 для определения напряжения U_1 на статоре АД, частотомер f_1 , необходимый для измерения выходной частоты f_1 АД), находясь в меню «Operation» (осуществляется кнопкой « $\frac{\text{ДААННЫЕ}}{\text{ВВОД}}$ »), с

помощью навигационных кнопок « \wedge » и « \vee » выбрать соответствующие пункты. В табл. 6.4 приведён список пунктов, расположенных в меню «Operation». Доступ и переключение между ними можно производить при работающем приводе.

Таблица 6.4

Название переменной	Индикация на дисплее
Значение заданной частоты вращения $f_{\text{зад}}$	Frequency Ref U1-01 = 50 HZ*
Значение частоты выходного напряжения ПЧ «ВЕСПЕР» f_1	Output Freq U1-02 = 50.00HZ*
Ток статора I_1	Output Current U1-03 = 0.58A*
Напряжение питания АД, U_1	Output Voltage U1-06 = 160 *

6.6.5. Функционирование защиты ПЧ в аварийных режимах работы

При срабатывании защиты ПЧ появляется надпись, характеризующая тип неисправности. Полный список возможных неисправностей представлен в [3, 4].

OL1*
Motor Overloaded*

Для продолжения работы необходимо нажать кнопку « \triangleright / СБРОС» или отключить преобразователь частоты от сети с помощью автоматического выключателя Q1. После повторного включения ПЧ вновь готов к работе.

6.7. Определение электромагнитного момента M_1 АД

Момент на валу асинхронного двигателя можно определить экспериментальным методом по известной зависимости:

$$M_{ад} = M_1 = M_{нм} \pm \Delta M,$$

где $M_{нм}$ – электромагнитный момент нагрузочной машины (двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов);

ΔM – момент потерь электромеханического агрегата «АД + ДПТ»:

(+) – двигательный режим асинхронного двигателя;

(-) – тормозной режим асинхронного двигателя.

Электромагнитный момент ДПТ:

$$M_{нм} = C \cdot I_{я}, \quad (6.6)$$

где $C = (U_n - I_n R_{я}) / \omega_n$ – коэффициент связи;

$I_{я}$ – ток якоря нагрузочной машины;

U_n – номинальное напряжение нагрузочной машины;

I_n – номинальный ток нагрузочной машины;

$R_{я}$ – сопротивление обмотки якоря;

ω_n – номинальная угловая скорость нагрузочной машины.

Подобным образом рассчитывается момент потерь электромеханического агрегата «АД + ДПТ»:

$$\Delta M = C \cdot I_{яxx}, \quad (6.7)$$

где $I_{яxx}$ – ток якоря ДПТ, при вращении вала обесточенного АД.

6.8. Снятие статических характеристик ПЧ-АД в разомкнутой и замкнутых системах

Электромеханические $\omega = f(I_1)$ и механические $\omega = f(M_1)$ характеристики системы снимать для заданной структуры управления.

Для этого необходимо:

- проверить кабель соединения ПЧ с АД;
- подать питание на ПЧ с помощью автоматического выключателя

Q1;

(ВНИМАНИЕ! Подключать ПЧ к сети разрешается только в присутствии преподавателя).

• произвести, по заданию преподавателя, выбор требуемой структуры управления по п. 6.6.1 (скалярное в разомкнутой системе, скалярное в замкнутой системе, векторное в разомкнутой системе, векторное);

- установить с помощью переключателя режимов нагрузки реактивный тип нагрузки, повернув переключатель, расположенный на панели ТП в положение «Р»;
- повернуть потенциометр R регулирования нагрузки в крайнее левое положение, задав тем самым минимальный нагрузочный момент;
- установить переключатель режимов работы ТП в положение «I», выбрав тем самым режим стабилизации тока ДПТ электропривода «КЕМЕК»;
- подключить к выводам «L» и «O», расположенным на лицевой панели ТП цифровой вольтметр, позволяющий измерять угловую скорость из расчёта $10 \text{ В} = 2000 \text{ об/мин}$;
- подать с помощью автоматического выключателя Q2 напряжение на электропривод «КЕМЕК»;
- включить переключателем на лицевой панели ТП стабилизатор тока (положение «ВКЛ.»);
- провести опыт по определению момента потерь ΔM (п. 6.7);
- контролировать скорость вращения ω электродвигателя с помощью цифрового вольтметра V_2 ;
- фиксировать ток $I_{я}$ нагрузочной машины по вольтметру A_2 , используя соотношение: $1 \text{ В} = 1 \text{ А}$;
- занести результаты опыта в табл. 6.5;
- вычислить значения момента потерь ΔM по выражению 6.7, используя данные табл. 6.5;

Таблица 6.5

$\omega, \text{ с}^{-1}$							Примечание
$I_{яxx}, \text{ А}$							$\Delta M = C \cdot I_{яxx}$
$\Delta M, \text{ Нм}$							

Привести пример расчёта.

- запустить АД в соответствии с п.6.6.2.

В случае возникновения аварийной ситуации привод нужно немедленно остановить нажатием кнопки «СТОП» на панели ПЧ.

- изменять момент на валу исследуемого двигателя АД, вращая регулировочную рукоятку потенциометра R нагрузочной машины, и заносить значения тока $I_{я}$, тока I_1 статора и частоты вращения ω в табл. 6.6;
- контролировать с помощью цифрового вольтметра V_2 скорость вращения электродвигателя ω ;

- фиксировать ток $I_{я}$ нагрузочной машины по вольтметру A_2 , используя соотношение: $1В = 1А$;
- снимать ток I_1 статора по амперметру A_1 , функционально входящему в состав ПЧ «ВЕСПЕР»;
- повторить опыт при задании частот равных 5 Гц, 10 Гц, 20 Гц, 50 Гц (данные занести в таблицы, аналогичные табл. 6.6).
- по завершению экспериментов рукоятки и переключатели используемых элементов схемы привести в исходное состояние;
- определить величину момента $M_{нм}$, по выражению 6.6, используя данные табл. 6.6.;
- рассчитать момент исследуемой машины M_1 графоаналитическим методом по данным табл. 6.5 и табл. 6.6;

Таблица 6.6

ω, c^{-1}							Примечание
$I_1, А$							$M_1 = M_{нм} \pm \Delta M$ $M_{нм} = C \cdot I_{я}$ $\Delta M_{п} = C \cdot I_{яхх}$
$I_{я}, А$							
$M_{нм}, Нм$							
$M_1, Нм$							

Привести пример расчёта.

- построить по данным табл. 6.6 электромеханические $\omega=f(I_1)$ и механические $\omega=f(M_1)$ характеристики двигателя АД для различных структур управления.

Внимание! Во избежание срабатывания защит ТП или ПЧ, при снятии механических характеристик, необходимо, как можно меньшее время работать с большой нагрузкой. Особенно при задании низких частот 5...10 Гц!

6.9. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Функциональная электрическая схема стенда.
3. Таблицы опытных данных и характеристики $\omega=f(I_1)$ для всех опытов на одном графике и $\omega=f(M_1)$ для всех опытов на другом графике, в том числе и для опыта момента потерь агрегата.
4. Рассчитать характеристики $\omega=f(I_1)$ и $\omega=f(M_1)$ по паспортным данным в соответствии с заданием. Сравнить их с соответствующими им опытными характеристиками.
5. Определить диапазон регулирования скорости при соответствующем заданию законе частотного управления.
6. Краткие выводы.

6.10. Контрольные вопросы

6.10.1. Нарисовать схему замещения и векторную диаграмму АД для частотного регулирования при питании от источника напряжения.

6.10.2. Изобразить электромеханические характеристики асинхронного двигателя при питании от ПЧ со свойствами источника тока и охарактеризовать основные точки работы.

6.10.3. Показать механические характеристики АД для частотного регулирования при питании от источника тока.

6.10.4. Представить схему замещения и векторную диаграмму исследуемого двигателя для частотного регулирования при питании от источника тока.

6.10.5. Привести формулу основного закона оптимального изменения напряжения при частотном управлении.

6.10.6. Объяснить принципы скалярного метода управления частотой вращения АД.

6.10.7. Перечислить известные Вам формулы для частотного управления асинхронной машины от ПЧ со свойствами источника напряжения.

6.10.8. Пояснить по функциональной схеме работу скалярной системы частотного управления АД.

6.10.9. Изобразить электромеханические и механические характеристики системы «ПЧ – АД» при скалярном управлении.

6.10.10. Разъяснить, как влияет падение напряжения $I_1 R_1$ на работу системы «ПЧ – АД» со свойствами источника напряжения.

6.10.11. Объяснить принцип построения векторных систем управления исследуемого двигателя.

6.10.12. Провести сравнение между скалярной и векторной системами управления АД (преимущества, недостатки и т.д.).

6.10.13. Охарактеризовать экономичность системы «ПЧ – АД».

6.10.14. Пояснить по функциональной схеме работу векторной системы частотного управления асинхронной машиной.

6.10.15. Разъяснить, почему асинхронный электропривод со скалярной системой управления нельзя использовать в качестве привода подачи металлорежущего станка?

6.10.16. Объяснить причину, которая долгое время сдерживала развитие векторных систем управления АД.

Литература

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1978. – 832 с.
3. Преобразователь частоты с управлением вектором потока модели EI – 9001. Руководство по эксплуатации.
4. Преобразователь частоты с управлением вектором потока модели EI – 9001. Руководство по эксплуатации (список констант).
5. Елисеев В.А. и Шинянский А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу. – М.: Энергоатомиздат, 1983 – 816с.
6. <http://tehsintez.ru/catalog/katalog/oborud/pre-04-02.html>

Лабораторная работа №7

СБОРКА И ПРОВЕРКА СХЕМЫ ШКАФА ДЛЯ РЕВЕРСИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОМОЩЬЮ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО МОНИТОРА ТОКА

7.1. Цель работы

Собрать и исследовать работу схемы шкафа для реверсивного управления асинхронным двигателем (АД) с помощью микропроцессорного монитора тока.

7.2. Оборудование стенда (перечень аппаратуры)

Аппаратная часть выполнена в виде настольного комплекта и содержит:

- шкаф управления, включающий соответствующий набор аппаратуры;
- трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- аксессуары.

Питание комплекса осуществляется от трехфазной электрической сети напряжением 380 В с нейтральным и защитным проводниками [1].

Параметры стенда:

- Потребляемая мощность, не более, Вт.....200.
- Габариты шкафа (длина / ширина / высота), мм.....600×430×510.
- Габариты электродвигателя (длина / ширина / высота), мм.....260×160×250.
- Масса, не более, кг.....30.

7.2.1. Назначения и описания функциональных блоков

Перечень и назначение функциональных узлов приведены на блок-схеме (рис. 7.1) и принципиальной электрической схеме (рис.7.2) [1].

•Трехфазный источник питания (GA). Предназначен для питания комплекта трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.

• Автоматический трехполюсный выключатель (QA). Предназначен для ручного или дистанционного / автоматического включения / отключения электрических цепей в аварийной ситуации.

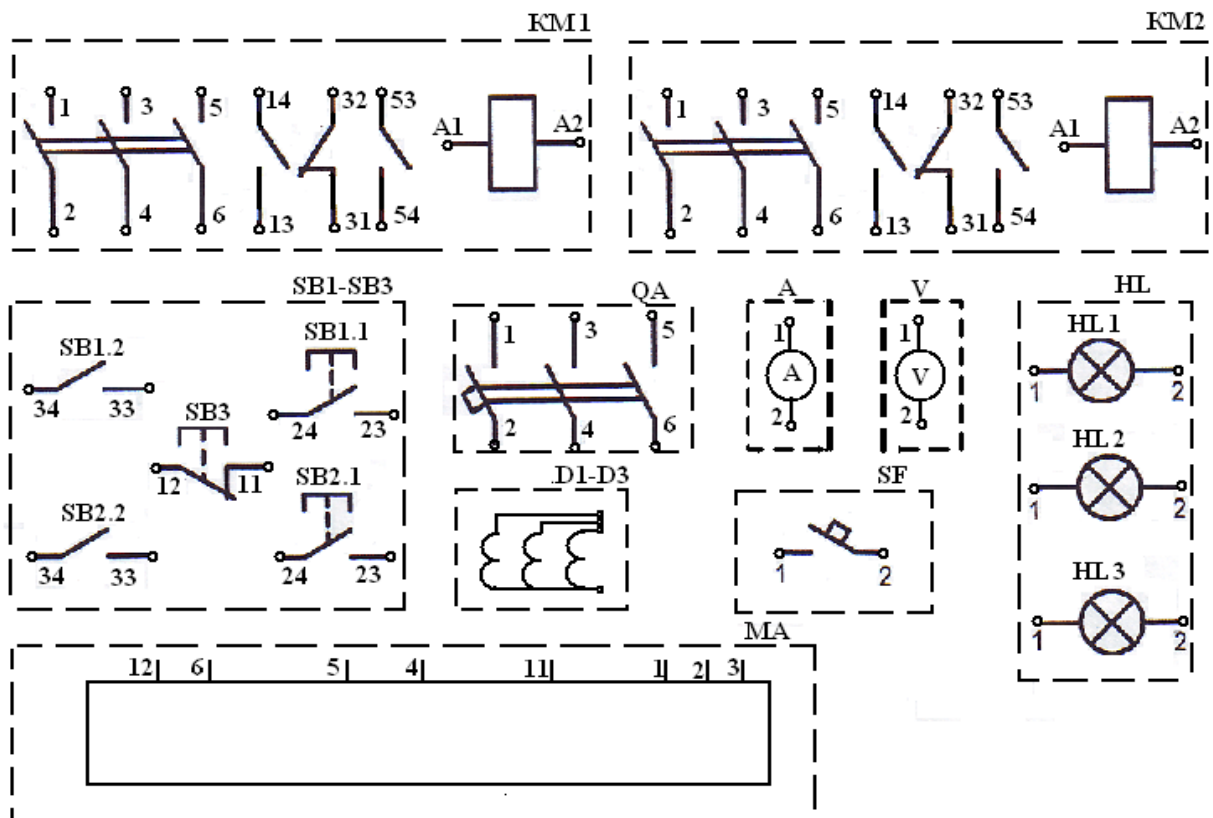


Рис. 7.1. Блок-схема лабораторного стенда

- Автоматический однополюсный выключатель (SF). Предназначен для замыкания размыкания реле KM1 и KM2 в случае аварийного режима.
- Микропроцессорный монитор тока двигателя (МА). Предназначен для программирования параметров электропривода, управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.
- Контакторы (KM1-KM2). Предназначены для управления асинхронным двигателем: пуск, останов и реверс.
- Блок мультиметров (BM), состоящий из амперметра (А) и вольтметра (V). Предназначен для получения и отображения величины напряжения и силы тока в силовой цепи.
- Исследуемая машина переменного тока (D1, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$P_H = 120 \text{ Вт}; U_H = \sim 380 \text{ В}; n_H = 1500 \text{ об/мин.}$$

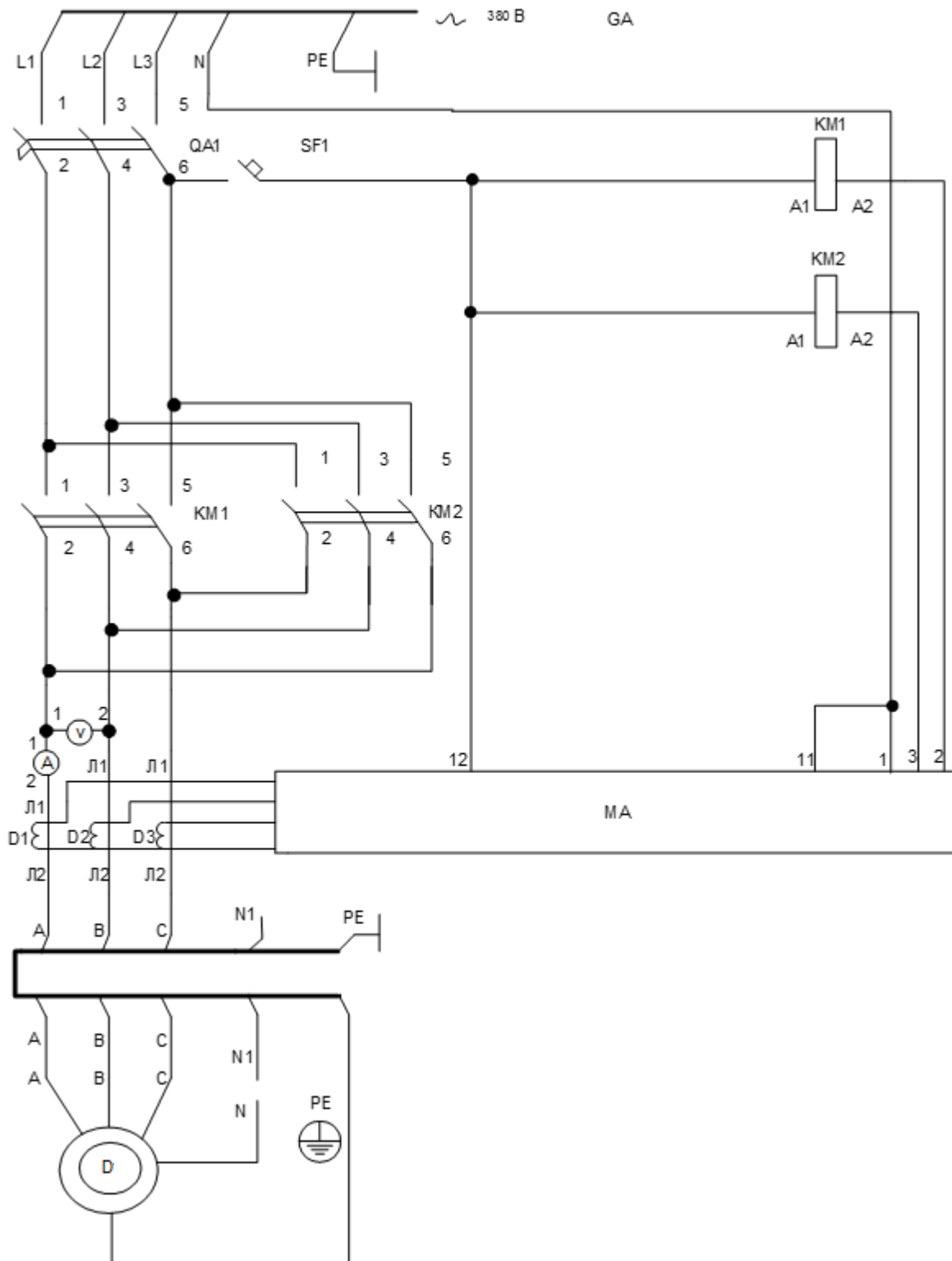


Рис. 7.2. Принципиальная схема электропривода

7.2.2. Обозначения и параметры исследуемой аппаратуры
 Назначение и параметры изучаемой схемы приведены в табл.7.1.

Таблица 7.1

Обозначение	Наименование	Параметры
D	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	120 Вт / ~ 380 В / 1500 мин ⁻¹
QA	Автоматический трехполюсный выключатель	~ 380 В / 10 А
SF	Автоматический однополюсный выключатель	~ 230 В / 0,5 А
KM1, KM2	Контакторы	~ 380 В / 10 А
D1...D3	Датчики тока	0...2,5 А
MA	Микропроцессорный монитор тока двигателя	~ 380 В / 2,5 А
V	Вольтметр	~ 0...500 В
A	Амперметр	~ 0...2 А

7.3. Общие сведения

7.3.1. Режимы работы АД

В зависимости от характера изменения нагрузки различают четыре основных номинальных режима работы АД: продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный и смешанный. В этих режимах основной характеристикой нагрузочных режимов является тепловая характеристика электродвигателя. Работа АД всегда сопровождается его нагревом, что обусловлено происходящими в нем процессами и потерями энергии. Нормативный срок службы электродвигателя определяется, в конечном счете, допустимой температурой нагрева его изоляции. В современных двигателях применяется несколько классов изоляции, допустимая температура нагрева которых составляет для класса А – 105° С, Е – 120° С, В – 130° С, F – 155° С, Н – 180° С, С – свыше 180° С. Превышение допустимой температуры ведет к преждевременному разрушению изоляции и существенному сокращению срока его службы.

В эксплуатации, в основном, приходится сталкиваться с режимами, ненормированными ГОСТами. Наиболее характерным является режим с быстроизменяющейся нагрузкой, когда двигатель периодически входит в

режим перегрузки, возвращаясь затем на номинальный режим или опускаясь в режим работы с нагрузкой меньше номинальной. Если машина работает в продолжительном режиме, но с переменной нагрузкой ($P_1, P_2, P_3 \dots$), имеет место неустановившийся тепловой процесс (рис. 7.3), т. к. в разные промежутки времени: t_1, t_2, t_3, t_4 и т. д. в ней возникают различные потери мощности, а следовательно, различные тепловые потери. Для эффективного контроля количества тепла, накопленного двигателем в процессе работы, необходимо выяснить законы нагрева и охлаждения асинхронного электродвигателя.

Снижение сопротивления изоляции.

В процессе эксплуатации АД его изоляция неизбежно «стареет». Основными причинами, вызывающими эти процессы являются: нагрев обмоток рабочими и пусковыми токами, токами короткого замыкания и перегруза, теплотой от посторонних источников; динамическими усилиями, возникающими при взаимодействии проводников с током, коммутационными перенапряжениями. На состояние изоляции большое влияние оказывают также условия окружающей среды – температура и влажность воздуха, загрязненность и запыленность.

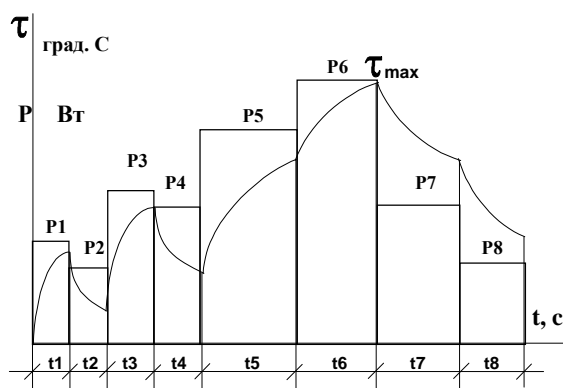


Рис. 7.3. Кривая изменения температуры двигателя при увеличении нагрузки

Состояние изоляции определяет степень безопасной эксплуатации электроустановок. Электродвигатель допускается эксплуатировать, если сопротивление его изоляции на корпус не менее 0,5 Ом. Вероятность пробоя изоляции возрастает на порядок, если сопротивление изоляции в два раза меньше допустимого. При снижении сопротивления изоляции высока вероятность появления такой тяжелой аварии АД, как пробой обмотки статора на корпус (короткое замыкание на корпус), опасной не только для самого электродвигателя, но и для обслуживающего персонала. По сети начинают протекать токи короткого замыкания в 10...100 раз

превышающие номинальные, а на корпус электроустановки может быть вынесено высокое напряжение, опасное для жизни человека. Не менее важным является непрерывный контроль сопротивления изоляции обмоток статора во время работы электродвигателя, т. к. диэлектрические свойства изоляции, измеренные до включения АД, могут внезапно измениться под воздействием электрического напряжения и температуры. Для этого используется измерение тока утечки на «землю» с помощью дифференциального трансформатора тока, реагирующего на появление дифференциального (разностного) тока выше некоторой уставки, заданной пользователем.

7.3.2. Аварии асинхронных двигателей

Аварии АД подразделяются на два основных типа: механические и электрические. Механические аварии это: деформация или поломка вала ротора, ослабления крепления сердечника статора к станине, опрессовки сердечника ротора, выплавление баббита в подшипниках скольжения, разрушение сепаратора, кольца или шарика в подшипниках качения, поломка крыльчатки, отложение пыли и грязи в подвижных элементах, пр.

Причиной большинства механических аварий являются радиальные вибрации из-за асимметрии питающей сети (т. н. перекос фаз), механические перегрузки на валу электродвигателя, брак комплектующих элементов или допущенный при сборке. До 10% всех аварий АД имеют механическое происхождение. При этом 8% приходится на долю аварий, связанных с асимметрией фаз и только 2% на аварии, связанные с механическим перегрузом. Доля аварий, связанных с браком мала и, поэтому, ее можно не принимать во внимание в настоящем рассмотрении. Оценка вероятностей возникновения механических аварий отсутствует, большая их часть, носит скрытый характер и выявляется только после соответствующих испытаний или разборки двигателя, однако, постоянный контроль сетевого напряжения и нагрузки на валу АД позволяет, в большинстве случаев, свести эту вероятность к минимуму.

Электрические аварии АД, в свою очередь, делятся на три типа:

- сетевые (аварии по напряжению), связанные с авариями в питающей электросети;
- токовые, связанные с обрывом проводников в обмотках статора, ротора, или кабеля, межвитковое и междуфазное замыкание обмоток, нарушением контактов и разрушении соединений, выполненных пайкой или сваркой;

- связанные со снижением сопротивления изоляции вследствие ее старения, разрушения или увлажнения.

Сетевые аварии АД.

Качество электроэнергии на территории РФ определяет ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». ГОСТ определяет соответствие стандартам целого ряда показателей, в первую очередь, таких как отклонения напряжения и частоты, коэффициент гармонической составляющей четного и нечетного порядка, коэффициенты обратной и нулевой последовательности напряжения, пр. Из-за аварий на подающих подстанциях, КЗ в распределительных сетях, коммутационных и грозовых возмущений, неравномерности распределения нагрузки по фазам, фактические значения ряда показателей больше допустимых, что ведет к аварийным режимам работы АД. По статистическим данным до 80% аварий электродвигателя напрямую или косвенно связаны именно с авариями сетевого напряжения (рис. 7.4).

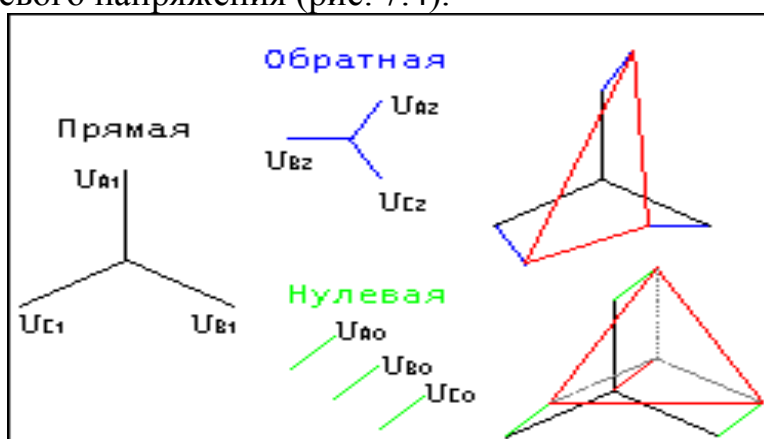


Рис. 7.4. Несимметрия напряжения

Из анализа показателей качества электрической энергии (ПКЭ) относительно условий работы АД видно, что, например, при уменьшении напряжения в сети (рис. 7.5), возрастает ток статора, приводящий к интенсивному нагреву изоляции АД и сокращению срока службы вследствие ускоренного старения изоляции и ее пробоя, а повышение напряжения приводит к увеличению магнитного потока статора, тока намагничивания, нагреву сердечника (вплоть до «пожара» в стали), потребляемой из сети реактивной мощности, снижающей коэффициент мощности. Следует отметить, что существует еще несколько типов сетевых аварий, которые происходят наиболее часто, но, напрямую ГОСТом не регламентируются, т. к. являются крайними случаями

проявлениями несимметричных режимов работы АД. Это обрыв одной из фаз, нарушение последовательности фаз и «слипание» фаз.

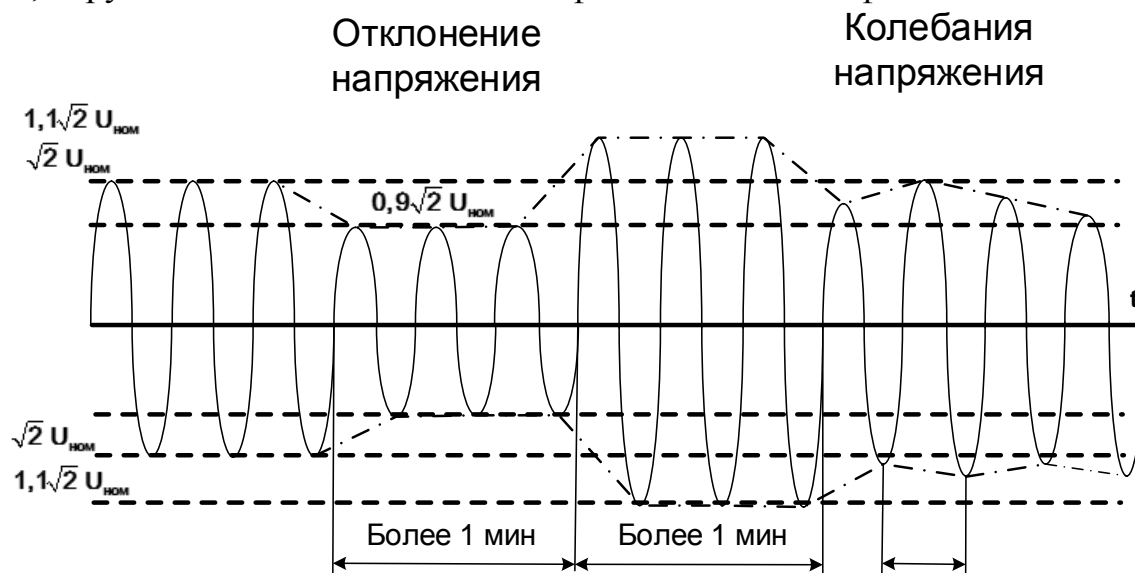


Рис. 7.5. Отклонение напряжения от номинального значения

Обрыв фаз, как правило, связан с обрывом жилы питающего кабеля, сгоревшим предохранителем или отключением автомата в одной из линий или обрывом самой линии. При соединении обмоток двигателя звездой напряжение в двух фазах делится поровну и составляет половину линейного $U_{\phi}=U_{л}/2$, в третьей отсутствует. Такие режимы приводят к повышенному энергопотреблению из сети, перегреву обмоток статора. Поле из вращающегося превращается в пульсирующее, ток в оборванной фазе будет отсутствовать, в двух других увеличится на 50%. Двигатель не разворачивается даже на холостом ходу. В некоторых типах двигателей в случае, если обрыв произошел во время работы двигателя, на оборванной фазе генерируется т. н. напряжение «рекуперации», близкое по фазе и амплитуде сетевому, двигатель переходит в тормозной режим работы и, если его не отключить, сгорит в течение нескольких минут.

Аварийный режим «слипания» фаз происходит в случае обрыва одной из питающих фаз и замыкании ее со стороны двигателя на другую фазу. При этом одно и то же фазное напряжение подается на две фазы двигателя, на третьей остается в норме. При незначительной амплитудной несимметрии наблюдается высокая фазная несимметрия, приводящая к появлению значительных напряжений обратной последовательности, вызывающих перегрев двигателя и выход его из строя.

Нарушение закрепленной ГОСТом последовательности фаз А-В-С (В-С-А, С-А-В), на любую другую обуславливает реверсивный режим работы – вращение двигателя в другую сторону, что часто недопустимо по

условиям технологического процесса, т. к. вызывает вращение приводного механизма в другую сторону и может привести, помимо аварии самого двигателя, к тяжелым, порой катастрофическим последствиям.

