

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
Владимирский государственный университет  
Кафедра автоматизации технологических процессов

# УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКИ

*Методические указания к лабораторным работам*

Составители:  
А.А. КОБЗЕВ  
А.А. НАЗАРОВ  
А.Н. КИРИЛИНА

Владимир 2004

УДК [621.316.37+621.316.9] (075.)

ББК 31.221.033-5

У82

Рецензент

Доктор технических наук, профессор  
Владимирского государственного университета  
*В.В. Морозов*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Владимирского государственного университета

**Устройства** электроавтоматики: метод. указания к лабораторным работам / сост.: А.А. Кобзев, А.А. Назаров, А.Н. Кирилина; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Ред.-издат. комплекс ВлГУ, 2004. – 67 с.

Рассмотрены вопросы углубленного изучения конструкции, принципов работы и основных технических характеристик элементов и устройств электроавтоматики, проведения их сравнительного анализа, расчета и выбора для применения в различном технологическом оборудовании с учетом особенностей технико-экономических показателей его эксплуатации.

Подготовлены в соответствии с программой курса «Элементы и устройства автоматики».

Содержат описание лабораторных работ и необходимые для проведения занятий сведения о лабораторных установках.

Предназначены для студентов специальностей 210200 «Автоматизация технологических процессов и производств», 071800 «Мехатроника», 072300 «Лазерная техника и лазерные технологии».

Табл. 5. Ил. 33. Библиогр: 12 назв.

УДК [621.316.37+621.316.9] (075.)

ББК 31.221 033-5

## ПРЕДИСЛОВИЕ

*Целью данных методических указаний является углубленное изучение и исследование промышленных элементов и устройств автоматики.*

*В задачи проведения лабораторных занятий входит изучение конструкции, принципов работы и основных характеристик устройств автоматики, методик их расчета и выбора, приобретение навыков построения принципиальных электрических схем пуска, регулирования и управления исполнительных устройств технологического оборудования. По результатам проведенных исследований решаются вопросы модернизации технологического оборудования при выполнении курсовых и дипломных проектов.*

*В результате выполнения лабораторных работ студенты получают практические навыки расчета и выбора элементов и устройств автоматики, построения принципиальных электрических схем, решения технических задач, встающих при рассмотрении вопросов защиты и управления режимами работы потребителей электрической энергии.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1. Цель работы

Целью работы является исследование временных характеристик реле и схем измерения времени срабатывания и отпускания.

### 2. Описание лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема установки представлена на рис.1.1, а. Испытуемое реле - типа РКН.

Стенд позволяет определить:

- напряжение и ток срабатывания;
- параметры временной характеристики (ток и время срабатывания, ток и время отпускания);
- собрать и исследовать схемы форсировки и замедления срабатывания реле.

Назначение элементов схемы видно из рис. 1.1. Сопротивления  $R_{3,4}$ , конденсаторы  $C_1, C_2$  служат для набора схем форсировки и замедления срабатывания. Временная характеристика  $I(t)$  регистрируется электронно-лучевым осциллографом (ЭО). Время срабатывания  $t_{ср}$  и отпускания  $t_{отп}$  реле определяется электронной схемой, состоящей из генератора  $G$ , двух схем «И», счетчика СТ.

Принцип действия схемы определения времени срабатывания поясняется временной диаграммой рис. 1.1, б. На вход счетчика импульсы с генератора поступают через размыкающий контакт 1Р1, схему «И1», в момент  $t_1$  после подачи напряжения на обмотку реле и второй вход схемы «И1» (тумблер  $T_3$  в положении  $t_{сраб}$ ). После срабатывания реле и соответственно размыкания контакта 1Р1 подача импульсов в счетчик прекращается.

Таким образом, зная период следования  $T$  и число импульсов, соответствующих времени срабатывания реле, оно определяется

$$t_{сраб} = nT.$$

Аналогично определяется время отпускания, только при этом работает нижняя цепь (тумблер  $T_3$  в положении  $t_{отп}$ ).

Время трогания  $t'_{тр}, t''_{тр}$  и движения могут быть получены по времен-

ной характеристике  $I(t)$ , зарегистрированной на экране электронно-лучевого осциллографа.

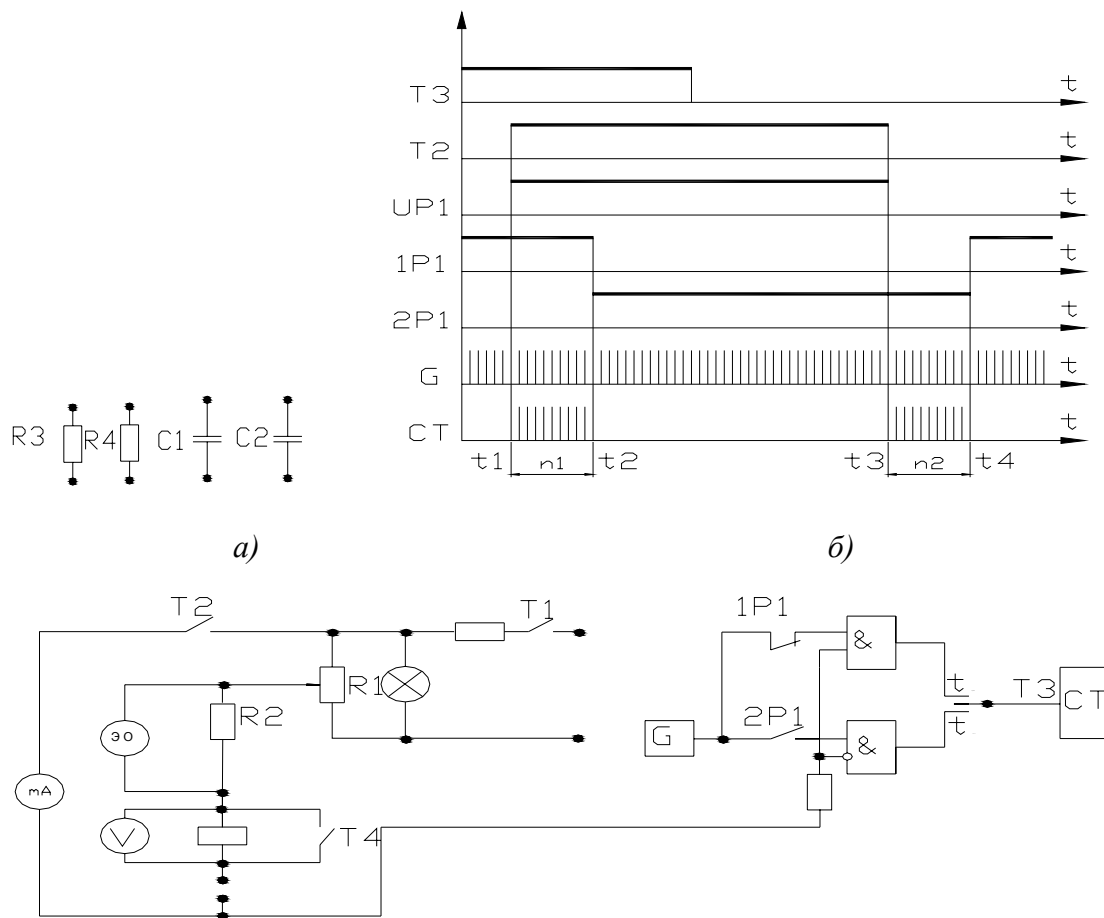


Рис. 1.1. Схема лабораторного стенда: а – R-C элементы форсирующих цепочек, расположенных на лицевой панели стенда; б – временные диаграммы работы элементов схемы; в – принципиальная электрическая схема установки

### Характеристики реле

Основные характеристики реле:

- 1) рабочее напряжение;
- 2) ток срабатывания;
- 3) сопротивление обмотки;
- 4) характер и число контактных групп;
- 5) время срабатывания и отпускания;
- 6) коэффициент возврата;

- 7) величина тягового усилия;
- 8) тип магнитной системы.

Динамика реле характеризуется временной характеристикой (рис.1.2), ( $\delta$  – зазор между якорем и сердечником электромагнита).

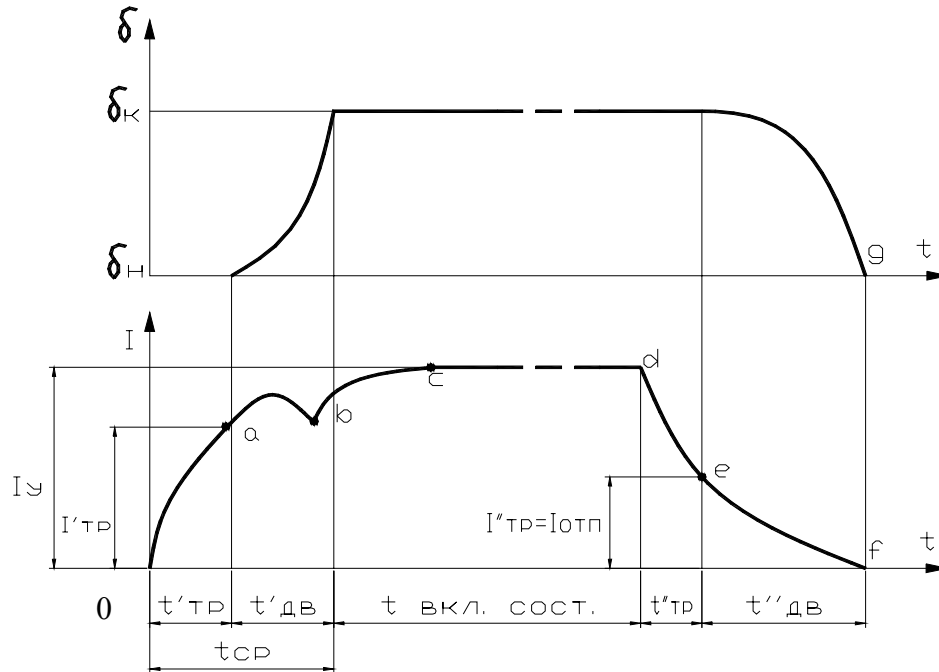


Рис. 1.2. Временная характеристика реле

На участке 0 - a переходный процесс описывается уравнением

$$U = IR + L \frac{dI}{dt}, \quad \text{где } L = \text{const}, \quad L = \omega^2 G \delta,$$

тогда  $i = I_y(1 - e^{-\frac{t}{T}})$ , где  $T = \frac{L}{R}$ ,  $I_y = \frac{U}{R}$ .

Трогание якоря наступает в момент, когда  $I = I_{тр}$ , т.е.

$$t_{тр} = T \ln \frac{1}{1 - \frac{I_{тр}}{I_y}} = T \ln \frac{I_y}{I_y - I_{тр}}.$$

На участке a - b происходит изменение магнитной проводимости зазора, в исходном уравнении появляется дополнительный член

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt}.$$

Так как  $\frac{dL}{dt} > 0$ , то составляющие  $IR + L \frac{dI}{dt}$ , по сравнению с участком

0 - a, начинают уменьшаться, чем и объясняется провал на временной характеристике. Время движения якоря на данном участке является сложной зависимостью многих параметров реле и приближенно может быть определено по формуле:

$$t'_{дв} \approx 0,14 \sqrt{\frac{G\delta}{F_{\theta} - F_M}},$$

где  $F_{\theta}, F_M$  – соответственно тяговое усилие и усилие пружины.

$$t'_{дв} \approx (0,1 \div 0,4)t'_{тр}.$$

На участке b - c после перемещения якоря индуктивность постоянна  $I = (I_y - I'_{тр})(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) + I_{тр}$ , где  $T_1 = \frac{L_1}{R}$ , где  $L_1$  – индуктивность при притяннутом якоре.

Отпускание якоря реле может быть вызвано либо отключением напряжения питания от обмотки, либо замыканием этой обмотки накоротко или через дополнительное сопротивление.

В первом случае ток в обмотке практически мгновенно уменьшается от  $I_y$  до нуля. Однако при этом наводится значительная ЭДС самоиндукции  $e = -L \frac{dI_y}{dt}$ . В результате чего может произойти пробой изоляции проводников обмотки.

Поэтому, как правило, реле постоянного тока шунтируется диодом, включенным встречно с источником питания (рис.1.3).

В результате этого режим отпускания соответствует замыканию обмотки реле накоротко. Тогда ток изменяется по экспоненте  $I = I_y e^{-\frac{t}{T_2}}$ .

В момент времени (участок d - e) (см. рис. 1.2), когда тяговое усилие становится меньше противодействующих сил, начинается движение якоря.

Время трогания  $t''_{тр}$  при размыкании определяется  $t''_{тр} = T \ln \frac{I_y}{I''_{тр}}$

Время движения  $t''_{дв}$  определяется сложной зависимостью и является функцией многих параметров.

#### *Способы изменения времени срабатывания и отпускания реле*

Различают конструктивные и схемные способы изменения времени срабатывания и отпускания. Первый способ предполагает снижение массы подвижных частей или уменьшение потерь на вихревые токи.

Рассмотрим схемные методы ускорения срабатывания реле (рис. 1.3, а, б).

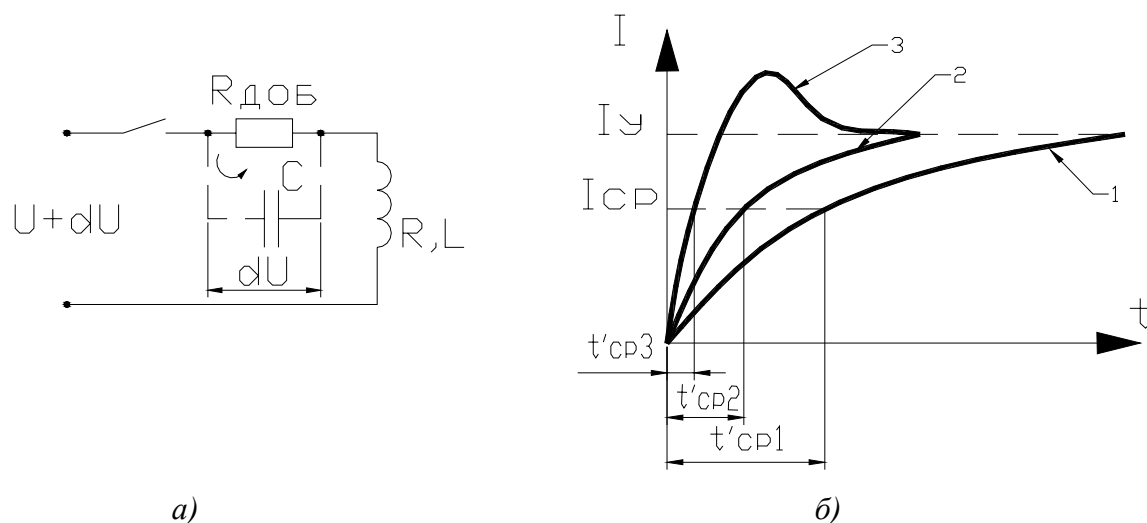


Рис. 1.3. Схема ускорения срабатывания реле (а) и графики изменения тока в катушке управления реле (б)

На рис 1.3, б кривая 1 характеризует переходный процесс в обмотке реле без принудительного ускорения срабатывания реле.

Включение последовательно с обмоткой реле добавочного активного сопротивления  $R_{доб}$  (рис. 1.3, б) приводит к уменьшению постоянной времени цепи, т.е. к уменьшению времени срабатывания (кривая 2), так как

$$T = \frac{L}{R + R_{доб}}$$

Ещё большее быстроедействие (в 5 – 10 раз) можно получить, включив параллельно  $R_{доб}$  (рис. 1.3, а) форсирующую ёмкость  $C$ , так как сопротивление конденсатора  $X_c = \frac{1}{\omega c}$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = \frac{1}{\Delta t_{замык}}$ ,  $\Delta t_{замык} \rightarrow 0$  значительно меньше  $R_{доб}$ .

Зарядный ток конденсатора резко увеличивается до значительной величины, поэтому ток в обмотке реле быстрее достигает значения тока срабатывания и, следовательно,  $t''_{cp}$  становится меньше (рис. 1.3, б, кривая 3). За малое время этот ток не успевает перегреть обмотку реле. Для сохранения величины установившегося тока  $I_y$  необходимо увеличить напряжение питания на величину  $\Delta U$

$$\Delta U = I_H R_{доб}$$

Способы замедления отпущения иллюстрируются рис. 1.4. В схеме, приведенной на рис. 1.4, а, замедление срабатывания достигается включе-



нием конденсатора  $C$  параллельно обмотке. При замыкании цепи источника питания ток проходит сначала через  $C$  в обход  $L_{\text{обм}}$ , так как индуктивное сопротивление больше емкостного

$$X_L = \omega L \gg X_C = \frac{1}{\omega C},$$

а затем, после заряда емкости, через обмотку реле. Время переходного процесса определяется из соотношения

$$I_{\text{ср}} = \frac{U}{R + R_{\text{доб}}} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{L - 2CR_{\text{доб}}^2}{2LCR_{\text{доб}}} t \right) e^{\gamma t} \right], \quad \gamma = -\frac{t + 2(R + R_{\text{доб}})C}{2(R + R_{\text{доб}})C}.$$

Как правило, эта схема используется для замедления отпуска якоря при размыкании.