Постоянный контроль наличия и качества сетевого напряжения (гармонический анализ, вычисление действующих или средних значений напряжения до включения двигателя, контроль за его состоянием во время работы АД, в т. ч. за изменениями параметров фазных напряжений, вызванных режимами работы самого двигателя) позволяет избежать причин возникновения аварийных режимов, предотвратить появление режимов короткого замыкания и токового перегруза.

Токовые аварии двигателя.

Напряжение на зажимах асинхронного двигателя и фазные токи, протекающие по его обмоткам тесно взаимосвязаны и любые, даже небольшие колебания сетевого напряжения вызывают значительные изменения фазных токов. Эффективная защита АД должна измерять фазные токи как можно точнее. Согласно последним исследованиям, длительная работа двигателя с токовым перегрузом всего лишь на 5% от номинального, сокращает срок его службы в 10 раз. В связи с сильной несинусоидальностью кривой тока, особенно во время пусков, в ней присутствует большое количество гармоник высшего порядка, оказывающих существенное влияние на величины действующих значений тока и напряжения (рис. 7.6).

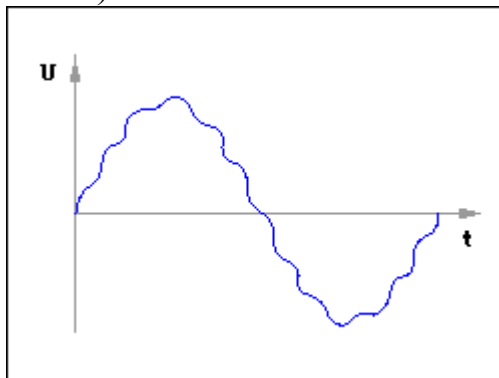


Рис. 7.6. Несинусоидальность напряжения

Поэтому, если принимать решение о работе двигателя не по вычисленным действующим значениям тока, а по неким усредненным сигналам или, еще хуже, по пиковым значениям, это может привести к ложным выводам о наличии или отсутствии токового перегруза.

Различают два вида токового перегруза АД: симметричный и несимметричный. Симметричный токовый перегруз, как правило, связан с механическими перегрузками на валу двигателя. Их значение напрямую

связано с режимами работы и тепловым перегрузом асинхронного двигателя.

Большая часть токовых аварий АД связана, в первую очередь, с повреждениями внутри самого двигателя, приводящими к несимметричному токовому перегрузу.

7.3.3. Методы защиты от аварийных режимов

Стремясь защитить двигатели от аварийных режимов, еще с середины прошлого века в энергетике стали применять различную релейную защиту: тепловую, токовую, температурную, фильтровую и комбинированную. Многолетний опыт эксплуатации асинхронного двигателя показал, что большинство существующих защит не обеспечивают безаварийную работу исследуемого двигателя. Так, например, тепловые реле рассчитывают на длительную перегрузку 25...30% от номинальной. Но, чаще всего, они срабатывают при обрыве одной фазы и величине нагрузки равной 60% от номинальной. При меньшей нагрузке реле не срабатывает и АД продолжает работать на двух фазах и выходит из строя в результате перегрева изоляции обмоток. Правильный выбор защитного устройства – это важный фактор в обеспечении безопасной эксплуатации асинхронного двигателя.

Приборы защиты АД от аварийных режимов можно разделить на несколько видов:

- тепловые: тепловые реле, расцепители;
- токозависимые: плавкие предохранители, автоматы;
- термочувствительные: термисторы, термостаты;
- защиты от аварий в электросети: реле напряжения и контроля фаз, мониторы сети;
- приборы МТЗ (максимальной токовой защиты), электронные токовые реле;
- комбинированные.

Современные стандарты большинства стран мира, включая и Россию, предъявляют все более высокие требования к безопасной эксплуатации асинхронных электродвигателей. Высокие показатели надежности и долговечности АД возможны только при условии их эксплуатации с номинальными или близкими к ним режимами, что можно обеспечить только установкой надлежащей защиты. Все из перечисленных защитных устройств служат для быстрого, в течении доли секунды, определения характера и степени повреждения двигателя и локализации аварийного участка путем отключения его от остальной схемы электроснабжения. Но,

вместе с тем, каждое из них имеет и целый ряд существенных недостатков, влияющих на качество их работы: одни отличаются неоправданной избирательностью, у других отсутствует отстройка от процесса пуска, третьи не реагируют на токи КЗ или перегруза и т. д. Для того, чтобы правильно выбрать защитное устройство, необходимо знать, как и от каких аварий защищает конкретное устройство, принцип их действия и конструктивные особенности.

Автоматические выключатели (автоматы).

Они предназначены для включения и отключения асинхронных электродвигателей и других приемников электроэнергии, а также для защиты их от токов перегрузки и короткого замыкания [7].

Автоматы совмещают в себе функцию рубильника, предохранителя и теплового реле. Обеспечивают одновременное отключение всех трех фаз в случае возникновения аварийных ситуаций. В рабочем режиме включение и отключение производится вручную; в аварийном режиме он отключается автоматически электромагнитным или тепловым разъединителем.

Важной составной частью автомата является расцепитель, который контролирует заданный параметр защищаемой сети и воздействует на разъединяющее устройство, отключающее автомат. Наибольшее распространение получили расцепители следующих типов:

- электромагнитные – для защиты от токов короткого замыкания;
- тепловые – для защиты от перегрузок;
- комбинированные.

Электромагнитный расцепитель состоит из катушки с подвижным сердечником и возвратной пружины. При протекании по катушке тока короткого замыкания сердечник мгновенно втягивается и воздействует на отключающую рейку механизма свободного расцепления.

Тепловой – представляет собой биметаллическую пластину, соединенную последовательно с контактом. При нагревании ее током перегрузки она изгибается и воздействует на отключающую рейку механизма свободного расцепления с обратозависимой выдержкой времени.

Выбор автоматических выключателей производится по номинальному току, характеристике срабатывания, отключающей способности, условиям монтажа и эксплуатации. Правильный выбор характеристики автоматического выключателя является залогом его своевременного срабатывания.

Специально для защиты электродвигателей были разработаны так называемые мотор-автоматы. В отличие от стандартного автомата, мотор-автоматы имеют целый ряд особенностей:

- номинальный ток электромагнитного расцепителя составляет $12 \dots 14 I_{нр}$, что соответствует режиму работы на индуктивную нагрузку (АС-3);
- высокую электродинамическую стойкость до 100 кА;
- рычаг или кнопки управления электроприводом расположены на корпусе;
- встроенные или навесные быстромонтируемые дополнительные контакты, срабатывающие при перегрузках или к.з.

Разнесение функций защитных аппаратов на несколько независимых устройств создает массу неудобств при монтаже и эксплуатации. Каждое из них не обладает универсальностью и подходит только к конкретному автоматическому выключателю. Поэтому перед разработчиками остро встала проблема создания многофункционального прибора.

Последние поколения автоматических выключателей снабжены т.н. электронными разъединителями, осуществляющими комплексную защиту электродвигателя и объединяющими в одном устройстве функции всех вышеперечисленных. Они выполнены на базе микропроцессорной техники, гарантируют высокую точность срабатывания, надежность и устойчивость к температурным режимам. Электропитание, необходимое для правильной работы, обеспечивается непосредственно трансформаторами тока разъединителя. Защитные разъединители состоят из трех или четырех трансформаторов тока (в зависимости от типа сети), электронного блока и механизма расцепления, который воздействует непосредственно на механизм выключателя. Для управления магнитным пускателем дополнительно потребуется вспомогательный блок управления, позволяющий управлять контактором в случае аварии (за исключением короткого замыкания).

С помощью DIP-переключателей, размещенных на передней панели устройства или с помощью специального электронного блока настройки, программируется определенный набор параметров и функций разъединителя. Кривая срабатывания выключателя (рис. 7.7), максимально приближенная к рабочей характеристике АД, определяет следующие параметры:

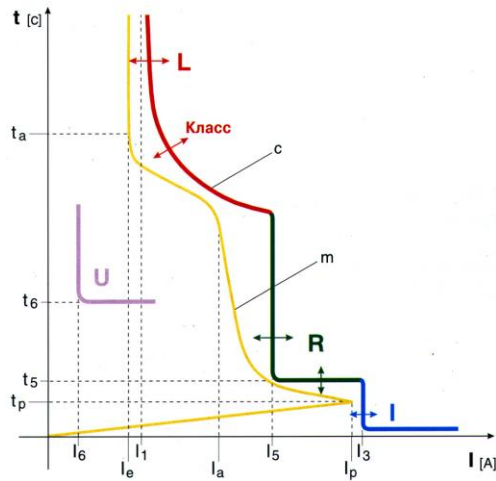


Рис. 7.7. Кривая срабатывания выключателя

- функция L – защита от перегрузки с обратнозависимой выдержкой по времени и характеристикой срабатывания согласно обратнозависимой кривой ($I_{2t}=\text{Const}$);
- функция R – защита от заклинивания ротора с определенным временем задержки срабатывания;
- функция I – защита от короткого замыкания с мгновенным срабатыванием;
- функция U – защита от перекоса или обрыва фазы с определенным временем задержки срабатывания. На характеристике: I_1 – порог срабатывания по току для функции L; I_3 – порог срабатывания по току для функции I; I_5 – порог срабатывания по току для функции R; t_5 – порог срабатывания по времени для функции R; I_6 – порог срабатывания по току для функции U; t_6 – порог срабатывания по времени для функции U; I_e – номинальный рабочий ток электродвигателя; I_a – пусковой ток электродвигателя; I_p – пиковое значение пускового тока; t_a – время пуска электродвигателя; t_p – время нарастания пускового тока до I_p ; m – типовая кривая пуска электродвигателя; c – пример кривой срабатывания автоматического выключателя с электронным расцепителем; Класс – класс пуска электродвигателя, определяющий время срабатывания для защиты от перегрузки согласно стандарта [11].

Автоматические выключатели, оснащенные электронными расцепителями, обеспечивают достаточную защиту двигателя от перегрузки при работе в нормальном режиме с малым количеством включений, недолгими запусками и умеренными пусковыми токами. Режим тепловой памяти, позволяющий вычислять температуру двигателя

при отключении, возможен только при наличии дополнительного источника питания. Эти выключатели совершенно неэффективны при работе в старт-стопном режиме (> 60 вкл./ч) и при тяжелом запуске. Если тепловые постоянные времени электродвигателя и электронного расцепителя не совпадают, то при настройке на номинальный ток двигателя, автоматический выключатель может сработать слишком рано или не распознать режим перегрузки. Ограничение рабочих циклов автоматического выключателя (количества включений-отключений), влечет за собой использование в таких схемах контактора, имеющего большее количество циклов коммутации и лучшую коммутирующую способность. Но для подключения к нему разъединителя потребуются вспомогательный блок управления. Дополнительные (вспомогательные) устройства необходимы также для настройки и тестирования блока, что приводит к значительному удорожанию устройства и усложнению режима его эксплуатации.

Термочувствительные защитные устройства: термисторы; термостаты.

Термочувствительные защитные устройства относятся к встраиваемой тепловой защите электродвигателя. Располагаются в специально предусмотренных для этой цели гнездах в лобовых частях электродвигателя (защита от заклинивания ротора) или в обмотках электродвигателя (защита от теплового перегруза). В основном их можно разделить на два типа: термисторы – полупроводниковые резисторы, изменяющие свое сопротивление в зависимости от температуры и термостаты – биметаллические выключатели, срабатывающие при достижении некоторой критической температуры.

Термисторы в основном делятся на два класса: РТС типа – полупроводниковые резисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления и NTC типа – полупроводниковые резисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Для защиты электродвигателей используются в основном РТС термисторы (позисторы), обладающие свойством резко увеличивать свое сопротивление, когда достигнута некоторая характеристическая температура T_{Ref} . Применительно к двигателю, это максимально допустимая температура нагрева обмоток статора для данного класса изоляции. Три (для двухобмоточных двигателей шесть) РТС-термистора соединены последовательно и подключены ко входу электронного блока защиты. Блок настроен таким образом, что при превышении суммарного сопротивления цепочки срабатывает контакт выходного реле,

управляющий разъединителем автомата или катушкой магнитного пускателя. Термисторная защита предпочтительней в тех случаях, когда по току невозможно определить с достаточной точностью температуру двигателя. Это касается, прежде всего, двигателей с продолжительным периодом запуска, частыми операциями включения и отключения (повторно-кратковременный режим) или двигателей с регулируемым числом оборотов (при помощи преобразователей частоты). Термисторная защита эффективна также при сильном загрязнении двигателей или выходе из строя системы принудительного охлаждения.

Недостатками данного вида защиты является то, что с датчиками выпускаются далеко не все типы двигателей. Это особенно касается двигателей отечественного производства. Датчики могут устанавливаться только в условиях стационарных мастерских. Температурная характеристика термистора достаточно инерционна и сильно зависит от температуры окружающей среды и от условий эксплуатации самого двигателя. Они требуют наличия специального электронного блока: термисторного устройства защиты двигателей, теплового или электронного реле перегрузки, в которых находятся блоки настройки и регулировки, а также выходные электромагнитные реле, служащее для отключения катушки пускателя или электромагнитного разъединителя.

Для более оперативного реагирования на сверхнормативные повышения температуры обмотки статора, в корпус двигателя встраивают биметаллические выключатели (термостаты).

Термостаты, их иногда еще называют реле температуры, представляют из себя биметаллические регуляторы, работающие по принципу температурной отсечки. Принцип работы термостата основан на температурной деформации металла с различным коэффициентом теплового расширения. Состоят из неподвижной контактной пластины, закрепленной в корпусе, биметаллической мембраны, изгибающейся в зависимости от температуры и подвижной контактной группы, прикрепленной к ней стержнем. Для защиты двигателей обычно используются три (по одному на каждую обмотку) нормально замкнутых термостата, включенных последовательно и подключенных непосредственно к схеме управления двигателем. При превышении критической температуры обмотки они мгновенно разрывают свою цепь, что приводит к отключению двигателя.

Большинство из описанных защитных устройств, работающих по принципу измерения прямого или косвенного теплового действия тока, очень плохо реагируют на аварии, связанные с авариями сетевого

напряжения. Для защиты от такого вида аварий используют реле напряжения и контроля фаз.

Реле напряжения и контроля фаз (мониторы напряжения).

Предназначены для постоянного контроля параметров сетевого напряжения и управления трехфазными электроустановками в т. ч. АД, путем отключения их от электрической сети в случае наступления аварийных режимов: недопустимых перепадах напряжения (скачки и провалы напряжения); обрывах, слипаниях, перекосах; нарушениях последовательности фаз и последующего автоматического повторного включения электродвигателя после возвращения параметров сети в норму, если иное не предусмотрено технологическим процессом.

Как показывает статистика, до 80% аварий электродвигателя, напрямую или косвенно связаны именно с авариями сетевого напряжения. Для защиты АД наиболее целесообразно применение т. н. мониторов напряжения, контролирующих несколько видов сетевых аварий.

Большинство из присутствующих на рынке реле напряжения, не обладают указанной универсальностью. Одни из них контролируют только обрыв фаз, другие превышение или понижение напряжения, третьи перекос фаз и т.д. Это приводит к необходимости использования нескольких аналогичных реле одновременно, что неоправданно усложняет и удорожает схему, приводит к повышенному энергопотреблению и тепловыделению, уменьшает надежность.

По схемотехнике данный класс реле условно можно разделить на две группы: аналоговые и цифровые. О преимуществах цифровой техники перед аналоговой сказано достаточно много. Отметим только, что характеристики аналоговых реле напряжения очень сильно зависят от параметров самого измеряемого напряжения и температуры окружающей среды. Их отличает низкая надежность, большие габариты и повышенное энергопотребление, работа по пиковым значениям напряжения, т. к. средствами аналоговой техники практически невозможно вычислить действующее значение напряжения.

Микропроцессорные мониторы напряжения способны в одном малогабаритном устройстве совместить большинство функций, производят работу по действующему значению напряжения, различают виды аварий, имеют множество регулируемых и настраиваемых параметров. Специально для защиты АД у лучших образцов реле имеется независимая регулируемая (или «защитая») уставка по минимальному напряжению для отстройки от пусковых посадок. Совмещать эту уставку с временем реакции (срабатывания) реле недопустимо, т.к. точно с такой же

задержкой реле будет реагировать и на тяжелые аварии, такие как обрыв фаз или сильный перекос. Такие мониторы имеют регулировку автоматического повторного включения в широких пределах (для управления оборудованием с длительными переходными процессами), а также возможность контроля контактов магнитного пускателя. Последняя функция наиболее актуальна для мощных двигателей или для двигателей, работающих в старт-стопном режиме (например, для электродвигателей компрессоров).

7.3.4. Универсальные устройства защиты АД

Попытки создать эффективную защиту предпринимаются различными производителями постоянно. Наибольшее распространение получили две идеологии: угло-фазовый метод, реализованный в большинстве импортных дорогостоящих устройств и контроль параметров работы двигателя по величине действующего значения тока в каждой из питающих фаз, положенный в основу отечественных устройств.

Задача создания защитного устройства оказалась достаточно сложной. Во-первых, ток необходимо измерять как можно точнее, ведь известно, что длительная работа АД всего лишь при 5% перегрузе сокращает срок его службы в 10 раз [7]. Во-вторых, в связи с сильной несинусоидальностью кривой тока, необходимо определять действующее значение токов, включая гармонический анализ, чтобы учесть значения высших гармоник, оказывающих наиболее вредное влияние на пусковые и рабочие характеристики двигателя. Работа по пиковым значениям (длительным фронтам) или по неким усредненным суммам приводит к ложным срабатываниям. В третьих, необходимо обеспечить отстройку от 7-8 кратных пусковых токов, одновременно обеспечив отключение двигателя даже при небольших длительных перегрузках. В четвертых, защита должна быть «умной», т. е. время срабатывания должно зависеть от тока. В пятых, необходимо отключать недогруженный двигатель при возникновении недопустимой асимметрии токов, т. к. это приводит к биению ротора. В шестых, необходимо учитывать тепло, выделяемое при пусках двигателя, т. к. при частых пусках двигатель может перегреться пусковыми токами, имея на валу нагрузку значительно ниже номинальной. Кроме всего прочего, необходимо различать виды аварий, и по каждой из них принимать свое решение: можно или нельзя включать двигатель повторно.

Большинство из представленных на рынке устройств т. н. токовой защиты, мало чем отличаются друг от друга по своим функциональным

возможностям и имеют общие недостатки: низкая точность выставления токов, срабатывание по максимально допустимому току, отсутствие измерения напряжения и др.

Лишь совсем недавно появились недорогие отечественные устройства, в которых функции защиты реализованы не хуже, а в некоторых, по совокупности параметров, даже лучше, чем у большинства импортных аналогов, включая встроенные защиты преобразователей частоты и устройств плавного пуска. Такие устройства объединяет наличие в измерительной цепи трансформаторов тока, контролирующих рабочие токи, протекающие в обмотках статора, цифровая обработка сигнала, множество контролируемых параметров, простота конструкции.

Для анализа был выбран ряд защитных устройств АД, наиболее часто используемых на российских предприятиях, где зачастую отдают предпочтение отечественным устройствам перед их, возможно более совершенных, западных аналогами. Несомненно, основная причина, – цена. В связи с низкой платежеспособностью российских предприятий устанавливать на каждый ответственный электропривод частотный преобразователь достаточно накладно, т. к. при больших мощностях их стоимость составляет несколько тысяч долларов. К тому же, импортные защитные устройства порой не способны выдержать жесткие режимы эксплуатации: повышенные температуры; влажность; низкое качество питающего напряжения; мощные электромагнитные и коммутационные возмущения, присутствующие в сети. У них усложнены схемы настройки и отладки, требуется наличие специальных знаний для их эксплуатации, которые отсутствуют у специалистов низшего звена.

Цена большинства отечественных устройств не превышает несколько сот долларов, причем практически не зависит от мощности защищаемого АД. Они создавались с учетом наших особенностей. Способны подстраиваться под реальные условия эксплуатации, при которых, по специфике производства, необходимо иногда загроублять или наоборот ослаблять режимы работы. Просты в обращении и не требуют дополнительных настроек.

Сравнение также производилось по основным параметрам, которым, должно соответствовать универсальное реле защиты АД: от аварий в электросети с возможностью точной настройки на номинальный (рабочий) ток двигателя; работа по действующим значениям токов; от внутренних аварий; от механического перегруза; от холостого хода («сухой» ход для насосов, обрыв шкива); от теплового перегруза; от пробоя изоляции на корпус и другое.

Более подробное описание аварийных режимов:

- Защита от аварий сетевого напряжения: обрыв, слипание, нарушение последовательности, перекос, скачки, провалы напряжения. В большинстве устройств такой контроль, как правило, отсутствует. В некоторых, перед включением, в лучшем случае проверяется наличие и полнофазность питающей сети. В большинстве случаев о плохом напряжении судят лишь после включения нагрузки по токам, т.е. косвенно. В блоке УБЗ-301 напряжение измеряется как до включения (при плохом напряжении нагрузка не включится), так и после включения двигателя.

- Одновременный контроль токов и напряжений необходим для анализа вида аварии. Такой анализ дает возможность применить соответствующую логику принятия решений. Например, при сетевых авариях повторный пуск разрешать, при авариях, связанных с повреждениями внутри двигателя – запрещать.

- Выставление номинальных и рабочих токов. Для правильной работы устройства защиты принципиально важно как можно точнее задать значение номинального тока двигателя. От того насколько правильно задан этот параметр зависит эффективность и достоверность принятия решения по различного рода перегрузам и другим токовым авариям. Для всех отечественных блоков – это камень преткновения. В одних он выставляется очень грубо, в других это вообще невозможно, в третьих номинальный ток вовсе не выставляется, а устанавливается ток срабатывания (максимальный), т.е. защита от перегруза – фактически защита по максимальному току с выдержкой времени (если ток будет меньше максимального, но выше номинального, двигатель войдет в перегруз, а защита это не определит). Например, ряд отечественных защитных устройств (УЗОТЭ-2У), перед их запуском предлагают потребителю создать на валу электродвигателя максимальную нагрузку, уменьшая ее затем до номинальной. При этом производители таких блоков не сообщают как это в принципе можно сделать. Точная уставка необходима для задания критических параметров работы, относительно которых будет производиться отсчет. Согласно исследованиям, долговременное использование электродвигателя с нагрузкой всего лишь на 5% превышающей номинальную, ведет к 10-кратному сокращению срока службы обмоток электродвигателя. Таким образом, невозможность точного выставления номинального тока означает, что эти блоки обеспечивают слишком грубую защиту, по сути не сильно отличающуюся от функций обыкновенного (гораздо более дешевого) теплового реле. В

УБЗ-301 (рис. 7.8) номинальный ток выставляется до включения нагрузки с высокой степенью точности [10].

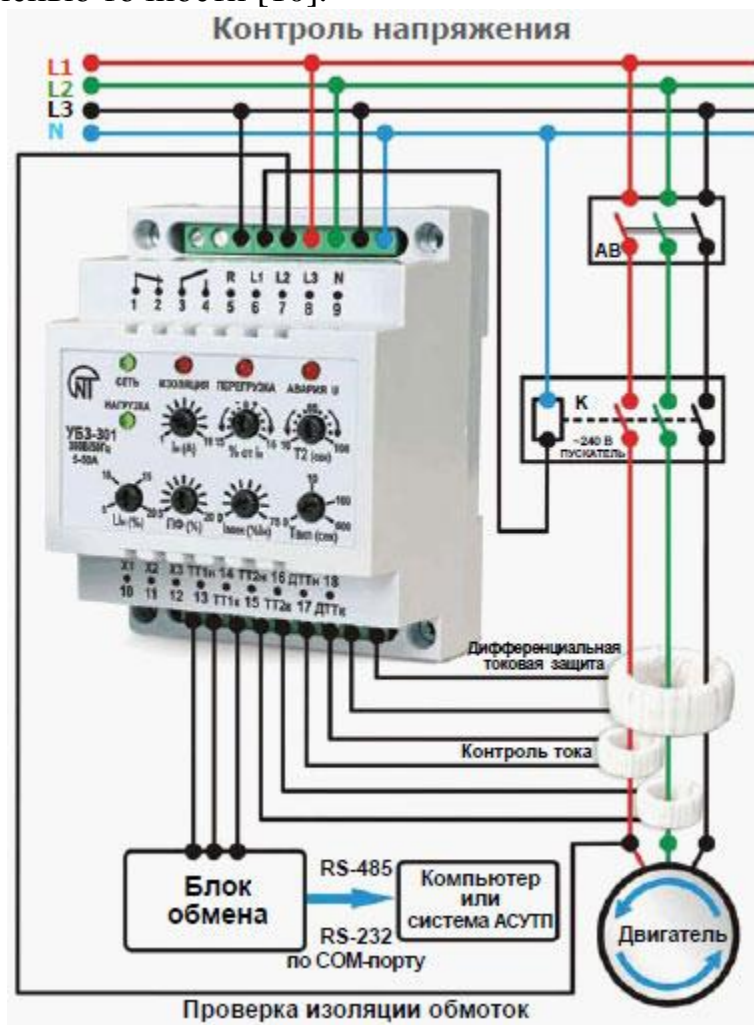


Рис. 7.8. Схема подключения УБЗ-301

- Работа по действующим значениям тока и напряжения. Ни одна из известных защит не дает такой возможности. Важность принятия решения по действующим значениям, особенно токов, определяется тем, что формы кривых токов, особенно при пусках, очень далеки от синусоиды. Если принимать решения не по действующим значениям, а по неким усредненным сигналам, или (еще хуже) по пикам, как сделано во многих других устройствах, то такие защиты будут срабатывать ложно, либо, сильно загрубленные, не будут эффективно защищать нагрузку. В блоке УБЗ-301 действующее значение токов определяется методом векторного и гармонического анализа до 7-й гармоники включительно.

- Защита по тепловому перегрузу. Применение микропроцессорной техники позволило в УБЗ-301 применить сложную математическую

обработку сигналов. В частности, постоянно измеряя действующее значение тока, решается уравнение теплового баланса электродвигателя. Таким образом, УБЗ-301 анализ перегруза производит с учетом «истории» работы электродвигателя. Это означает, например, что предварительно нагруженный двигатель после перегруза будет отключен быстрее, чем предварительно холодный. В других блоках в лучшем случае работа происходит по некоторой усредненной токо-временной характеристике, без учета предварительно накопленного двигателем тепла. Особенно такой подход необходим, когда нагрузка на валу электродвигателя переменная с периодическими перегрузами. В этом случае двигатель может получить тепловой перегруз, находясь в зоне перегруза кратковременно, периодически возвращаясь на номинальную нагрузку. Это же можно отнести к частым пускам. Важным преимуществом такого подхода, является то, что он позволяет ограничить количество пусков в единицу времени. Это очень важно, т.к. двигатель, имея нагрузку на валу меньше номинальной, может перегреться от частых пусков. Уравнение теплового баланса решается непрерывно, как в процессе работы двигателя, так и при его остановках.

- Защита при симметричном/несимметричном перегрузе фазных/линейных токов по сложной логике принятия решений (механические перегрузки, повреждения внутри двигателя/питающего кабеля, пр.).

- Защита по минимальному рабочему или пусковому току («сухой ход» для насосов).

- Повышенные габариты, вес, энергопотребление, небольшой диапазон рабочих температур говорят о наличии аналоговых компонентов в схемотехнике большинства устройств. А это значит, что невозможно достичь требуемого уровня надежности и точности.

В блоке УБЗ-301, в отличие от других, два гальванически развязанных «сухих» контакта, что необходимо для построения схемы дистанционного контроля и управления. Он единственный имеет интерфейсный выход, что дает возможность использования его в проектах АСУ ТП и диспетчеризации.

7.4. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования электропривода:

- проверка работоспособности экспериментального стенда.

Снятие динамических характеристик асинхронного двигателя:

- прямой пуск и останов двигателя;

- пуск двигателя в обратном направлении вращения.

Исследование аварийных режимов:

- пуск двигателя с имитацией обрыва фазы;
- пуск при моделировании стопорения вала двигателя.

7.5. Программирование монитора тока двигателя

Порядок процедуры программирования микроконтроллера:

- Подать на гнезда 11, 12 монитора тока двигателя D (далее - монитора) сетевое напряжение ~ 220 В, 50 Гц. На индикаторе монитора должно «С» двигателя задан номинальный ток $I_1=0,42$ А.

- Изменить при необходимости номинальный ток конкретной фазы; для этого кнопкой «P» выбрать эту фазу. Затем кнопкой «⊕» вызвать мигание нужного разряда на мониторе и кнопкой «⊖» установить в этом разряде требуемую цифру (от 0 до 9). Устанавливаемое трехразрядное число (от 1 до 250) должно быть равно увеличенному в 100 раз значению номинального тока фазы. Например, для установки номинального тока $I_1=1,25$ А необходимо установить число 125. После отобразиться основное меню – отобразится надпись «A.000», показывающая, что в фазе «А» двигателя увеличенное в 100 раз текущее значение тока равно нулю.

- Проверить заданные (по умолчанию) номинальные фазные токи двигателя. Для этого следует нажать и удерживать более 2 секунд кнопку «⊖». На мониторе должна появиться надпись «A.042», означающая, что для фазы «А» двигателя задан номинальный ток $I_1=0,42$ А.

- Нажать и отпустить кнопку «P». На мониторе должна появиться надпись «B.042», означающая, что для фазы «В» двигателя задан номинальный ток.

- Нажать и отпустить кнопку «P». На мониторе должна появиться надпись «C.042», означающая, что для фазы установки числа записать его в память монитора. Для этого следует нажать и отпустить кнопку «P».

- Вернуться в основное меню. Для этого нажать кнопку «⊕». На мониторе блока должна отобразиться надпись «A.000».

- Ввести требуемые параметры защиты двигателя. Для этого необходимо нажать и удерживать более 2 секунд кнопку «P». На мониторе отобразится надпись «I250», означающая, что задан ток перегрузки $I_2=50$ %. При превышении тока двигателя на 50 % от его номинального тока I_1 должно осуществиться аварийное отключение двигателя с появлением на мониторе блока сообщения «OL2». Например, при заданном номинальном токе $I_1=0,42$ А аварийное отключение двигателя

должно происходить при превышении током двигателя уровня $I_{OL2}=0,42+(0,42\cdot 50)/100=0,63$ А.

- Вызвать кнопкой « ⊕ » мигание нужного разряда на мониторе и кнопкой « ⊖ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменения тока I_2 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого надо нажать кнопку « Ⓟ ». На мониторе блока отобразится надпись «I370», означающая, что задан ток недогрузки $I_3=70$ %. При уменьшении тока, например, в фазе «А» двигателя в результате ее обрыва, до уровня 70 % от заданного номинального тока I_1 должно происходить его аварийное отключение с появлением на мониторе сообщения «A.OL3». Например, при заданном номинальном токе $I_1=0,42$ А и обрыве фазы «А» двигателя его аварийное отключение должно происходить при уменьшении тока двигателя ниже уровня $I_{OL3}=(0,42\cdot 70)/100=0,29$ А.