После размыкания цепи якорь удерживается за счет потока, создаваемого током разряда конденсатора,

$$t_{\text{разм}} = RC.$$

Для замедления размыкания применяют короткозамкнутый демпфирующий виток. При размыкании цепи питания в нем наводится поток, который препятствует убыванию потока в магнитной системе реле, что влечет за собой увеличение времени размыкания реле (рис. 1.4, б).

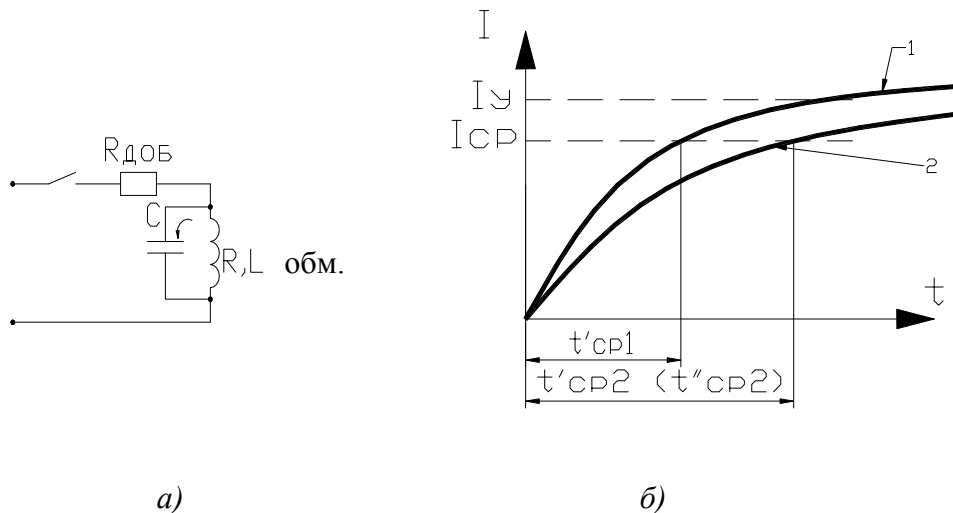


Рис. 1.4. Схемы замедления отпуска реле (а) и графики изменения тока в катушке управления реле (б)

### 3. Правила техники безопасности

3.1. К работе на лабораторной установке допускаются лица, прошедшие инструктаж в соответствии с инструкцией по технике безопасности.

3.2. Лабораторная работа выполняется в соответствии с методическими указаниями по выполнению лабораторной работы.

3.3. Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо ознакомиться с правилами использования приборов, входящих в состав лабораторной работы.

3.4. Убедиться в исправности оборудования и приборов. Обо всех неисправностях в оборудовании, приборах и т.п. в период занятий необходимо извещать руководителя занятий немедленно.

3.5. Набор схем проводить только при выключенном стенде.

3.6. В местах соединений необходимо обеспечить плотный контакт.

3.7. По окончании работы обесточить приборы, стенд. Убрать за собой рабочее место.

#### **4. Порядок выполнения работы**

4.1. Ознакомиться с лабораторной установкой и с правилами эксплуатации используемой измерительной аппаратуры.

4.2. Определить номинальное напряжение и ток срабатывания реле.

4.3. Определить коэффициент возврата, время срабатывания и отпускания реле и другие параметры временной характеристики.

4.4. Исследовать схемы ускорения и замедления срабатывания реле (по рис. 1,4).

*Используемая аппаратура: осциллограф типа С1-19, С1-58, счетчик импульсов типа Ф5007.*

#### **5. Содержание отчета**

5.1. Схема установки, исследуемые схемы.

5.2. Аналитические зависимости времени срабатывания от параметров схемы.

5.3. Экспериментальные характеристики, определённые по пп. 4.2 – 4.4.

#### **6. Контрольные вопросы**

6.1. Принцип действия реле постоянного тока.

6.2. Классификация реле.

6.3. Тяговая характеристика.

6.4. Временная характеристика, аналитическое описание.

6.5. Способы и схемы изменения времени срабатывания и отпускания реле.

## **РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

### **1. Цель работы**

Изучение принципа действия магнитного пускателя и релейно-контактных схем управления электрическими двигателями, приобретение практических навыков монтажа релейно-контактных схем.

### **2. Принцип действия магнитного пускателя и построение схем управления электрическими двигателями на его основе**

В настоящее время для повышения производительности станков наметилась тенденция внедрения многодвигательного привода, т.е. применение нескольких двигателей для выполнения различных операций (например, двигатель шпинделя и два двигателя подачи по соответствующим осям на фрезерном станке). Основная часть станочного парка на сегодняшний день оснащена однодвигательными приводами с асинхронными двигателями. Одними из основных требований, предъявляемых к схемам управления асинхронного двигателя, являются достаточная простота, высокая надежность и долговечность.

Для управления асинхронными двигателями при ступенчатом регулировании скорости применяются магнитные пускатели. При управлении одним двигателем с их помощью можно осуществлять следующие операции управления:

- включение;
- выключение;
- реверс;
- торможение.

При управлении двумя или более двигателями кроме перечисленных операций можно производить различного рода взаимные блокировки, на-

пример, включение или выключение в определенной временной зависимости исполнительных двигателей.

Схема магнитного пускателя представлена на рис 2.1, *а, б*.

На рис. 2.1, *а* приведена принципиальная электрическая схема включения и выключения асинхронного двигателя с помощью магнитного пускателя с необходимыми защитными устройствами. На рис. 2.1, *б* представлена та же схема, но с соблюдением соответствия между расположением элементов электрооборудования на схеме и в действительности. Под магнитным пускателем понимают комплект контактной аппаратуры, предназначенной для пуска и остановки асинхронного двигателя без ограничения пускового тока. При управлении основными агрегатами различают силовую цепь, по которой течет ток нагрузки (сеть – предохранитель – контакты 1К1-1К3 – элементы тепловых реле – статор двигателя) и цепь управления (контакты тепловых реле – катушка контактора – кнопки).

В схеме рис. 2.1 питание силовой цепи и цепи управления осуществляется от одного источника. Однако в целях повышения надежности релейных и контактных аппаратов, большей частью рассчитанных на низкое напряжение, а также в целях повышения безопасности эксплуатации часто применяются схемы, предусматривающие питание цепей управления от источника пониженного напряжения (220 В, 36 В).

Схема работает следующим образом. При нажатии кнопки «Пуск» *SB2* получает питание обмотка контактора, который срабатывает и замыкает контакты 1К1-1К3 в силовой цепи, подключая тем самым двигатель к напряжению сети. Одновременно блок-контакт 1К4 шунтирует кнопку «Пуск», в результате чего при ее отпускании цепь питания контактора не размыкается.

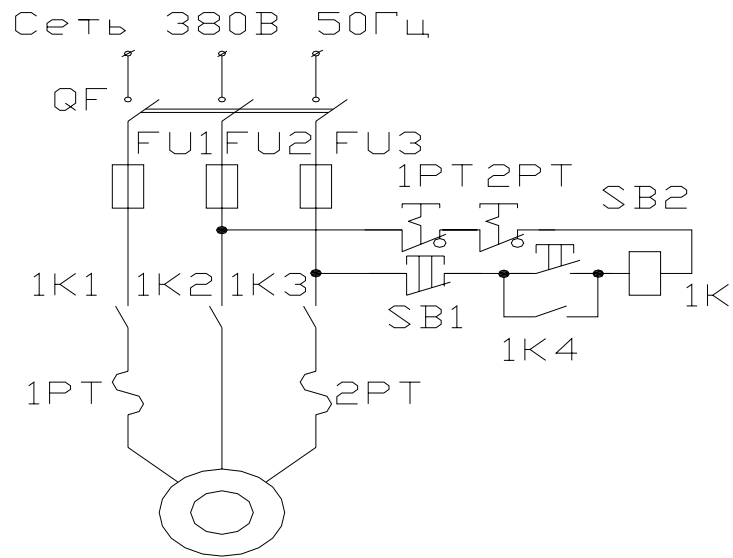
При нажатии кнопки «Стоп» *SB1* размыкается цепь питания контактора, он размыкает свои контакты в цепи статора двигателя, и двигатель останавливается.

При управлении электродвигателями обязательно применяются два вида защиты:

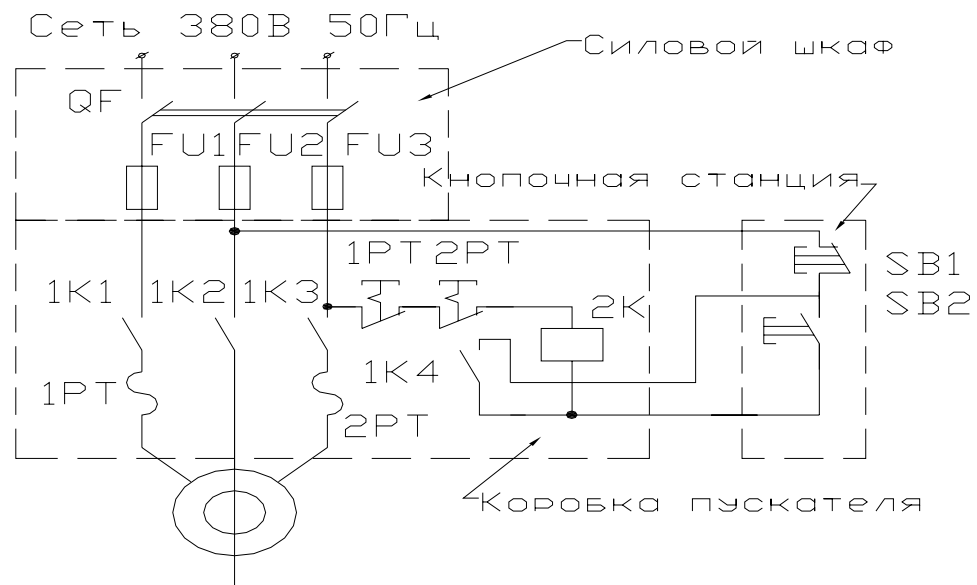
- от короткого замыкания – предохранители;
- от перегрузок – тепловое реле по току.

Для двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей с фазным

ротором, пускаемых посредством реостата, предохранители (плавкие вставки) подбирают на номинальный ток.



а)



б)

Рис. 2.1. Принципиальная электрическая схема включения и выключения асинхронного двигателя с помощью магнитного пускателя (а) и принципиальная электрическая схема включения и выключения асинхронного двигателя с помощью магнитного пускателя с учетом особенностей расположения элементов оборудования в действительности (б)

Для короткозамкнутых асинхронных двигателей предохранители нельзя так выбирать, т.к. пусковой ток превышает номинальный в 3 – 7

раз, поэтому для них выбирается предохранитель, рассчитанный на ток в 2 – 2,5 раза меньше пускового.

Вследствие кратковременности пуска вставка при пуске не успевает расплавиться. Для защиты асинхронных (а также и всех других типов) двигателей от длительных нагрузок (возрастание нагрузки, обрыв фазы) применяются тепловые реле, тепловой элемент которых включается последовательно с нагрузкой, а контакты - в цепь управления последовательно с обмоткой контактора. При перегрузках тепловой элемент (биметаллическая пластина) деформируется и через систему рычагов размыкает контакты в цепи управления, обесточивая обмотку контактора, который размыкает силовую цепь. Как правило, используются два тепловых реле, что вполне достаточно, т.к. при обрыве любой фазы одно из двух тепловых реле всегда будет задействовано, при обрыве двух фаз двигатель останавливается. Магнитные пускатели предусматривают включение тепловых реле в цепи питания двух фаз обмоток электродвигателя. Обычно в этом случае имеется два однофазных реле, которые размещаются в пределах габаритов контактора, непосредственно на его основании. Реле могут выполняться также двухфазными или трехфазными. В этом случае они размещаются в пускателе за пределами габаритов контактора.

Назначение реле состоит в том, чтобы не допустить работы двигателя при перегреве обмоток из-за ненормального увеличения нагрузки электродвигателя.

Защитная характеристика реле (связывающая время его срабатывания с током, вызывающим срабатывание) имеет такой же вид, как перегрузочная характеристика двигателя (рис. 2.2). Однако в действительности вследствие различных масс и условий нагрева двигателя и реле они не совпадают. Если бы обе характеристики совпали, то защита была бы идеальной.

На рис. 2.3 показано типичное взаимное расположение перегрузочной характеристики двигателя в замкнутой системе регулирования и характеристики реле для случая, когда номинальный ток двигателя и ток, соответ-

ствующий границе срабатывания реле, одинаковы (1 - перегрузочная характеристика электродвигателя, 2 - защитная характеристика реле).

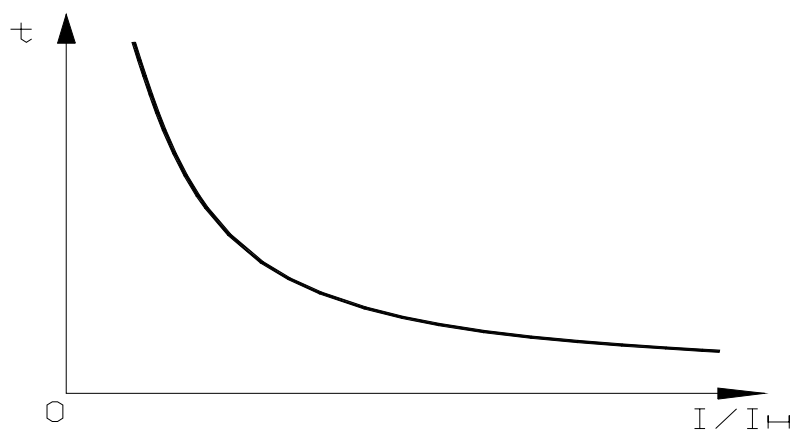


Рис. 2.2. График защитной характеристики реле

При этом видно, что имеется значительная зона, где реле срабатывает раньше, чем двигатель достигнет допустимой температуры - зоны перезащищенности. В то же время при больших перегрузках двигателя имеется зона незащищенности. За счет выбора конструкций реле и соответствующего тока срабатывания добиваются лучшего согласования характеристик реле и электродвигателя.

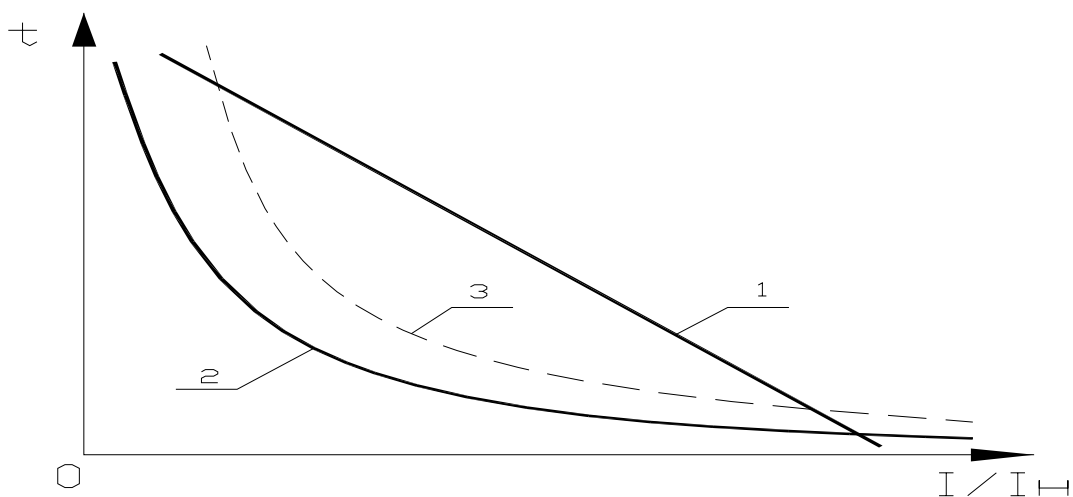


Рис. 2.3. Графики взаимного расположения характеристик реле и двигателя

Следует отметить, что при выборе тока срабатывания теплового реле близким по величине к номинальному току двигателя зона незащищенности двигателя увеличивается.

С целью уменьшения этой зоны и лучшего использования перегрузочной способности двигателя ток срабатывания реле выбирают на 15–20 % выше номинального тока двигателя.

В этом случае защитная характеристика реле займет (рис. 2.3) положение 3 и наряду с уменьшением зоны защищенности будут существовать две зоны незащищенности двигателя: одна как и раньше - в области больших перегрузок, другая - в области малых перегрузок.