- Вызвать кнопкой « ⊕ » мигание нужного разряда на мониторе и кнопкой « ⊖ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменить ток I_3 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого нажать кнопку « Ⓟ ». На мониторе блока отобразится надпись «t010», означающая, что задано время $t_0=10$ с, необходимое для останова (выбега) двигателя после подачи команды на его реверсирование. При подаче команды на реверс двигателя она должна начать выполняться спустя заданное время t_0 .

- Вызвать кнопкой « ⊕ » мигание нужного разряда на мониторе блока и кнопкой « ⊖ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменения времени t_0 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого нажать кнопку « Ⓟ ». На мониторе блока отобразится надпись «t103», означающая, что задано время $t_1=3$ с. При превышении тока двигателя его четырехкратного заданного номинального тока I_1 продолжительностью более 3 секунд должно происходить аварийное отключение двигателя с появлением на мониторе сообщения «OL1». Например, при заданном номинальном токе двигателя $I_1=0,42$ А и реальном токе двигателя превышающем значение $I_{OL1}=4\cdot 0,42=1,64$ А через 3 секунды должно происходить аварийное отключение двигателя.

- Вызвать кнопкой « ⊕ » мигание нужного разряда на мониторе блока и кнопкой « ⊖ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменить время t_1 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра.

Для этого нажать кнопку « P » . На мониторе блока отобразится надпись «t205», означающая, что задано время $t_2=05$ с. При перегрузке двигателя типа «OL2» его аварийное отключение должно происходить спустя время $t_2=5$ с.

- Вызвать кнопкой « ⊕ » мигание нужного разряда на мониторе блока и кнопкой « ⊖ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменить время t_2 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого нажать кнопку « P » . На мониторе блока отобразится надпись «t305», означающая, что задано время $t_3=5$ с. При недогрузке (обрыве фазы) двигателя типа «OL3» его аварийное отключение должно происходить спустя время $t_3=5$ с.

- Вызвать кнопкой « ⊕ » мигание нужного разряда на мониторе блока и кнопкой « ⊖ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменить время t_3 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого следует нажать кнопку « P » .

- Вернуться в основное меню. Для этого надо нажать кнопку « ↵ » . На мониторе блока должна отобразиться надпись «A.000».

7.6. Проверка работоспособности стенда

Для этого необходимо:

- Обеспечить, чтобы шкаф управления асинхронным двигателем (далее – шкаф) был заперт и отключен от сети электропитания внешним коммутационным аппаратом, автоматическим выключателем.

- Открыть дверь шкафа.

- Если включены выключатели QA1 и SF, то отключить их.

- Соединить аппаратуру в соответствии с принципиальной электрической схемой (рис.7.2). Для соединения аппаратуры, установленной на двери шкафа, с аппаратурой внутри шкафа использовать в качестве промежуточных контактов блоки зажимов X5, X6, расположенные на шасси шкафа.

- Включить выключатели QA1 и SF.

- Закрыть дверь шкафа ключом.


- Подать на шкаф электропитание соответствующим автоматическим выключателем от сети. На мониторе MA показатель тока двигателя (далее – мониторе) высветится надписью «A.000», означающая увеличенное в 100 раз текущее (равно нулю) значение тока в фазе «А» двигателя D, а также загорится светодиод около надписи «СТОП».



- Проверить, что в мониторе блока МА заданы следующие значения параметров управления асинхронного двигателя: токи $I_1 = 0,42$ А (во всех фазах), $I_2=50\%$, $I_3=70\%$ и времена $t_0=10$ с, $t_1=3$ с, $t_2=5$ с, $t_3=5$ с. Если это не так, то восстановить их или изменить на желаемые значения этих параметров в соответствии с п. 7.5.


7.7. Определение параметров АД в динамических и аварийных режимах

7.7.1. Прямой пуск и останов двигателя

Для этого необходимо:

- Нажать и отпустить кнопку «» на мониторе МА. Загорится светодиод около надписи «**ВПЕРЕД**».

- Нажать и отпустить кнопку «» на мониторе МА. Произойдет **прямой пуск двигателя Д**. Стрелки вольтметра V и амперметра А укажут напряжение и ток АД. На мониторе высветится увеличенное в **100** раз текущее значение тока двигателя в выбранной фазе. Для наблюдения значения тока в другой фазе нажать и отпустить кнопку «».

- Нажимая кнопку «» добиться загорания светодиода около надписи «**СТОП**».


- По завершении эксперимента отключить шкаф от сети электропитания.



- Открыть дверь шкафа.


- Отключить выключатели QA и SF.

7.7.2. Пуск в обратном направлении АД

Для этого необходимо:

- Нажимая кнопку «» добиться загорания светодиода около надписи «**НАЗАД**».

- Нажать и отпустить кнопку «» на мониторе МА. Через время $t_0 = 10$ с должен произойти **прямой пуск двигателя Д с обратным направлением вращения**. Стрелки вольтметра V и амперметра А укажут напряжение и ток АД. На мониторе МА высветится увеличенное в **100** раз текущее значение тока двигателя в выбранной фазе. Для наблюдения значения тока в другой фазе нажать и отпустить кнопку «».

- Нажимая кнопку «» добиться загорания светодиода около надписи «**СТОП**».

- По завершении эксперимента отключить шкаф от сети электропитания.

- Открыть дверь шкафа.
- Отключить выключатели QA и SF.

7.7.3. Пуск двигателя с имитацией обрыва фазы

Для этого необходимо:

- Смоделировать обрыв фазы двигателя D, вынуть перемычки в фазе «В» на его терминальной панели. Стрелка вольтметра V и амперметра A укажут напряжение и увеличившийся ток АД. На мониторе блока МА высветится увеличенное в 100 раз текущее значение тока двигателя в выбранной фазе. Двигатель начнет издавать характерный гудящий звук. Через время $t_3=5$ с двигатель должен аварийно отключиться от электрической сети и остановиться. Об этом будет сигнализировать надпись «OL3», которая должна появиться на мониторе блока МА.

- Устранить искусственно созданный обрыв фазы «В» двигателя D.
- Отключить шкаф от сети электропитания лаборатории.
- Открыть дверь шкафа.
- Отключить выключатели QA и SF.

7.7.4. Пуск при моделировании стопорения вала двигателя

Для этого необходимо:

- Создать механический момент сопротивления на валу двигателя, исключаяющий его пуск. Для этого снять кожух, защищающий от прикосновения к валу двигателя D. Закрепить на валу двигателя стопорное устройство так, чтобы исключалось вращение вала в обе стороны.

- Включить выключатели QA и SF.
- Закрыть дверь шкафа ключом.
- Подать на шкаф электропитание от сети лаборатории.
- Нажать и отпустить кнопку « ⏪ » на мониторе МА. Загорится светодиод около надписи «ВПЕРЕД».

- Нажать и отпустить кнопку « Ⓟ » на мониторе МА. В результате произойдет подключение АД к электрической сети. Стрелки вольтметра V и амперметра A укажут напряжение и увеличившийся ток АД. Двигатель останется неподвижным и начнет издавать характерный гудящий звук. Через время $t_2 = 5$ с двигатель должен аварийно отключиться от электрической сети. Об этом будет сигнализировать надпись «OL2», которая должна появиться на мониторе блока МА.

- По завершении эксперимента отключить шкаф от сети электропитания, снять стопорное устройство с вала двигателя D и установить защитный кожух.

- Открыть дверь шкафа.
- Отключить выключатели QA и SF.

7.8. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Электрическая схема соединений стенда с краткими пояснениями.
3. Параметры и характеристики электродвигателя в режиме пуска, останова и реверса.
4. Параметры электродвигателя в аварийном режиме.
5. Краткие выводы.

7.9. Контрольные вопросы

7.9.1. Преимущества и недостатки АД с короткозамкнутым и фазным роторами.

7.9.2. Как вызвать реверс АД?

7.9.3. Пояснить физический смысл и количественно охарактеризовать показатели качества: отклонения напряжения и колебания частоты; колебания напряжения (размах изменения, доза колебания, частота изменения, интервал времени между изменениями, глубина провала, интенсивность провалов, длительность импульса); несимметрии напряжения трехфазной сети; несинусоидальность напряжения.

7.9.4. Привести классификацию устройств защит электродвигателей.

7.9.5. От каких аварийных режимов защищают силовой трансформатор?

7.9.6. От каких аварийных режимов защищают электродвигатель напряжением выше 1 кВ?

7.9.7. Каким образом защищают электродвигатель напряжением до 1 кВ?

7.9.8. Указать назначение и принцип работы автоматического включения резерва.

7.9.9. Объяснить принцип работы микропроцессорной защиты электроустановок.

7.9.10. Привести классификацию электротехнических установок с учетом мер электробезопасности.

Литература

1. Сенигов П.Н. Электромонтаж и наладка шкафов управления. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭМНШУ.001 РБЭ (943) – Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2007. – 46 с.
2. Онищенко Г.Б. и др. Автоматизированный электропривод промышленных установок. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
4. Крупович В. И. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 415 с.
5. Елисеева В. А., Шинянский А. В. Справочник по автоматизированному электроприводу – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
6. Электротехника: Учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова. – Челябинск: Изд-во Ю УрГУ, 2005. – 639 с.
7. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 1991. – 496 с.
8. Сечин А.А. Электробезопасность. Исследование действия защитного отключения. Методические указания для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Электробезопасность» для студентов направлений: 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и 140200 – «Электроэнергетика» – Томск: изд. ТПУ, 2009, – 16 с.
9. Монаков В.К. УЗО. Теория и практика. – М.: ЗАО «Энергосервис», 1997. – 368 с.
10. http://promin.in.ua/produkcija_novatek-elektro/ustrojstva_zashiti_asinhronnih_elektrovdigatelej.html
11. Стандарт IEC 60947-4-14.7.3. Low-voltage switchgear and controlgear. 2009. – 176 с.

Лабораторная работа №8

СБОРКА И ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРОСХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕВЕРСИВНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОМОЩЬЮ КНОПОЧНОГО ПОСТА И МИКРОПРОЦЕССОРНОГО МОНИТОРА ТОКА

8.1. Цель работы

Собрать и исследовать работу схемы шкафа для реверсивного управления асинхронным двигателем с помощью микропроцессорного монитора тока.

8.2. Оборудование стенда (перечень аппаратуры)

Аппаратная часть выполнена в виде настольного комплекта и содержит [1]:

- шкаф управления, включающий соответствующий набор аппаратуры;
- трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- аксессуары.

Питание комплекса осуществляется от трехфазной электрической сети напряжением 380 В с нейтральным и защитным проводниками.

Параметры стенда:

- Потребляемая мощность, не более, Вт.....200;
- Габариты шкафа (длина / ширина / высота), мм.....600×430×510;
- Габариты электродвигателя (длина / ширина / высота), мм.....260×160×250;
- Масса, не более, кг.....30.

8.2.1. Назначения и описания функциональных блоков

Перечень и назначение функциональных узлов приведены на блок-схеме (рис. 8.1) и принципиальной электрической схеме (рис. 8.2.)

- Трехфазный источник питания (GA). Предназначен для питания комплекта трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.

- Автоматический трехполюсный выключатель (QA). Предназначен для ручного или дистанционного / автоматического включения / отключения электрических цепей в аварийной ситуации.

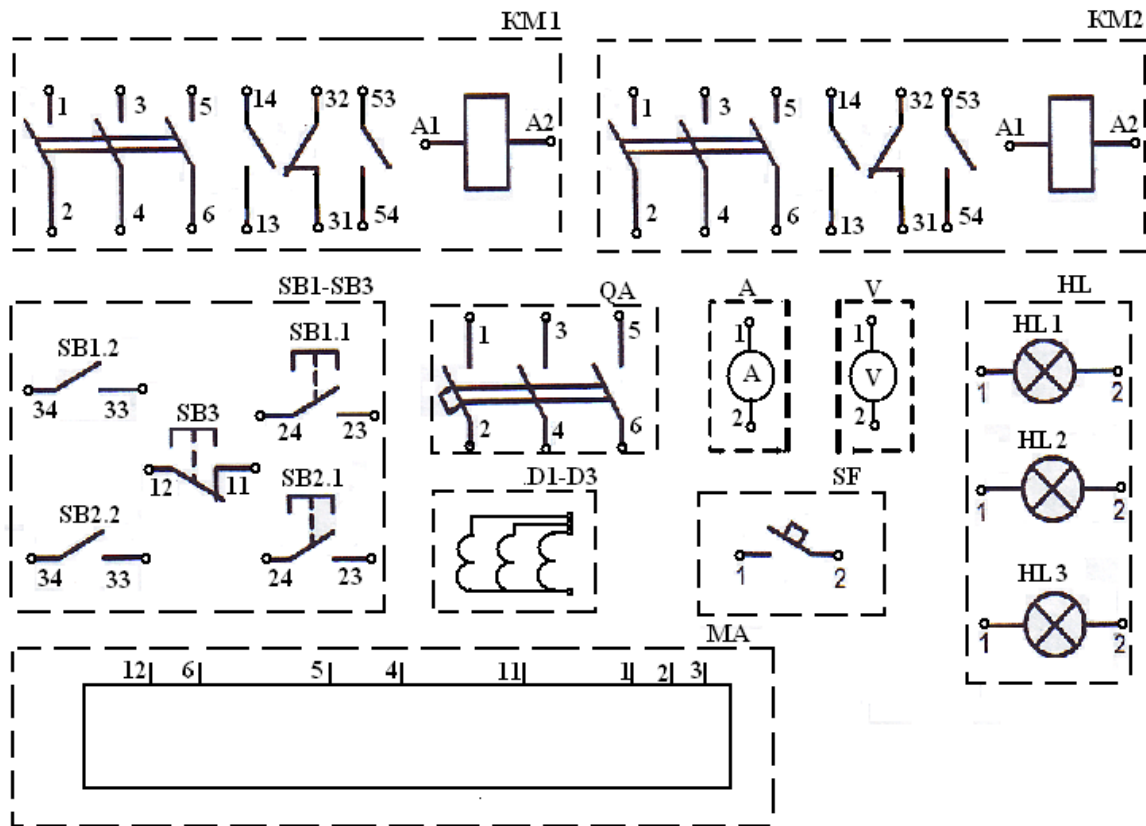


Рис. 8.1. Блок-схема лабораторного стенда

- Автоматический однополюсный выключатель (SF). Предназначен для замыкания размыкания реле KM1 и KM2 в случае аварийного режима.
- Микропроцессорный монитор тока двигателя (МА). Предназначен для программирования параметров электропривода, управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.
- Контакторы (KM1-KM2). Предназначены для управления асинхронным двигателем: пуск, останов и реверс.
- Кнопочная станция (SB). Предназначена для управления контакторами KM1 и KM2 (в режимах пуска, останова и реверса двигателя).
- Блок мультиметров (BM), состоящий из амперметра (A) и вольтметра (V). Предназначен для получения и отображения величины напряжения и силы тока в силовой цепи.
- Сигнальный (индикаторный) блок (HL). Предназначен для визуального наблюдения о готовности электропривода к работе.

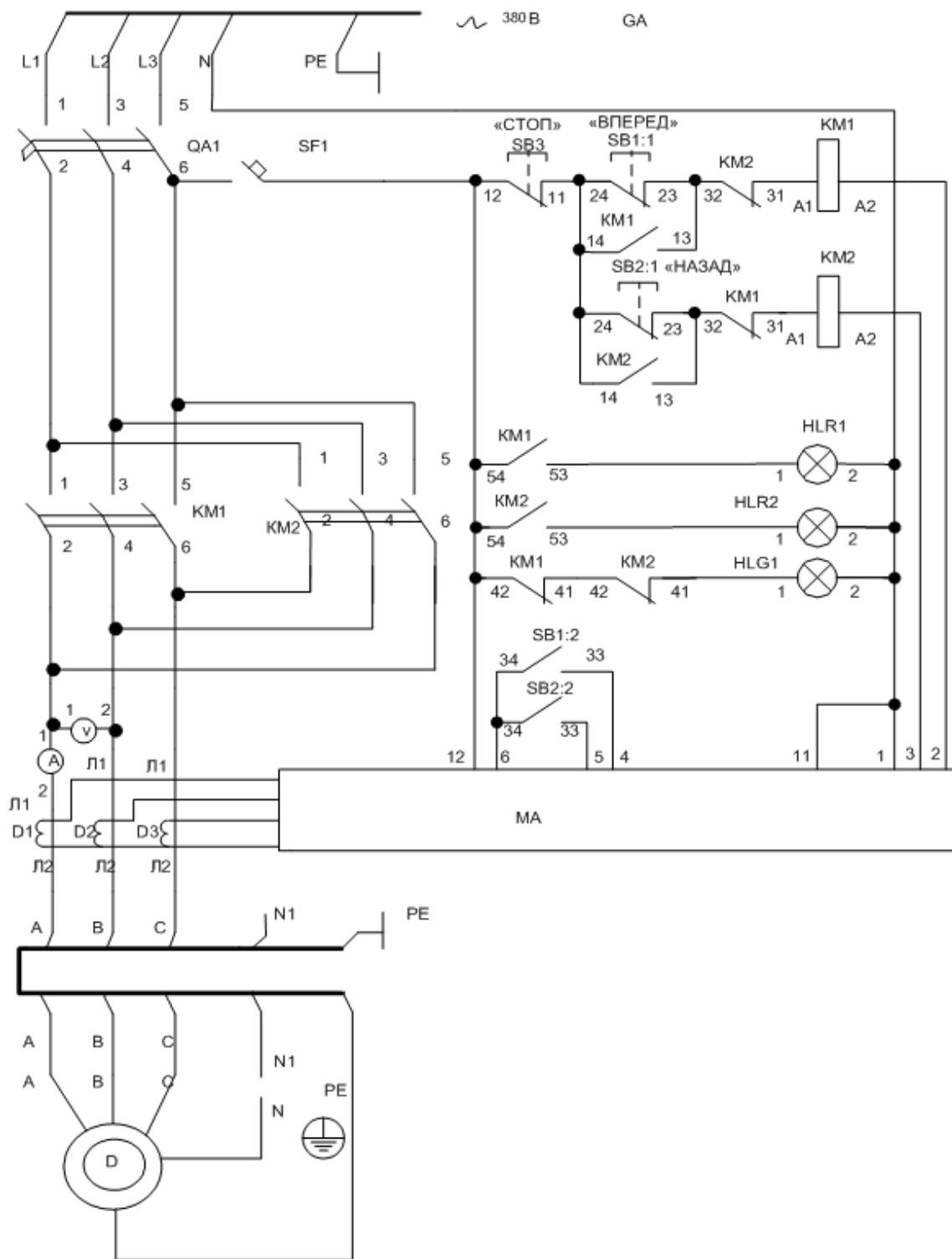


Рис. 8.2. Принципиальная схема электропривода

- Исследуемая машина переменного тока (D, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором):

$$P_H = 120 \text{ Вт}; U_H = \sim 380 \text{ В}; n_H = 1500 \text{ об/мин.}$$

8.2.2. Обозначения и параметры исследуемой аппаратуры

Обозначение и параметры изучаемой схемы приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Обозначение	Наименование	Параметры
D	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	120 Вт / ~ 380 В / 1500 мин ⁻¹
QA	Автоматический трехполюсный выключатель	~ 380 В / 10 А
SF	Автоматический однополюсный выключатель	~ 230 В / 0,5 А
KM1, KM2	Контакты	~ 380 В / 10 А
D1...D3	Датчики тока	0...2,5 А
MA	Микропроцессорный монитор тока двигателя	~ 380 В / 2,5 А
SB1...SB3	Кнопка	~ 380 В / 10 А
HL1,HL2,HL3	Лампа индикаторная	~ 220 В
V	Вольтметр	~ 0...500 В
A	Амперметр	~ 0...2 А

8.3. Общие сведения

8.3.1. Режимы работы АД

В зависимости от характера изменения нагрузки различают четыре основных номинальных режима работы АД: продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный и смешанный. Основной характеристикой нагрузочных режимов является тепловая характеристика электродвигателя. Работа АД всегда сопровождается его нагревом, что обусловлено происходящими в нем процессами и потерями энергии. Нормативный срок службы электродвигателя определяется, в конечном счете, допустимой температурой нагрева его изоляции. В современных двигателях применяется несколько классов изоляции, допустимая температура нагрева которых составляет для класса А – 105° С, Е – 120° С, В – 130° С, F – 155° С, Н – 180° С, С свыше 180° С. Превышение допустимой температуры ведет к преждевременному разрушению изоляции и существенному сокращению срока его службы.

В эксплуатации, в основном, приходится сталкиваться с режимами, ненормированными ГОСТами. Наиболее характерным является режим с быстроизменяющейся нагрузкой, когда двигатель периодически входит в

режим перегрузки, возвращаясь затем на номинальный режим или опускаясь в режим работы с нагрузкой меньше номинальной. Если машина работает в продолжительном режиме, но с переменной нагрузкой ($P_1, P_2, P_3 \dots$), имеет место неустановившийся тепловой процесс (рис. 8.3), т. к. в разные промежутки времени: t_1, t_2, t_3, t_4 и т. д. в ней возникают различные потери мощности, а следовательно, различные тепловые потери. Для эффективного контроля количества тепла, накопленного двигателем в процессе работы, необходимо выяснить законы нагрева и охлаждения асинхронного электродвигателя.

Снижение сопротивления изоляции. В процессе эксплуатации АД его изоляция неизбежно «старееет». Основными причинами, вызывающими эти процессы являются: нагрев обмоток рабочими и пусковыми токами, токами короткого замыкания и перегруза, теплотой от посторонних источников; динамическими усилиями, возникающими при взаимодействии проводников с током, коммутационными перенапряжениями. На состояние изоляции большое влияние оказывают также условия окружающей среды – температура и влажность воздуха, загрязненность и запыленность.

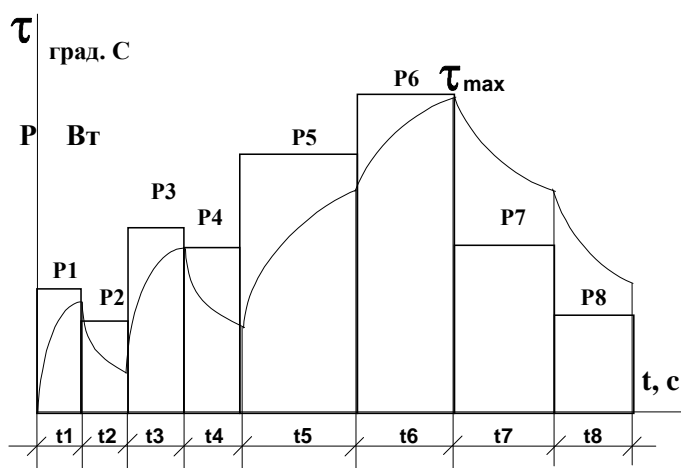


Рис. 8.3. Кривая изменения температуры двигателя при увеличении нагрузки

Состояние изоляции определяет степень безопасной эксплуатации электроустановок. Электродвигатель допускается эксплуатировать, если сопротивление его изоляции на корпус не менее 0,5 Ом. Вероятность пробоя изоляции возрастает на порядок, если сопротивление изоляции в два раза меньше допустимого. При снижении сопротивления изоляции высока вероятность появления такой тяжелой аварии АД, как пробой обмотки статора на корпус (короткое замыкание на корпус), опасной не только для самого электродвигателя, но и для обслуживающего персонала.

По сети начинают протекать токи короткого замыкания в 10...100 раз превышающие номинальные, а на корпус электроустановки может быть вынесено высокое напряжение, опасное для жизни человека. Не менее важным является непрерывный контроль сопротивления изоляции обмоток статора во время работы электродвигателя, т. к. диэлектрические свойства изоляции, измеренные до включения АД, могут внезапно измениться под воздействием электрического напряжения и температуры. Для этого используется измерение тока утечки на «землю» с помощью дифференциального трансформатора тока, реагирующего на появление дифференциального (разностного) тока выше некоторой уставки, заданной пользователем.

8.3.2. Аварии асинхронных двигателей

К повреждениям, возникающим в обмотке статора электродвигателей переменного тока, относятся многофазные короткие замыкания, однофазные повреждения на землю и замыкания между витками одной фазы. [7]

Многофазные короткие замыкания всегда сопровождаются значительным возрастанием тока в поврежденном электродвигателе и понижением напряжения в питающей сети. Такие повреждения опасны не только для электродвигателя, но и для других неповрежденных электроприемников, поэтому на электродвигателях предусматривается быстродействующая защита от многофазных коротких замыканий в его обмотках и соединениях с коммутационным аппаратом, действующая на отключение.

Однофазное повреждение на землю в обмотке статора определяется режимом заземления нейтралей в питающей сети. Если нейтрали глухо заземлены, что обычно характерно для четырехпроводных сетей напряжением до 1 кВ, то ток однофазного короткого замыкания представляет опасность для поврежденного электродвигателя, поэтому и при таких повреждениях электродвигатель должен отключаться защитой без выдержки времени.

Витковые замыкания в обмотке опасны для электродвигателя в связи с тем, что наведенные в замкнутых витках токи могут намного превышать номинальный ток. При этом из-за теплоты, выделяемой в замкнутых витках, происходит повышенный нагрев магнитопровода и неповрежденной части обмотки и, как следствие, дальнейшее разрушение изоляции. Ток в неподвижной части обмотки при витковых замыканиях изменяется незначительно, поэтому защиты, включенные на полные токи

фаз, не могут использоваться для действия при таких повреждениях. Для этого в случае необходимости рекомендуется применять фильтровую защиту.

Ненормальные режимы работы и защита от них. Все учитываемые ненормальные режимы работы электродвигателя сопровождаются прохождением сверхтока в его обмотке. Опасно прежде всего тепловое действие сверхтока, которое определяет допустимые значения и продолжительность прохождения сверхтока. Чем больше кратность k тока перегрузки относительно номинального тока, тем меньше допустимое время перегрузки $t_{пер} = A/(k^2 - 1)$, где A – коэффициент, зависящий от типа и исполнения двигателя.

Асинхронные двигатели напряжением до 1 кВ защищают:

- от многофазных КЗ;
- от перегрузок, если они возможны по условиям эксплуатации;
- от понижения напряжения, если самозапуск двигателей недопустим.

Защиту двигателя от коротких замыканий в сетях с глухозаземленной нейтралью выполняют трехфазной. Защиту двигателя от КЗ выполняют отдельно для каждого двигателя.

Защита двигателя от перегрузки осуществляется токовой, реагирующей на возрастание тока, а так же температурной защитами. Токовая защита выполняется электромеханическими, полупроводниковыми или электротепловыми реле. Защита двигателя от перегрузки должна срабатывать при кратковременных перегрузках, поэтому она имеет выдержку и может действовать на отключение, сигнал или разгрузку механизма двигателя. Защиту от перегрузки устанавливают, когда имеет место технологическая перегрузка. Защита выполняется с помощью тепловых расцепителей или электротепловых реле автоматических выключателей.

Аппаратом защиты минимального напряжения является магнитный пускатель, так при напряжении менее $0,7U_n$ он автоматически отключается, и включить его можно только с помощью схем управления при восстановлении напряжения сети.

Сверхтоки технологической перегрузки. В условиях эксплуатации некоторые электродвигатели перегружаются приводимыми в движение механизмами. При недопустимой длительности перегрузки электродвигатель должен быть разгружен. Технологические перегрузки могут устраняться автоматически или обслуживающим персоналом без остановки механизма или только после его остановки, поэтому защита от

перегрузки имеет выдержку времени и может выполняться с действием на автоматическую разгрузку механизма, на сигнал или на отключение электродвигателя.

Сверхтоки при понижении напряжения. Момент вращения $M_{вр}$ электродвигателя зависит от напряжения U_c на его выводах. Так, для асинхронного электродвигателя $M_{вр}=kU_c^2$, поэтому понижение напряжения U_c , например при коротком замыкании в питающей сети, приводит к снижению момента вращения и уменьшению числа оборотов электродвигателя. Он может даже остановиться, если вращающий момент станет меньше противодействующего момента механизма. Последующее восстановление нормальной работы (самозапуск) при возрастании напряжения после отключения короткого замыкания сопровождается прохождением по обмоткам сверхтоков самозапуска. Токи самозапуска для большинства двигателей опасности не представляют, однако при кратковременном самозапуске многих электродвигателей, подключенных к одной и той же сети, в ряде случаев начальное значение восстанавливающегося напряжения оказывается $U_{ост.сзп} < 0,55U_n$, что затрудняет восстановление нормальной работы.

Сверхтоки при обрыве фазы. Сверхтоки, вызываемые обрывом фазы, наиболее часто возникают при защите электродвигателя или его питающей сети плавкими предохранителями. При этом вращающий момент уменьшается. Поведение работающего электродвигателя после обрыва фазы зависит от противодействующего момента механизма. Если к сети с оборванной фазой подключается неподвижный электродвигатель, то, поскольку он развернуться не может, по его обмотке будет длительно проходить опасный для него начальный пусковой ток. Перегорание предохранителя в одной фазе или нарушение контакта в одном полюсе коммутационного аппарата при правильном выборе предохранителей и высокой культуре эксплуатации электрооборудования происходит очень редко. Поэтому обычно специальная защита от работы электродвигателя на двух фазах не устанавливается, а ее функции выполняют другие защиты от перегрузок.

Наиболее универсальной защитой электродвигателей напряжением до 1 кВ от всех ненормальных режимов, сопровождающихся возрастанием тока и в связи с этим интенсивным нагревом электродвигателя, является встроенная температурная защита.

В условиях эксплуатации электроустановок не исключается опасность случайных прикосновений человека к токоведущим и нетокковедущим частям, находящимся под напряжением, и поражения его

электрическим током. В сетях с заземленной нейтралью ток повреждения значительно выше чем, безопасный для человека. Поэтому сети напряжением до 1 кВ выполняются с изолированной или компенсированной нейтралью и снабжаются устройствами защитного отключения.

8.3.3. Методы защиты от аварийных режимов

Стремясь защитить двигатели от аварийных режимов в энергетике стали применять различную релейную защиту: тепловую, токовую, температурную, фильтровую и комбинированную. Многолетний опыт эксплуатации АД показал, что большинство существующих защит не обеспечивают безаварийную работу исследуемого двигателя. Так, например, тепловые реле рассчитывают на длительную перегрузку 25...30% от номинальной. Но, чаще всего, они срабатывают при обрыве одной фазы и величине нагрузки равной 60% от номинальной. При меньшей нагрузке реле не срабатывает и АД продолжает работать на двух фазах и выходит из строя в результате перегрева изоляции обмоток. Правильный выбор защитного устройства – это важный фактор в обеспечении безопасной эксплуатации асинхронного двигателя.

Приборы защиты асинхронных двигателей от аварийных режимов можно разделить на несколько видов:

- тепловые: тепловые реле, расцепители;
- токозависимые: плавкие предохранители, автоматы;
- термочувствительные: термисторы, термостаты;
- защита от аварий в электросети: реле напряжения и контроля фаз, мониторы сети;
- приборы МТЗ (максимальной токовой защиты), электронные токовые реле;
- комбинированные устройства защиты.