Появление зоны незащищенности при малых двигательных перегрузках не представляет опасности для двигателя, так как, если такие перегрузки будут часто повторяться, значит, двигатель выбран неправильно и должен быть более мощным. Недозащищенность же в области больших перегрузок может быть скомпенсирована применением плавких предохранителей.

Кроме того, в магнитном пускателе осуществляется так называемая нулевая защита, заключающаяся в том, что при исчезновении или значительном снижении напряжения в сети катушка контактора перестает удерживать его во включенном состоянии и двигатель отключится от сети. После восстановления нормального напряжения сети самопроизвольного пуска двигателя не произойдет.

#### *Примеры релейно-контактных схем управления*

В некоторых случаях электродвигатели отдельных приводов должны быть между собой электрически заблокированы. Одна из таких схем представлена на рис. 2.4. Замыкающий контакт 1К, включенный в цепь катушки 2К, позволяет включить второй двигатель только при работе первого двигателя. Такая блокировка встречается у фрезерных станков с отдельным приводом подачи. Во избежание аварии (поломки фрезы) схема должна быть построена так, чтобы привод подачи мог работать лишь при вращении шпинделя.

При замене в цепи катушки 2К замыкающего контакта 1К размыкающим, второй двигатель получает возможность работать только в том случае, если первый двигатель не включен. Блокировка такого рода также часто встречается в схемах станков.

Если посредством одной кнопки необходимо управлять несколькими электрическими цепями, прибегают к использованию многоконтактного промежуточного реле. На рис. 2.5 представлена схема, у которой при на-



жиме на кнопку *SB2* включается промежуточное реле РП, включающее одновременно контакторы 1К, 2К и т.д. и обеспечивающие одновременный пуск нескольких двигателей.

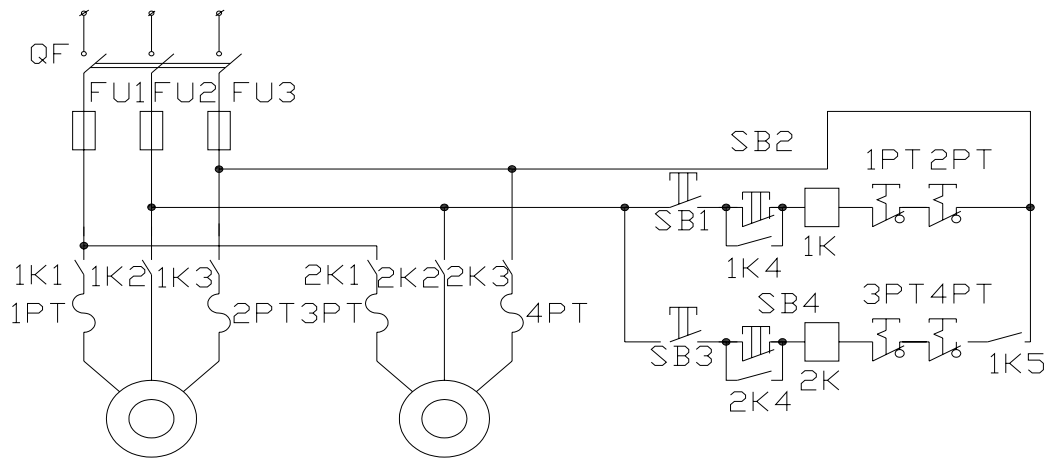


Рис. 2.4. Принципиальная электрическая схема последовательного пуска двух асинхронных двигателей

При нажатии на кнопку *SB1* одновременно отключаются все электродвигатели. Наряду с групповым управлением предусмотрена возможность включения и отключения каждого электродвигателя в отдельности. Подобное управление применяют, например, для включения всей станочной линии и отдельных станков, входящих в ее состав.

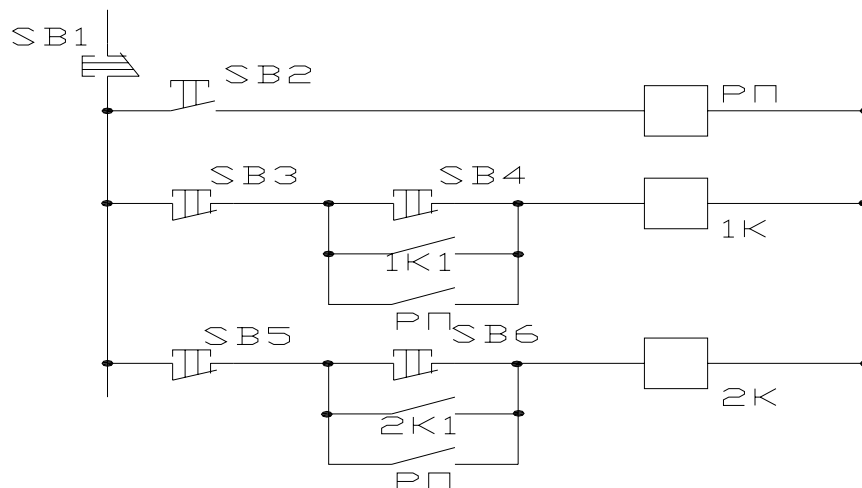


Рис. 2.5. Принципиальная электрическая схема управления одновременным пуском нескольких асинхронных двигателей

При реверсивном управлении электродвигателем требуются два контактора: для хода вперед КВ и для хода назад КН (рис. 2.6, а). При случайном одновременном включении контакторов КВ и КН в цепи рабочего то-

ка возникнет короткое замыкание, так как крайние линейные провода соединяются крайними контактами контакторов КВ и КН. Во избежание одновременного включения двух контакторов применяют электрическую блокировку, осуществляемую размыкающими контактами кнопок *SB2* (вперед) и *SB1* (назад).

Когда нажимают кнопку *SB2*, замыкается цепь катушки КВ и размыкается цепь катушки КН. Контакт КН, если он был включен, отключается. При одновременном нажатии на кнопки *SB2* и *SB1* их размыкающие соответственно разрывают цепи катушек КН и КВ, и ни один из контакторов включиться не может.

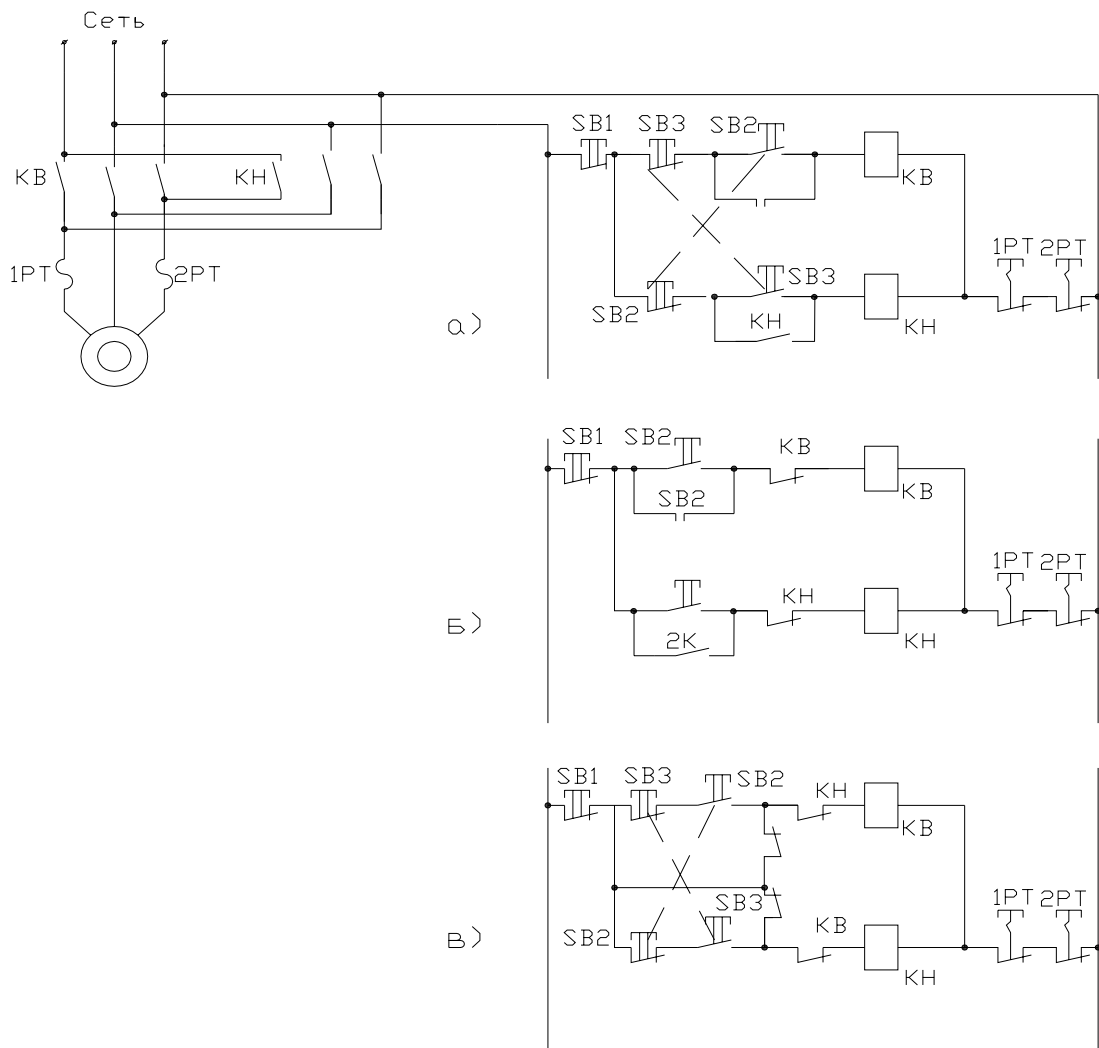


Рис. 2.6. Принципиальные электрические схемы реверсивного управления асинхронным двигателем с элементами электрической (а, б) и механической (в) блокировок

Если схема реверса выполнена с применением двух отдельных контакторов, то электрическая блокировка, осуществляемая размыкающими

контактами кнопок, не предотвращает короткие замыкания при всех возможных случаях. Так, если подвижная система контактора КН в рассмотренном примере вследствие приваривания главных контактов или механического заедания не отпадает после отключения катушки КН размыкающим контактом кнопки *SB2* или отпадает с замедлением, произойдет короткое замыкание в рабочей цепи, так как контактор КВ включается при замыкании и.о. контакта кнопки *SB2*.

На рис. 2.6, б представлена цепь управления схемы, в которой электрическая блокировка, не допускающая одновременного включения обоих контакторов, осуществляется посредством размыкающих контактов КН и КВ. При этом замыкаются контакты КВ в цепи рабочего тока, блок-контакт самоблокировки КВ, шунтирующий кнопку *SB2*, и размыкается контакт КВ, включенный в цепь катушки КН. Пока контактор КВ не будет отключен и его подвижная система полностью не отпадет, нажатие на кнопку *SB1* не вызывает замыкания цепи катушки контактора КН. Для реверса в схеме данного варианта необходимо предварительно нажать кнопку *SB3*.

Схема, показанная на рис. 2.6, в не допускает реверса электродвигателя без промежуточного нажатия на кнопку *SB3*, а при одновременном нажатии на кнопки *SB2* и *SB3* ни один контактор не включается (как и в схеме, изображенной на рис. 2.6, б).

Реверсивные магнитные пускатели, содержащие по два контактора на общей панели, обычно снабжены механической блокировкой. В этом случае посредством коромысла или кулачков не допускается включение одного контактора, когда другой уже включен или пока полностью не отключится. При использовании схемы, представленной на рис. 2.6, в, требуется применить реверсивный пускатель с механической блокировкой, которая предотвратит короткое замыкание в указанных выше случаях.

Однако при применении реверсивных магнитных пускателей переменного тока не следует ограничиваться одной механической блокировкой, это объясняется тем, что при замыкании цепи катушки контактора переменного тока, который не имеет возможности включаться, в катушке течет ток, который в несколько раз превышает нормальный.

При длительном нажатии на кнопку катушка может сгореть и поэтому надо осуществлять электрическую блокировку размыкающих контактов контакторов.

Схемы, представленные на рис. 2.6, используют в случае длительной работы электропривода. Часто требуется, чтобы электропривод металло-режущих станков работал лишь при нажатии кнопки «Пуск». Подобное управление необходимо при различных установочных перемещениях, когда при кратковременном нажатии на кнопку должно произойти небольшое перемещение (толчок) движущегося элемента станка. В этом случае не нужны контакты самопитания и кнопка «Стоп». Такая схема представлена на рис. 2.7, а.

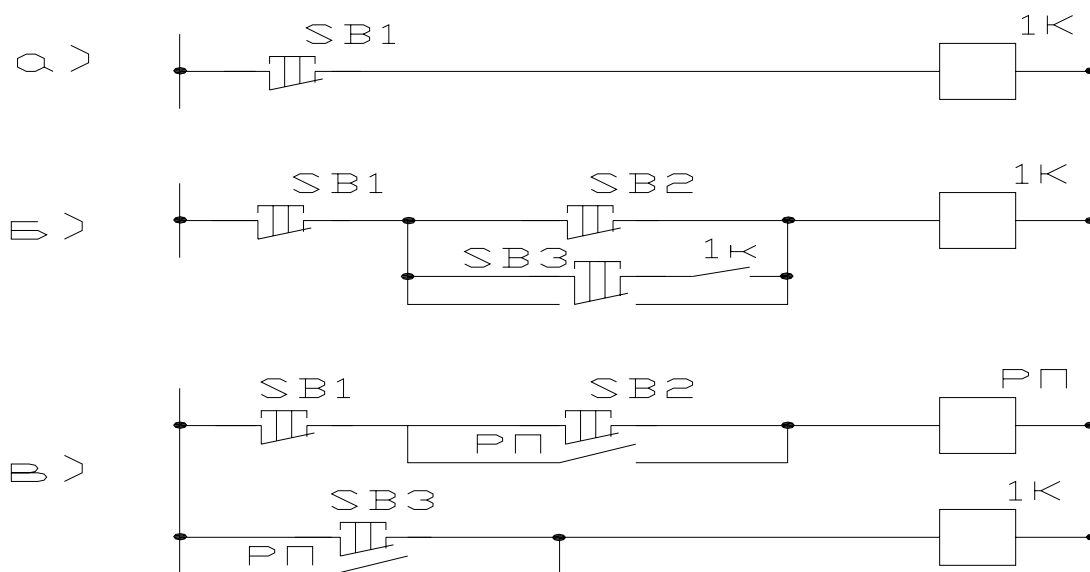


Рис. 2.7. Пример построения схем управления асинхронными двигателями для обеспечения установочных перемещений механизмов

Часто возникает необходимость управления одним и тем же приводом в обоих указанных режимах. Схема, обеспечивающая такое управление, изображена на рис. 2.7, б. В этой схеме при кратковременном нажатии на кнопку SB2 обеспечивается длительная работа привода. В случае нажатия на кнопку SB3 (установка) её замыкающий контакт включает контакт 1К, а размыкающий контакт размыкает цепь самопитания контактора. При применении этой схемы необходимо учитывать возможность задержки отпадания контактора 1К.

При этом размыкающий контакт отпущенной кнопки SB3 может замкнуться раньше, чем разомкнется блок-контакт 1К и двигатель будет продолжать работать. Действие схемы, представленной на рис. 2.7, в, оди-

наково при любом времени отпадания контактора. Для длительной работы двигателя нужно кратковременно нажать кнопку *SB2*. Это вызовет включение промежуточного реле РП. Один замыкающий контакт реле шунтирует кнопку *SB2* и дает возможность прекратить её нажатие, не вызывая отключения реле, другой – включает рабочую катушку контактора 1К. Для осуществления установочного перемещения достаточно нажать кнопку *SB3*.

Не каждое расположение контактов в цепи управления целесообразно. Так, например, расположение контактов, показанное на рис. 2.8, является нерациональным. Кнопочная станция находится на станине станка, а контактор и ввод сети – в шкафу с аппаратурой электрического управления станком. При указанном на рис. 2.8 расположении контактов нужен лишний провод, проложенный между кнопочной станцией и шкафом управления. Кроме того, в кнопочной станции кнопки *SB2* и *SB1*, присоединенные к различным полюсам цепи, находятся близко одна к другой, что создает возможность коротких замыканий. В связи с этим все контакты электроаппаратуры стремятся размещать по одну сторону катушки контактора или реле.

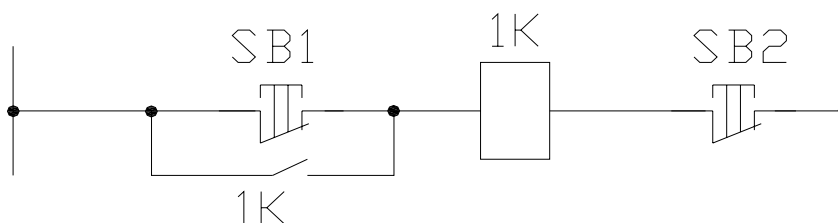


Рис. 2.8. Пример нерационального построения схемы управления пуском асинхронного двигателя

### 3. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой текстолитовую плиту, на наружной панели которой расположены элементы магнитных пускателей и кнопка «Стоп» (рис. 2.9). Места соединения с другими элементами путем вынужденного контакта выведены на клеммы, расположенные на наружной панели.

Таким образом, соединяя проводами соответствующие элементы, можно набирать рассмотренные релейно-контактные схемы управления одним или двумя двигателями.

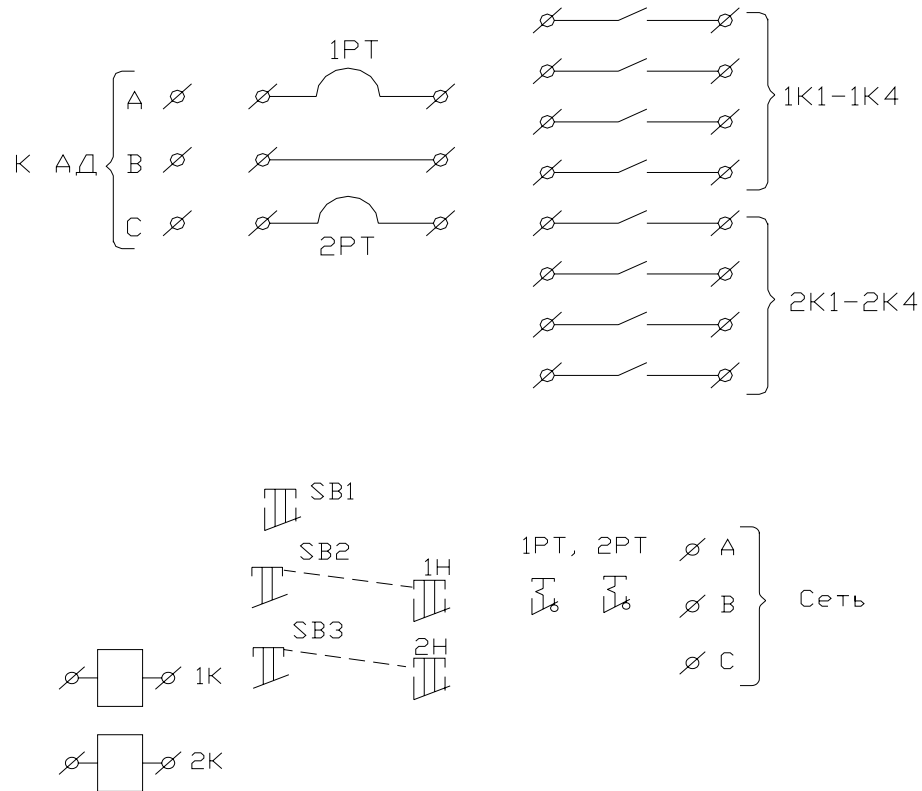


Рис. 2.9. Схема расположения элементов магнитного пускателя и кнопок управления на лицевой панели лабораторного стенда

#### 4. Порядок выполнения работы

4.1. Собрать схему включения и выключения одним двигателем (рис. 2.1). После монтажа все схемы проверяются преподавателем. Включить и выключить схему (в присутствии преподавателя).

4.2. Проверить работоспособность тепловой защиты и определить время срабатывания теплового реле. Для этого:

- разомкнуть одну фазу в силовой цепи двигателя (снять один провод);
- включить схему и засечь время включения;
- зафиксировать момент срабатывания теплового реле и определить время его срабатывания.

4.3. Собрать схему реверсивного управления асинхронного двигателя (рис. 2.4). Включить и выключить схему. Проверить работоспособность защиты от короткого замыкания (плавкие предохранители). Для этого:

- а) закоротить любые две фазы после силовых контактов;
- б) включить схему.

Время, необходимое для выполнения работы, – 2 часа.

## **5. Содержание отчета**

5.1. Принципиальные электрические схемы по пп. 4.1 – 4.3. По пп. 4.2 на схеме 4.1 указать места разрыва и соединения накоротко.

5.2. Время срабатывания тепловых реле.

## Лабораторная работа № 3

### **ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТУРЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

#### **1. Цель работы**

Знакомство с принципом действия автоматических воздушных выключателей (АВК), тепловых реле (ТР) и плавких предохранителей (ПП), изучение их конструкций, основных характеристик, исследование режимов работы устройств защиты контактных коммутационных устройств на примере ТР.

#### **2. Общие положения**

АВК, ТР, ПП относятся к группе коммутационных аппаратов распределительных устройств и предназначенных для защиты электрических цепей от токовых перегрузок и токов КЗ. По области применения названные аппараты объединяют в подгруппы аппаратов низкого напряжения (с номинальным напряжением до 1000 В) и высокого напряжения (с номинальным напряжением более 1000 В). В данной лабораторной работе рассматриваются аппараты распределительных устройств низкого напряжения.

Основной характеристикой АВК, ТР и ПП является зависимость времени срабатывания от тока нагрузки (времятоковая характеристика).

Основные требования для аппаратов данной группы:

- времятоковая характеристика должна проходить ниже, но возможно ближе к времятоковой характеристике защищаемого объекта;
- время срабатывания при КЗ должно быть минимально возможным;
- характеристики аппаратов должны быть стабильными, а технологический разброс их параметров не должен нарушать надежности защиты.

### **3. Автоматический воздушный выключатель**

АВК служит для автоматического отключения электрической цепи при перегрузках, КЗ, чрезмерном понижении напряжения питания, изменения направления мощности, а также для редких включений и отключений вручную номинальных токов нагрузки. В зависимости от вида воздействующей величины АВК делятся на максимальные автоматы по току, минимальные автоматы по напряжению, автоматы обратного тока, максимальные автоматы, работающие по производной тока, поляризованные максимальные автоматы и неполяризованные. АВК, обеспечивающие комбинированную защиту (максимальную по току и минимальную по напряжению), называются универсальными. АВК общепромышленного и бытового применения, имеющие лишь максимально токовую защиту, отрегулированную на заводе, называются установочными.

В любом АВК есть следующие основные узлы: токоведущая цепь, дугогасительная система, механизм свободного расцепления и элементы защиты - расцепители.

В автомате на ток более 200 А (рис. 3.1) токоведущая цепь имеет главные 3 и дугогасительные 1 контакты.

Включение АВК может производиться вручную рукояткой 10 и электромагнитом 9. Звенья 11, 13 и упор 12 образуют механизм свободного расцепления. Отключение автомата может производиться рукояткой 10 или с помощью тепловых или электромагнитных расцепителей 4, 5, 6, 8. Необходимую скорость расхождения контактов обеспечивает пружина 14. Гашение дуги происходит в камере 2.





ский элемент состоит из двух пластин с различным коэффициентом линейного расширения  $\alpha$ . В месте прилегания друг к другу пластины жестко скреплены за счет проката в горячем состоянии либо сваркой.

Если такой элемент закрепить неподвижно и нагреть, то произойдет его изгиб в сторону материала с меньшим  $\alpha$ . Нагрев биметаллического элемента может производиться за счет тепла, выделяемого током нагрузки в самой пластине или в специальном нагревателе. В современных ТР биметаллическая пластина имеет комбинированную систему нагрева. Как правило, ток срабатывания выбирается в пределах  $(1,1 - 1,4) \cdot I_n$ , где  $I_n$  – номинальный ток в цепи нагрузки, а время срабатывания составляет несколько секунд или минут и зависит от типа ТР и его конструкции.

Любые тепловые воздействия инерционны по своей природе, и прогиб биметаллической пластины происходит медленно. Поэтому воздействие пластины на контакт передается, как правило, через ускоряющие устройства, наиболее совершенным из которых является «прыгающий» контакт (рис. 3.2, а). В холодном состоянии биметаллическая пластина 3 занимает крайнее левое положение. Пружина 1 создает силу  $P$ , которая замыкает контакты 2. В исходном состоянии пластина 3 направлена вдоль оси пружины 1. Сила упругости пружины  $P$  направлена вертикально вниз и проходит через центр  $O$ . При этом прыгающий контакт находится в нейтральном положении.

При нагреве пружина 1 быстро переходит в крайнее правое положение и контакты 2 размыкаются с большой скоростью, обеспечивая надежное гашение дуги.

После срабатывания ТР для нового включения цепи нагрузки необходимо вернуть его контакты в исходное положение. Для этого служит кнопка возврата 5.

При длительной нагрузке (рис. 3.2, б) время срабатывания реле

$$t_{\text{ср}} = T \cdot \ln \frac{I_{\text{ср}}^2 - I_0^2}{I_{\text{ср}}^2 - I_{\infty}^2},$$

где  $T$  – постоянная времени нагрева;  $I_0$  – ток предварительной нагрузки;  $I_{\infty}$  – ток, при котором реле срабатывает за время  $t_{\text{ср}} \gg T$ ;  $I_{\text{ср}}$  – ток, при кото-

ром реле срабатывает за время  $t_{\text{ср}}$ , величина которого в относительных единицах

$$t_{\text{ср}} = \ln[(x^2 - \varepsilon^2)/(x^2 - x_{\text{ср}}^2)].$$

Здесь  $x = I/I_H$ ,  $x_{\text{ср}} = I_m/I_H$ ,  $\varepsilon = I_0/I_H$ .

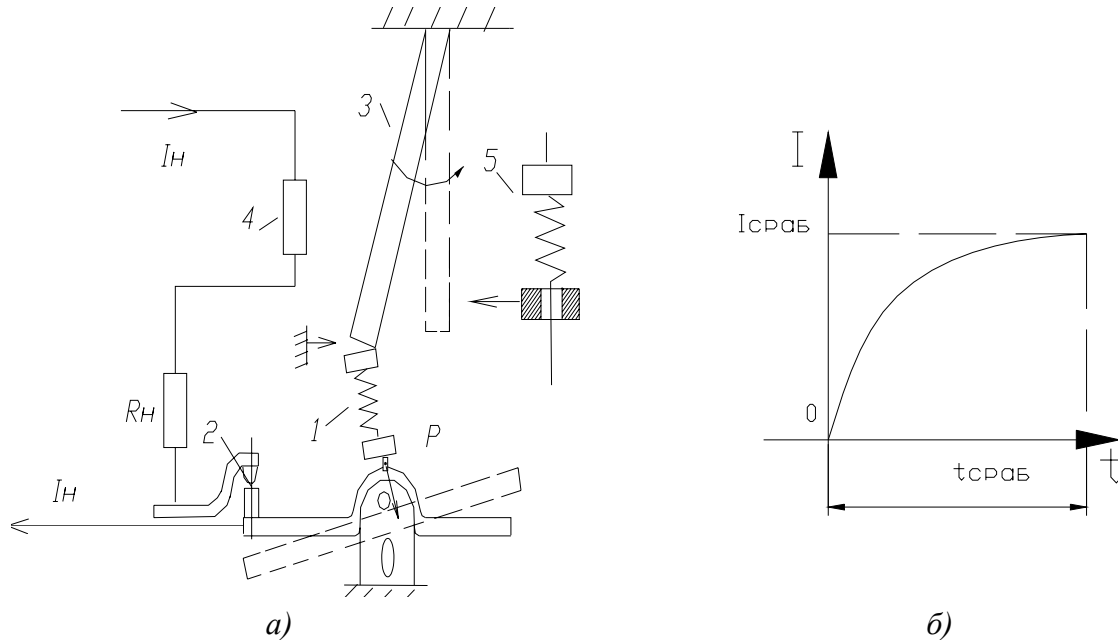


Рис. 3.2. Тепловое реле: а) принципиальная схема; б) зависимость времени срабатывания от тока при длительной нагрузке

Если реле включается в холодном состоянии ( $\varepsilon = 0$ ), то

$$t_{\text{ср}} = T \ln[x^2/(x^2 - x_{\text{ср}}^2)].$$

При повторно-кратковременной нагрузке (рис.3.3) эквивалентный ток  $I_{\text{э}}$  должен соответствовать току срабатывания ТР

$$I_{\text{э}} = I_p \sqrt{\frac{1 - \exp(-t_H/\theta_T)}{1 - \exp(-t_H 100\%/\theta_T \text{ПВ}\%)}}$$

где  $\text{ПВ} = (t_H/(t_H + t_n)) \cdot 100\%$ ,  $\theta_T = S^2 \gamma C / (K_T p s - I^2 \rho_0 \alpha_c)$ ;  $\rho_0$  – удельное сопротивление проводника, Ом·м;  $\alpha_c$  – температурный коэффициент сопротивления, Ом/град;  $k_T$  – коэффициент теплопередачи, Вт/см<sup>2</sup>;  $p$  – периметр поперечного сечения проводника, см<sup>2</sup>;  $C$  – удельная теплоемкость материала проводника, Дж/(кг·К);  $\gamma$  – удельный вес материала проводника, кг/см<sup>3</sup>.

При кратковременной нагрузке эквивалентный ток

$$I_{\text{э}} = I_p \sqrt{1 - \exp(t_H/\theta_T)}.$$

При коротком замыкании процесс нагрева идет без отдачи тепла. Время срабатывания:

$$t_{ср} = T \cdot x_{ср}^2 / x^2 .$$

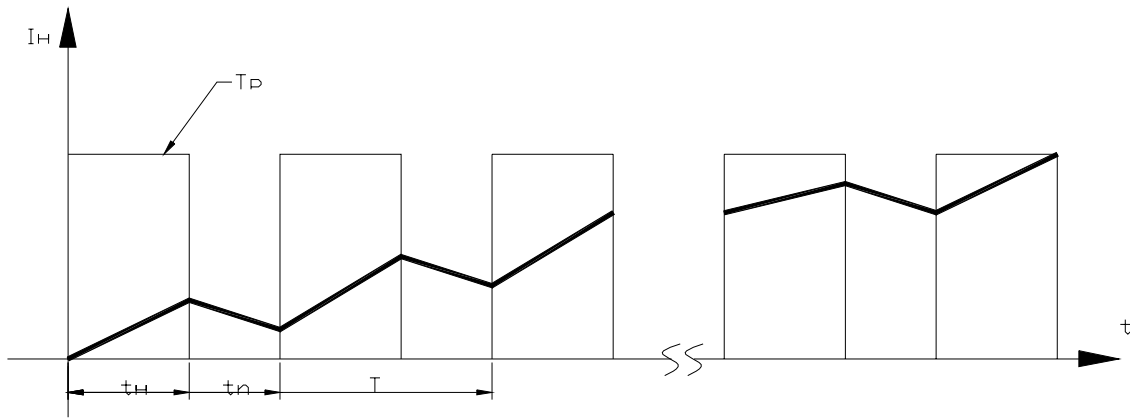


Рис. 3.3. График изменения тока нагрузки при повторно-кратковременном режиме

### 5. Методика приближенного расчета ПП

Расчет пограничного тока и защитной характеристики ПП (рис. 3.4) обычно довольно сложен, если учитывать влияние всех определяющих факторов.

Остановимся лишь на некоторых, наиболее простых расчетах, относящихся к открытым плавким вставкам в воздухе и к засыпным предохранителям.

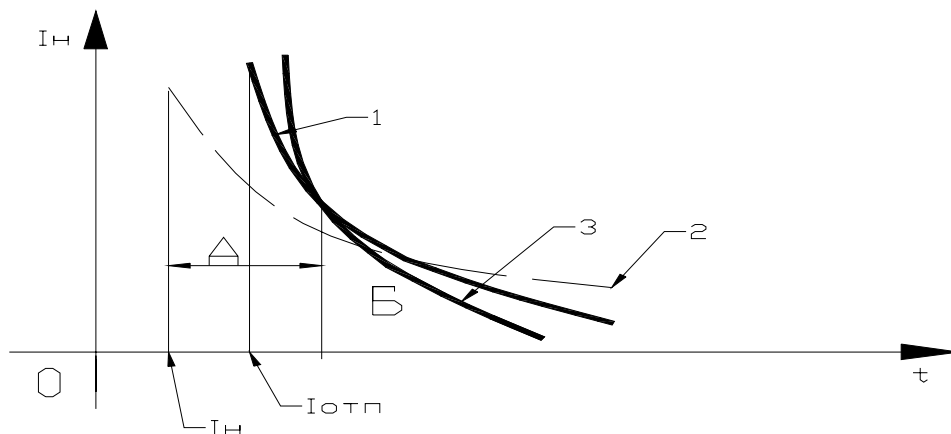


Рис. 3.4. Диаграммы к расчету пограничного тока плавкой вставки

Расчетный пограничный ток  $I_{погр}$  берется несколько больше номинального  $I_n$ . Отношение  $K_0 = I_{погр} / I_n$  для различных вставок равно: медные  $K_0 = 1,6 - 2,0$ ; серебряные  $K_0 = 1,1 - 1,6$ ; цинковые и свинцовые  $K_0 = 1,25 - 1,45$ .