Современные стандарты большинства стран мира, включая и Россию, предъявляют все более высокие требования к безопасной эксплуатации асинхронных электродвигателей. Высокие показатели надежности и долговечности АД возможны только при условии их эксплуатации с номинальными или близкими к ним режимами, что можно обеспечить только установкой надлежащей защиты. Все из перечисленных защитных устройств служат для быстрого, в течении доли секунды, определения характера и степени повреждения двигателя и локализации аварийного участка путем отключения его от остальной схемы электроснабжения. Но, вместе с тем, каждое из них имеет и целый ряд существенных недостатков,

влияющих на качество их работы: одни отличаются неоправданной избирательностью, у других отсутствует отстройка от процесса пуска, третьи не реагируют на токи КЗ или перегруза и т. д. Для того, чтобы правильно выбрать защитное устройство, необходимо знать, как и от каких аварий защищает конкретное устройство, принцип их действия и конструктивные особенности.

Автоматические выключатели (автоматы) предназначены для включения и отключения асинхронных электродвигателей и других приемников электроэнергии, а также для защиты их от токов перегрузки и короткого замыкания [3].

Автоматы совмещают в себе функцию рубильника, предохранителя и теплового реле. Обеспечивают одновременное отключение всех трех фаз в случае возникновения аварийных ситуаций. В рабочем режиме включение и отключение производится вручную; в аварийном режиме он отключается автоматически электромагнитным или тепловым расцепителем.

Важной составной частью автомата является расцепитель, который контролирует заданный параметр защищаемой сети и воздействует на расцепляющее устройство, отключающее автомат. Наибольшее распространение получили расцепители следующих типов: электромагнитные, для защиты от токов короткого замыкания; тепловые для защиты от перегрузок; комбинированные.

Электромагнитный расцепитель состоит из катушки с подвижным сердечником и возвратной пружины. При протекании по катушке тока короткого замыкания сердечник мгновенно втягивается и воздействует на отключающую рейку механизма свободного расцепления.

Тепловой расцепитель представляет собой биметаллическую пластину, соединенную последовательно с контактом. При нагревании ее током перегрузки она изгибается и воздействует на отключающую рейку механизма свободного расцепления с обратозависимой выдержкой времени.

Выбор автоматических выключателей производится по номинальному току, характеристике срабатывания, отключающей способности, условиям монтажа и эксплуатации. Правильный выбор характеристики автоматического выключателя является залогом его своевременного срабатывания.

Специально для защиты электродвигателей были разработаны так называемые мотор-автоматы. В отличие от стандартного автомата, мотор-автоматы имеют целый ряд особенностей:

- номинальный ток электромагнитного расцепителя составляет $(12...14)I_{нр}$, что соответствует режиму работы на индуктивную нагрузку (АС-3);

- высокую электродинамическую стойкость до 100 кА;
- рычаг или кнопки управления электроприводом на корпусе;
- встроенные или навесные быстромонтируемые дополнительные контакты, срабатывающие при перегрузках или КЗ.

Разнесение функций защитных устройств на несколько независимых устройств создает массу неудобств при монтаже и эксплуатации. Каждое из них не обладает универсальностью и подходит только к конкретному автоматическому выключателю. Поэтому перед разработчиками остро встала проблема создания универсального устройства.

Последние поколения автоматических выключателей снабжены т.н. электронными расцепителями, осуществляющими комплексную защиту электродвигателя и объединяющими в одном устройстве функции всех вышеперечисленных расцепителей. Они выполнены на базе микропроцессорной техники, гарантируют высокую точность срабатывания, надежность и устойчивость к температурным режимам. Электропитание, необходимое для правильной работы, обеспечивается непосредственно трансформаторами тока расцепителя. Защитные расцепители состоят из трех или четырех трансформаторов тока (в зависимости от типа сети), электронного блока и механизма расцепления, который воздействует непосредственно на механизм выключателя. Для управления магнитным пускателем дополнительно потребуется вспомогательный блок управления, позволяющий управлять контактором в случае аварии (за исключением короткого замыкания).

С помощью DIP-переключателей, размещенных на передней панели устройства или с помощью специального электронного блока настройки, программируется определенный набор параметров и функций расцепителя. Кривая срабатывания выключателя (рис. 8.4), максимально приближенная к рабочей характеристике АД, определяет следующие параметры:

- функция L – защита от перегрузки с обратозависимой выдержкой по времени и характеристикой срабатывания согласно обратозависимой кривой ($I_{2t}=\text{Const}$);
- функция R – защита от заклинивания ротора с определенным временем задержки срабатывания;
- функция I – защита от короткого замыкания с мгновенным срабатыванием;

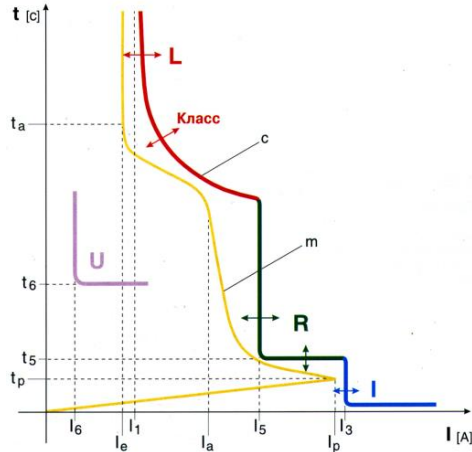


Рис. 8.4. Кривая срабатывания выключателя

- функция U – защита от перекоса или обрыва фазы с определенным временем задержки срабатывания. На характеристике: I_1 – порог срабатывания по току для функции L; I_3 – порог срабатывания по току для функции I; I_5 – порог срабатывания по току для функции R; t_5 – порог срабатывания по времени для функции R; I_6 – порог срабатывания по току для функции U; t_6 – порог срабатывания по времени для функции U; I_e – номинальный рабочий ток электродвигателя; I_a – пусковой ток электродвигателя; I_p – пиковое значение пускового тока; t_a – время пуска электродвигателя; t_p – время нарастания пускового тока до I_p ; m – типовая кривая пуска электродвигателя; c – пример кривой срабатывания автоматического выключателя с электронным расцепителем; Класс – класс пуска электродвигателя, определяющий время срабатывания для защиты от перегрузки согласно стандарта IEC 60947-4-14.7.3.

Автоматические выключатели, оснащенные электронными расцепителями, обеспечивают достаточную защиту двигателя от перегрузки при работе в нормальном режиме с малым количеством включений, недолгими запусками и умеренными пусковыми токами. Режим тепловой памяти, позволяющий вычислять температуру двигателя при отключении, возможен только при наличии дополнительного источника питания. Эти выключатели совершенно неэффективны при работе в старт-стопном режиме (> 60 вкл./ч) и при тяжелом запуске. Если тепловые постоянные времени электродвигателя и электронного расцепителя не совпадают, то при настройке на номинальный ток двигателя, автоматический выключатель может сработать слишком рано или не распознать режим перегрузки. Ограничение рабочих циклов автоматического выключателя (количества включений-отключений),

влечет за собой использование в таких схемах контактора, имеющего большее количество циклов коммутации и лучшую коммутирующую способность. Но для подключения к нему расцепителя потребуются вспомогательный блок управления. Дополнительные (вспомогательные) устройства необходимы также для настройки и тестирования блока, что приводит к значительному удорожанию устройства и усложнению режима его эксплуатации.

Термочувствительные защитные устройства: термисторы, термостаты.

Термочувствительные защитные устройства относятся к встраиваемой тепловой защите электродвигателя. Располагаются в специально предусмотренных для этой цели гнездах в лобовых частях электродвигателя (защита от заклинивания ротора) или в обмотках электродвигателя (защита от теплового перегруза). В основном их можно разделить на два типа: термисторы – полупроводниковые резисторы, изменяющие свое сопротивление в зависимости от температуры и термостаты – биметаллические выключатели, срабатывающие при достижении некоторой критической температуры.

Термисторы в основном делятся на два класса: РТС типа – полупроводниковые резисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления и NTC типа – полупроводниковые резисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Для защиты электродвигателей используются в основном РТС термисторы (позисторы), обладающие свойством резко увеличивать свое сопротивление, когда достигнута некоторая характеристическая температура T_{Ref} . Применительно к двигателю, это максимально допустимая температура нагрева обмоток статора для данного класса изоляции. Три (для двухобмоточных двигателей шесть) РТС-термистора соединены последовательно и подключены ко входу электронного блока защиты. Блок настроен таким образом, что при превышении суммарного сопротивления цепочки срабатывает контакт выходного реле, управляющий расцепителем автомата или катушкой магнитного пускателя. Термисторная защита предпочтительней в тех случаях, когда по току невозможно определить с достаточной точностью температуру двигателя. Это касается, прежде всего, двигателей с продолжительным периодом запуска, частыми операциями включения и отключения (повторно-кратковременный режим) или двигателей с регулируемым числом оборотов (при помощи преобразователей частоты). Термисторная

защита эффективна также при сильном загрязнении двигателей или выходе из строя системы принудительного охлаждения.

Недостатками данного вида защиты является то, что с датчиками выпускаются далеко не все типы двигателей. Это особенно касается двигателей отечественного производства. Датчики могут устанавливаться только в условиях стационарных мастерских. Температурная характеристика термистора достаточно инерционна и сильно зависит от температуры окружающей среды и от условий эксплуатации самого двигателя. Они требуют наличия специального электронного блока: термисторного устройства защиты двигателей, теплового или электронного реле перегрузки, в которых находятся блоки настройки и регулировки, а также выходные электромагнитные реле, служащее для отключения катушки пускателя или электромагнитного расцепителя.

Для более оперативного реагирования на сверхнормативные повышения температуры обмотки статора, в корпус двигателя встраивают биметаллические выключатели (термостаты).

Термостаты, их иногда еще называют реле температуры, представляют из себя биметаллические регуляторы, работающие по принципу температурной отсечки. Принцип работы термостата основан на температурной деформации металла с различным коэффициентом теплового расширения. Состоят из неподвижных контактных пластин, закрепленных в корпусе, биметаллической мембраны, изгибающейся в зависимости от температуры и подвижной контактной группы, прикрепленной к ней стержнем. Для защиты двигателей обычно используются три (по одному на каждую обмотку) нормально замкнутых термостата, включенных последовательно и подключенных непосредственно к схеме управления двигателем. При превышении критической температуры обмотки они мгновенно разрывают свою цепь, что приводит к отключению двигателя.

Большинство из описанных защитных устройств, работающих по принципу измерения прямого или косвенного теплового действия тока, очень плохо реагируют на аварии, связанные с авариями сетевого напряжения. Для защиты от такого вида аварий используют реле напряжения и контроля фаз.

Реле напряжения и контроля фаз (мониторы напряжения).

Предназначены для постоянного контроля параметров сетевого напряжения и управления трехфазными электроустановками в т. ч. АД, путем отключения их от электрической сети в случае наступления аварийных режимов: недопустимых перепадов напряжения (скачки и

провалы напряжения); обрывы, слипания, перекосы, нарушения последовательности фаз и последующего автоматического повторного включения электродвигателя после возвращения параметров сети в норму, если иное не предусмотрено технологическим процессом.

Как показывает статистика, до 80% аварий электродвигателя, напрямую или косвенно связаны именно с авариями сетевого напряжения. Для защиты АД наиболее целесообразно применение т. н. мониторов напряжения, контролирующих несколько видов сетевых аварий.

Большинство из присутствующих на рынке реле напряжения, не обладают указанной универсальностью. Одни из них контролируют только обрыв фаз, другие превышение или понижение напряжения, третьи перекося фаз и т.д. Это приводит к необходимости использования нескольких аналогичных реле одновременно, что неоправданно усложняет и удорожает схему, приводит к повышенному энергопотреблению и тепловыделению, уменьшает надежность.

По схемотехнике данный класс реле условно можно разделить на две группы: аналоговые и цифровые. О преимуществах цифровой техники перед аналоговой сказано достаточно много. Отметим только, что характеристики аналоговых реле напряжения очень сильно зависят от параметров самого измеряемого напряжения и температуры окружающей среды. Их отличает низкая надежность, большие габариты и повышенное энергопотребление, работа по пиковым значениям напряжения, т. к. средствами аналоговой техники практически невозможно вычислить действующее значение напряжения.

Микропроцессорные мониторы напряжения способны в одном малогабаритном устройстве совместить большинство функций, производят работу по действующему значению напряжения, различают виды аварий, имеют множество регулируемых и настраиваемых параметров. Специально для защиты АД у лучших образцов реле имеется независимая регулируемая (или «защитая») уставка по минимальному напряжению для отстройки от пусковых посадок. Совмещать эту уставку с временем реакции (срабатывания) реле недопустимо, т.к. точно с такой же задержкой реле будет реагировать и на тяжелые аварии, такие как обрыв фаз или сильный перекося. Такие мониторы имеют регулировку автоматического повторного включения в широких пределах (для управления оборудованием с длительными переходными процессами), а также возможность контроля контактов магнитного пускателя. Последняя функция наиболее актуальна для мощных двигателей или для двигателей,

работающих в старт-стопном режиме (например, для электродвигателей компрессоров).

8.3.4. Принцип действия и виды устройства защитного отключения

Защитное отключение – быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения током [8].

Такая опасность может возникнуть при замыкании фазы на корпус электрооборудования; при снижении сопротивления изоляции фаз относительно земли ниже определенного предела; появлении в сети более высокого напряжения; прикосновении человека к токоведущей части, находящейся под напряжением. В этих случаях в сети происходит изменение некоторых электрических параметров: например, могут изменяться напряжение нулевой последовательности и др. Любой из этих параметров, а точнее говоря – изменение его до определенного предела, при котором возникает опасность поражения человека током, может служить импульсом, вызывающим срабатывание защитно-отключающего устройства, т.е. автоматического отключения опасного участка сети.

Основными частями устройства защитного отключения (УЗО) являются прибор защитного отключения и автоматический выключатель.

Прибор защитного отключения – совокупность отдельных элементов, которые реагируют на изменение какого-либо параметра электрической сети и дают сигнал на отключение автоматического выключателя. Этими элементами являются:

- датчик – устройство, воспринимающее изменение параметра и преобразующее его в соответствующий сигнал (обычно датчиками служат реле соответствующего типа);
- усилитель, предназначенный для усиления сигнала датчика;
- цепи контроля, служащие для периодической проверки исправности схемы защитно-отключающего устройства;
- вспомогательные элементы – сигнальные лампы, измерительные приборы, характеризующие состояние установки, и т.п.

УЗО в зависимости от параметра, на который оно реагирует, можно отнести к тому или иному типу, в том числе к типам устройств, реагирующих на напряжение корпуса относительно земляного контура,

ток замыкания на землю, напряжение фазы относительно земли, напряжение нулевой последовательности, оперативный ток и др.

Назначение защитного отключения.

Назначение защитного отключения заключается в том, чтобы одним прибором осуществить совокупность защиты либо некоторые из следующих её видов:

- от однофазных замыканий на землю или элементы оборудования, нормально изолированные от напряжения;
- от не полных замыканий, когда снижение изоляции одной из фаз создает опасность поражения человека;
- от поражения при прикосновении человека к одной из фаз эл. оборудования, если прикосновение произошло в зоне действия защиты прибора.

Функционально УЗО можно определить как быстродействующий защитный выключатель, реагирующий на разницу токов в проводниках, подводящих электроэнергию к защищаемой электроустановке.

Опасность поражения человека электрическим током появляется не только при случайных прикосновениях человека к токоведущим частям, но и при снижении сопротивления изоляции, неисправности заземления и самого устройства защитного отключения.

УЗО применяют в электроустановках до 1000 В:

- в передвижных эл.установках с изолированной нейтралью (особенно если затруднительно создание заземляющего устройства, может применяться как в виде самостоятельной защиты, так и в сочетании с заземлением);
- в стационарных эл.установках с изолированной нейтралью для защиты ручных электрических машин в качестве единственной защиты, и в дополнение к другим;
- в условиях повышенной опасности поражения током и взрывоопасности в стационарных и передвижных эл.установках с различными режимами нейтрали;
- в стационарных эл.установках с глухозаземленной нейтралью на отдельных удаленных потребителях эл.энергии и потребителя большой номинальной мощности, на которых защита занулением не достаточно эффективна.

Для защиты от поражения электрическим током в нормальном режиме должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты от прямого прикосновения:

- основная изоляция токоведущих частей;
- ограждения и оболочки;
- установка барьеров;
- размещение вне зоны досягаемости;
- применение сверхнизкого напряжения.

Для дополнительной защиты от прямого прикосновения в электроустановках напряжением до 1 кВ, следует применять УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не более 30 мА.

При выполнении автоматического отключения питания в электроустановках до 1 кВ все открытые проводящие части должны быть присоединены к глухозаземленной нейтральной точке источника питания, если применена система TN, и заземлены, если применены системы IT и TT. При этом характеристики и параметры защитных аппаратов и проводников должны быть согласованы, чтобы обеспечивалось нормированное время отключения поврежденной цепи с защитно-коммутационным аппаратом в соответствии с номинальным фазным напряжением питающей сети.

В системе TN время автоматического отключения питания не должно превышать значений, указанных в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Наибольшее время защитного отключения для системы TN

Номинальное фазное напряжение, В	Время отключения, с
127	0,8
220	0,4
380	0,2
Более 380	0,1

Приведенные значения времени отключения считаются достаточными для обеспечения электробезопасности, в том числе в групповых цепях, питающих передвижные и переносные электроприемники и ручной электроинструмент. В цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и др. щиты и щитки, время отключения не должно превышать 5 с. Также допускается применение УЗО, реагирующих на дифференциальный ток.

В системе IT время защитного отключения питания при двойной замыкании на открытые проводящие части должно соответствовать табл. 8.3.

Таблица 8.3

Наибольшее время отключения для системы IT

Номинальное фазное напряжение, В	Время отключения, с
220	0,8
380	0,4
660	0,2
Более 660	0,1

При выполнении мер защиты в электроустановках напряжением до 1 кВ классы применяемого электрооборудования по способу защиты человека от поражения электрическим током по ГОСТ 12.2.007.0 «ССБТ. Изделия электротехнические» [10].

В случае питания передвижной электроустановки от стационарного источника питания для защиты при косвенном прикосновении должно быть выполнено автоматическое отключение питания с применением устройства защиты от сверхтоков. При этом время отключения, приведенное в табл. 8.3, должно быть уменьшено вдвое либо дополнительно к устройству защиты от свехтоков должно быть применено устройство защитного отключения, реагирующее на дифференциальный ток. В специальных электроустановках допускается применение УЗО, реагирующих на потенциал корпуса относительно земли. При применении УЗО, реагирующего на потенциал корпуса относительно земли, уставка по значению отключающего напряжения должна быть равной 25 В при времени отключения не более 5 с.

При применении автоматического отключения в системе IT для защиты при косвенном прикосновении должно быть выполнено автоматическое отключение питания, обеспечивающее время отключения при двухфазном замыкании на открытые проводящие части. В табл. 8.4 приведено наибольшее время отключения для системы IT в передвижных электроустановках, питающихся от автономного передвижного источника

Таблица 8.4

Номинальное фазное напряжение, В	Время отключения, с
220	0,4
380	0,2
660	0,06
Более 660	0,02

Типы УЗО.

Существуют различные по техническому исполнению устройства защитного отключения [9]. Ниже приведена классификация УЗО по:

- назначению;

- условию зависимости работоспособности от напряжения;
- положению силовых контактов и сохранению защитных функций при отсутствии напряжения;
- способу установки;
- числу полюсов и токовых путей;
- наличию задержки по времени.

УЗО со встроенной защитой от сверхтоков иногда называют «комбинированными». Практически все фирмы-производители устройств защитного отключения имеют в своей производственной программе УЗО со встроенной защитой от сверхтоков. Как правило, их доля в общем объеме выпускаемых устройств защитного отключения не превышает одного-двух процентов. Это объясняется довольно ограниченной областью их применения – небольшие электроустановки, малая, неизменяемая нагрузка, автономные электроприемники и т.п.

Принципиальное значение при рассмотрении применения различных видов УЗО имеет разделение устройств по условию зависимости от напряжения питания на следующие два типа:

- Устройства защитного отключения, функционально не зависящие от напряжения питания (электромеханические). В таких устройствах источником энергии, необходимой для выполнения защитных функций, включая операцию отключения, является сам сигнал – дифференциальный ток.
- Микропроцессорные защиты, в том числе и токовые, должны удовлетворять основным требованиям, предъявляемым к защитам независимо от их элементной базы. Это – селективность, чувствительность, быстрдействие и надежность. У токовых защит это достигается соответствующим выбором тока срабатывания и выдержки времени. [7]

При выборе тока срабатывания защиты $I_{с.з}$ следует использовать выражения для соответствующих ступеней.

Основным требованием при выборе тока срабатывания защиты является ее несрабатывание на отключение при послеаварийных кратковременных перегрузках, которые могут происходить по разным причинам.

При определении максимально возможного тока линии $I_{з \max}$ необходимо учитывать возможность увеличения тока в защищаемой линии вследствие самозапуска электродвигателей при восстановлении напряжения после отключения короткого замыкания. Ток $I_{з \max}$ обычно

больше длительно существующего максимального рабочего тока $I_{\text{раб max}}$, что учитывается коэффициентом самозапуска $k_{\text{сзп}}=2,5\dots3$.

Согласование выдержек времени защит с независимыми и зависимыми от тока характеристиками рассмотрено в [7]. Аналогично согласуются и выдержки времени третьих ступеней микропроцессорных защит. Особенность заключается в выборе обратнoзависимых от тока временных характеристик.

Выдержки времени у максимальных токовых защит выбирают по ступенчатому принципу: начинают выбор с наиболее удаленного от источника питания элемента и, по мере приближения к источнику питания, увеличивают ее таким образом, что защита последующего участка имеет выдержку времени на ступень селективности больше, чем максимальная выдержка времени защиты предыдущего участка. Для выполнения защиты с ограниченно зависимой характеристикой выдержки времени могут быть использованы реле РТ–80 и РТВ.

Они определяются вычислением времени срабатывания в секундах по соответствующим соотношениям. Характеристики определяются вычислением по следующему алгоритму:

$$t_{\text{с.з}} = k\beta / [(I_{\text{к}}/I_{\text{с.з}})^{\alpha} - 1],$$

где k – временной коэффициент, измеряемый от 0,05 до 1; α и β – коэффициенты, определяющие крутизну характеристик, имеют следующие значения (рис. 8.5): $\alpha = 0,02$, $\beta = 0,14$ (международная инверсная типа L); $\alpha = 1$, $\beta = 120$ (международная инверсная типа N).

УЗО, функционально зависящие от напряжения питания (электронные). В таких устройствах для выполнения операции отключения нужна энергия, получаемая либо от контролируемой сети, либо от внешнего источника.

Принцип действия устройств защитного отключения.

Принцип действия УЗО дифференциального типа (рис. 8.6) основан на применении электромагнитного векторного сумматора токов – дифференциального трансформатора тока [9].

Сравнение текущих значений двух и более токов по амплитуде и фазе наиболее эффективно, т.е. с минимальной погрешностью, осуществляется электромагнитным путем – с помощью дифференциального трансформатора тока.

Важнейшим функциональным блоком УЗО является дифференциальный трансформатор тока 1.

Пороговый элемент (пусковой орган) 2 выполняется на чувствительных магнитоэлектрических реле прямого действия, а в

устройствах, зависимых от напряжения питания – на электронных компонентах.

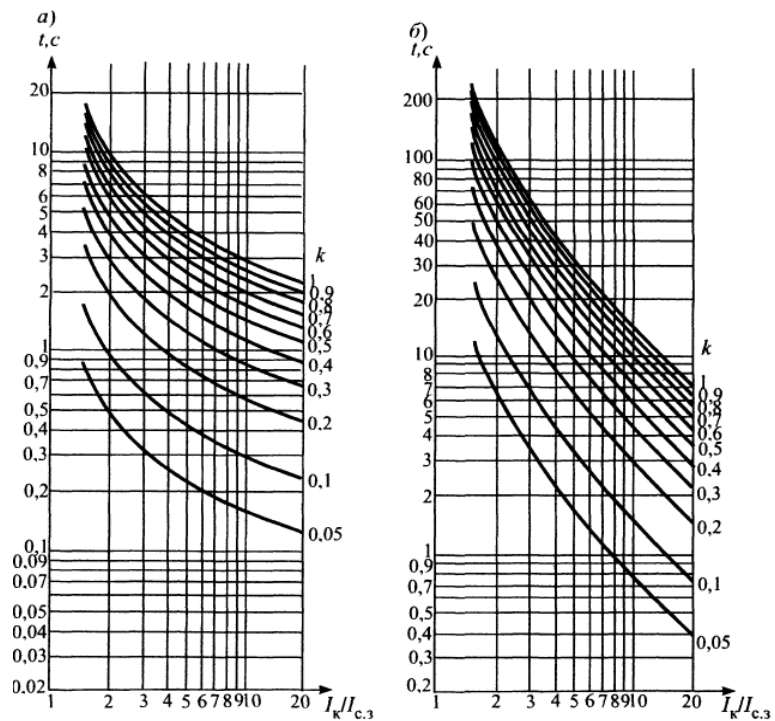


Рис.8.5. Характеристики микропроцессорных токовых защит: а) – $\alpha = 0,02, \beta = 0,14$; б) – $\alpha = 1, \beta = 120$

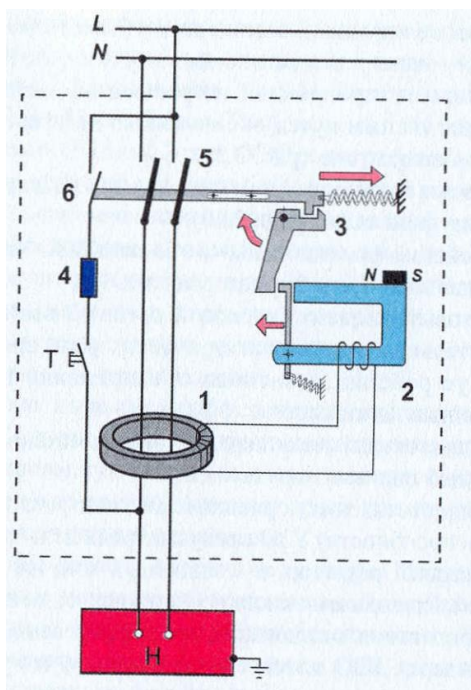


Рис. 8.6. Структурная схема УЗО

Исполнительный механизм состоит из механизма привода 3 с группой контактов 5.

Для осуществления периодического контроля исправности УЗО предусмотрена цепь тестирования (4 – тестовый резистор, 6 – защитный контакт цепи тестирования). При нажатии кнопки «Тест» искусственно создается цепь протекания отключающего дифференциального тока. Срабатывание УЗО в этом случае означает, что устройство в целом исправно. Принцип действия УЗО изображен на рис. 8.7.

Основные нормируемые параметры.

В настоящее время параметры УЗО нормируются следующими стандартами: ГОСТ Р 50807-95, ГОСТ Р 51326.1-99 и ГОСТ Р 51327.1-99 [11, 12, 13].

К основным параметрам относятся:

- номинальное напряжение;
- номинальный ток;
- номинальный отключающий дифференциальный ток;
- номинальный неотключающий дифференциальный ток;
- предельное значение неотключающего сверхтока;
- сверхток;
- номинальная включающая и отключающая способность;
- номинальный условный ток КЗ;
- номинальный условный дифференциальный ток КЗ;
- номинальное время отключения.

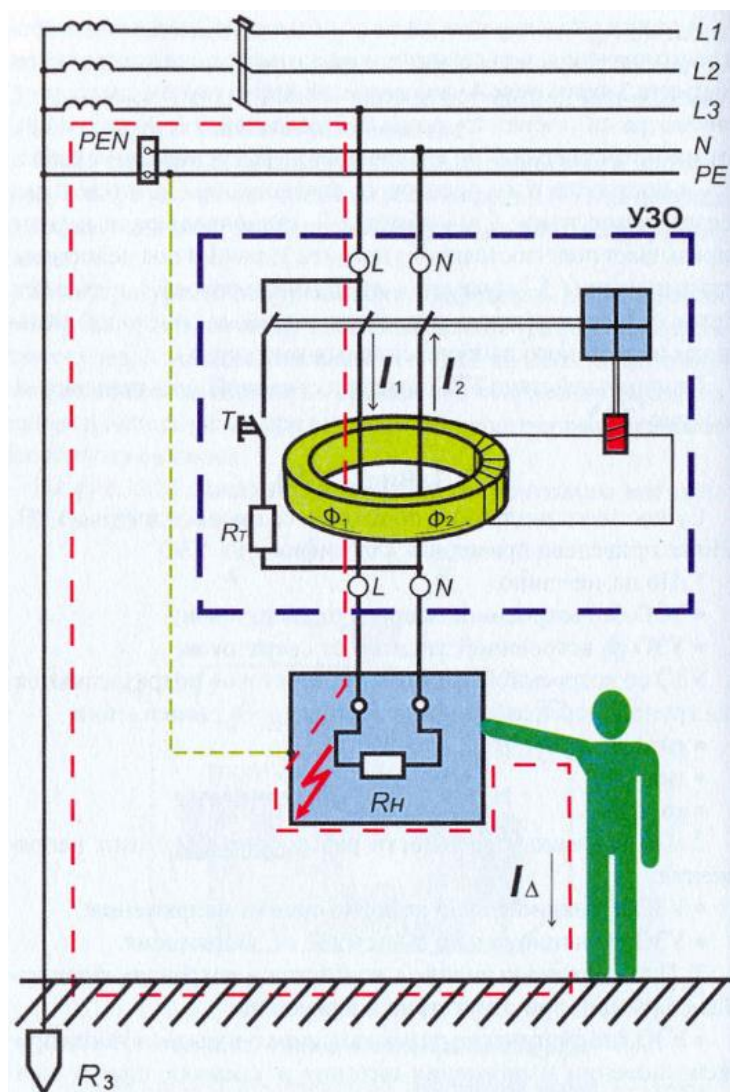


Рис. 8.7. Принцип действия УЗО

8.3.5. Использование устройства защитного отключения с микропроцессорным устройством

В последнее время разработано большое количество структурных схем УЗО с микропроцессорными комплексами, но все они, как правило, базируются на элементной схеме, имеющейся в данной работе. Структурная схема устройства приведена на рис. 8.8 [9].

Устройство предназначено для защиты и автоматики кабельных и воздушных линий, трансформаторов, синхронных и асинхронных двигателей различной мощности, реакторов и других присоединений в сетях напряжением 6...10...35 кВ. Устройство выполняет не только функции защиты и автоматики, но и функции местного дистанционного управления.

Основными достоинствами являются: многофункциональность; местное и дистанционное управление; возможность интегрирования в систему управления верхнего уровня; прием сигналов от внешних устройств с последующим действием на отключение.

К основным блокам относятся:

Блок входных трансформаторов, на вход которого подаются аналоговые входные сигналы от измерительных трансформаторов тока или напряжения защищаемого присоединения. Здесь эти сигналы преобразуются до уровней, необходимых для работы аналого-цифрового преобразователя. Блок обеспечивает также разделение цепей устройства от цепей измерительных трансформаторов.

Измерительный блок выполняется на микропроцессорной элементной базе и имеет независимую систему самоконтроля, которая обеспечивает высокую надежность функционирования блока. Измерительный блок преобразует аналоговые сигналы, поступившие на его вход от блока входных трансформаторов, в последовательность двоичных кодов и сравнивает их со значением уставок. Если сигнал превысит значение уставки, то в регистры памяти записываются параметры аварийного режима и формируется логический сигнал, который поступает на вход управления.

Блок управления выполнен на микропроцессорной элементной базе. Содержит микроЭВМ, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ). Микропроцессорная часть блока осуществляет постоянный контроль состояния этих реле.

Блок выходных реле принимает команды от блока управления и обеспечивает срабатывание реле KL1...KL16.

Блок питания обеспечивает необходимые уровни напряжения питания для функционирования всех блоков устройства.

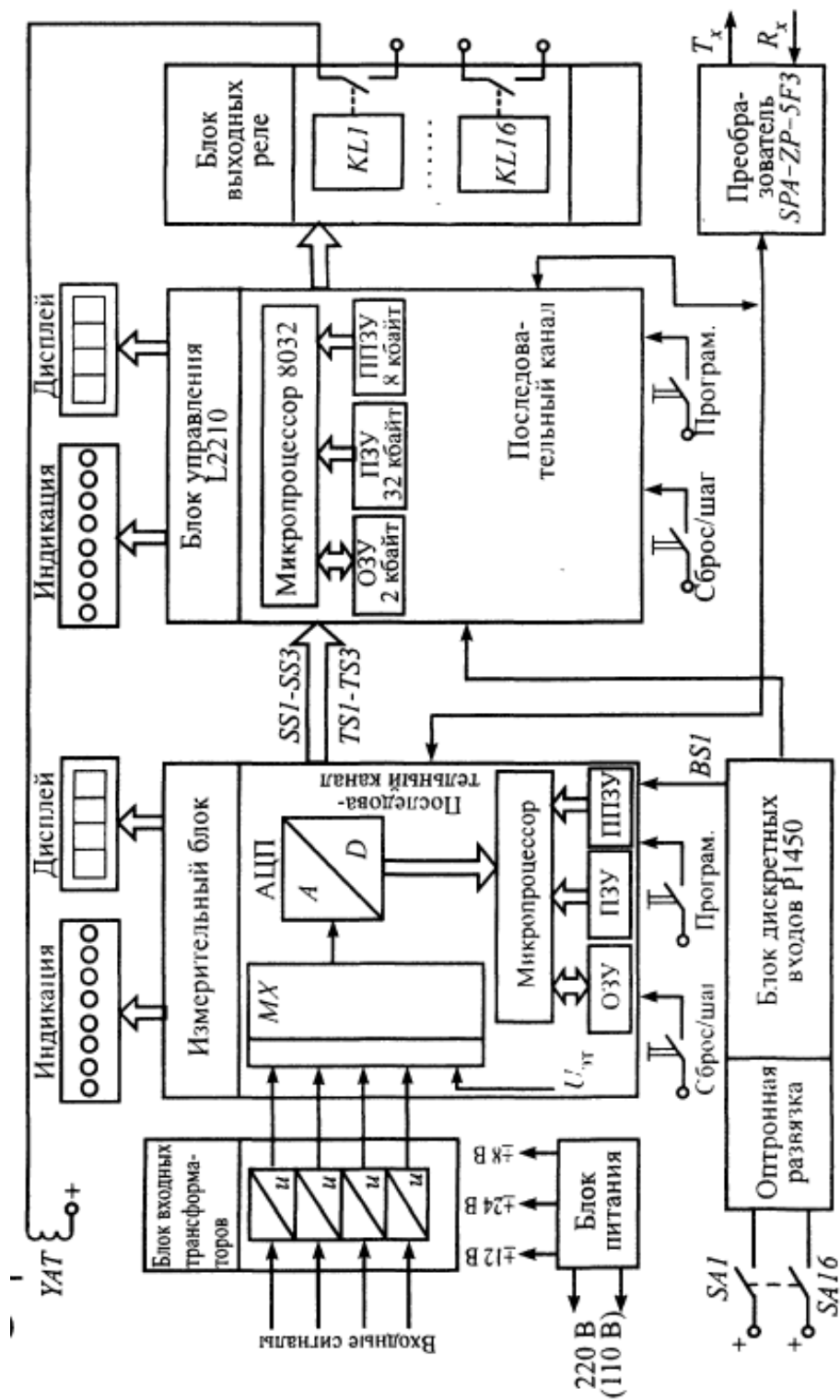


Рис. 8.8. Структурная схема комплектного устройства

8.4. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования электропривода:

- проверка работоспособности экспериментального стенда.

Снятие динамических характеристик асинхронного двигателя:

- прямой пуск и останов двигателя;
- пуск двигателя в обратном направлении вращения.

Исследование аварийных режимов:

- пуск двигателя с имитацией обрыва фазы;
- пуск при моделировании стопорения вала двигателя.

8.5. Программирование монитора тока двигателя

Порядок процедуры программирования микроконтроллера:

- Подать на гнезда 11, 12 монитора тока двигателя D (далее - монитора) сетевое напряжение ~ 220 В, 50 Гц. На индикаторе монитора должно «С» двигателя задан номинальный ток $I_1=0,42$ А.

- Изменить при необходимости номинальный ток конкретной фазы; для этого кнопкой «P» выбрать эту фазу. Затем кнопкой «⊕» вызвать мигание нужного разряда на мониторе и кнопкой «⊖» установить в этом разряде требуемую цифру (от 0 до 9). Устанавливаемое трехразрядное число (от 1 до 250) должно быть равно увеличенному в 100 раз значению номинального тока фазы. Например, для установки номинального тока $I_1=1,25$ А необходимо установить число 125. После отобразиться основное меню – отобразится надпись «A.000», показывающая, что в фазе «А» двигателя увеличенное в 100 раз текущее значение тока равно нулю.

- Проверить заданные (по умолчанию) номинальные фазные токи двигателя. Для этого следует нажать и удерживать более 2 секунд кнопку «⊖». На мониторе должна появиться надпись «A.042», означающая, что для фазы «А» двигателя задан номинальный ток $I_1=0,42$ А.

- Нажать и отпустить кнопку «P». На мониторе должна появиться надпись «B.042», означающая, что для фазы «В» двигателя задан номинальный ток.

- Нажать и отпустить кнопку «P». На мониторе должна появиться надпись «C.042», означающая, что для фазы установки числа записать его в память монитора. Для этого следует нажать и отпустить кнопку «P».

- Вернуться в основное меню. Для этого нажать кнопку «↶». На мониторе блока должна отобразиться надпись «A.000».

- Ввести требуемые параметры защиты двигателя. Для этого необходимо нажать и удерживать более 2 секунд кнопку «P». На

мониторе отобразится надпись «I250», означающая, что задан ток перегрузки $I_2=50\%$. При превышении тока двигателя на 50 % от его номинального тока I_1 должно осуществиться аварийное отключение двигателя с появлением на мониторе блока сообщения «OL2». Например, при заданном номинальном токе $I_1=0,42$ А аварийное отключение двигателя должно происходить при превышении током двигателя уровня $I_{OL2}=0,42+(0,42\cdot 50)/100=0,63$ А.

- Вызвать кнопкой « Ⓢ » мигание нужного разряда на мониторе и кнопкой « Ⓢ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменения тока I_2 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого надо нажать кнопку « Ⓢ ». На мониторе блока отобразится надпись «I370», означающая, что задан ток недогрузки $I_3=70\%$. При уменьшении тока, например, в фазе «А» двигателя в результате ее обрыва, до уровня 70 % от заданного номинального тока I_1 должно происходить его аварийное отключение с появлением на мониторе сообщения «А.OL3». Например, при заданном номинальном токе $I_1=0,42$ А и обрыве фазы «А» двигателя его аварийное отключение должно происходить при уменьшении тока двигателя ниже уровня $I_{OL3}=(0,42\cdot 70)/100=0,29$ А.

- Вызвать кнопкой « Ⓢ » мигание нужного разряда на мониторе и кнопкой « Ⓢ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменить ток I_3 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого нажать кнопку « Ⓢ ». На мониторе блока отобразится надпись «t010», означающая, что задано время $t_0=10$ с, необходимое для останова (выбега) двигателя после подачи команды на его реверсирование. При подаче команды на реверс двигателя она должна начать выполняться спустя заданное время t_0 .

- Вызвать кнопкой « Ⓢ » мигание нужного разряда на мониторе блока и кнопкой « Ⓢ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменения времени t_0 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого нажать кнопку « Ⓢ ». На мониторе блока отобразится надпись «t103», означающая, что задано время $t_1=3$ с. При превышении тока двигателя его четырехкратного заданного номинального тока I_1 продолжительностью более 3 секунд должно происходить аварийное отключение двигателя с появлением на мониторе сообщения «OL1». Например, при заданном номинальном токе двигателя $I_1=0,42$ А и реальном

токе двигателя превышающем значение $I_{OL1}=4\cdot0,42=1,64$ А через 3 секунды должно происходить аварийное отключение двигателя.

- Вызвать кнопкой « ⊕ » мигание нужного разряда на мониторе блока и кнопкой « ⊖ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменить время t_1 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого нажать кнопку « Ⓟ ». На мониторе блока отобразится надпись «t205», означающая, что задано время $t_2=05$ с. При перегрузке двигателя типа «OL2» его аварийное отключение должно происходить спустя время $t_2=5$ с.

- Вызвать кнопкой « ⊕ » мигание нужного разряда на мониторе блока и кнопкой « ⊖ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменить время t_2 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого нажать кнопку « Ⓟ ». На мониторе блока отобразится надпись «t305», означающая, что задано время $t_3=5$ с. При недогрузке (обрыве фазы) двигателя типа «OL3» его аварийное отключение должно происходить спустя время $t_3=5$ с.

- Вызвать кнопкой « ⊕ » мигание нужного разряда на мониторе блока и кнопкой « ⊖ » установить требуемую цифру (от 0 до 9), при необходимости изменить время t_3 . Установленное число (от 0 до 99) записать в память монитора и перейти к заданию следующего параметра. Для этого следует нажать кнопку « Ⓟ ».

- Вернуться в основное меню. Для этого надо нажать кнопку « ⊕ ».

На мониторе блока должна отобразиться надпись «A.000».

8.6. Подготовка стенда к эксперименту

Для этого необходимо:

- Обеспечить, чтобы шкаф управления асинхронным двигателем (далее – шкаф) был заперт и отключен от сети электропитания внешним коммутационным аппаратом, автоматическим выключателем.

- Открыть дверь шкафа.

- Если включены выключатели QF и SF, то отключить их.

- Соединить аппаратуру в соответствии со схемой электрической принципиальной (рис. 8.2). Для соединения аппаратуры, установленной на двери шкафа, с аппаратурой внутри шкафа использовать в качестве промежуточных контактов блоки зажимов X5, X6, расположенные на шасси шкафа.

- Включить выключатели QA и SF.

- Закрывать дверь шкафа ключом.
- Подать на шкаф электропитание от сети. О наличии последнего должна сигнализировать загоревшаяся зеленая лампа HL3 («ГОТОВ»). На мониторе тока двигателя МА (далее – мониторе) высветится надпись «А.000», означающая увеличенное в 100 раз текущее (равно нулю) значение тока в фазе «А» двигателя D, а также загорится светодиод около надписи «СТОП».
- Проверить, что в мониторе МА заданы следующие значения параметров управления асинхронного двигателя: токи $I_1 = 0,42$ А (во всех фазах), $I_2=50\%$, $I_3=70\%$ и времена $t_0=10$ с, $t_1=3$ с, $t_2=5$ с, $t_3=5$ с. Если это не так, то восстановить их или изменить на свои желаемые значения этих параметров.

8.7. Определение параметров АД в динамических и аварийных режимах

8.7.1. Прямой пуск и останов двигателя

Для этого необходимо:

- Нажать и удерживать не менее 2 секунд кнопку SB1 («ВПЕРЕД»). В результате произойдет прямой пуск двигателя D, о чем должна будет сигнализировать загоревшаяся красная лампа HL1 («ВПЕРЕД»). Стрелки вольтметра V и амперметра А укажут напряжение и ток двигателя. Зеленая лампа HL3 («ГОТОВ») погаснет. На мониторе МА высветится увеличенное в 100 раз текущее значение тока АД в выбранной фазе. Для того чтобы пронаблюдать за значениями тока в другой фазе нажать и отпустить кнопку « \triangle ».
- Нажать и удерживать не менее 2 секунд кнопку SB2 («СТОП»). В результате произойдет отключение асинхронного двигателя от электрической сети и последующий его останов. Двигатель будет готов к очередному пуску, о чем будет сигнализировать загоревшаяся зеленая лампа HL3 («ГОТОВ»). Красная лампа HL1 («ВПЕРЕД») погаснет.
- По завершении эксперимента отключить шкаф от сети электропитания.
- Открыть дверь шкафа.
- Отключить выключатели QA и SF.

8.7.2. Пуск в обратном направлении АД

Для этого необходимо:

- Дважды с интервалом времени не менее $t_0 = 10$ с нажать кнопку SB2 («НАЗАД»). В результате должен произойти пуск двигателя D с обратным направлением вращения, о чем должна будет сигнализировать загоревшаяся красная лампа HL2 («НАЗАД»). Стрелки вольтметра V и амперметра A укажут напряжение и ток АД. Зеленая лампа HL1 («ГОТОВ») погаснет. На мониторе МА высветится увеличенное в 100 раз текущее значение тока АД в выбранной фазе. Для наблюдения значения тока в другой фазе нажать и отпустить кнопку « \ominus ».

- Нажать и удерживать не менее 2 секунд кнопку SB2 («СТОП»). В результате произойдет отключение АД от электрической сети и последующий его останов. Двигатель будет готов к очередному пуску, о чем будет сигнализировать загоревшаяся зеленая лампа HL3 («ГОТОВ»). Красная лампа HL1 («ВПЕРЕД») погаснет.

- Запустить двигатель D нажатием кнопки SB1 («ВПЕРЕД»).
- По завершении эксперимента отключить шкаф от сети электропитания.
- Открыть дверь шкафа.
- Отключить выключатели QA и SF.

8.7.3. Пуск двигателя с имитацией обрыва фазы

Для этого необходимо:

- Смоделировать обрыв фазы двигателя D, вынуть перемычку в фазе «В» на его терминальной панели. Стрелка вольтметра V и амперметра A укажут напряжение и увеличившийся ток двигателя D. Зеленая лампа HL3 («ГОТОВ») погаснет. На мониторе МА высветится увеличенное в 100 раз текущее значение тока двигателя в выбранной фазе. АД начнет издавать характерный гудящий звук. Через время $t_3=5$ с АД должен аварийно отключиться от электрической сети и остановиться. Об этом будет сигнализировать надпись «OL3», которая должна появиться на мониторе блока МА.

- Устранить искусственно созданный обрыв фазы «В», вставив ранее вынутый проводник в соответствующее гнездо, двигателя D.

- Отключить шкаф от сети электропитания.
- Открыть дверь шкафа.
- Отключить выключатели QA и SF.

8.7.4. Пуск при моделировании стопорения вала двигателя

Для этого необходимо:

- Создать механический момент сопротивления на валу двигателя D, исключаяющий его пуск. Для этого снять кожух, защищающий от прикосновения к валу двигателя. Закрепить на валу двигателя стопорное устройство так, чтобы исключалось вращение вала в обе стороны.

- Включить выключатели QA и SF.

- Закрыть дверь шкафа ключом.

- Подать на шкаф электропитание от сети. О наличии последнего должна сигнализировать загоревшаяся зеленая лампа HL3 («ГОТОВ»).

- Нажать и удерживать не менее 2 секунд кнопку SB1 («ВПЕРЕД»). В результате произойдет подключение АД к электрической сети, о чем должна будет сигнализировать загоревшаяся красная лампа HL1 («ВПЕРЕД»). Стрелки вольтметра V и амперметра A укажут напряжение и увеличившийся ток АД. Зеленая лампа HL3 («ГОТОВ») погаснет. Двигатель D останется неподвижным и начнет издавать характерный гудящий звук. Через время $t_2=5$ с АД должен аварийно отключиться от электрической сети. Об этом будет сигнализировать надпись «OL2», которая должна появиться на мониторе блока МА.

- По завершении эксперимента отключить шкаф от сети электропитания, снять стопорное устройство с вала двигателя D и установить защитный кожух.

- Открыть дверь шкафа.

- Отключить выключатели QA и SF.

8.8. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Электрическая схема соединений стенда с краткими пояснениями.
3. Параметры и характеристики электродвигателя в режиме пуска, останова и реверса.
4. Параметры электродвигателя в аварийном режиме.
5. Краткие выводы.

8.9. Контрольные вопросы

8.9.1. Преимущества и недостатки АД с короткозамкнутым и фазным роторами.

8.9.2. Как вызвать реверс АД?

8.9.3. Пояснить физический смысл и количественно охарактеризовать показатели качества: отклонения напряжения и колебания частоты;

колебания напряжения (размах изменения, доза колебания, частота изменения, интервал времени между изменениями, глубина провала, интенсивность провалов, длительность импульса); несимметрии напряжения трехфазной сети; несинусоидальность напряжения.

8.9.4. Привести классификацию устройств защит электродвигателей.

8.9.5. От каких аварийных режимов защищают силовой трансформатор?

8.9.6. От каких аварийных режимов защищают электродвигатель напряжением выше 1 кВ?

8.9.7. Каким образом защищают электродвигатель напряжением до 1 кВ?

8.9.8. Указать назначение и принцип работы автоматического включения резерва.

8.9.9. Объяснить принцип работы микропроцессорной защиты электроустановок.

8.9.10. Привести классификацию электротехнических установок с учетом мер электробезопасности.

Литература

1. Сенигов П.Н. Электромонтаж и наладка шкафов управления. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭМНШУ.001 РБЭ (943) – Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2007. – 46 с.

2. Онищенко Г.Б. и др. Автоматизированный электропривод промышленных установок. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.

3. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.

4. Крупович В. И. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 415 с.

5. Елисеева В. А., Шинянский А. В. Справочник по автоматизированному электроприводу – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

6. Электротехника: Учебное пособие для вузов. В 3-х книгах. Книга 3. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.А. Шестакова. – Челябинск: Изд-во Ю УрГУ, 2005. – 639 с.

7. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 1991. – 496 с.

8. Сечин А.А. Электробезопасность. Исследование действия защитного отключения. Методические указания для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Электробезопасность» для студентов направлений: 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и 140200 – «Электроэнергетика» – Томск: изд. ТПУ, 2009, – 16 с.

9. Монаков В.К. УЗО. Теория и практика. – М.: ЗАО «Энергосервис», 1997. – 368 с.

10. ГОСТ 12.2.007.0 «ССБТ. Изделия электротехнические». 2001. – 11 с.

11. ГОСТ Р 50807–95. «Устройства защитные, управляемые дифференциальным током. Общие требования и методы испытаний». 1996. – 51 с.

12. ГОСТ Р 51326.1–99. «Выключатели автоматические, управляемые дифференциальным током, бытового и аналогичного назначения без встроенной защиты от сверхтоков. Часть 1. Общие требования и методы испытаний». 2000. – 90 с.

13. ГОСТ Р 51327.1–99. «Выключатели автоматические, управляемые дифференциальным током, бытового и аналогичного назначения со встроенной защиты от сверхтоков. Часть 1. Общие требования и методы испытаний». 2000. – 90 с.

Лабораторная работа №9

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

9.1. Цель работы

Изучение конструкции, статических характеристик и способов регулирования скорости вращения электропривода постоянного тока с бесконтактным (вентильным) двигателем в разомкнутых и замкнутых системах автоматического регулирования в ручном и компьютерном вариантах управления.

9.2. Оборудование стенда

Лабораторный стенд состоит из приборного блока и электромеханического агрегата на базе бесконтактного двигателя постоянного тока со встроенным синхронным тахогенератором и электромагнитного тормоза с моментомером (рис 9.1). Электромеханический агрегат соединяется с приборным блоком тремя кабелями на его передней стороне [4].

К разъему СМРТ на лицевой панели приборного блока должен быть подключен информационный кабель, соединяющий блок с компьютером.

Основные технические данные бесконтактного двигателя:

тип БК-1424;

$P_H = 6$ Вт;

$U_H = 27$ В;

$I_H = 0,44$ А;

$n_H = (4000 \pm 10 \%)$ об/мин;

$M_H = 0,0147$ Н·м;

$M_{II}/M_H = 1,5$;

$\eta_H = 51\%$;

режим работы S1, S2, S3.

Электромеханический тормоз питается от источника постоянного тока, снабжен моментомером, позволяющим измерять вращающий момент на валу двигателя по выражению: $M=K_T \cdot Z$ [Нм], $K_T = 2,4$ Нм/дел – коэффициент перерасчета по моменту; Z – число делений по лимбу моментомера.

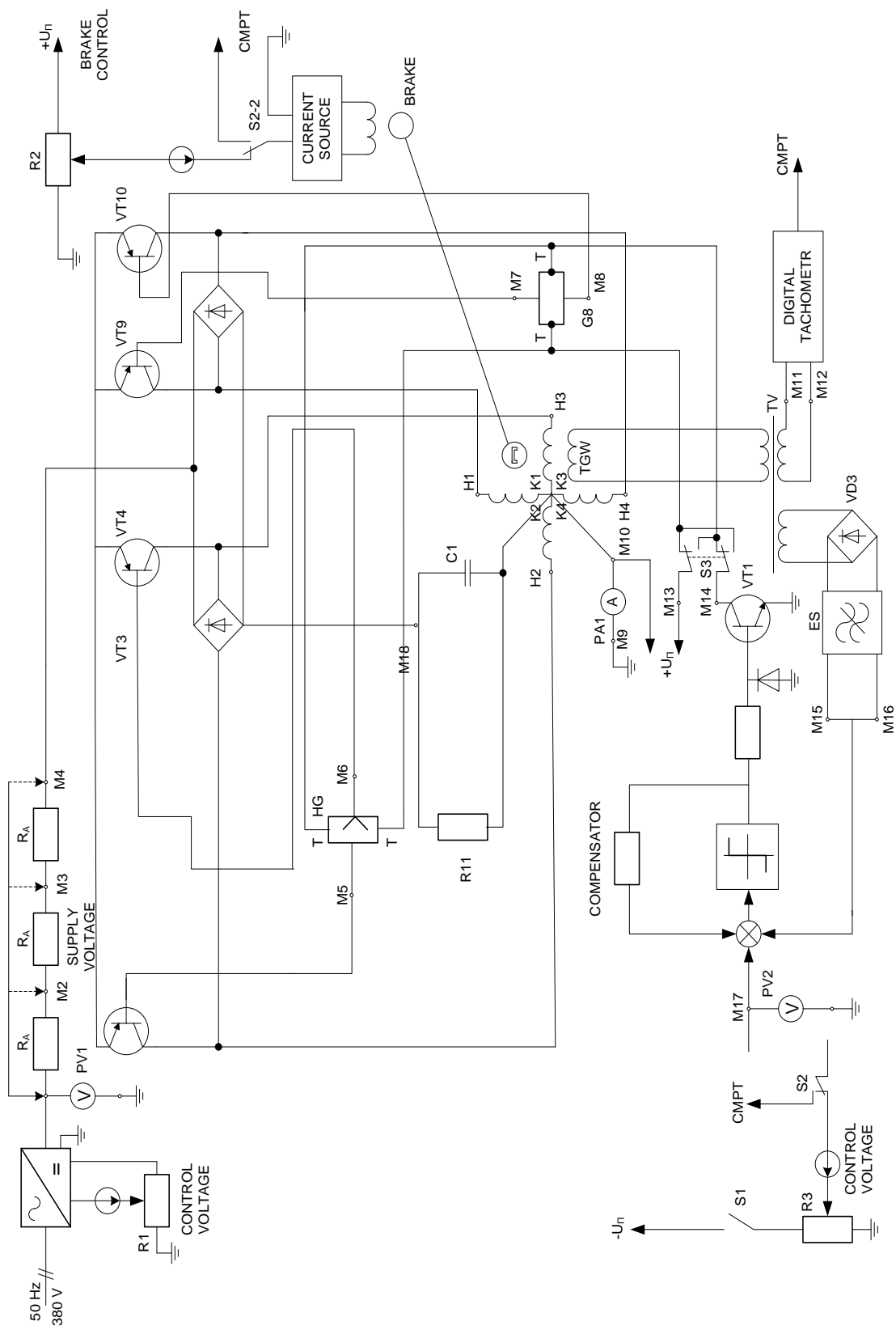


Рис. 9.1. Принципиальная электрическая схема стенда

Сопротивление обмотки возбуждения тормоза $R_b=80$ Ом.

Компьютерная программа «sbdpt.exe» реализована на языке программирования ПАСКАЛЬ.

Основные технические данные программы:

- диапазон измерения сигнала тока якоря, А..... ± 5 ;
- диапазон измерения скорости, рад/с..... $\pm (0 - 1000)$;
- частота программной фильтрации для сигнала тока, Гц..... < 10 ;
- число точек для одного графика.....72;
- время вывода графиков на печать, мин..... < 1 .

К разъёму «СМРТ» на лицевой панели приборного блока должен быть подключен информационный кабель, соединяющий стенд с компьютером.

9.3. Перевод обозначений элементов оборудования и принципиальной электрической схемы на лицевой панели приборного блока

Перевод обозначений элементов оборудования осуществляется по схеме лицевой панели (рис. 9.1):

POWER	Энергия
ARMATURE VOLTAGE	Напряжение якоря
CURRENT SOURCE	Источник тока
ARMATURE CURRENT	Ток якоря
BRAKE	Тормоз
CONTROL VOLTAGE	Управляющее напряжение
TEST MOTOR	Исследуемый двигатель
BRAKE CONTROL	Задатчик нагрузки
DIGITAL TACHOMETER	Цифровой тахометр
SPEED, rad/s	Скорость, рад/с
HG	Датчик Холла
TGW	Измерительная обмотка тахогенератора
CMPT	Компьютер
COMPENSATOR	Компенсатор
POWER	Энергия
ARMATURE VOLTAGE	Напряжение якоря
CURRENT SOURCE	Источник тока

9.4. Общие сведения

9.4.1. Режимы работы, статические характеристики вентильных двигателей постоянного тока

Аналитическое выражение электромеханических $\omega=f(I)$ и механических $\omega=f(M)$ характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} \pm \frac{IR_{\Sigma}}{k\Phi} = \frac{U}{C} \pm \frac{IR_{\Sigma}}{C^2} = \omega_0 \pm \Delta\omega ;$$
$$\omega = \frac{U}{k\Phi} \pm \frac{MR_{\Sigma}}{(k\Phi)^2} = \frac{U}{C} \pm \frac{MR_{\Sigma}}{C^2} = \omega_0 \pm \Delta\omega ,$$

где знак "++" соответствует режиму рекуперативного (генераторного) торможения;

знак "--" соответствует двигательному режиму, режимам противовключения и динамического торможения;

U – напряжение питания двигателя;

I – ток якоря двигателя;

R_{Σ} – сопротивление якорной цепи, состоящее в общем случае из сопротивлений добавочного резистора R_A и якоря $R_{\text{я}} = R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}$;

$R_{\text{оя}}, R_{\text{дп}}, R_{\text{ко}}$ – сопротивления соответственно обмотки якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки;

M – электромагнитный момент двигателя;

$k\Phi$ – соответственно конструктивный коэффициент и магнитный поток двигателя;

C – коэффициент связи двигателя;

ω_0 – скорость идеального холостого хода;

$\Delta\omega$ – падение скорости относительно скорости ω_0 при изменении нагрузки от нуля до заданного значения.

Возможные режимы работы электродвигателя:

- двигательный режим (характеристика 1-2, рис. 9.2);
- режим рекуперативного (генераторного) торможения (характеристика 2-3);
- режим торможения противовключением при сохранении полярности питающего напряжения и наличии активной нагрузки (характеристика 1-4);
- режим динамического торможения с независимым возбуждением (характеристика 0-5).

Скорость вращения в электроприводе с ДПТ независимого возбуждения регулируют изменением питающего напряжения U , включением в якорную цепь добавочного сопротивления R_d , изменением

магнитного потока Φ , шунтированием обмотки якоря сопротивлением $R_{ш}$. На рис. 9.3 показаны естественная и искусственные характеристики при указанных способах регулирования.

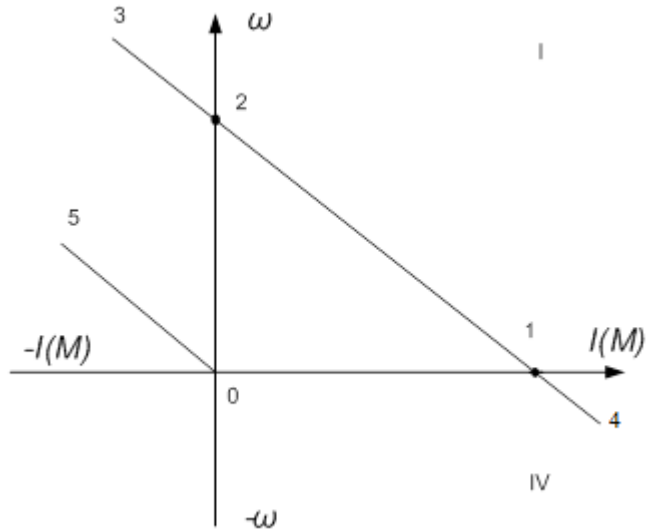


Рис. 9.2. Электромеханические и механические характеристики электропривода с ДПТ НВ (добавить 4 в IV квадрант)

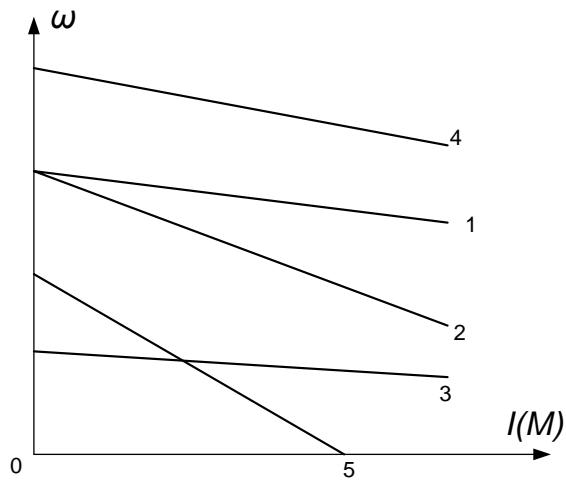


Рис. 9.3. Естественная и искусственные электромеханические и механические характеристики ДПТ НВ:

- 1 – естественная ($U=U_H$; $\Phi=\Phi_H$; $R_d=0$; $R_{ш}=0$);
- 2 – искусственная ($R_d \neq 0$);
- 3 – искусственная ($U < U_H$);
- 4 – искусственная ($\Phi < \Phi_H$)

9.4.2. Области применения электроприводов с БД

Развитие техники, особенно в отраслях автоматизированного производства, робототехники и средств обработки и передачи информации существенно расширяет уровень требований, предъявляемых к исполнительным электромеханическим устройствам. В первую очередь это касается областей, связанных с производством роботов и манипуляторов. К электромеханической системе предъявляется требование преобразовать командные сигналы в механическое перемещение, обеспечивая при этом устойчивую работу электропривода во всем рабочем диапазоне. В некоторых случаях закономерности преобразования командных сигналов в механическое перемещение настолько сложны, что невозможно их реализовать с помощью известных электромеханических устройств. В этом случае используются исполнительные устройства, управляемые с помощью микроконтроллера, или в более сложных случаях с использованием ЭВМ. Все эти задачи потребовали разработки электромеханических устройств, механические и регулировочные характеристики которых могут быть перестроены в процессе эксплуатации в соответствии с условиями, определяемыми законом управления. Одним из наиболее перспективных устройств электропривода по совокупности технических и эксплуатационных характеристик являются бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ). Эти двигатели обеспечивают устойчивую работу привода в режимах с изменяющейся нагрузкой, имеют относительно высокий КПД и могут быть реализованы в малых габаритах, что особенно важно в космической технике, или при создании автономных роботов. Отсутствие коллекторного узла, являющегося необходимым для обычных двигателей постоянного тока, обеспечивает надежную работу устройства в вакууме, взрывоопасных объектах, или средах с повышенной запыленностью. Кроме того, БДПТ обеспечивают относительно низкий уровень, создаваемый ими радио и акустических помех. Все эти особенности бесконтактных двигателей определили интерес к этой области проектирования исполнительных устройств электропривода как у нас в стране, так и зарубежом. В последнее время получены значительные результаты по снижению себестоимости БДПТ, что расширяет возможности использования подобных двигателей в изделиях массового применения: в автомобилестроении, бытовой технике и ряде других отраслей [5].