Этот запас расчетного пограничного тока ПП по отношению к номинальному определяется возможностью снижения пограничного тока из-за уменьшения сечения плавкой вставки в процессе эксплуатации вследствие ее коррозии и технологических отклонений при изготовлении. Плавкая вставка не должна иметь заниженное сечение также и потому, что в длительном режиме протекания номинального тока изоляционные и контактные детали ПП могут нагреться до недопустимо высокой температуры. Учет этого обстоятельства также приводит к повышению пограничного тока по отношению к номинальному. Пограничный ток бесконечно длинной открытой плавкой вставки в воздухе можно рассчитать на основе уравнения баланса подводимой и отводимой мощностей:

$$RI_{\text{погр}}^2 = K_T S_{\text{бок}} (T_{\text{пл}} - T_{\text{окр}}), \quad (3.1)$$

где  $K_T$  – коэффициент теплопередачи с наружной поверхности вставки;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления материала вставки, которая достигается при пограничном токе;  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды.

Сопротивление  $R$  плавкой вставки связано с удельным сопротивлением  $\rho_0$  материала плавкой вставки, его температурным коэффициентом  $\alpha_c$ , длиной  $l$  и сечением  $S$  соотношением

$$R = \rho_0 (1 + \alpha_c T) l S^{-1}.$$

Боковая поверхность охлаждения выражается через периметр поперечного сечения  $p$  и длину  $l$  следующим образом:

$$S_{\text{бок}} = p l.$$

С учетом приведенных зависимостей из (3.1) получаем

$$I_{\text{погр}} = \sqrt{\frac{K_T p S (T_{\text{пл}} - T_{\text{окр}})}{\rho_0 (1 + \alpha_c T_{\text{пл}})}}. \quad (3.2)$$

Для круглой плавкой вставки диаметром  $d$  (3.2) приобретает вид

$$I_{\text{погр}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot K_T \cdot d^3 (T_{\text{пл}} - T_{\text{окр}})}{4 \rho_0 (1 + \alpha_c T_{\text{пл}})}}. \quad (3.3)$$

С учетом того, что  $I_{\text{погр}} = K_0 I_n$ , из (3.3) можно получить связь между диаметром  $d$  и номинальным током  $I_n$  плавкой вставки. Одна из эмпирических формул для определения пограничного тока открытых плавких вставок в воздухе имеет вид:

$$I_{\text{погр}} = A_0 d^{3/2},$$

где  $d$  – диаметр вставки, мм.

Константа  $A_0$  имеет следующие значения: 60 – для меди, 44 – для серебра, 128 – для олова, 24,6 – для свинца.

Другая эмпирическая формула для пограничного тока учитывает поправку на коэффициент теплопередачи, который при малом диаметре плавкой вставки имеет значение

$$I_{\text{погр}} = \frac{\pi}{2} K_1 K_2 d^{3/2}.$$

Коэффициент  $K_1$  для различных материалов равен: 36 – для меди, 28 – для серебра, 6,2 – для цинка, 4,4 – для свинца. Зависимость коэффициента  $K_2$  от диаметра плавкой вставки приведена на рис. 3.5. Свойства материалов, наиболее часто используемых для изготовления плавких вставок, даны в таблице.

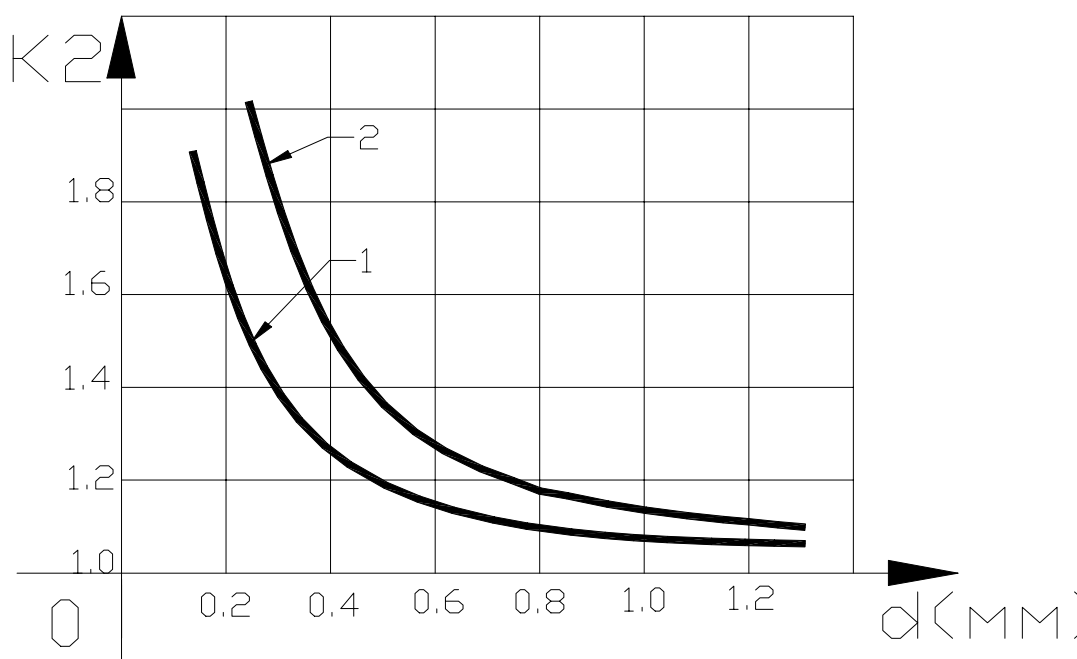


Рис. 3.5. Зависимость коэффициента  $K_2$  от диаметра плавкой вставки

Таблица

Свойства материалов плавких вставок ПП

Материал	$\rho_0$ , Ом·с	$\alpha_s$ , град <sup>-1</sup>	$K_r$ , Дж/с·град	$T_{\text{пл}}$ , °С
Медь	$1,75 \cdot 10^{-6}$	0,004	0,39	1083
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,0036	0,234	960,8
Цинк	$6,1 \cdot 10^{-6}$	0,0037	0,39	419,5
Свинец	$19,5 \cdot 10^{-6}$	0,0041	0,13	397,3
Олово	$19 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,23	231,9

## 6. Описание лабораторного стенда

Стенд предназначен для испытания ТР при работе нагрузки в длительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах. Принципиальная схема стенда приведена на рис. 3.6. Схема состоит из трех цепей:

- силовой ( $U = 40$  В, 50 Гц), в состав которой входит испытуемое ТР, нагрузка  $R_n$ , индикатор напряжения  $PV$  и индикатор тока  $PA$  ;
- управления ( $U=20$  В), основными компонентами которой являются два ключа, собранные на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ ;
- вспомогательной (на рис. 3.6 ее компоненты не изображены), содержащей источник питания вышеназванных цепей, тумблер включения напряжения и электронный секундомер, снабженный трехпозиционным переключателем («работа», «0», «пауза»).

Для включения схемы управления переключатель  $SA5$  переводится в положение «Вкл.». Сопротивление  $R2$  регулирует время протекания тока в цепи нагрузки  $t_n$ , а сопротивление  $R1$  – время паузы, реле  $K4$  коммутирует силовую цепь.

Схема управления работает следующим образом. В случае разомкнутого переключателя  $SA5$  реле  $K4$  все время обесточено, силовая цепь замкнута. При включении переключателя  $SA5$  срабатывают реле  $K4$  и  $K1$ . Реле  $K4$  замыкает свой контакт в силовой цепи. Контакт реле  $K1$  переключает конденсатор  $C1$  с заряда на разряд через сопротивление  $R1$  и переход база-эмиттер транзистора  $VT1$ . Постоянная времени цепи разряда  $T_1 = C_1(R_1 + R_{\sigma-1})$ .

При переключении конденсатора  $C1$  на разряд транзистор  $VT1$  открывается, при этом срабатывает реле  $K$ .

Когда напряжение на конденсаторе  $C1$  падает до напряжения, меньшего напряжения отпирания транзистора  $VT1$ , он закрывается и реле  $K2$  обесточивается. Время удержания реле  $K2$  регулируется величиной сопротивления  $R1$  и емкостей  $C1$  ( $C1'$ ) и определяется выражениями:

$$U(t) = U_{C1} \cdot e^{-t/T1} ; t_{отп.1} = T1 \cdot \ln (U_{отп.1}/U_{C1}).$$

При срабатывании реле  $K2$  конденсатор  $C2$  переключается на заряд, а при обесточивании реле  $K2$  он переключается на разряд. В последнем слу-

чае открывается транзистор  $VT2$  и срабатывает реле  $K3$ , размыкая своими контактами цепи питания реле  $K4$  и  $K1$ . Силовая цепь замыкается.

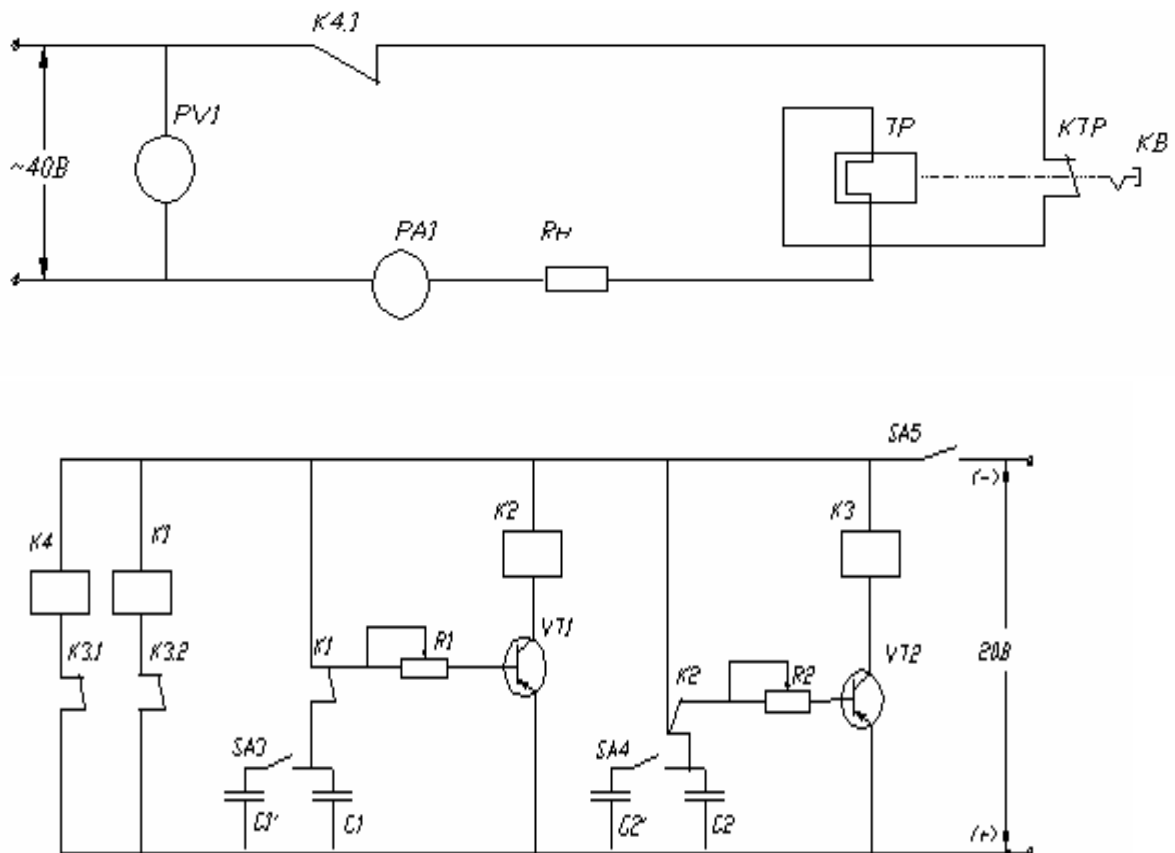


Рис. 3.6. Принципиальная электрическая схема стенда

Время удержания реле  $K3$ , а следовательно, время  $t_{\text{отп}2}$  определяется соотношением  $t_{\text{отп}2} = T2 \cdot \ln(U_{\text{отп}2}/U_{C2})$  и регулируется величиной сопротивления  $R2$  и емкостей  $C2$  ( $C2'$ ).

Таким образом, времязадающая ячейка транзистора  $VT1$  определяет время паузы  $t_{\text{п}}$ , а времязадающая ячейка транзистора  $VT2$  – время работы под нагрузкой.

Для расширения диапазона времени  $t_{\text{н}}$ ,  $t_{\text{п}}$  используются емкости  $C1'$ ,  $C2'$ , подключаемые переключателями  $SA3$  и  $SA4$  параллельно основным  $C1$  и  $C2$ .

## 7. Порядок выполнения работы

7.1. Подключить кабель питания стенда к разъему силового щитка 220 В, 50 Гц.



7.2. Отключить цепь управления, переведя переключатель *SA5* в положение «Выкл.», обеспечив тем самым работу ТР в длительном режиме.

7.3. Включить стенд в сеть (переключатель *SA1* поставить в положение «Вкл.»). При этом должна загореться сигнальная лампочка *HL1* на передней панели стенда и включиться секундомер.

7.4. При срабатывании ТР произойдет отключение секундомера. Записать показания секундомера в протокол испытаний.

7.5. Измерить время срабатывания ТР при различных положениях его собственного регулятора; повторное включение ТР в нагрузку осуществлять нажатием кнопки возврата 5 (см. рис. 3.2) .

7.6. Переключатель *SA5* перевести в положение «Вкл.», обеспечив тем самым повторно-кратковременный режим работы ТР.

7.7. Измерить  $t_n$  и  $t_{п}$  при всевозможных комбинациях положений переключателей *SA3*, *SA4* и положений ручек потенциометров *R1* и *R2*.

7.8. Результаты измерений с соответствующей отметкой положений переключателей и ручек потенциометров занести в протокол испытаний.

7.9. Выключить стенд, переведя переключатель *SA1* в положение «Выкл.», и отключить кабель питания стенда от силового щитка.

## **8. Содержание отчета**

8.1. Результаты расчета ПП по методике, изложенной в п. 5. Исходные данные для расчета выдаются преподавателем.

8.2. Результаты эксперимента (таблицы, схемы, краткие положения, выводы).

8.3. Отчет оформляется в соответствии с требованиями ЕСКД.

## Лабораторная работа № 4

### **ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЕЧНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ**

#### **1. Цель работы**

Изучение принципа действия и экспериментальное определение выходных характеристик конечных выключателей (КВ).

## 2. Общие положения

Конечные (концевые, путевые) выключатели применяются для контроля (в основном ограничения) перемещения подвижных органов различных механизмов. В общем случае КВ, являющийся датчиком, состоит из чувствительного элемента (ЧЭ) и усилителя-преобразователя (УП) (рис. 4.1).

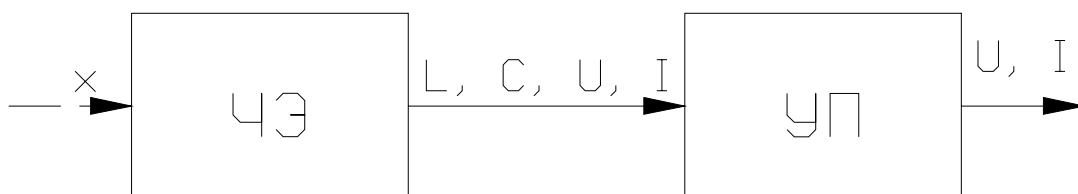


Рис. 4.1. Функциональная схема конечного выключателя

ЧЭ преобразует механическое перемещение в изменение какого-либо параметра электрической цепи (сопротивление, индуктивность, емкость, напряжение, ток). ЧЭ содержит подвижный элемент (копир, экран, лепесток, магнит и др.), который, входя в зону действия ЧЭ, изменяет один из его внутренних параметров (нажимает на контакты и изменяет их состояние; перекрывает световой поток, изменяя тем самым ток в цепи фотодиода; изменяет индуктивное сопротивление катушек ЧЭ; создает сильное магнитное поле вблизи контактов геркона и т.д.). В зависимости от принципа действия ЧЭ различают КВ:

- а) механические;
- б) индуктивные;
- в) фотоэлектрические;
- г) на герконах.

УП усиливает и преобразует входную величину в изменение тока или напряжения.