На рис. 9.4 показана трехфазная лучевая обмотка с нереверсивным питанием и коммутатором на трех силовых транзисторах. Фазы 01.02.03 подключаются и отключаются от источника питания с помощью транзисторов V_1 , V_2 , V_3 , управляемых соответственно от чувствительных элементов 1, 2, 3 датчика положения ротора (ДПР), имеющего сектор С с угловым размером 120° эл.

В каждый момент времени под током находится только одна фаза. Например, в положении, показанном на рис. 9.4, а возбужден чувствительный элемент 3, открыт транзистор V_3 , под током фаза 03. Электромагнитный момент, обусловленный взаимодействием полей ротора и статора соответствующих F_f и F_a , приводит к вращению ротора в направлении стрелки. После подхода сектора С к элементу 2 запирается

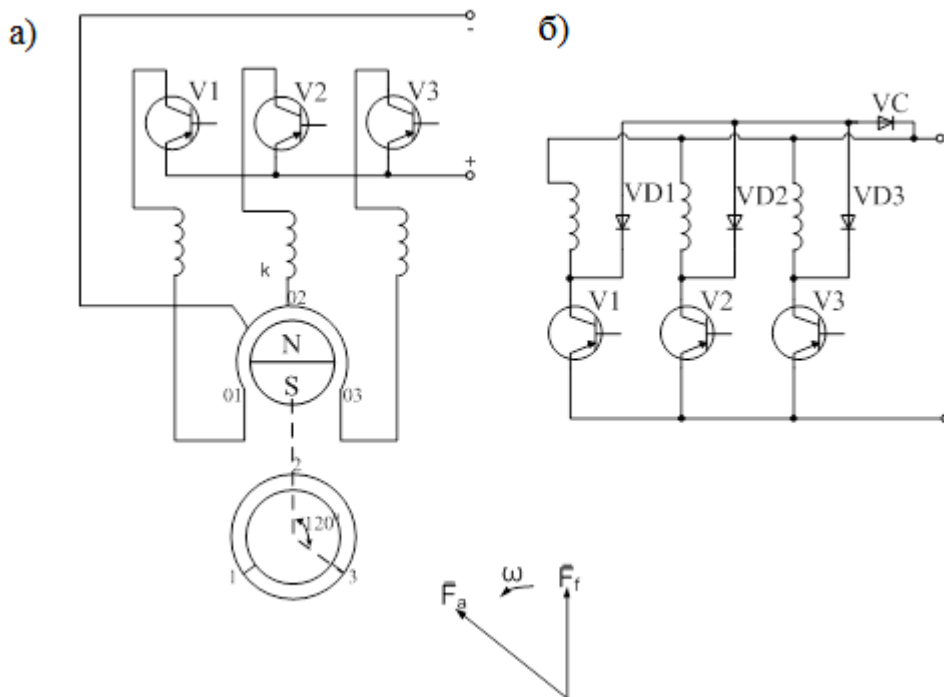


Рис. 9.4. Трехфазный двигатель с нереверсивным питанием :а) принципиальная схема , б) соединение фаз с коммутатором с учетом защиты от перенапряжений

транзистор V_3 , обесточивается фаза 03, открывается транзистор V_2 , подключается фаза 02 и т. д. Электромагнитный момент при любом положении ротора не меняет свой знак, двигатель пускается из любого положения. Средний угол между векторами F_f и F_a за межкоммутационный период, равный для этой схемы 120° эл., составляет 90° эл.

Для данной схемы, как и для других, принята такая взаимная ориентация элементов конструкции: оси чувствительных элементов 1, 2, 3 параллельны магнитным осям фаз 01,02, 03; ось симметрии сектора якоря датчика положения составляет с осью полюсов магнита угол 90° эл. Возможны и другие виды ориентации элементов, если они не нарушают условия нейтральной коммутации. Схема соединения обмотки двигателя с коммутатором показана на рис. 9.4,б. Каждая фаза для снятия перенапряжений, возникающих в момент отключения соответствующего транзистора, шунтирована диодом VD и общим стабилитроном VC. Для схем с нереверсивным питанием шунтировать фазу одним только диодом

нельзя, так как ЭДС вращения фазы на интервале поворота, на котором транзистор отключен (пассивный интервал), вызовет протекание тока через диод и создаст тормозной электромагнитный момент (момент динамического торможения). Чтобы исключить это явление последовательно с диодом включается цепочка стабилитронов, напряжение пробоя которой несколько выше, чем амплитуда ЭДС вращения в режиме холостого хода. Таким образом, шунтирующий диод вступает в работу только тогда, когда при отключении фазы ЭДС самоиндукции «пробивает» цепочку стабилитронов. Напряжение на транзисторе ограничивается величиной напряжения пробоя стабилитронов.

На рис. 9.5 показана схема трехфазной лучевой обмотки с реверсивным питанием (а) и коммутатором мостового типа на шести транзисторах (б). Датчик положения ротора (ДПР) похож на датчик предыдущей схемы, однако имеет шесть чувствительных элементов, три из которых 1, 2, 3 управляют нижней группой транзисторов, а другие три 1', 2' 3' — верхней группой. Поскольку сектор датчика положения ротора имеет угловой размер 120° эл., а угловое расстояние между соседними чувствительными элементами — 60° эл., то всегда возбуждены два элемента, открыты два транзистора и под током две фазы двигателя. Межкоммутационный период такого двигателя $\vartheta_k=60^\circ$ эл., причем мостовой тип коммутатора обеспечивает изменение направления тока в фазе за один полный оборот ротора. Это легко проследить, мысленно поворачивая ротор, согласно рис. 9.5,а против часовой стрелки и отмечая, какие элементы при этом оказываются возбужденными, какие транзисторы открыты и какое направление тока в фазах. При этом средний за период ϑ_k угол между векторами F_f и F_a составляет, как и в предыдущей схеме, 90° , а вектор F_f совершает на каждом периоде перемещение от $90^\circ+30^\circ$ до $9^\circ\dots30^\circ$.

Схема соединения фаз обмотки с коммутатором показана на рис. 9.5,б, она в отличие от предыдущей содержит мост обратных диодов VD1–VD4', служащий для снятия коммутационных перенапряжений.

Существуют и другие довольно разнообразные схемы обмоток и коммутаторов. Достоинством трехфазной схемы с нереверсивным питанием фаз является ее простота, малое количество силовых транзисторов и чувствительных элементов, а недостатком — плохое использование меди обмотки (под током только одна фаза) и сравнительно низкий КПД. Этих недостатков лишена схема с реверсивным (двухполупериодным) питанием фаз на рис. 9.5, а. Однако она содержит в два раза больше силовых транзисторов и, возможно, (не всегда) в два раза большее число чувствительных элементов ДПР. Трехфазная схема получила широкое распространение для относительно мощных двигателей, для которых важны

высокие удельные показатели по моменту и мощности, а также высокий уровень КПД.

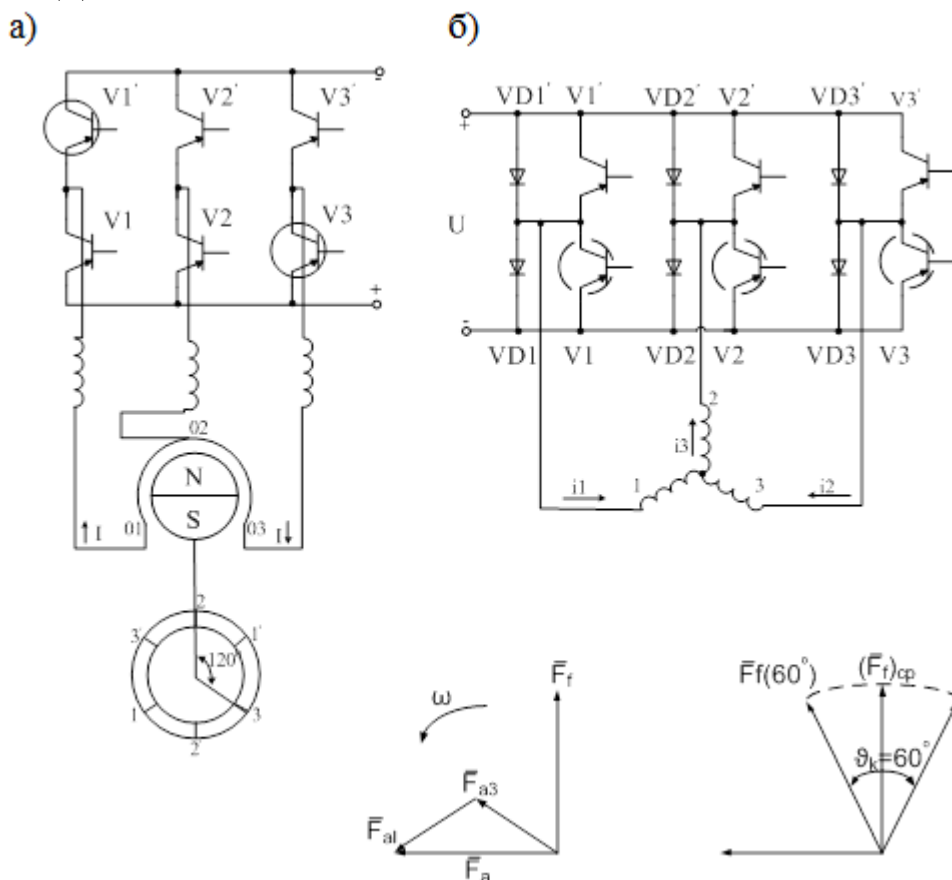


Рис. 9.5. Трехфазный двигатель с реверсивным питанием: а) электрическая схема силовой части, б) схема соединений фаз с коммутатором

Применение вентильных двигателей с постоянными магнитами, для которых используются рассмотренные схемы обмоток и коммутаторов, охватывают следующие области техники:

- приводы роботов и станков;
- звукозаписывающая и звуковоспроизводящая аппаратура;
- самописцы приборов и медицинская техника;
- насосы, компрессоры, центрифуги;
- передвижные транспортные средства;
- конвейерные линии;
- системы аэрокосмической техники;
- корабельная техника и другие направления.

Рассмотрим некоторые типичные схемы коммутаторов и вентильных двигателей с пассивным невозбужденным (реактивным) ротором.

Вентильные двигатели с реактивным ротором (ВДРР) работают по принципу, аналогичному ВД с постоянными магнитами. Для ВДРР,

имеющего магнитную несимметрию на роторе (зубчатость ротора), характерно стремление совмещения соответствующих зубцов ротора с эквивалентной магнитной осью статора, по обмотке которого проходит ток. Меняя положение магнитной оси статора путем последовательного согласованного переключения фаз, можно обеспечить создание знакопостоянного в среднем момента двигателя и вращение его ротора в необходимом направлении.

На рис. 9.6 показаны принципиальные схемы трех- (а) и четырехфазных (б) ВДРР. Двигатель на рис. 9.6, а имеет шесть зубцов на статоре, на которых расположены фазы 01, 02, 03. Каждая фаза включена в диагональ моста на двух транзисторах V и диодах VD . Датчик положения ротора содержит три чувствительных элемента, каждый из которых управляет соответствующей парой транзисторов. Якорь датчика имеет симметрично расположенные секторы, число которых равно числу зубцов ротора. Для определенности анализа положим, что число зубцов статора z_1 больше числа зубцов ротора z_2 .

Межкоммутационный период ВДРР равен

$$\vartheta_k = 2\pi \cdot \frac{z_1 - z_2}{z_1 \cdot z_2} \text{ геом. рад.}$$

Для уяснения принципа работы двигателя рассмотрим схему трёхфазного ВДРР. На ней сектор якоря выходит из связи с чувствительным элементом 1 и входит во взаимодействие с элементом 2. Транзисторы V_1 и V_1' закрываются, а V_2 и V_2' открываются. Ток в фазе 01 спадает до нуля, проходя по контуру «фаза — диод VD_1 — источник — диод VD_1' — фаза». Тот же контур может быть образован с применением емкости C . Ток в фазе 02 возрастает и зубцы ротора «притягиваются» к зубцам статора, на которых расположена фаза 02. Ротор поворачивается на угол, равный $\vartheta_k = \pi/6$. Далее ДПР отключает фазу 02 и включает фазу 03 и т. д. Ротор находится в непрерывном вращении, поскольку последовательное включение фаз 01, 02, 03 создает знакопостоянный электромагнитный момент. Аналогично работает схема на рис. 9.6,б.

По сравнению с ВД на постоянных магнитах (ВДПМ) с тремя фазами и транзисторами (рис. 9.4,а), где под током только одна из трех фаз, схема на рис. 9.6,а имеет удвоенное число силовых транзисторов и диодов. Это необходимо для более эффективной коммутации отключаемой фазы, имеющей по сравнению со схемой с постоянным магнитом значительно большую индуктивность.

Несмотря на конструктивную простоту ВДРР и меньшую стоимость электромеханической части, он имеет несколько худшие энергетические и массогабаритные характеристики по сравнению с ВДПМ, однако

оптимизация методов управления и оптимизация его конструкции позволяют в ряде случаев достигнуть и даже превзойти показатели других типов двигателей.

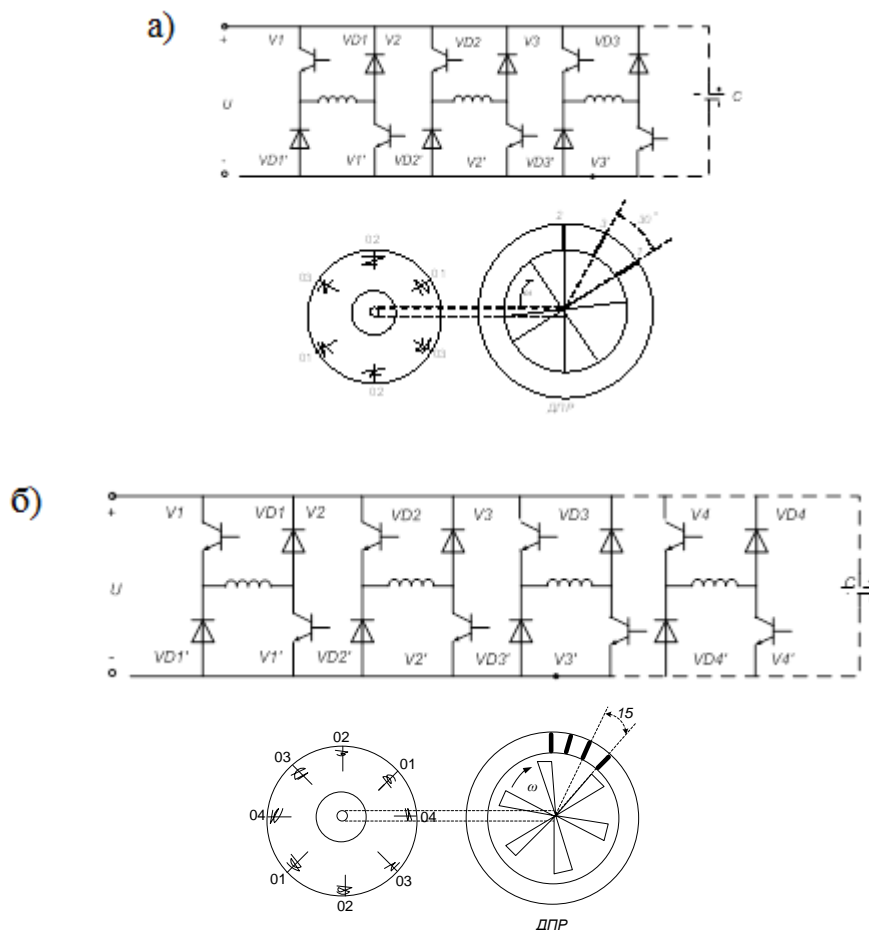


Рис. 9.6. Принципиальная схема трехфазного (а) и четырехфазного (б) вентильных двигателей с реактивным ротором

Области применения ВДРР приблизительно такие же, как и ВДПМ. Особо следует выделить применение в тихоходных высокомоментных приводах, а также в электроинструменте.

На базе ВДРР эффективным становится создание высокомоментных низкооборотных приводов. Благодаря увеличению числа зубцов статора и ротора удастся увеличить коэффициент момента при заданном токе.

9.5. Описание принципиальной электрической схемы стенда

Принципиальная схема стенда приведена на рис. 9.1.

Для проведения экспериментов необходима компьютерная программа «sbdpt.exe», реализованная на языке программирования Паскаль, предназначенная для использования на ПЭВМ типа IBM PC AT/XT.

9.5.1. Конструкция и принцип действия двигателя

У бесконтактного двигателя постоянного тока щеточно-коллекторный узел отсутствует, его роль выполняет транзисторный коммутатор, управляемый датчиками углового положения ротора. Благодаря этому бесконтактный двигатель, сохраняя основные характеристики коллекторного двигателя, более надежен в работе, создает меньшие радиопомехи.

Бесконтактный двигатель состоит из трех частей: собственно двигателя, датчиков углового положения ротора и полупроводникового коммутатора. Датчики положения размещаются в специальных пазах по центрам полюсов обмотки якоря, коммутатор встроен в двигатель (рис. 9.1).

Статор двигателя имеет неявнополюсную конструкцию, на нем размещается обмотка якоря из четырех секций: Н1-К1, К2-Н2, Н3-К3, К4-Н4. Каждая секция состоит из двух катушек, соединенных последовательно и размещенных на противоположных полюсах статора. Секции Н1-К1 и Н3-К3 запитываются от однополярного источника питания с начала, а секции К2-Н2 и К4-Н4 – с конца; это необходимо для создания однополярного электромагнитного момента двигателя при вращении ротора, выполненного из магнитотвердого материала с двумя полюсами.

В каждый момент времени обтекается током лишь одна секция обмотки якоря, остальные секции обесточены (табл. 9.1). Создаваемый секцией магнитный поток взаимодействует с потоком ротора, благодаря чему осуществляется поворот последовательно на 90°. Управление токораспределением по секциям выполняют транзисторы по сигналам датчиков углового положения ротора — датчиков ЭДС Холла (рис. 9.7).

9.5.2. Датчики углового положения ротора

В исследуемом двигателе в качестве датчиков углового положения ротора использованы два датчика ЭДС Холла (в табл. 9.1 и на рис. 9.1 обозначены G и HG). Датчик Холла выполняется на кремниевой пластинке (рис. 9.7) или стеклянной (слодяной) пленке с напылённым полупроводником. К противоположным торцам 1-1 припаяны токовые выводы, через которые датчик подключается к источнику питания.

При подаче на токовые выводы напряжения питания по кремневой пластинке протекает ток. При воздействии на датчик магнитного поля нормальная к плоскости пластины составляющая индукции B вызывает на гранях 2-2 поперечное электрическое поле, ЭДС которого (ЭДС Холла):

$$E_x = K \cdot \frac{I \cdot H}{d},$$

где, K — константа Холла;

I — величина тока;

H — нормальная составляющая напряженности магнитного поля (перпендикулярная линии тока в пластине);

d — толщина пластины.

Если изменять направление индукции или питающего тока, меняется знак ЭДС Холла.

В двигателе два датчика размещаются в специальных пазах в расточке статора и сдвинуты относительно друг друга на 90° . При вращении ротора (постоянного магнита) датчики вырабатывают на выходах М5-М6 и М7-М8 напряжения, величина и знак которых соответствуют величине и знаку магнитной индукции поля, создаваемого ротором-индуктором. Эти напряжения являются управляющими для транзисторов VT3, VT4, VT9, VT10.

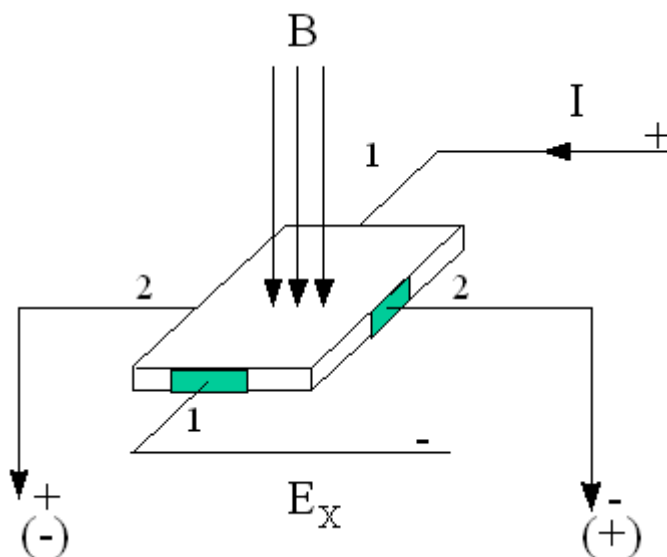


Рис. 9.7. Датчик Холла

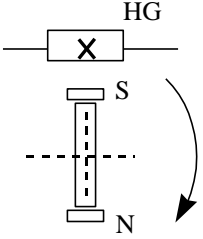
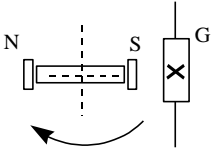
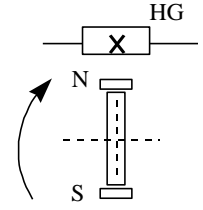
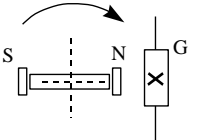
Датчики G или HG управляют коммутацией двух секций обмотки якоря:

- G коммутирует секции Н1-К1 и К2-Н2;
- HG коммутирует секции Н3-К3 и К4-Н4.

Например, отрицательный потенциал одного из полюсов ЭДС Холла на датчике G вызывает отпирание транзистора VT9 и включение секции Н1-К1, в это же время положительный потенциал другого полюса ЭДС Холла запирает транзистор VT10 и секция К2-Н2 отключается, то есть секции работают строго в противофазе. Аналогично коммутируются и секции Н3-К3, К4-Н4.

Знак ЭДС Холла каждого датчика зависит от того, какой полюс ротора находится под датчиком: S или N (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Положение Ротора	Сигнал датчика Холла	Открыт транзистор	Закрываются транзисторы	Включена Секция	Поворот Ротора
	+M5, -M6	VT4	VT3, VT9, VT10	Н3-К3	0°...90°
	+M7, -M8	VT10	VT3, VT4, VT9	К2-Н2	90°...180°
	-M5, +M6	VT3	VT4, VT9, VT10	К4-Н4	180°...270°
	-M7, +M8	VT9	VT3, VT4, VT10	Н1-К1	270°...360°

9.5.3. Транзисторный коммутатор

Упрощенная электрическая схема коммутатора приведена на передней панели приборного блока (рис. 9.1).

Каждая секция обмотки якоря коммутируется транзисторным ключом: секция Н1-К1 – VT9, К2-Н2 – VT10, Н3-К3 – VT4 и К4-Н4 – VT3. База каждого транзистора подключена к выводам датчиков ЭДС Холла (гнезда М5, М6 и М7, М8). На токовые выводы датчиков Холла подается напряжение питания $+U_{\Pi}$ (гнездо М13), которое формируется специальной схемой. Если транзистор VT1 закрыт, закрываются транзисторы VT9, VT10, VT3, VT4 и $U_{\Pi} = +26$ В. Если VT1 открыт, протекает ток через датчики Холла и напряжение $U_{\Pi} \leq 5$ В.

Диодные мосты VD1 и VD2, резистор R11 и конденсатор С1 защищают транзисторы от перенапряжений.

9.5.4. Измерение, регулирование и стабилизация скорости вращения

Угловая скорость вращения двигателя измеряется цифровым тахогенератором, на вход которого через разделительный трансформатор TV подается напряжение, пропорциональное скорости, от тахометрической обмотки TГW, расположенной в пазах статорного пакета вместе с обмоткой якоря.

На стенде скорость двигателя регулируется или изменением напряжения источника питания потенциометром R1, или трёхсекционным реостатом в цепи якоря (гнезда M1...M4, сопротивление каждой секции $R_A=3,0$ Ом).

Стабилизация скорости двигателя в замкнутой системе управления выполняется введением в схему отрицательной обратной связи по скорости. Для этого через компенсатор («COMPENSATOR») на входе транзистора VT1 сравниваются по величине два напряжения: напряжение управления U_y , снимаемое с потенциометра R3, и напряжение обратной связи по скорости U_{OC} , подведенное от тахометрической обмотки TГW двигателя через разделительный трансформатор TV, диодный выпрямитель VD3 и фильтр низких частот EC. При $U_y > U_{OC}$ транзистор VT1 открыт, двигатель включен, и его скорость увеличивается до тех пор, пока $U_{OC} < U_y$; при $U_{OC} > U_y$ транзистор VT1 закрывается, и двигатель переходит в кратковременный режим свободного выбега, после чего снова $U_y > U_{OC}$, VT1 открывается, двигатель ускоряется и т.д. – средняя скорость двигателя стабилизируется на уровне, соответствующем величине управляющего напряжения U_y .

9.6. Программа экспериментов

Программа проведения работы состоит из двух видов исследований: первый вариант рассчитывает на исследование экспериментальных характеристик в ручном режиме, а второй вариант предполагает исследование экспериментальных характеристик с использованием компьютерной программы «sbdpt.exe».

Порядок экспериментального исследования статических режимов по первому варианту:

- проверка работоспособности стенда;
- снятие электромеханических $\omega=f(I)$ и механических $\omega=f(M)$ характеристик при регулировании скорости изменением напряжения якоря;
- построение электромеханических $\omega=f(I)$ и механических $\omega=f(M)$ характеристик при регулировании скорости добавочным сопротивлением;

- снятие электромеханических $\omega=f(I)$ и механических $\omega=f(M)$ характеристик в замкнутой системе управления;
- построение регулировочной характеристики $\omega=f(U_y)$ в замкнутой системе управления.

Порядок экспериментального исследования статических режимов по второму варианту:

- проверка работоспособности стенда;
- построить электромеханические $\omega=f(I)$ характеристики на экране компьютера при регулировании скорости изменением напряжения якоря;
- снять электромеханические $\omega=f(I)$ характеристики с экрана компьютера при регулировании скорости добавочным сопротивлением;
- построить электромеханические $\omega=f(I)$ характеристики на экране компьютера в замкнутой системе управления.

9.7. Проверка работоспособности стенда

Внимание! Ток якоря не должен превышать 500мА.

Для этого необходимо:

- повернуть ручки потенциометров R2 и R3 в крайнее левое, а потенциометра R1 в крайнее правое положение;
- поставить переключатели S1 и S2 в левое положение;
- включить автомат на левой боковой панели приборного блока, загорается световой индикатор «POWER»;
- повернуть вправо ручку потенциометра R3 и убедиться, что двигатель вращается; установить потенциометром $U_{\text{упр}}=0,75$ В (вольтметр PV2);
- переключить S3, двигатель должен изменить направление вращения;
- повернуть ручку потенциометра R1 влево при $U_{\text{упр}}=5$ В и с помощью тахометра убедиться в том, что скорость двигателя уменьшается, а затем повернуть ручку потенциометра R1 в крайнее правое положение;
- повернуть вправо ручку потенциометра R2 и убедиться в том, что тормоз реагирует на увеличение тока возбуждения в его катушке;
- выставить ручки потенциометров R2 и R3 в крайнее левое положение;
- поставить переключатели S1 и S2 в левое положение;
- рекомендуется работа в ОС DOS, если пользователь находится в Windows, то необходимо открыть клавишей Enter окно Far, зайти в папку и выбрать файл «TMP → SBDPT → SBDPT.exe»;
- с помощью клавиши F2 зайти в окно «Динамические характеристики»;
- выставить максимальные значения скорости $\omega=600$ рад/с, тока $I=1,5$ А, времени $t=300$ мс, программа готова к работе;
- ручки потенциометров и переключателей установить в исходное положение.

9.8. Исследование статических режимов электропривода без использования дополнительной аппаратуры

9.8.1. Регулирование скорости вращения двигателя изменением напряжения якоря

Опыт проводить при выведенных из цепи якоря сопротивлениях R_A .

Для этого необходимо:

- разомкнуть обратную связь по скорости, повернув ручку потенциометра R3 в крайнее правое положение; при этом скорость двигателя максимальна;
- записать величину напряжения на якоре двигателя по вольтметру PV1 (ручка потенциометра R1 должна быть повернута в крайнее правое положение);
- *Внимание!* Ток якоря не должен превышать 500мА.
- увеличивать нагрузку двигателя, поворачивая ручку потенциометра R2, и записать по 5 – 6 значений скорости вращения ω , тока якоря I и момента M на валу (в делениях Z по лимбу моментомера) в табл. 9.2;
- повторить опыт, уменьшая напряжение на якоре ступеньками по 4В с помощью потенциометра R1, полученные данные записать в таблицы, аналогичные табл. 9.2;
- вернуть ручки потенциометров в исходное положение;

Таблица 9.2

ω	c^{-1}							Примечания
I	мА							$U = \dots В;$ $R_{доб} = 0;$ $M = 2,4 \times Z \times 10^{-3}$
Z	дел							
M	Н×м							

Привести пример расчета.

- построить характеристики $\omega=f(I)$, $\omega=f(M)$ по данным табл. 9.2.

9.8.2. Регулирование скорости вращения двигателя добавочным сопротивлением (реостатные характеристики)

Опыт выполнять при полном напряжении якоря (ручка потенциометра R1 – в крайнем правом положении).

Для этого необходимо:

- отключить добавочные резисторы R_A соединив гнезда M1 и M4 с помощью специальной перемычки;
- разомкнуть обратную связь по скорости, повернув ручку потенциометра R3 в крайнее правое положение; при этом скорость двигателя максимальная;

- записать величину напряжения на якоре двигателя по вольтметру PV1 (ручка потенциометра R1 должна быть повернута вправо до упора);
- увеличивать нагрузку двигателя, поворачивая ручку потенциометра R2, и записывать по 5 – 6 значений скорости вращения, тока якоря и делений лимба моментомера в таблицу, аналогичную табл. 9.2;
- повторить опыт, вводя последовательные добавочные сопротивления R_A в цепь якоря путем коммутации гнезд M1-M4; данные занести в таблицы, аналогичные табл. 9.2;
- вернуть ручки потенциометров в исходное положение.

9.8.3. Регулирование скорости вращения в замкнутой системе управления

В работе использована замкнутая система с отрицательной обратной связью по скорости.