Как правило, выходная характеристика КВ является релейной представляет собой зависимость выходного напряжения (тока) от перемещения подвижного элемента «х»:

$$U_{\text{ВЫХ}}(x); \quad I_{\text{ВЫХ}}(x) .$$

Основным требованием, предъявляемым к КВ, является как можно большее значение коэффициента возврата  $K_B \rightarrow 1$  (рис. 4.2):

$$K_B = \frac{X_{\text{отп}}}{X_{\text{сраб}}}; \quad K_B = \frac{I_{\text{отп}}}{I_{\text{сраб}}}$$

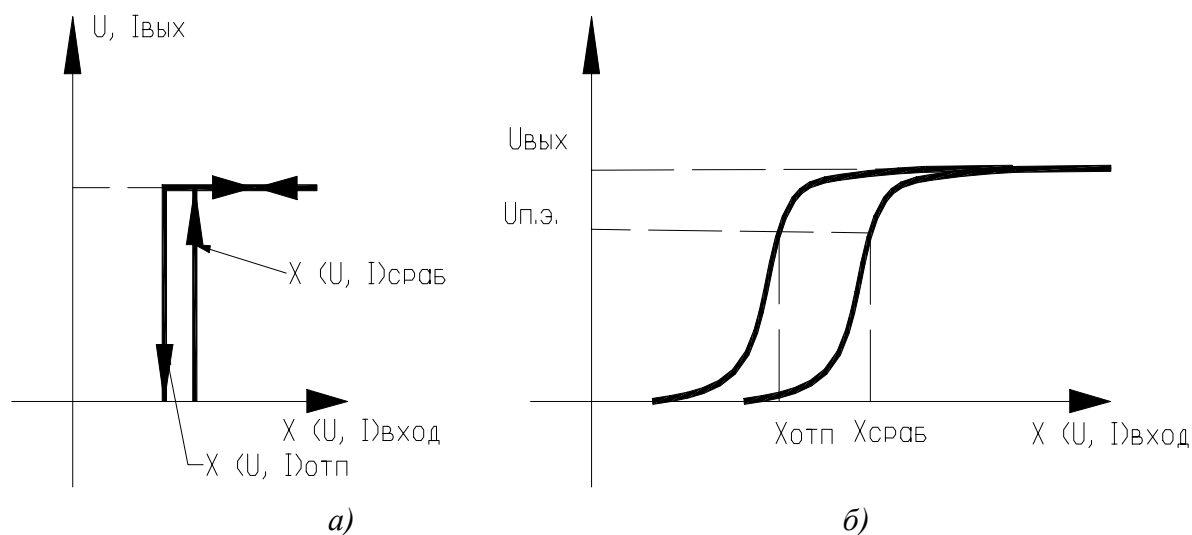


Рис. 4.2. Графики изменения коэффициента возврата конечных выключателей: *а* – с релейной характеристикой, *б* – с аналоговой

Абсолютная величина разницы перемещения срабатывания и размыкания КВ называется дифференциальным ходом. В некоторых типах КВ изменение выходной величины происходит не мгновенно, а нарастает по определенному закону (рис. 4.2, *б*), что объясняется физическими свойствами ЧЭ. Тогда в УП дополнительно ставят пороговый элемент, срабатывающий при достижении выходным напряжением (током) определенной величины. Часто на выходе УП включают контактный коммутационный аппарат (реле, контактор).

### 3. Лабораторный стенд

Лабораторный стенд предназначен для экспериментального определения выходных  $U(x); I(x)$  и временных  $U(x, t); I(x, t)$  характеристик КВ: механического (МП-5), фотоэлектрического, индукционного (БВКЗ-24) и на герконе (КЭМ-3).

### 4. Порядок выполнения работы

4.1. Определить выходные характеристики КВ при перемещении подвижного органа КВ вправо и влево.

4.2. Определить зависимость изменения промежуточной величины ЧЭ КВ при его срабатывании и отпускании.

*Необходимая аппаратура: осциллограф типа С1-68, микроамперметр.*

## **5. Содержание отчета**

5.1. Принципиальные электрические схемы КВ и схемы их включения на стенде.

5.2. Характеристики и графики по пп. 4.1. – 4.2.

## **6. Контрольные вопросы**

6.1. Назначение и классификация КВ.

6.2. Принцип действия и конструкция КВ.

6.3. Основные аналитические зависимости, лежащие в основе КВ различных типов, и характеристики КВ.

6.4. Характеристики некоторых промышленных КВ.

## Лабораторная работа № 5

### **ИЗУЧЕНИЕ РЕЛЕ ВРЕМЕНИ**

#### **1. Цель работы**

Изучение реле времени, ознакомление с принципами автоматического управления пуском и торможением двигателя постоянного тока в функции времени.

#### **2. Описание лабораторного стенда**

Исследование автоматического управления пуском и торможением двигателя постоянного тока (ДПТ) в функции времени и скорости проводится на лабораторном макете, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 5.1.

Макет работает следующим образом: в исходном положении тумблеры  $K1$  и  $K2$  разомкнуты, первая и вторая ступень пускового реостата зашунтированы контактами реле  $1P1$  и  $1P2$ , конденсаторы  $C1$  и  $C2$  реле времени заряжены, транзисторы  $T1$ ,  $T2$  – закрыты.

При замыкании тумблера  $K2$  подается напряжение на обмотку возбуждения двигателя. Нажатием кнопки «Пуск» подается питание на обмотку реле  $P$ , реле  $P$  включается и своим контактом  $4P$  подключает якорную цепь двигателя к сети – 110 В. Контакты реле  $2P$ ,  $3P$  подключают конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  к цепям разряда. Транзисторы  $T1$ ,  $T2$  открываются, срабатывают реле  $P1$  и  $P2$ , которые своими размыкающими контактами включают в якорную цепь двигателя пусковой реостат ( $R1$ ,  $R2$ ). Блокировочный замыкающий контакт  $1P$  закорачивает пусковую кнопку, которая после этого может быть отпущена. Следовательно, с момента срабатывания реле  $P$  начинается разгон двигателя в соответствии с первой искусственной механической характеристикой (характеристика «1» на рис. 5.2).

Через некоторое время, определяемое временем разряда конденсатора  $C1$ , срабатывает первое реле времени. Транзистор  $T1$  закрывается, реле  $P1$  обесточивается, контакт  $1P1$  замыкается и закорачивает первую ступень пускового реостата  $R1$ . Начинается разгон двигателя согласно второй искусственной механической характеристике (прямая 2 на рис. 5.2). Через некоторое время, определяемое постоянной времени цепи разряда конденсатора  $C2$ , срабатывает второе реле времени (закрывается транзистор  $T2$  и обесточивается реле  $P2$ ), замыкается контакт  $1P2$ , который закорачивает вторую ступень пускового сопротивления  $R2$ . Двигатель начинает работать по естественной механической характеристике, (прямая 3 на рис. 5.2).

Для динамического торможения включается тумблер  $K1$  и нажимается кнопка «Стоп». При нажатии кнопки «Стоп» реле  $P$  обесточивается и своим контактом  $4P$  отключает якорную цепь от сети; контакты реле  $P$ ,  $2P$  и  $3P$  подключают конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  к источнику постоянного напряжения.

При включении тумблера  $K1$  подается питание на обмотки реле  $P3$  и  $P4$ , контакты этих реле ( $1P3$ ,  $1P4$ ) закорачивают якорную цепь двигателя, шунтируя сопротивление  $R3$  и  $R4$

При уменьшении частоты вращения двигателя отключается реле  $P3$ , и якорная цепь двигателя замыкается на сопротивление  $R3$ .

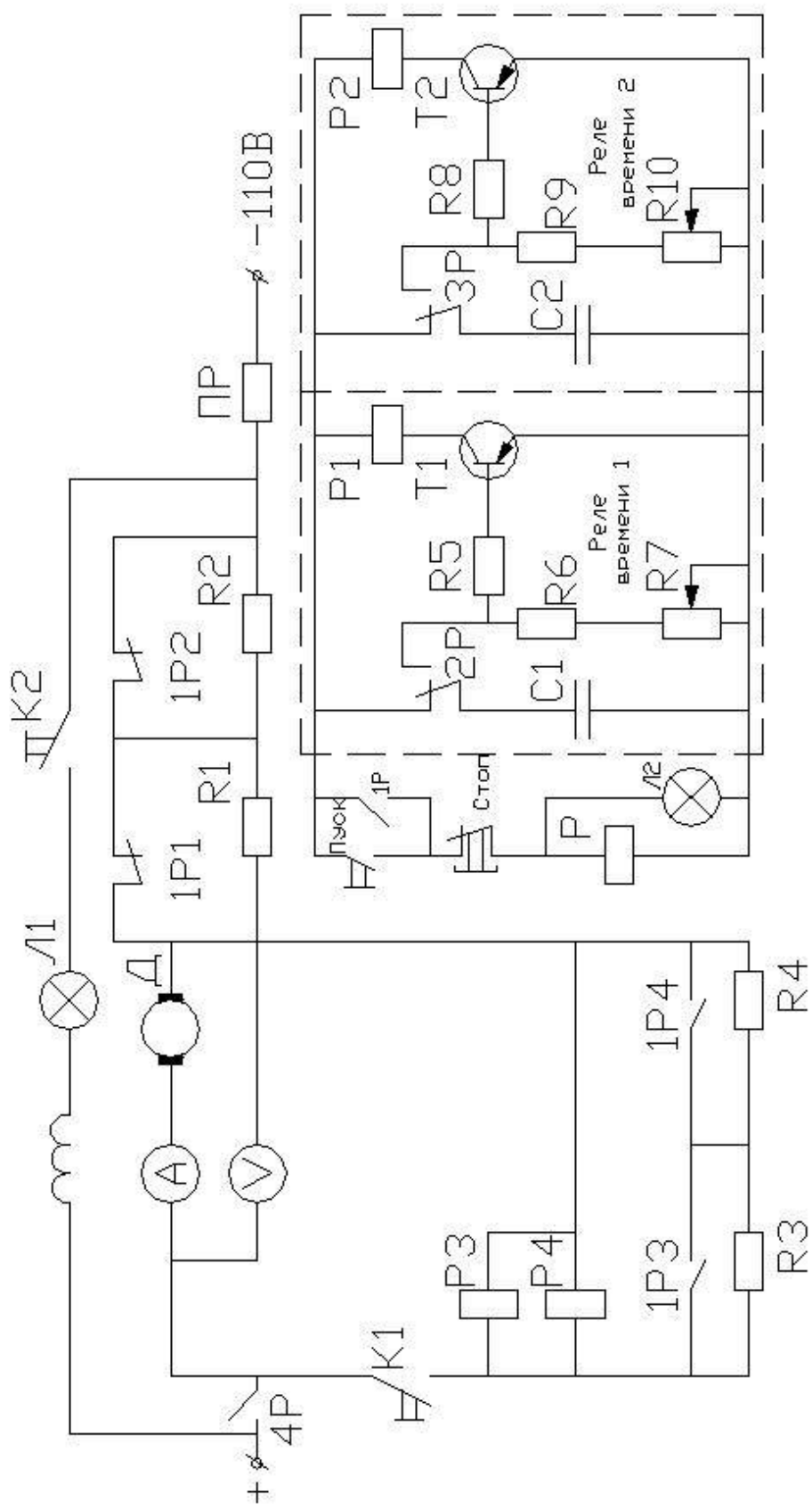


Рис. 5.1. Принципиальная электрическая схема стенда

При последующем уменьшении частоты вращения двигателя отключается реле P4, в результате чего якорь двигателя замыкается на сопротивление  $R = R3 + R4$ . Механические характеристики двигателя постоянного тока, работающего в режиме динамического торможения, приведены на рис. 5.2.

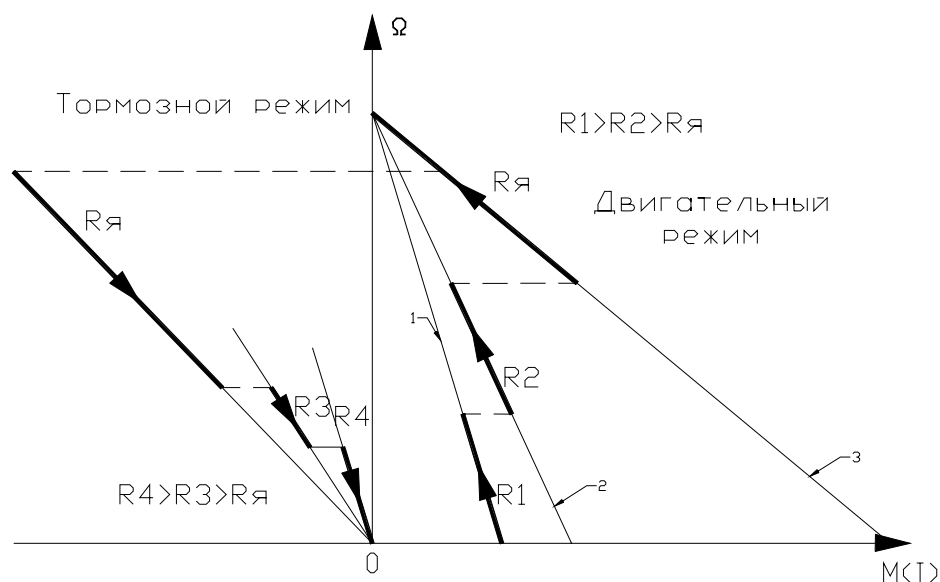


Рис. 5.2. Механические характеристики ДПТ

Изменение частоты вращения двигателя контролируется по вольтметру  $V$  (см. рис. 5.1), подключенному к сигнальной обмотке тахогенератора (ТГ).

При снятии пусковой диаграммы, диаграммы торможения, графиков изменения тока якоря и частоты вращения двигателя используется электронный осциллограф С1-68.

### 3. Порядок выполнения работы

- 3.1. Изучить работу лабораторного макета.
- 3.2. Снять механическую характеристику двигателя  $n(M_{дв})$ .
- 3.3. Снять характеристики  $i_{я} = f_1(t)$  и  $\omega_{дв} = f_2(t)$  при пуске и торможении двигателя для трех значений выдержки срабатывания реле времени 1 и 2.
- 3.4. Определить время срабатывания реле времени.

### 4. Содержание отчета

- 4.1. Принципиальная электрическая схема макета.

4.2. Временные диаграммы пуска и торможения двигателя,

4.3. Механические характеристики двигателя.

4.4. Время срабатывания реле времени 1 и 2.

### **5. Контрольные вопросы**

5.1. Принцип работы лабораторного макета.

5.2. Методика снятия характеристик  $i_{\text{я}} = f_1(t)$  и  $\omega_{\text{дв}} = f_2(t)$ .

5.3. Методика определения времени срабатывания реле времени.

5.4. Методика построения механических характеристик двигателя.

5.5. Режимы торможения ДПТ. Механические характеристики ДПТ в тормозных режимах.

5.6. Способы регулирования частоты вращения.

## Лабораторная работа № 6

### **ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКИ НА БАЗЕ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

#### **1. Цель работы**

Изучение конструкции и принципов действия устройств электроавтоматики, построенных на базе магнитных усилителей, экспериментальное исследование электроприводов с магнитными усилителями (МУ) на примере привода серии ПМУ.

#### **2. Некоторые сведения из теории магнитных усилителей**

Электропривод с МУ представляет управляемый МУ, нагрузкой которого является электродвигатель переменного или, как правило, постоянного тока. Рассмотрим кратко принцип действия и особенности МУ.

В зависимости от места включения нагрузки и характера протекающего по рабочим обмоткам тока различают дроссельные МУ и МУ с самоподмагничиванием.

#### *Дроссельные магнитные усилители (ДМУ)*

ДМУ обычно состоит из двух дросселей насыщения  $D_{p1}$  и  $D_{p2}$  (рис. 6.1), каждый из которых выполнен на ферромагнитном сердечнике и имеет рабочую обмотку  $\omega_r$  и обмотку управления  $\omega_y$ , предназначенную для подмагничивания дросселя постоянным током.

Два дросселя используют для компенсации в управляющей цепи пе-



ременной составляющей напряжения основной частоты, трансформируемой из рабочей цепи. Для этого, как показано на рис. 6.1, в, рабочие обмотки включают согласно, а обмотки управления - встречно.

Действительно, легко видеть, что любой из полупериодов напряжения питания (при идентичных сердечниках) благодаря согласному включению рабочих (первичных) обмоток и встречному включению обмоток управления (вторичных) трансформируемые в цепи управления ЭДС основной частоты оказываются в противофазе и компенсируют друг друга (для примера на рис. 6.1, а, б полярности ЭДС, трансформируемых в положительный полупериод, отмечены на обмотках в кружочках).

При увеличении тока управления растет подмагничивание стальных сердечников. При этом вследствие насыщения сердечников уменьшаются магнитные потоки, созданные переменным током в рабочих обмотках  $\omega_p$ . Поэтому уменьшаются индуктивности этих обмоток и их индуктивные сопротивления, т.е.

$$L = \frac{U_{\approx}}{\sqrt{(R_H + R_O)^2 + \omega^2 \cdot L^2}},$$

где  $L = \frac{0,4\pi\omega_p^2\mu_{\text{дин}}S_{\text{ж}}}{l_{\text{ж}}}$ ,  $S_{\text{ж}}$  – сечение железа;  $l_{\text{ж}}$  – средняя длина магнитной индукции;  $\mu_{\text{дин}} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$ ,  $H = \frac{I_y \cdot \omega_y}{l_{\text{ж}}}$ .

Выходная характеристика МУ  $I_H = f(I_y)$  имеет вид рис 6.1, з.

Статическими параметрами МУ являются:

- коэффициент полезного действия (без учета потерь в сердечнике,

$I_H = I_p$ )  $\eta = \frac{P_H}{P_O} = \frac{R_H}{R_p}$ , где  $P_H = I_H^2 \cdot R_H$  – мощность, выделяемая в нагрузке

(полезная);  $P_p = I_p^2 \cdot R_p$  – вся мощность, потребляемая от источника питания;

- отношение приращения тока в нагрузке  $\Delta I_H$  к соответствующему приращению тока управления  $\Delta I_y$  называется коэффициентом усиления

по току  $K_I$ . Для рабочего режима  $K_I = \frac{\Delta I_H}{\Delta I_y} = \frac{I_H}{I_y} = \frac{\omega_y}{\omega_p}$ ;

- коэффициент усиления по напряжению

$K_U = \frac{\Delta U_H}{\Delta U_y} = \frac{\Delta I_H \cdot R_H}{\Delta I_y \cdot R_y} = \frac{\omega_y \cdot R_H}{\omega_p \cdot R_y} = K_I \frac{R_H}{R_y}$ ;

- коэффициент усиления по мощности

$$K_U = \frac{\Delta P_H}{\Delta P_y} = \frac{P_H}{P_y} = \frac{I_H^2 \cdot R_H}{I_y^2 \cdot R_y} = \frac{\omega_y^2 \cdot R_H}{\omega_p^2 \cdot R_y} = K_I \cdot K_U.$$

Определим некоторые динамические параметры идеального ДМУ.

С подачей управляющего сигнала  $E_y$  новый режим работы МУ устанавливается не сразу.

Период времени с момента подачи управляющего сигнала до достижения одним из сердечников насыщенного состояния называется временем запаздывания ( $T_3$ ).

$$T_3 = N \frac{T}{2} = \frac{2\omega_p S_c (B_s - B_m)}{E'_y} = \frac{2\omega_y S_c (B_s - B_m)}{E_y}.$$

В дальнейшем, в переходном процессе, дроссели будут периодически насыщаться, а в цепи управления и в нагрузке будет появляться ток, возрастающий с каждым периодом.

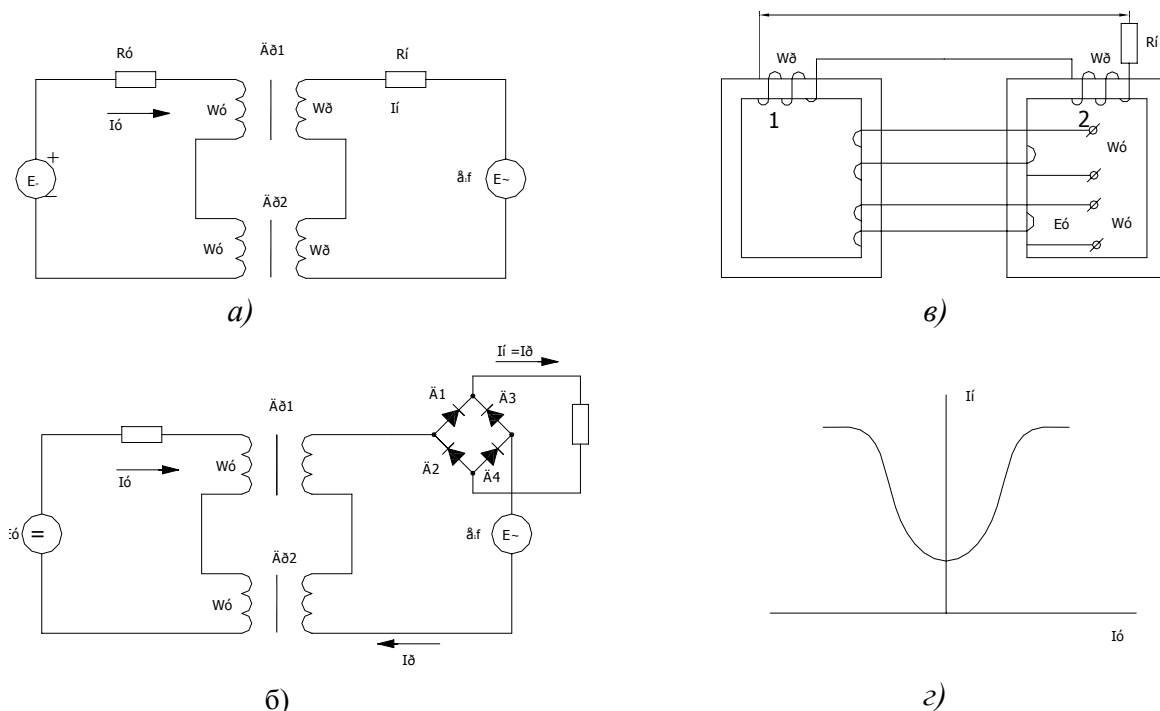


Рис. 6.1. Схемы ДМУ: *а* – ДМУ с нагрузкой на переменном токе, *б* – ДМУ с нагрузкой на постоянном токе, *в* – конструктивная схема ДМУ, *г* – выходная характеристика МУ

В случае  $R_y \ll R_p$  длительность переходного процесса существенно превышает длительность полупериода изменения напряжения питания.

Поэтому можно считать, что среднее значение токов  $i_y$  и  $i_n$  меняется не ступенчато от одного полупериода к другому, а непрерывно и цепь управления может рассматриваться как цепь из последовательно включенных активного сопротивления  $R_y$  и индуктивности  $L_y$ . Длительность переходного процесса в такой цепи определяется постоянной времени  $T_y = \frac{L_y}{R_y}$ .

### *Магнитные усилители с самоподмагничиванием (МУС)*

МУС при равных условиях выгодно отличаются от дроссельных усилителей более высокими коэффициентами усиления и динамической добротностью.

Отличительная особенность МУС состоит в том, что подмагничивание постоянным магнитным полем в них осуществляется как за счет сигнала управления, так и за счет постоянной составляющей тока рабочих обмоток. Подмагничивание от рабочих обмоток происходит в результате последовательного включения с каждой из этих обмоток вентиля, обеспечивающего протекание в них однополупериодного выпрямленного тока нагрузки. Так как подмагничивание имеет место и при отсутствии управляющего сигнала, подобные устройства получили название МУС.

Поскольку подмагничивание от рабочих обмоток пропорционально току нагрузки, то ее действие эквивалентно работе обратной связи. В связи с этим МУС иногда называют МУ с внутренней обратной связью.

Свойство МУС самонасыщаться при отсутствии управляющего сигнала позволяет называть их также МУ с самонасыщением.

МУС представляет собой особый класс МУ, в которых осуществляется диодное разделение рабочих и управляющих интервалов. Физические процессы в них отличаются от процессов в ДМУ и предопределяются прежде всего характером динамического цикла перемагничивания сердечника за период изменения питающего напряжения.

На рис. 6.2, а приведена схема простейшего МУС на одном сердечнике с однополупериодным выходом. Индуктивность  $L$  в цепь управления включена для того, чтобы погасить в ней ток трансформации от рабочей обмотки.

МУС с однополупериодным выходом находят весьма ограниченное применение, так как ток в нагрузке такого усилителя протекает лишь в течение одного полупериода и всегда содержит постоянную составляющую,

кроме того, индуктивность  $L$  обуславливает значительную инерционность усилителя.

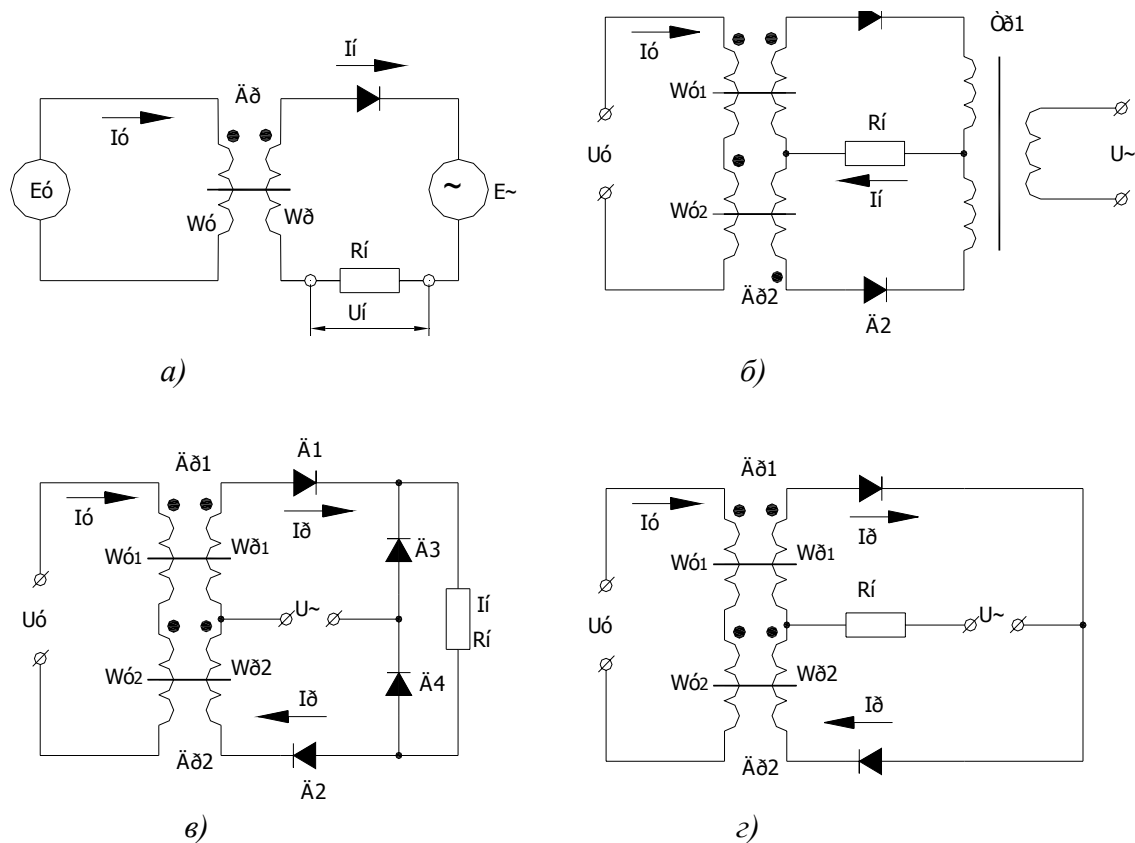


Рис. 6.2. Схемы МУС: а – однополупериодная, б – двухпериодная трансформаторная, в – двухполупериодная мостовая, г – двухполупериодная с выходом на переменном токе

Как уже отмечалось, из-за ряда недостатков однополупериодные схемы МУС находят ограниченное применение. Этих недостатков лишены двухполупериодные МУС, схемы которых приведены на рис. 6.2, б, г. Схемы рис. 6.2, б, г компонуются из двух одинаковых в магнитном и электрическом отношении типовых элементов, включенных на общую нагрузку  $R_H$ . Балластную индуктивность  $L$  в данном случае включать в цепь управления не требуется.

Рабочие  $\omega_p$  и управляющие  $\omega_y$  обмотки необходимо включать таким образом, чтобы взаимное направление напряженностей в рабочие полупериоды от них в каждом из дросселей было одинаковым. Другими словами, напряженность от тока управления в обоих дросселях должна всегда оказывать на сердечники одинаковое воздействие - или их намагничивать, или, наоборот, размагничивать.

В соответствии с этим требованием на схемах произведена маркировка обмоток: начало обмоток отмечено точками. Первый полупериод питающего напряжения («+», «-» - без скобок) будет рабочим для дросселя  $D_{p1}$ , в то время, как для дросселя  $D_{p2}$  он является управляющим. В последующий полупериод («+», «-») режимы работы дросселей меняются местами. Таким образом, дроссели  $D_{p1}$  и  $D_{p2}$  рис. 6.2, б работают поочередно со сдвигом в один полупериод, обеспечивая протекание в ней двухполупериодного тока. В рабочих обмотках каждого дросселя при этом протекает однополупериодный ток.

По сравнению со схемой рис. 6.2, а в двухполупериодных МУС ток в нагрузке удваивается.

В двухполупериодных схемах МУС отношение сопротивления нагрузки к общему активному сопротивлению рабочей цепи ( $\frac{R_H}{R_p}$ ) определяет

коэффициент полезного действия усилителя. В общем случае под КПД МУС принято понимать отношение мощности  $P_H$  выделяемой в нагрузке к активной мощности  $P$ , потребляемой рабочей цепью от источника питания.

К статическим параметрам МУС относятся коэффициенты усиления: по току, напряжению, мощности, а также коэффициент кратности изменения нагрузочного тока, характеризующий регулировочную способность усилителя. Коэффициенты усиления МУС сравнительно легко определяются через конструктивные параметры усилителя и характеристику вход-выход, построенную в координатах  $U_H(I_y)$  при  $U_{\sim} = \text{const}$ ,  $R_H = \text{const}$ .

Коэффициент усиления по току:

$$K_1 = \frac{dI_H}{dI_y} = \frac{dU_H}{R_H dI_y} = \frac{K_R}{R_H}, \text{ где } K_R = 2f\eta\omega_p\omega_y \frac{S_{ж}}{l_{ж}} \mu_y.$$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{dU_H}{dU_y} = \frac{dU_H}{r_y dI_y} = \frac{K_R}{r_y}, \text{ здесь } r_y - \text{ омическое сопротивление обмотки}$$

управления.

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = K_1 \cdot K_U \frac{K_R^2}{R_H r_y}.$$

Крутизну  $K_R$  можно определить по кривой  $\Delta B(H_y)$ . Однако удобнее ее находить непосредственно по характеристике  $U_H(I_y)$ , рассчитываемой обычно в ходе проектирования МУС. Кратность изменения нагрузочного тока определяется отношением тока нагрузки в режиме максимальной от-

дачи к току холостого хода:

$$K = \frac{I_{H\max}}{I_{HO}}.$$

Постоянная времени МУС определяется:

$$T_y = \frac{K_y \omega_y}{2f\eta\omega_p}, \text{ или } T_y = \frac{L_y}{R_y},$$

#### *Обратные связи (ОС) в МУ*

Под обратной связью принято понимать вводимую в магнитный усилитель цепь, по которой осуществляется дополнительное подмагничивание дросселей напряженностью магнитного поля, пропорционально сигналу выхода или скорости его изменения.

ОС называют жесткими, если подмагничивание пропорционально величине выходного сигнала, и гибкими, если оно определяется скоростью изменения сигнала на выходе.

ОС называют положительной, когда напряженности от цепи управления и ОС по знаку совпадают, и отрицательной, если эти напряженности действуют встречно.

По способу введения на вход МУ ОС подразделяют на гальванические и магнитные. В гальванических ОС сигнал с входа усилителя и сигнал управления суммируются электрически.

При магнитных ОС сигнал ОС поступает на отдельную обмотку - обмотку ОС, а суммирование с управляющим сигналом осуществляется путем сложения магнитных напряженностей их полей. При гальванических ОС входная цепь МУ и цепь нагрузки электрически связаны, что с практической точки зрения делает ее не всегда удобной.

ОС называют связью по напряжению, если она вводится в функции напряжения на нагрузке, и связью по току, если подмагничивание осуществляется током нагрузки.

Магнитные ОС получили преимущественное применение. Обмотка ОС, так же, как и обмотка управления, при этом располагается на сердечниках усилителя.

Так как в МУС сердечники подмагничиваются также и постоянной составляющей тока рабочих обмоток, это подмагничивание нередко рассматривают как жесткую ОС по току и называют внутренней ОС.

Жесткая ОС чаще всего используется для изменения статических параметров усилителя. Гибкая ОС функционирует лишь в переходных режимах и применяется в тех случаях, когда требуется при сохранении коэффициентов усиления существенно изменить инерционность усилителя. В частности, за счет введения положительной гибкой ОС представляется возможным уменьшить инерционность МУ в 5 – 15 раз.

Эффективность действия жесткой ОС принято характеризовать коэф-

фициентом ОС. Это коэффициент пропорциональности, связывающий сигнал на выходе усилителя с величиной создаваемой им напряженности подмагничивания. Так как сигнал на выходе и создаваемое им подмагничивание измеряются в различных единицах, то при введении коэффициента ОС величины эти приводятся к одному параметру. В качестве параметра приведения весьма удобным является напряженность магнитного поля.

Под коэффициентом ОС принято понимать отношение напряженности подмагничивания, создаваемой обмоткой ОС, к напряженности от рабочей обмотки, определяемой через среднее значение тока:

$$K_{OC} = \frac{H_{OC}}{H_P},$$

где  $H_{OC}$  – напряженность подмагничивания, создаваемая обмоткой ОС;  $H_P$  – напряженность намагничивания, создаваемая рабочей обмоткой, выраженная через среднее значение тока.