Для этого необходимо:

- задать с помощью потенциометра R3 напряжение управления $U_y=2$ В по вольтметру PV2, поворачивая ручку потенциометра R2 вправо и записывая 5 – 6 значений скорости вращения, тока якоря и делений лимба моментомера в таблицу, аналогичную табл. 9.2;
- повторить опыт для значений управляющего напряжения $U_y=3; 4; 5; 6$ В, заполнив таблицы, аналогичные табл. 9.2;
- вернуть ручки потенциометров в исходное положение.

9.8.4. Регулировочная характеристика $\omega = f(U_y)$ в замкнутой системе управления

Опыт выполнять в режиме холостого хода двигателя (ручка потенциометра R2 повернута влево до упора).

Для этого необходимо:

- установить последовательно управляющее напряжение $U_y= 0; 1; 2 \dots 6$ В, поворачивая ручку потенциометра R3 вправо; для каждого значения U_y записать показания скорости ω ;
- данные занести в табл. 9.3;
- вернуть ручки потенциометров в исходное положение;

Таблица 9.3

U_y	В	0	1	2	3	4	5
Ω	c^{-1}						

- построить характеристику $\omega=f(U_y)$ по данным табл. 9.3.

9.9. Исследование статических режимов электропривода с помощью компьютерной программы «sbdpt.exe»

9.9.1. Подготовка стенда к работе и запуск программы

Для этого необходимо:

- выключить автомат на левой боковой панели приборного блока, гаснет световой индикатор «POWER»;
- переключатели S1, S2 – в левом положении;
- потенциометр R1 выведен в крайнее правое положение;
- потенциометры R2, R3 выведены в крайнее левое положение;
- рекомендуется работа в операционной системе DOS;
- если пользователь находится в Windows, необходимо запустить менеджер файлов «FAR manager», а затем зайти в папку «C:\TMP\SBDPT\» и запустить программу «sbdpt.exe»;
- открыть окно (файл) «Механические характеристики», путем нажатия клавиши F2.

9.9.2. Назначение клавиш и процедура записи статических характеристик

Во время работы программы в нижней строке экрана содержится информация о назначении клавиш клавиатуры, причём в каждый момент времени действуют только те команды, обозначения которых изображены выделенным (белым) цветом:

- клавиша F1 – возврата в меню «Выбора режима»;
- клавиша F2 – прорисовки нового графика;
- клавиша F3 – записи;
- клавиша F4 – печати графиков и таблиц электромеханических характеристик на принтере;
- клавиша F10 – выхода в операционную систему.

В верхней строке экрана располагается справочная информация – значения тока и скорости на одно деление масштабной сетки графика, номер текущего измерения (точки на графике) в исходном состоянии равен 1.

Для записи точки на графике и координат точки в таблицу (таблица до вывода на печать сохраняется в памяти) необходимо после того, как были заданы очередные значения скорости и тока [4] нажать клавишу «Пробел» (номер текущего измерения станет равен 2). Программа обрабатывает вводимые данные таким образом, что они группируются по шесть точек в линии на графике; координаты точек записываются в шести столбцах таблицы значений тока и скорости.

Это означает, что при последовательном вводе точек на графике будут соединяться точки с 1 по 6, с 7 по 12, с 13 по 18 и т.д. Клавиша «F3» заканчивает ввод очередной группы точек, если требуется зафиксировать меньше шести точек, при этом в таблице не введённые координаты точек устанавливаются равными координатам последней введённой точки.

9.9.3. Регулирование скорости вращения двигателя изменением напряжения якоря

Опыт проводить при выведенных из цепи якоря сопротивлениях R_A .

Порядок проведения опыта:

- разомкнуть обратную связь по скорости, повернув ручку потенциометра R3 в крайнее правое положение; при этом скорость двигателя максимальная;
- записать величину напряжения на якоре двигателя по вольтметру PV1 (ручка потенциометра R1 должна быть повернута в крайнее правое положение);
- осуществить прорисовку графика характеристики $\omega=f(I)$ на экране и запись координат скорости и тока в таблицу, находящуюся в памяти компьютера, в соответствии с процедурой п. 9.9.2; при этом изменение нагрузки двигателя производить потенциометром R2.

Процедура вложения полученных графиков и таблиц в отчёт (п. 9.9.2).

Внимание! Ток якоря не должен превышать 500 мА!

- повторить опыт, уменьшая напряжение на якоре ступеньками по 4 В с помощью потенциометра R1;
- по окончании опыта повернуть ручки потенциометров в исходные положения (п. 9.8.1).

Для вложения полученных графиков и таблиц в лабораторный отчёт возможны два способа:

- вывод на принтер;
- запись на дискету.

Если подключен принтер, то использовать клавишу F4. При отсутствии принтера воспользоваться дискетой.

Внимание! С помощью стандартной программы проверить дискету на отсутствие вирусов!

Процедура записи информации на дискету:

- нажать клавишу Alt; не отпуская её, нажать клавишу Print Screen (в дальнейшем подобные процедуры будут коротко обозначены как Alt+Print Screen). Такая комбинация клавиш помещает графический образ экрана в буфер обмена (clipboard);

- нажать Alt-Tab (переключение между задачами; работает только в Windows);
- запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню «Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию;
- вернуться в программу «sbdpt.exe» (Alt-Tab).

9.9.4. Регулирование скорости вращения двигателя изменением добавочного сопротивления (реостатные характеристики)

Опыт выполняется при полном напряжении якоря (ручка потенциометра R1 – в крайнем правом положении).

Порядок проведения опыта:

- отключить добавочные резисторы R_A , соединив гнезда M1 и M4 с помощью специальной перемычки;
- разомкнуть обратную связь по скорости, повернув ручку потенциометра R3 в крайнее правое положение; при этом скорость двигателя максимальна;
- осуществить прорисовку графика характеристики $\omega=f(I)$ на экране и запись координат скорости и тока в таблицу, находящуюся в памяти компьютера, в соответствии с процедурой п. 9.9.2; при этом изменение нагрузки двигателя производить потенциометром R2;
- повторить опыт, вводя последовательные добавочные сопротивления R_A в цепь якоря путём коммутации гнезд M1...M4;
- по окончании опыта повернуть ручки потенциометров в исходные положения (п. 9.8.2).

Процедура вложения полученных графиков и таблиц в отчёт (п. 9.9.3).

9.9.5. Регулирование скорости вращения двигателя в замкнутой системе управления

В работе используется замкнутая система управления с отрицательной обратной связью по скорости.

Порядок проведения опыта:

- установить с помощью потенциометра R3 напряжение управления $U_y = 2$ В по вольтметру PV2;
- осуществить прорисовку графика характеристики $\omega=f(I)$ на экране и запись координат скорости и тока в таблицу, находящуюся в памяти компьютера, в соответствии с процедурой п. 9.9.2; записи статических характеристик; при этом изменение нагрузки двигателя производить потенциометром R2;

- повторить опыт для значений управляющего напряжения $U_y = 3; 4; 5; 6$ В;
- по окончании опыта повернуть ручки потенциометров в исходные положения.

Процедура вложения полученных графиков и таблиц в отчёт (п. 9.9.3).

9.10. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема электропривода с краткими пояснениями.

По первому варианту экспериментов:

3. Таблицы полученных данных и характеристики $\omega=f(I)$ – для всех опытов на одном графике; $\omega=f(M)$ – для всех опытов на другом графике.
4. Регулировочная характеристика $\omega=f(U_y)$.

По второму варианту экспериментов:

5. Таблицы полученных данных и характеристики $\omega=f(I)$ для всех опытов.
6. Краткие выводы по обоим вариантам.

9.11. Контрольные вопросы

- 9.11.1. Описать принцип работы испытуемого двигателя.
- 9.11.2. Чем обеспечивается однополярность импульсов электромагнитного момента двигателя?
- 9.11.3. Пояснить назначение транзисторного коммутатора.
- 9.11.4. В чем заключается принцип действия датчиков ЭДС Холла.
- 9.11.5. Пояснить работу электропривода в замкнутой системе стабилизации скорости.
- 9.11.6. Возможно ли динамическое торможение данного двигателя?
- 9.11.7. При каких условиях характеристики $\omega=f(I)$ и $\omega=f(M)$ испытуемого двигателя могут быть естественными?

Литература

1. Арменский Е.В., Фальк Г.Б. Электрические микромашины. – М.: Высшая школа, 1985. – 230 с.
2. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 364 с.
3. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. Пособие для сред. проф. образования/ Владимир Валентинович Москаленко. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 368 с.

4. Исследование бесконтактного двигателя постоянного тока СБДПТ–2. Методические указания по проведению лабораторной работы. Уфимский институт автоматики и электромеханики. Приложение 1. 1999. – 6 с.

5. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. Курс лекций. – Сп.Б. Издательство: Корона-век, 2006. – 333 с.

Лабораторная работа №10

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ

10.1. Цель работы

Исследование динамических режимов бесконтактного (вентильного) двигателя постоянного тока в замкнутой и разомкнутой системах с использованием компьютерной программы «sdpt.exe».

10.2. Оборудование стенда

Лабораторный стенд состоит из приборного блока и электромеханического агрегата на базе бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ) со встроенным синхронным тахогенератором и электромагнитного тормоза с моментомером (рис 10.1). Электромеханический агрегат соединяется с приборным блоком тремя кабелями на его передней стороне [6].

К разъему СМРТ на лицевой панели приборного блока должен быть подключен информационный кабель, соединяющий блок с компьютером.

Основные технические данные бесконтактного двигателя:

тип БК-1424;

$P_H = 6$ Вт;

$U_H = 27$ В;

$I_H = 0,44$ А;

$n_H = (4000 \pm 10 \%)$ об/мин;

$M_H = 0,0147$ Н·м;

$M_{\Gamma}/M_H = 1,5$;

$\eta_H = 51\%$;

режим работы S1, S2, S3.

Электромеханический тормоз питается от источника постоянного тока, снабжен моментомером, позволяющим измерять вращающий момент на валу двигателя по выражению: $M=K_T \cdot Z$ [Нм], $K_T = 2,4$ Нм/дел – коэффициент перерасчета по моменту; Z – число делений по лимбу моментомера.

Сопротивление обмотки возбуждения тормоза $R_b=80$ Ом.

Для проведения экспериментов необходима компьютерная программа «sbdpt.exe», реализованная на языке программирования ПАСКАЛЬ, предназначенная для использования на ПЭВМ типа IBM PC AT/XT.

Основные технические данные программы «sbdpt.exe»:

- диапазон измерения сигнала тока якоря, ± 5 А;
- диапазон измерения скорости, ± 1000 рад/с;
- диапазон измерения времени переходного процесса, $10 \div 4000$ мс;
- частота измерений (для переходных процессов), >1000 Гц;
- время вывода графиков на печать, <1 мин;

К разъёму СМРТ должен быть подключён информационный кабель, соединяющий приборный блок с компьютером.

10.3. Перевод обозначений элементов оборудования и принципиальной электрической схемы на лицевой панели приборного блока

POWER	Энергия
ARMATURE VOLTAGE	Напряжение якоря
CURRENT SOURCE	Источник тока
ARMATURE CURRENT	Ток якоря
BRAKE	Тормоз
CONTROL VOLTAGE	Управляющее напряжение
TEST MOTOR	Исследуемый двигатель
BRAKE CONTROL	Задатчик нагрузки
DIGITAL TACHOMETER	Цифровой тахометр
SPEED, rad/s	Скорость, рад/с
HG	Датчик Холла
TGW	Измерительная обмотка тахогенератора
CMPT	Компьютер
COMPENSATOR	Компенсатор
POWER	Энергия
ARMATURE VOLTAGE	Напряжение якоря
CURRENT SOURCE	Источник тока

10.4. Общие сведения

10.4.1. Режимы работы и динамические характеристики бесконтактного двигателя

Переходный или динамический режим электропривода – это режим работы при переходе из одного установившегося состояния привода к другому, происходящему во время пуска, торможения, реверсирования и резкого изменения

нагрузки на валу. Эти режимы характеризуются изменениями ЭДС, угловой скорости и тока.

В переходном режиме электропривода одновременно и взаимосвязано между собой действуют переходные электромеханические, электромагнитные и тепловые процессы.

Электромагнитные переходные процессы вызываются электромагнитной инерцией обмоток электрических машин и аппаратов. В некоторых случаях с влиянием электромагнитных процессов можно не считаться, тогда переходные процессы будут определяться только механическими, в которых учитывается только механическая инерция движущихся масс электропривода.

Индуктивностью ($L_{я}=0$) цепи якоря можно пренебречь, если электромеханическая постоянная времени электропривода T_M на порядок и более превосходит электромагнитную постоянную времени цепи якоря $T_э$. При этом скорость вращения ω , ток якоря I и электромагнитный момент M двигателя в различных режимах рассчитывают по выражениям:

$$\omega = \omega_c + (\omega_{нач} - \omega_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (10.1)$$

$$I = I_c + (I_{нач} - I_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (10.2)$$

$$M = M_c + (M_{нач} - M_c) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}, \quad (10.3)$$

где $\omega_{нач}$, ω_c – начальная и установившаяся скорости вращения;

$I_{нач}$, I_c – начальный и установившийся токи;

$M_{нач}$, M_c – начальный момент двигателя и момент статической нагрузки на валу;

T_M – электромеханическая постоянная времени электропривода; определяется по формуле

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\Sigma}}{c^2} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0}{M_k} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \Delta\omega}{M_k}, \quad (10.4)$$

где J_{Σ} – суммарный момент инерции установки (момент инерции механизма, двигателя, редуктора), приведенный к валу двигателя;

$c = \frac{U_H - I_H \cdot R_{я}}{\omega_H}$ – коэффициент связи двигателя;

R_{Σ} – суммарное сопротивление цепи якоря;

ω_0 – скорость идеального х.х.;

M_k – момент короткого замыкания (стопорения) двигателя;

ΔM , $\Delta \omega$ – изменение скорости и момента двигателя между двумя какими-либо точками механической характеристики $\omega = f(M)$;

$t_{\text{пп}}$ – текущее время переходного процесса.

Расчеты заканчивают при достижении 5%-й зоны, если на характеристике реализуется установившийся режим [в этом случае приблизительно $t_{\text{пп}} = (3 \div 5)T_M$], или по истечении времени переходного процесса:

$$t = T_M \cdot \ln \frac{\omega_{\text{нач}} - \omega_c}{\omega_{\text{кон}} - \omega_c} = T_M \cdot \ln \frac{I_{\text{нач}} - I_c}{I_{\text{кон}} - I_c} = T_M \cdot \ln \frac{M_{\text{нач}} - M_c}{M_{\text{кон}} - M_c}, \quad (10.5)$$

если на характеристике не достигается установившийся режим.

В формулы (10.1)...(10.5) следует вносить величины той характеристики, на которой совершается переходный процесс.

При уточненных расчетах учитывают индуктивность цепи якоря и переходные характеристики рассчитывают следующим образом:

$$\omega = \omega_c + A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t};$$

$$I = I_c + A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t};$$

$$M = c \cdot I,$$

где p_1, p_2 – корни характеристического уравнения электропривода

$$p_{1,2} = \frac{-T_M \pm \sqrt{T_M^2 - 4 \cdot T_\gamma \cdot T_M}}{2 \cdot T_\gamma \cdot T_M},$$

при этом

$$T_\gamma = \frac{L_\gamma}{R_\Sigma} - \text{электромагнитная постоянная времени цепи якоря};$$

A_1, A_2, B_1, B_2 – постоянные интегрирования дифференциального уравнения электропривода.

Время достижения максимального значения пускового тока

$$t_M = \frac{\ln \left| \frac{p_1 \cdot B_1}{p_2 \cdot B_2} \right|}{p_2 - p_1}.$$

Двигатель начинает вращаться после подачи напряжения на якорь по истечении времени

$$t_3 = T_3 \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{I_C \cdot R_\Sigma}{U_H}}$$

10.4.1.1. Механические переходные процессы в двигательном режиме ($L_{я} = 0$)

В двигательном режиме исследуются пуск из неподвижного состояния и перевод двигателя с одной характеристики на другую. На рис. 10.2, рис. 10.3 и рис. 10.4 показаны статические электромеханические характеристики для указанных переходных процессов:

- пуск на реостатной характеристике из неподвижного состояния ;
- перевод двигателя с естественной или реостатной характеристики на другую искусственную характеристику ;
- перевод двигателя с реостатной на другую искусственную или естественную характеристики .

Так же на этих рисунках приведены выражения для расчета установившихся скоростей, начальных токов и электромеханических постоянных времени.

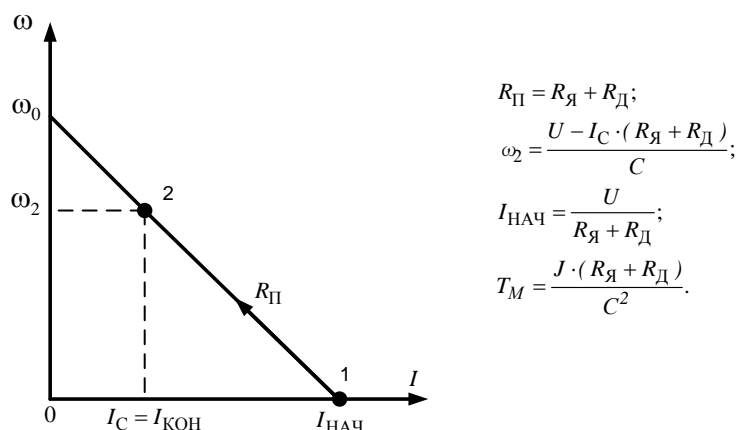
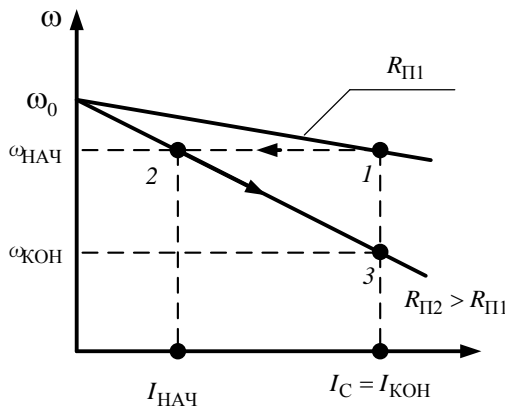


Рис. 10.2. Пуск на реостатной характеристике из неподвижного состояния



$$R_{\Pi 1} = R_{\text{я}} + R_{\text{д1}};$$

$$R_{\Pi 2} = R_{\text{я}} + R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}};$$

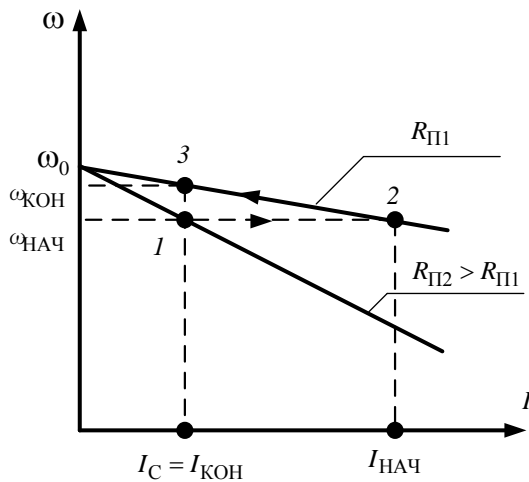
$$\omega_{\text{НАЧ}} = \omega_1 = \frac{U - I_C \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д1}})}{C};$$

$$\omega_{\text{КОН}} = \omega_3 = \frac{U - I_C \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}})}{C};$$

$$I_{\text{НАЧ}} = \frac{U - C \cdot \omega_1}{R_{\text{я}} + R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}}};$$

$$T_M = \frac{J \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}})}{C^2}.$$

Рис. 10.3. Перевод двигателя с естественной или реостатной характеристик на другую реостатную



$$R_{\Pi 1} = R_{\text{я}} + R_{\text{д1}};$$

$$R_{\Pi 2} = R_{\text{я}} + R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}};$$

$$\omega_{\text{НАЧ}} = \omega_1 = \frac{U - I_C \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д1}} + R_{\text{д2}})}{C};$$

$$\omega_{\text{КОН}} = \omega_3 = \frac{U - I_C \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д1}})}{C};$$

$$I_{\text{НАЧ}} = \frac{U - C \cdot \omega_1}{R_{\text{я}} + R_{\text{д1}}};$$

$$T_M = \frac{J \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д1}})}{C^2}.$$

Рис. 10.4. Перевод двигателя с реостатной на реостатную или естественную характеристики

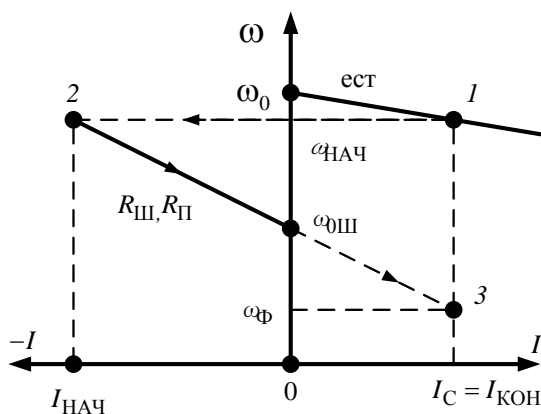
10.4.1.2. Механические переходные процессы в режимах торможения

Исследуются три тормозных режима:

- динамическое торможение при шунтировании якоря резистором (характеристика 2 – $\omega_{0\text{ш}}$), рис. 10.5;
- динамическое торможение с независимым возбуждением и отключенным от сети якорем (характеристика 2–0), рис. 10.6;
- противовключение изменением полярности напряжения якоря (характеристика 2–3), рис. 10.7.

Проверочные расчеты характеристик – $\omega = f(t)$, $I = f(t)$, $M = f(t)$ – выполняются по формулам (10.1)...(10.5), в которых в качестве установившейся скорости принимается фиктивная установившаяся скорость $\omega_{\text{ф}}$.

Реверс включает в себя режим противовключения (характеристика 2–3, рис. 10.7) и пуск в противоположном направлении (характеристика 3–4). Поверочный расчет переходного процесса рекомендуется выполнять по участкам: 2–3 – по формулам противовключения, 3–4 – по формулам пуска.



$$R_{\Pi} = R_{\text{Я}} + R_{\text{Д}};$$

$$R = R_{\text{Я}} + \frac{R_{\text{Ш}} \cdot R_{\text{П}}}{R_{\text{Ш}} + R_{\text{П}}};$$

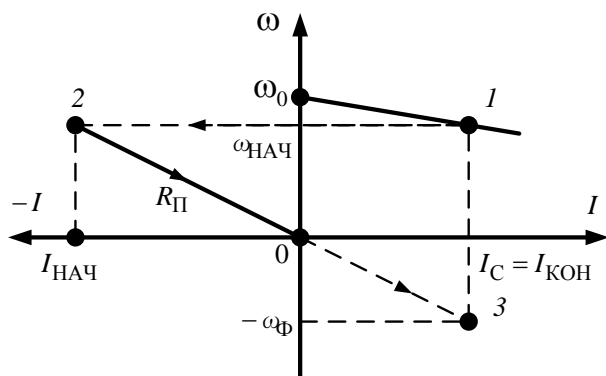
$$\omega_{\text{НАЧ}} = \omega_1 = \frac{U - I_{\text{С}} \cdot R_{\text{Я}}}{C};$$

$$I_{\text{НАЧ}} = \frac{U - C \cdot \omega_1}{R_{\text{Я}} + \frac{R_{\text{Ш}} \cdot R_{\text{П}}}{R_{\text{Ш}} + R_{\text{П}}}};$$

$$\omega_{\text{Ф}} = \frac{U}{C} \cdot \frac{R_{\text{Ш}}}{R_{\text{Ш}} + R_{\text{П}}} - \frac{I_{\text{С}}}{C} \cdot (R_{\text{Я}} + \frac{R_{\text{Ш}} \cdot R_{\text{П}}}{R_{\text{Ш}} + R_{\text{П}}});$$

$$T_{\text{М}} = \frac{J \cdot (R_{\text{Я}} + \frac{R_{\text{Ш}} \cdot R_{\text{П}}}{R_{\text{Ш}} + R_{\text{П}}})}{C^2}.$$

Рис. 10.5. Динамическое торможение при шунтировании якоря резистором $R_{\text{Ш}}$ (характеристика 2 – $\omega_{0\text{Ш}}$)



$$R_{\Pi} = R_{\text{Я}} + R_{\text{Д}};$$

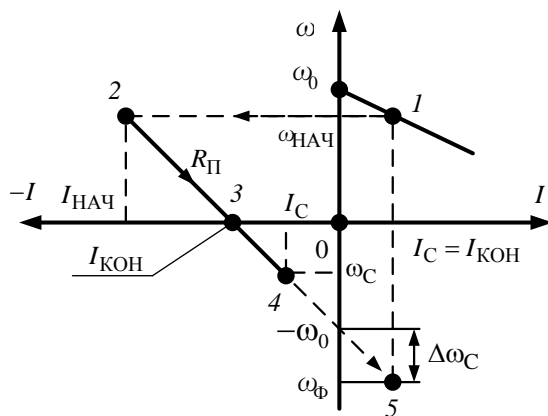
$$\omega_{\text{НАЧ}} = \omega_1 = \frac{U - I_{\text{С}} \cdot (R_{\text{Я}} + R_{\text{Д}})}{C};$$

$$I_{\text{НАЧ}} = -\frac{C \cdot \omega_1}{R_{\text{Я}} + R_{\text{Д}}};$$

$$\omega_{\text{Ф}} = -\frac{I_{\text{С}} \cdot (R_{\text{Я}} + R_{\text{Д}})}{C};$$

$$T_{\text{М}} = \frac{J \cdot (R_{\text{Я}} + R_{\text{Д}})}{C^2}.$$

Рис. 10.6. Динамическое торможение с независимым возбуждением и отключенным от сети якорем (характеристика 2–0)



$$R_{\Pi} = R_{\text{я}} + R_{\text{д}};$$

$$\omega_{\text{НАЧ}} = \omega_1 = \frac{U - I_C \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{C};$$

$$I_{\text{НАЧ}} = \frac{U + C \cdot \omega_{\text{НАЧ}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}};$$

$$I_{\text{КОН}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}};$$

$$\omega_{\text{Ф}} = -(\omega_0 + \Delta\omega_C) = -\left[\omega_0 + \frac{I_C \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{C}\right];$$

$$T_M = \frac{J \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{C^2}.$$

Рис. 10.7. Противовключение изменением полярности напряжения якоря (характеристика 2–3)

10.4.2. Области применения электроприводов с БД

Развитие техники, в первую очередь в отраслях автоматизированного производства, робототехники и средств обработки и передачи информации существенно расширяет уровень требований, предъявляемых к исполнительным электромеханическим устройствам. В первую очередь это касается областей, связанных с производством роботов и манипуляторов. К электромеханическому приводу предъявляется требование преобразовать командные сигналы в механическое перемещение, обеспечивая при этом устойчивую работу привода во всем рабочем диапазоне. В некоторых случаях закономерности преобразования командных сигналов в механическое перемещение настолько сложны, что невозможно их реализовать с помощью известных электромеханических устройств. В этом случае используются исполнительные устройства, управляемые с помощью микроконтроллера, или в более сложных случаях с использованием ЭВМ. Все эти задачи потребовали разработки электромеханических устройств, механические и регулировочные характеристики которых могут быть перестроены в процессе эксплуатации в соответствии с условиями, определяемыми законом управления. Одним из наиболее перспективных устройств электропривода по совокупности технических и эксплуатационных характеристик являются бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ). Эти двигатели обеспечивают устойчивую работу привода в режимах с изменяющейся нагрузкой, имеют относительно высокий КПД и могут быть реализованы в малых габаритах, что особенно важно в космической технике или при создании автономных роботов. Отсутствие коллекторного узла, являющегося необходимым для обычных двигателей постоянного тока, обеспечивает надежную работу устройства в вакууме, взрывоопасных средах, или средах с повышенной запыленностью.

Кроме того, бесконтактные двигатели обеспечивают относительно низкий уровень, создаваемый ими уровень радио и акустических помех. Все эти особенности бесконтактных двигателей определили интерес к этой области проектирования исполнительных устройств электропривода как у нас в стране, так и за границей. В последнее время получены значительные результаты по снижению себестоимости БДПТ, что расширяет возможности использования подобных двигателей в изделиях массового применения: в автомобилестроении, бытовой технике и ряде других отраслей [7].

Рассмотрим примеры выполнения отдельных схем. На рис. 10.8 а показана трехфазная лучевая обмотка с нереверсивным питанием и коммутатором на трех силовых транзисторах. Фазы 01.02.03 подключаются и отключаются от источника питания с помощью транзисторов V_1, V_2, V_3 , управляемых соответственно от чувствительных элементов 1, 2, 3 датчика положения ротора ДПР, имеющего сектор C с угловым размером 120° эл.

В каждый момент времени под током находится только одна фаза. Например, в положении на рис. 10.8 возбужден чувствительный элемент 3, открыт транзистор V_3 , под током фаза 03. Электромагнитный момент, обусловленный взаимодействием полей, ротора и статора соответствующих

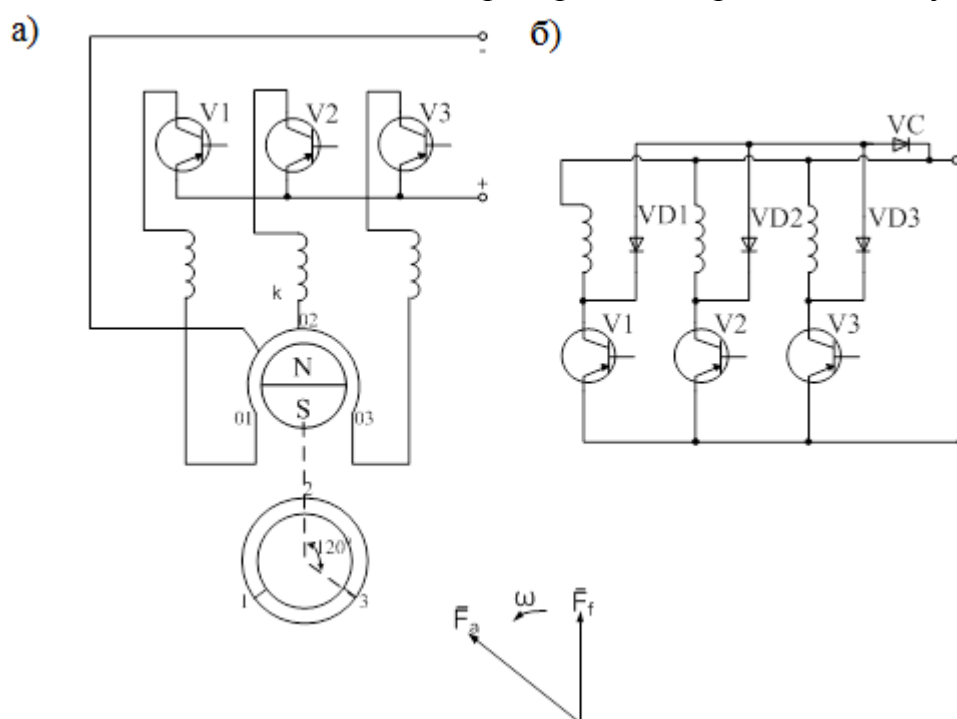


Рис. 10.8. Трехфазный двигатель с нереверсивным питанием:

- а) принципиальная схема, б) схема соединения фаз с коммутатором с учетом защиты от перенапряжений

F_f и F_a , приводит к вращению ротора в направлении стрелки. После подхода сектора C к элементу 2 запирается транзистор V_3 обесточивается фаза 03, открывается транзистор V_2 , подключается фаза 02 и т. д. Электромагнитный

момент при любом положении ротора не меняет свой знак, двигатель пускается из любого положения. Средний угол между векторами F_f и F_a за межкоммутационный период, равный для этой схемы 120° эл. Составляет 90° эл.

Для данной схемы, как и для других схем. принята такая взаимная ориентация элементов конструкции: оси чувствительных элементов 1, 2, 3 параллельны магнитным осям фаз 01, 02, 03; ось симметрии сектора якоря датчика положения составляет с осью полюсов магнита угол 90° эл. Возможны и другие виды ориентации элементов, если они не нарушают условия нейтральной коммутации. Схема соединения обмотки двигателя с коммутатором показана на рис. 10.8,б. Каждая фаза для снятия перенапряжений, возникающих в момент отключения соответствующего транзистора, шунтирована диодом VD и общим стабилитроном VC. Для схем с нереверсивным питанием шунтировать фазу одним только диодом нельзя, так как ЭДС вращения фазы на интервале поворота, на котором транзистор отключен (пассивный интервал), вызовет протекание тока через диод и создаст тормозной электромагнитный момент (момент динамического торможения). Чтобы исключить это явление последовательно с диодом включается цепочка стабилитронов, напряжение пробоя которой несколько выше, чем амплитуда ЭДС вращения в режиме холостого хода. Таким образом, шунтирующий диод вступает в работу только тогда, когда при отключении фазы ЭДС самоиндукции «пробивает» цепочку стабилитронов. Напряжение на транзисторе ограничивается величиной напряжения пробоя стабилитронов.

На рис. 10.9,а показана схема трехфазной лучевой обмотки с реверсивным питанием и коммутатором мостового типа на шести транзисторах. Датчик положения ДПР похож на датчик предыдущей схемы, однако имеет шесть чувствительных элементов, три из которых 1, 2, 3 управляют нижней группой транзисторов, а другие три 1', 2' 3' — верхней группой. Поскольку сектор ДПР имеет угловой размер 120° эл., а угловое расстояние между соседними чувствительными элементами — 60° эл., то всегда возбуждены два элемента, открыты два транзистора и под током две фазы двигателя. Межкоммутационный период такого двигателя $\vartheta_K = 60^\circ$ эл., причем мостовой тип коммутатора обеспечивает изменение направления тока в фазе за один полный оборот ротора. Это легко проследить, мысленно поворачивая ротор, согласно рис. 10.9,а против часовой стрелки и замечая* какие элементы при этом оказываются возбужденными, какие транзисторы открыты и какое направление тока в фазах. Можно заметить при этом, что средний за период ϑ_K угол между векторами F_f и F_a составляет, как и в предыдущей схеме, 90° , а вектор F_f совершает на каждом периоде перемещение от $90^\circ + 30^\circ$ до $9^\circ - 30^\circ$ (рис. 10.9,а).

Схема соединения фаз обмотки с коммутатором показана на рис. 10.9,б.

Схема в отличие от предыдущей содержит мост обратных диодов VD1-VD4'(стабилитроны не нужны), служащий для снятия коммутационных перенапряжений.

Существуют и другие довольно разнообразные схемы обмоток и коммутаторов. Достоинством трехфазной схемы с нереверсивным питанием фаз (рис 10.8,а) является ее простота, малое количество силовых транзисторов и чувствительных элементов, а недостатком — плохое использование меди обмотки (под током только одна фаза) и сравнительно низкий КПД. Этих недостатков лишена схема с реверсивным (двухполупериодным) питанием фаз на рис. 10.9,а. Однако она содержит в два раза больше силовых транзисторов и, возможно, (не всегда) в два раза большее число чувствительных элементов ДПР. Трехфазная схема (рис. 10.9,а) получила широкое распространение, как мы отмечали ранее, для относительно мощных двигателей, для которых важны высокие удельные показатели по моменту и мощности, а также высокий уровень КПД.

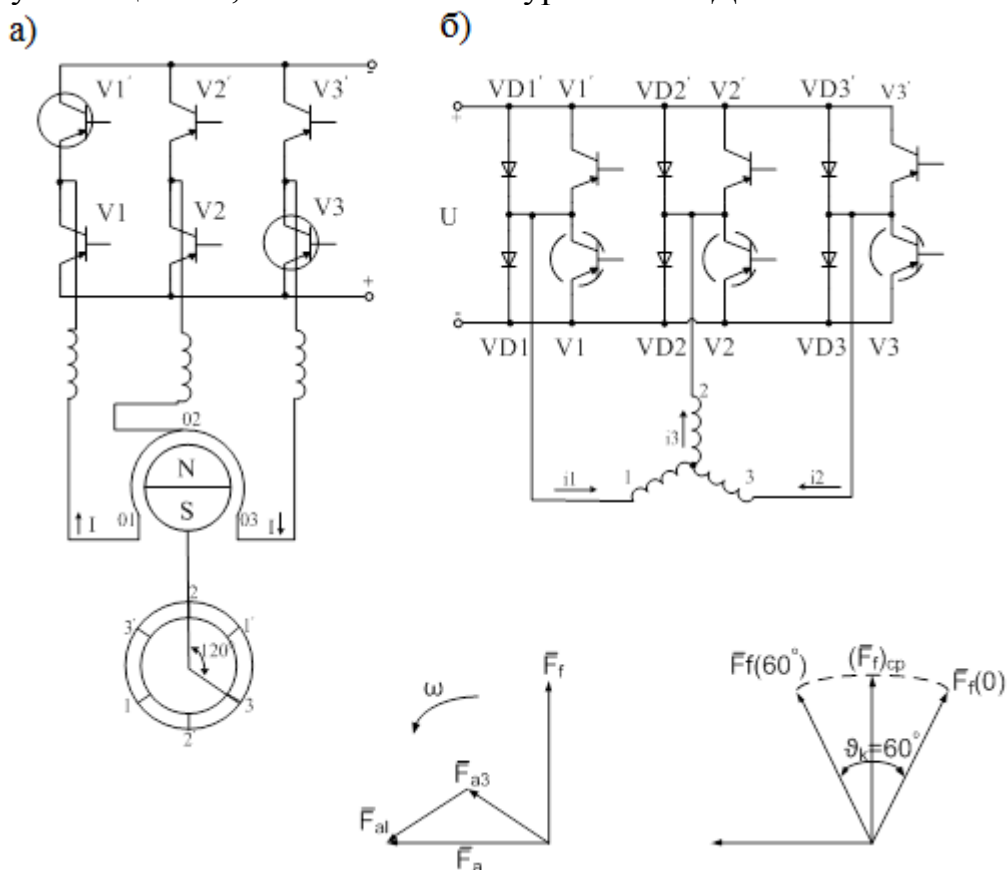


Рис. 10.9. Трехфазный двигатель с реверсивным питанием:
а) принципиальная схема, б) схема соединения фаз с коммутатором

Применение вентильных двигателей с постоянными магнитами, для которых используются рассмотренные схемы обмоток и коммутаторов, охватывают следующие области техники:

- приводы роботов и станков;
- звукозаписывающая и звуковоспроизводящая аппаратура;
- самописцы приборов и медицинская техника;
- насосы, компрессоры, центрифуги;
- передвижные транспортные средства;
- конвейерные линии;
- системы аэрокосмической техники;
- системы корабельной техники и другие направления.

Теперь рассмотрим некоторые типичные схемы коммутаторов и вентильных двигателей с пассивным невозбужденным (реактивным) ротором (Switched Reluctance Motor).

Вентильные двигатели с реактивным ротором (ВДРР) работают по принципу, аналогичному ВД с постоянными магнитами. Для ВДРР, имеющего магнитную несимметрию на роторе (зубчатость ротора), характерно стремление совмещения соответствующих зубцов ротора с эквивалентной магнитной осью статора, по обмотке которого проходит ток. Меняя положение магнитной оси статора путем последовательного согласованного переключения фаз, можно обеспечить создание знакопостоянного в среднем момента двигателя и вращение его ротора в необходимом направлении.

На рис. 10.10 показаны принципиальные схемы трехфазного (а) и четырехфазного (б) ВДРР. Двигатель на рис. 10.10 а имеет шесть зубцов на статоре, на которых расположены фазы 01, 02, 03. Каждая фаза включена в диагональ моста на двух транзисторах V и диодах VD . Датчик положения ротора содержит три чувствительных элемента, каждый из которых управляет соответствующей парой транзисторов. Якорь датчика имеет симметрично расположенные секторы, число которых равно числу зубцов ротора. Для определенности рассмотрим положим, что число зубцов статора z_1 больше числа зубцов ротора z_2 .

Межкоммутационный период ВДРР равен

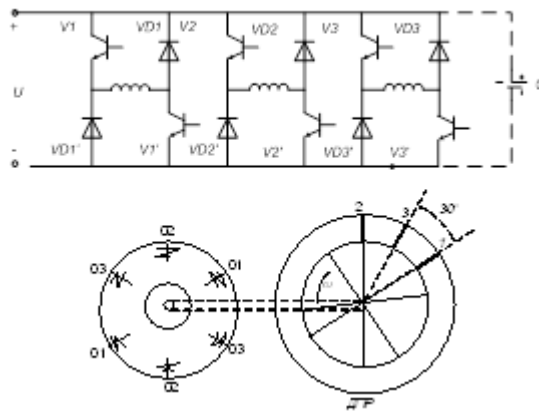
$$\mathcal{G}_k = 2\pi \cdot \frac{z_1 - z_2}{z_1 \cdot z_2} \text{ геом.рад.}$$

Для уяснения принципа работы двигателя рассмотрим рис. 10.10,а. На рисунке сектор якоря выходит из взаимодействия с чувствительным элементом 1 и входит во взаимодействие с чувствительным элементом 2. Транзисторы V_1 и V_1' закрываются, а V_2 и V_2' открываются. Ток в фазе 01 спадает до нуля, проходя по контуру «фаза — диод VD_1 — источник —

диод VD_1' — фаза». Тот же контур может быть образован с участием емкости C . Ток в фазе 02 возрастает и зубцы ротора «притягиваются» к зубцам статора, на которых расположена фаза 02. Ротор поворачивается на угол, равный ($\alpha_k = \pi/6$) - Далее ДПР отключает фазу 02 и включает фазу 03 и т. д. Ротор находится в непрерывном вращении, поскольку последовательное включение фаз 01, 02, 03 создает знакопостоянный электромагнитный момент. Аналогично работает схема рис. 10.10,б.

По сравнению с ВД с постоянным магнитом с тремя фазами и тремя транзисторами рис. 10.8,а, где под током только одна из трех фаз, схема на рис. 10.10,а имеет удвоенное число силовых транзисторов и диодов. Это необходимо для более эффективной коммутации отключаемой фазы, имеющей по сравнению со схемой с постоянным магнитом значительно большую индуктивность.

а)



б)

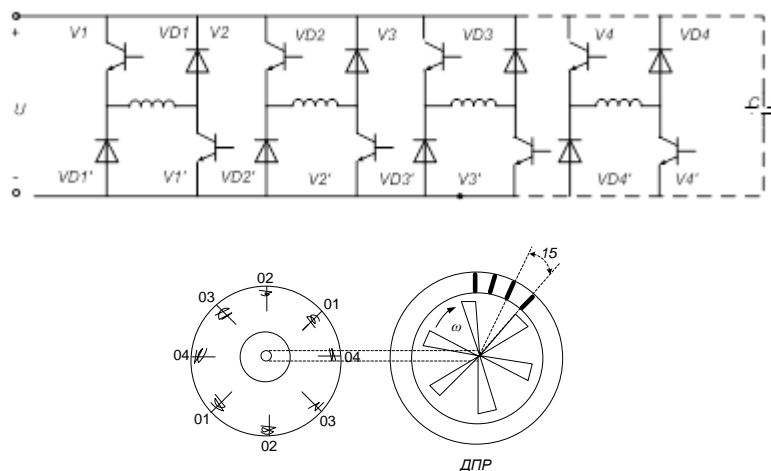


Рис. 10.10. Принципиальная схема трехфазного (а) и четырехфазного (б) вентильных двигателей с реактивным ротором

Несмотря на конструктивную простоту ВДРР и меньшую стоимость электромеханической части, он имеет несколько худшие энергетические и массогабаритные характеристики по сравнению ВД с постоянными магнитами (ВДПМ), однако оптимизация методов управления и оптимизация его конструкции позволяют в ряде случаев достигнуть и даже превзойти показатели других типов двигателей.

Области применения ВДРР приблизительно такие же, как и ВДПМ. Особо следует выделить применение в тихоходных высокомоментных приводах, а также в электроинструменте.

На базе ВДРР эффективным становится создание высокомоментных низкооборотных приводов. Благодаря увеличению числа зубцов статора и ротора удается увеличить коэффициент момента при заданном токе.

10.5. Описание принципиальной электрической схемы стенда

Принципиальная схема стенда приведена на рис. 10.1.

Бесконтактный двигатель состоит из трёх частей: собственно двигателя, датчиков углового положения ротора и полупроводникового коммутатора.

У бесконтактного двигателя постоянного тока щёточно-коллекторный узел отсутствует, его роль выполняет транзисторный коммутатор, управляемый датчиками углового положения ротора.

Статор двигателя имеет неявнополюсную конструкцию, на статоре размещается обмотка якоря из четырёх секций: Н1–К1, К2–Н2, Н3–К3, К4–Н4 (рис. 10.1). Каждая секция состоит из двух катушек, соединённых последовательно и размещённых на противоположных полюсах статора. Секции Н–К1 и Н3–К3 запитываются от однополярного источника с начала, а секции К2–Н2 и К4–Н4 – с конца; это необходимо для создания однополярного электромагнитного момента двигателя и вращения ротора. В исследуемом двигателе в качестве углового датчика положения ротора использованы два датчика ЭДС Холла. В двигателе два датчика размещаются в специальных пазах в расточках статора и сдвинуты друг относительно друга на угол 90° (на рис. 10.1 обозначены G и HG). При вращении ротора (и вместе с ним его постоянных магнитов) датчики вырабатывают на выходах М5–М6 и М7–М8 напряжения, величины и знаки которых соответствуют величине и знаку магнитных индукций поля, создаваемого ротором – индуктором.

Эти напряжения являются управляющими для транзисторов VT3, VT4, VT9, VT10.

Транзисторный коммутатор работает следующим образом: каждая секция обмотки якоря коммутируется транзисторным ключом (секции Н1–К1 – VT9, К2–Н2 – VT10, Н3–К3 – VT4, К4–Н4 – VT3). База каждого транзистора подключена к выводам датчиков ЭДС Холла (гнезда М5, М6 и М7, М8). На токовые выводы датчиков Холла подаётся напряжение питания $+U_{\text{п}}$ (гнездо М13), которое формируется специальной схемой. Если транзистор VT1 закрыт, закрываются транзисторы VT9, VT10, VT3, VT4 и $U_{\text{п}}=+26$ В. Если VT1 открыт, то ток протекает через датчики Холла и напряжение $U_{\text{п}} < 5$ В.

Угловая скорость двигателя измеряется цифровым тахогенератором. Скорость двигателя регулируется изменением напряжения источника питания с помощью потенциометра R1 или трёхсекционным реостатом в цепи якоря (гнезда М1..М4, сопротивление каждой секции $R_a=3$ Ом).

Стабилизация скорости двигателя в замкнутой системе управления выполняется введением в схему отрицательной обратной связи по скорости. Для этого через компенсатор (COMPENSATOR) на входе транзистора VT1 сравниваются по величине два напряжения: напряжение управления U_y , снимаемое с потенциометра R3, и напряжение обратной связи по скорости $U_{\text{ос}}$, подведённое от тахометрической обмотки ТGW двигателя через разделительный трансформатор TV, диодный выпрямитель VD3 и фильтр низких частот ЕС.

10.6. Программа экспериментов

Порядок экспериментального исследования переходных процессов в разомкнутой и замкнутой системах управления:

В разомкнутой системе:

- проверка работоспособности стенда
- зарисовать характеристики скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при пуске без нагрузки и с нагрузкой;
- зарисовать характеристики скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при торможении без нагрузки и с нагрузкой;
- зарисовать характеристики скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при реверсе без нагрузки и с нагрузкой;
- зарисовать характеристики скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при переводе двигателя с естественной характеристики на реостатную и наоборот;
- зарисовать характеристики скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при пуске на реостатной характеристике без нагрузки и с нагрузкой;

- зарисовать характеристики скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при набросе и сбросе нагрузки.

В замкнутой системе:

- проверка работоспособности стенда
- зарисовать характеристики скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при сбросе и набросе нагрузки.

10.7. Проверка работоспособности стенда и запуск программы

Внимание! Ток якоря не должен превышать 500 мА.

Для этого необходимо:

- поставить переключатели S1 и S2 в левое положение;
- вывести ручку потенциометра R1 в крайнее правое положение;
- вывести ручки потенциометров R2 и R3 в крайнее левое положение;
- включить автомат на левой боковой панели приборного блока, загорается световой индикатор «POWER»;
- повернуть вправо ручку потенциометра R3 и убедиться, что двигатель вращается, установить потенциометром $U_{\text{упр}}=0,75$ В (вольтметр PV2);
- переключить S3, двигатель при этом должен изменить направление вращения;
- при $U_{\text{упр}}=5$ В повернуть ручку потенциометра R1 влево и с помощью тахометра убедиться, что скорость двигателя уменьшилась, затем повернуть ручку потенциометра R1 в крайнее правое положение;
- повернуть ручку потенциометра R2 вправо и убедиться, что тормоз реагирует на увеличение тока возбуждения в его катушке;
- повернуть ручки потенциометров R2 и R3 в крайнее левое положение
- перевести переключатели S1 и S2 в левое положение;
- рекомендуется работа в ОС DOS;
- если пользователь находится в Windows, то необходимо открыть клавишей Enter окно Far, зайти в папку и выбрать файл «TMP → SBDPT → SBDPT.exe»;
- с помощью клавиши F2 зайти в окно «Динамические характеристики»;
- выставить максимальные значения скорости $\omega=600$ рад/с, тока $I=1,5$ А, времени $t=300$ мс, программа готова к работе;
- ручки потенциометров и переключателей установить в исходное положение.

10.8. Назначение клавиш и процедур записи переходных процессов

Во время работы программы в нижней части экрана содержится информация о назначении клавиш клавиатуры. Причём в каждый момент времени действуют только те команды, которые изображены выделенным (белым) цветом:

- клавиша F1 – возврат в меню выбора режима;
- клавиша F2 – прорисовка нового графика;
- клавиша F3 – запись;
- клавиша F4 – печать графиков и таблиц переходных процессов;
- клавиша F10 – выход из программы.

В верхней строке экрана располагается справочная информация: значение тока, скорости и времени на одно деление масштабной сетки графика. Запись переходных процессов $\omega=f(t)$ и $I=f(t)$ может быть выполнена двумя способами.

Первый способ – асинхронный, в этом случае запись производится при нажатии клавиши F3. Данный способ не рекомендуется при записи переходных процессов, так как требуется определённый навык для того, чтобы в нужный момент нажать клавишу.

Второй способ – синхронный. Для синхронизации записи программа анализирует напряжение задания скорости, нагрузки (потенциометры R3 и R2, и переключатель S1 на передней панели приборного блока) и состояние переключателя S3, которые используются для организации переходного процесса. Для записи процесса необходимо нажать клавишу «Пробел», после этого программа будет ожидать изменение состояния любого из переключателей: S1, S3 или потенциометров R2, R3.

ВНИМАНИЕ! Необходимо, чтобы интервал времени между нажатием клавиши «Пробел» и переключением S1, S3, R2, R3 был минимальным. Это обусловлено особенностями программы.

10.9. Исследование динамических режимов электропривода с помощью компьютерной программы «sbdpt.exe»

10.9.1. Подготовка стенда к работе и запуск программы

Для этого необходимо:

- автомат на левой боковой панели приборного блока выключен;
- переключатели S1, S2 – в левом положении;
- потенциометр R1 выведен в крайнее правое положение;
- потенциометры R2, R3 установлены в крайнее левое положение;
- рекомендуется работа в операционной системе DOS; если пользователь находится в Windows, необходимо запустить менеджер файлов «FAR manager», а затем зайти в папку «C:\TMP\SBDPT\» и запустить программу «sbdpt.exe»;
- открыть окно (файл) «Динамические характеристики», путем нажатия клавиши F2.

10.10. Снятие переходных процессов $\omega=f(t)$ и $I=f(t)$ в разомкнутой системе

10.10.1. Пуск без нагрузки

Для этого необходимо:

- установить переключку M1 – M4;
- потенциометр R1 – в крайнее правое положение;
- потенциометр R2 – в крайнее левое положение;
- потенциометр R3 – в крайнее левое положение;
- переключатель S1 – в правое положение;
- переключатель S2 – в левое положение;
- переключатель S3 – в верхнее положение;
- нажать F2;
- нажать «Пробел» и затем – быстро перевести S1 в левое положение (на экране должны появиться графики переходных процессов).

Изменяя максимальное значение параметров тока, скорости и времени (выходя в соответствующее меню с помощью «Esc»), добиться того, чтобы графики переходных процессов занимали всё пространство экрана.

Для вложения полученных графиков в отчёт по лабораторной работе возможны два способа вывода информации:

- вывод на принтер;
- запись на Flash-память.

Если подключен принтер, следует использовать клавишу F4. При отсутствии принтера необходимо воспользоваться Flash-памятью. Для этого запустить из меню «Пуск > Программы > Стандартные» графический редактор «Paint» и поместить в него содержимое буфера обмена (меню

«Правка > Вставить» или Shift-Ins (или Ctrl-V). Сохранить полученную информацию на Flash-памяти вернуться в программу «sbdpt.exe» (Alt-Tab).

10.10.2. Пуск с нагрузкой

Повторить процедуры пункта 10.10.1, установив потенциометром R2 ток якоря не более 500 мА.

10.10.3. Торможение без нагрузки

Повторить процедуры пункта 10.10.1 за исключением того, что S1 должен находиться в исходном состоянии в левом положении.

10.10.4. Торможение с нагрузкой

Повторить процедуры пункта 10.10.1 за исключением того, что потенциометром R2 установить ток якоря не более 500 мА, при этом переключатель S1 находится в левом положении.

10.10.5. Реверс без нагрузки

Повторить процедуры пункта 10.10.1 за исключением того, что переключатель S1 должен находиться в исходном состоянии в левом положении. Реверс осуществлять переводом переключателя S3 из верхнего положения в нижнее.

10.10.6. Реверс с нагрузкой

Повторить процедуры пункта 10.10.1 за исключением того, что:

- потенциометром R2 установить ток якоря не более 500 мА;
- S1 должен находиться в исходном состоянии в левом положении;
- реверс осуществлять переводом переключателя S3 из верхнего положения в нижнее.

10.10.7. Пуск на реостатной характеристике без нагрузки

Повторить процедуры пункта 10.10.1 за исключением:

- снять переключки M1 – M4.

10.10.8. Пуск на реостатной характеристике с нагрузкой

Повторить процедуры пункта 10.10.1 за исключением:

- снять переключки М1 – М4;
- потенциометром R2 установить ток якоря не более 500 мА.

10.10.9. Перевод двигателя с естественной характеристики на реостатную

Повторить процедуры пункта 10.10.1 за исключением:

- переключатель S1 в исходном состоянии находится в левом положении;
- потенциометром R2 установить ток якоря не более 500 мА;
- перевод с естественной характеристики на реостатную осуществлять размыканием переключков М1 – М4.

10.10.10. Перевод двигателя с реостатной характеристики на естественную

Повторить процедуры пункта 10.10.9 за исключением того, что перевод двигателя с реостатной характеристики на естественную осуществлять замыканием переключков М1 – М4.

10.10.11. Наброс нагрузки

Повторить процедуры пункта 10.10.1 за исключением:

- переключатель S1 в исходном состоянии находится в левом положении;
- зарисовку графика осуществлять при переводе потенциометра R2 из левого положения в правое после нажатия клавиши «Пробел».

10.10.12. Сброс нагрузки

Повторить процедуры пункта 10.10.1 за исключением:

- переключатель S1 в исходном состоянии находится в левом положении;
- потенциометром R2 установить ток якоря не более 500 мА;
- зарисовку графика осуществлять при переводе потенциометра R2 из правого положения в левое после нажатия клавиши «Пробел».

10.11. Снятие переходных процессов $\omega=f(t)$, $I=f(t)$ в замкнутой системе

10.11.1. Наброс нагрузки

Для этого необходимо:

- установить переключки M1–M4;
- ручку потенциометра R3 – в крайнее правое положение;
- ручку потенциометра R2 – в крайнее левое положение;
- переключатель S1 – в левое положение;
- переключатель S2 – в левое положение;
- переключатель S3 – в верхнее положение;
- ручкой потенциометра R3 выставить $U_y=2$ В;
- нажать клавишу F2;
- зарисовку графика осуществлять переводом ручки потенциометра R2 в крайнее правое положение после нажатия клавиши F3.

Изменяя максимальное значение параметров тока, скорости и времени (выход в соответствующее меню с помощью клавиши «Esc»), необходимо добиться того, чтобы графики переходных процессов занимали всё пространство экрана.

Для вложения полученных графиков в отчёт по лабораторной работе возможны два способа вывода информации, приведенные в пункте 10.10.1.

10.11.2. Сброс нагрузки

Повторить процедуру пункта 10.11.1 за исключением:

- потенциометром R2 установить ток якоря не более 500 мА;
- зарисовку графика осуществлять переводом потенциометра R2 в крайнее левое положение после нажатия клавиши «Пробел».

ВНИМАНИЕ! На один график можно выводить несколько переходных процессов. Это необходимо использовать для того, чтобы сравнить характеристики пуска и торможения.

После того как закончено построение графика на экране ПЭВМ для вывода его на печать нужно заправить в принтер бумагу и нажать клавишу F4.

По окончании работы нажать клавишу F10 и выключить питание ПЭВМ и принтера.

10.12. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема электропривода с краткими пояснениями.
3. Графики переходных процессов скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при пуске без нагрузки и с нагрузкой.
4. Графики переходных процессов скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при реверсе без нагрузки и с нагрузкой.
5. Графики переходных процессов скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при переводе двигателя с реостатной характеристики на естественную и наоборот.
6. Графики переходных процессов скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при сбросе и набросе нагрузки.
7. Графики переходных процессов скорости $\omega=f(t)$ и тока $I=f(t)$ при сбросе и набросе нагрузки в замкнутой системе.
8. Краткие выводы.

При обработке графиков переходных процессов на каждой характеристике необходимо отметить:

- максимальное значение тока во время переходных процессов $I_{\text{макс}}$;
- установившиеся начальное и конечное значения тока и скорости $I_{\text{н}}$, $I_{\text{к}}$, $\omega_{\text{н}}$, $\omega_{\text{к}}$;
- время переходного процесса, $t_{\text{пт}}$;
- при сбросе и набросе величину выброса и проседания скорости;
- относительную величину пульсаций тока $\delta I\% = I/I_{\text{уст}}$, здесь I – абсолютная величина размаха пульсаций тока;
- установившееся после переходного процесса значение тока $I_{\text{уст}}$;
- наибольший размах пульсаций тока и найти $\delta I\%_{\text{макс}}$. После окончания переходного процесса пульсации принимают постоянное значение $\delta I\%_{\text{уст}}$;
- проанализировать полученные временные зависимости координат и параметров электропривода. Результаты анализа занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1

№ П/П	Параметр переходного процесса								Переходный процесс (пуск, реверс, торможение и т.д.)
	$t_{\text{пт}}$, мс	$\omega_{\text{уст}}$, с^{-1}	$\omega_{\text{нач}}$, с^{-1}	$I_{\text{нач}}$, мА	$I_{\text{уст}}$, мА	$\delta I_{\text{уст}}$, %	$\delta I_{\text{макс}}$, %	$I_{\text{макс}}$, мА	
1									

Окончание таблицы 10.1

2									
3									
4									
5									
6									

10.13. Контрольные вопросы

10.13.1. В чём сущность стабилизации скорости в замкнутой системе при сбросе и набросе нагрузки?

10.13.2. Дать анализ времени переходного процесса при пуске двигателя без нагрузки и с нагрузкой.

10.13.3. Чем обусловлено разное время переходного процесса при торможении двигателя без нагрузки и с нагрузкой?

10.13.4. Изобразить графики скорости и тока в режиме наброса нагрузки.

10.13.5. Нарисовать графики скорости и тока в режиме сброса нагрузки.

10.13.6. Начертить графики скорости и тока при переводе двигателя с реостатной характеристики на естественную и наоборот.

10.13.7. Что происходит со скоростью и током при реверсе? Как меняется момент при реверсе?

Литература

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.: Высшая школа, 1994. – 407 с.
3. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1979. – 615 с.
4. Арменский Е.В., Фальк Г.Б. Электрические микромашины. – М.: Высшая школа, 1985. – 230 с.
5. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 364 с.

6. Исследование бесконтактного двигателя постоянного тока СБДПТ–2. Методические указания по проведению лабораторной работы. Уфимский институт автоматики и электромеханики. Приложение 1. 1999. – 6 с.

7. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. Курс лекций. – Сп.Б. Издательство: Корона-век, 2006 – 333 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1	Лабораторная работа №1 Исследование реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока в системе промышленного электрооборудования.....	3
2	Лабораторная работа №2 Исследование реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока в системе промышленного электрооборудования с управлением от компьютера.....	37
3	Лабораторная работа №3 Исследование системы «преобразователь-двигатель постоянного тока» в схеме промышленного электрооборудования.....	81
4	Лабораторная работа №4 Исследование электропривода переменного тока в системе промышленного электрооборудования.....	106
5	Лабораторная работа №5 Исследование процессов автоматизированного пуска и торможения двигателей постоянного тока независимого возбуждения.....	132
6	Лабораторная работа №6 Исследование асинхронного электропривода при частотном управлении в системе электрооборудования промышленности.....	166
7	Лабораторная работа №7 Сборка и проверка схемы шкафа для реверсивного управления асинхронным двигателем с помощью микропроцессорного монитора тока (Криков).....	199
8	Лабораторная работа №8 Сборка и проверка схемы асинхронного двигателя с ручным и микропроцессорным управлением.....	227
9	Лабораторная работа №9 Исследование режимов работы и статических характеристик бесконтактного электродвигателя постоянного тока в системе электрооборудования промышленности.....	261
10	Лабораторная работа №10 Исследование динамических режимов бесконтактного двигателя постоянного тока с использованием компьютерной программы.....	284

Учебное издание

ОДНОКОПЫЛОВ Иван Георгиевич
ДЕМЕНТЬЕВ Юрий Николаевич
СЕМЕНОВ Сергей Михайлович

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Научный редактор
доктор технических наук,
профессор

С.И. Качин

Верстка


В.А. Русскин

Подписано к печати 00.00.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. .
Заказ . Тираж экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO
9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.