#### *Жесткие ОС в ДМУ*

На рис. 6.3, а, б приведены схемы ДМУ с жесткими ОС по току. Маркировка обмоток в этих схемах дана применительно к случаю, когда ОС являются положительными. Из определения коэффициента ОС следует:

$$K_{OC} = \frac{H_{OC}}{H_P} = \frac{I_{OC}\omega_P}{l_{OC}} \div \frac{I_H\omega_P}{l_{PC}} = \frac{I_{OC}\omega_{OC}l_{PC}}{I_H\omega_P l_{OC}},$$

где  $I_H$  – приращение тока в рабочей обмотке (в нагрузке) в средних значениях;  $\omega_{OC}$  – число витков обмотки ОС;  $l_{OC}$ ,  $l_{PC}$  – длина средней силовой линии для магнитного потока соответственно от рабочей обмотки и обмотки ОС.

Если учесть, что в схеме рис. 6.3, а  $I_{OC} = I_H \cdot K_B$ , а в схеме рис. 6.3, б

$$I_{OC} = \frac{I_{HD}}{K_f} K_B \text{ и } I_H = \frac{I_{HD}}{K_f},$$

где  $K_f$  – коэффициент формы тока, то для этих схем не трудно установить, что  $K_{OC} = \frac{\omega_{OC}l_{PC}K_B}{\omega_P l_{OC}}$ , здесь  $K_B$  – коэффициент

выпрямления. Он может быть найден по прямому и обратному току выпрямителя:

$$K_B = \frac{I_{ПР} - I_{ОБР}}{I_{ПР}}.$$

В большинстве случаев исполнения МУ  $l_{PC} = l_{OC} = l_C$  и тогда

$$K_{OC} = \frac{\omega_{OC}}{\omega_P} K_B.$$

Выражения для  $K_{OC}$  при других видах жесткой ОС записываются аналогично.

#### *Жесткие ОС в МУС*

Самоподмагничивание в МУС эквивалентно действию жесткой ОС связи по току и поэтому может характеризоваться коэффициентом внутренней ОС:

$$K_{OC}^B = \frac{H_{OC}^B}{H_P},$$

где  $H_{OC}^B$  – магнитная напряженность подмагничивания сердечников, создаваемая рабочими обмотками;  $H_P$  – приведенный к магнитной напряженности выходной сигнал выхода в средних значениях.

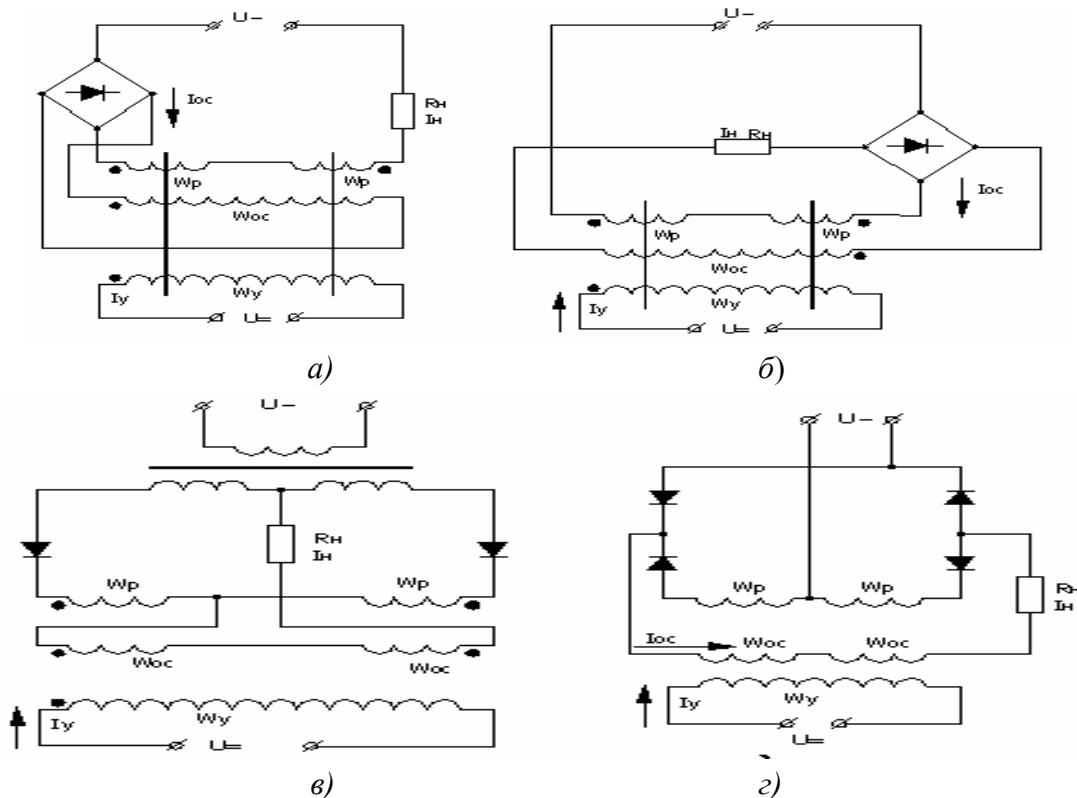


Рис. 6.3. Схемы МУ с обратной связью: а – ДМУ с выходом на переменном токе; б – ДМУ с выходом на постоянном токе; в, г МУС

Так как  $H_{OC}^B = \frac{I_{OC}\omega_P}{l_C}$  и  $H_P = \frac{I_P\omega_P}{l_C}$ , где  $I_{OC}$  – постоянная составляющая тока в рабочей обмотке за период питающего напряжения;  $I_P$  – ток выхода в средних значениях, то  $H_{OC}^B = \frac{I_{OC}}{I_P}$ .

Если пренебречь активным сопротивлением вторичной полуобмотки трансформатора, то

$$K_{OC}^B = \frac{R_{OБP} - 2R_H - R_a}{R_{OБP} + 2R_H + R_a + 2r_P}.$$

Из этого выражения следует, что если сопротивление нагрузки соизме-



римо с обратными сопротивлениями вентиляей, то  $K_{OC}^B$  заметно снижается.

Выражение для  $K_{OC}^B$  записано в предположении, что прямое и обратное сопротивления вентиляей являются величинами постоянными. Это обстоятельство, а также принятая идеализация процессов в МУС, приводит при численном нахождении  $K_{OC}^B$  к значительным погрешностям.

### *Коэффициент внешней ОС в МУС*

Необходимость во внешней жесткой ОС в МУС возникает в тех случаях, когда требуется существенно уменьшить крутизну характеристики вход-выход или, наоборот, перевести усилитель в релейный режим работы. Примеры исполнения внешней ОС в схемах МУС приведены на рис. 6.3, в, г.

Коэффициент внешней ОС в МУС

$$K_{OC}^B = \frac{H_{OC}^H}{H_P}.$$

Полагая, что характеристики вентиляей, используемых в усилителе, одинаковые, значения  $\omega_p$ ,  $\omega_r$  и  $l_c$  известны для мостовой схемы (рис. 6.3, в), в которой  $I_{OC} = I_H = 2I_P$ ,  $H_{OC}^H = \frac{I_{OC}\omega_{OC}}{l_c}$  и  $H_P = \frac{I_P\omega_p}{l_c}$ , коэффициент внешней ОС находят из выражения

$$K_{OC}^H = \frac{2\omega_{OC}}{\omega_p}.$$

Коэффициенты ОС по току, напряжению и мощности, постоянная времени и добротность соответственно определяются:

$$K_{I(OC)} = \frac{\Delta I_H}{\Delta I_y} = \frac{K_I}{1 \mp K_I K_{OC}^H \xi},$$

$$K_{U(OC)} = \frac{K_U}{1 \mp K_I K_{OC}^H \xi},$$

$$K_{P(OC)} = \frac{K_P}{(1 \pm K_I K_{OC}^H \xi)^2},$$

$$D_{OC} = \frac{D}{1 \mp K_I K_{OC}^H \xi},$$

$$K_{I(OC)} = \frac{\Delta I_H}{\Delta I_y} = \frac{K_I}{1 \mp K_I K_{OC}^H \xi}$$

### **3. Приводы серии ПМУ**

Приводы серии ПМУ предназначены для стационарной установки в закрытых помещениях на высоте до 1000 м над уровнем моря, при темпе-

ратуре окружающего воздуха от  $+5$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности воздуха до  $80\%$ , в условиях свободного теплообмена с окружающим воздухом. Приводы рассчитаны для работы от сети переменного тока частотой  $50$  Гц стандартного напряжения  $220$  В или  $380$  В. Допустимое отклонение напряжения от номинального – до  $+5\%$ ,  $-15\%$ .

### 3.1. Общие сведения о приводах серии ПМУ

Каждый привод из серии ПМУ представляет собой комплект, состоящий из электродвигателя (постоянного тока), блока питания, магнитного усилителя и задатчика скорости.

Блоки питания и задатчики не имеют защитного кожуха или оболочек. При установке их в закрытых шкафах, нишах, пультах и т.п. должны быть обеспечены такие условия теплообмена с окружающим воздухом, чтобы температура воздуха внутри шкафа или ниши вблизи блока не превышала  $+40^{\circ}\text{C}$ .

В серию входят приводы пяти типоразмеров (габаритов) с номинальной мощностью  $0,1$ ,  $0,2$ ,  $0,5$ ,  $1$ ,  $2$  кВт.

В приводах регулирование скорости осуществляется вниз от номинальной скорости вращения изменением напряжения на якоре двигателя с помощью магнитного усилителя, работающего в системе автоматического регулирования. Структурная схема системы показана на рис. 6.4.

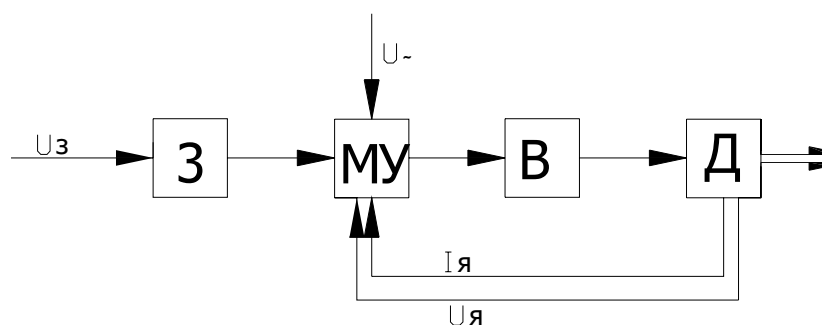


Рис. 6.4. Структурная схема приводов серии ПМУ

Переменное напряжение  $U_{\sim}$  подается на вход МУ. После преобразования в выпрямителе В ток поступает в обмотку якоря двигателя постоянного тока Д. Требуемое напряжение  $U_3$  на якоре двигателя устанавливается с помощью задатчика З. Магнитный усилитель охвачен отрицательной обратной связью по току якоря  $I_{я}$ . Совместное действие этих двух обрат-



го задатчика  $P_1 - P_2$  специальной конструкции.

С одной из секций задатчика-потенциометра  $P_1$  снимается задающее напряжение  $U_3$ . Другая секция  $P_2$  – переменное сопротивление, включаемое параллельно или последовательно с обмоткой  $\omega_3$ . Сопротивление  $P_2$  должно обеспечивать некоторую заданную зависимость тока в обмотке  $\omega_3$  от задающего напряжения  $U_3$ . Характер этой зависимости связан с параметрами магнитного усилителя, выпрямителей и двигателя; он различен для приводов разных типов и определяется экспериментально. В однофазных приводах, предназначенных для работы при относительно небольших изменениях нагрузки либо при сокращенном диапазоне регулирования, «зависимое регулирование» не применяется и управление магнитным усилителем осуществляется по схеме рис. 6.6.

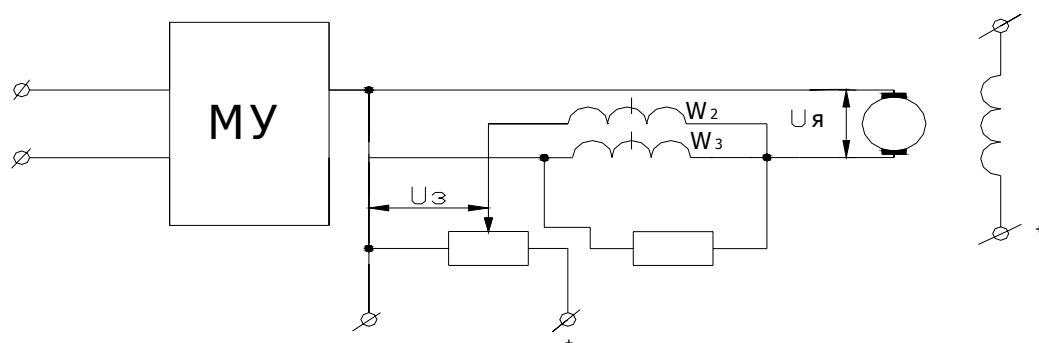


Рис. 6.6. Схема однофазных приводов ПМУ первого, второго и третьего габаритов с отдельным регулированием токовой связи

В приводах четвертого и пятого габаритов (трехфазных) управление магнитными усилителями осуществляется по схеме рис. 6.7. Вместо магнитного сложения сигналов управления в магнитном усилителе, реализованном в схеме рис. 6.4, происходит электрическое сложение сигналов вне усилителя. МУ имеет только одну обмотку управления, на которую подается суммарный сигнал; положительная обратная связь вводится не непосредственно по току якоря, а косвенно по переменному току на входе питания с помощью трансформатора тока Т. Схема рис. 6.7 создает более широкие возможности для получения устойчивой системы автоматического регулирования, накладывает меньше ограничений на выбор параметров,

необходимых для осуществления обратной связи по величине, достаточно близкой к противо-э.д.с. двигателя. «Зависимое регулирование» токовой связи в этой схеме не применяется.

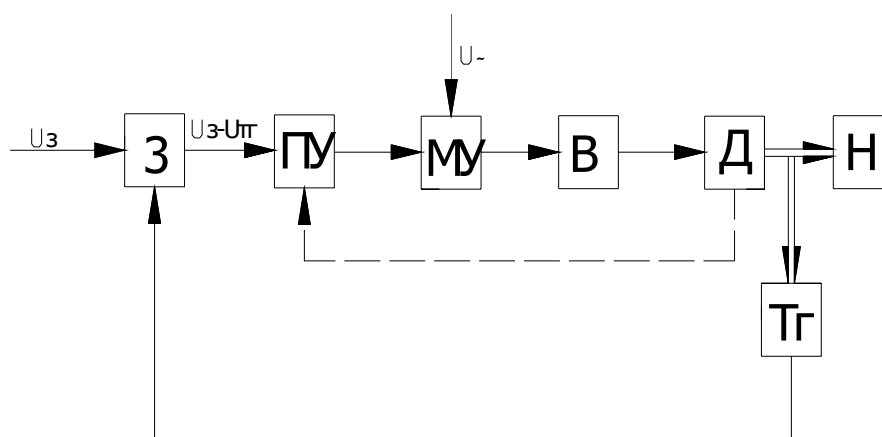


Рис. 6.7. Структурная схема трехфазных приводов серии ПМУ четвертого и пятого габаритов

В некоторых партиях трехфазных приводов серии ПМУ применялась кроме указанных выше также схема с магнитным сложением сигналов управления, как в схемах рис. 6.5, 6.6, и с косвенной токовой положительной обратной связью с помощью трансформатора тока, как в схеме рис. 6.7. Эта схема применялась как с зависимым регулированием токовой связи, так и без него.

### **3.2. Механические характеристики электроприводов серии ПМУ, ПМУ-М, ПМУ-П и ПКВ**

Механические характеристики электродвигателя в регулируемом электроприводе существенно отличаются от его естественной характеристики. Если система регулирования разомкнута, без обратных связей, то уравнение механической характеристики привода с двигателем постоянного тока имеет вид

$$n = \frac{U}{C_1 \Phi} - \frac{MR_{\Sigma Я}}{C_1 C_2 \Phi^2}, \quad (6.1)$$

где  $n$  – скорость вращения,  $U$  – напряжение на якоре,  $\Phi$  – магнитный поток возбуждения,  $M$  – вращающий момент,  $R_{\Sigma Я}$  – сопротивление цепи якоря,  $C_1, C_2$  – постоянные, связанные с конструктивными данными двигателя.

Графически механическая характеристика двигателя постоянного тока с независимым возбуждением изображается прямой линией (рис. 6.8), пересекающей ось ординат в точке  $n_0$  и образующей с осью абсцисс угол  $\alpha$ .

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{R_{\Sigma Я}}{C_1 C_2 \Phi^2}.$$

$$n_0 = \frac{E_{\text{я}}}{C_1 \Phi}.$$

Здесь  $n_0$  – скорость холостого хода двигателя.

При неизменных напряжениях на якоре и потоке возбуждения угол наклона механической характеристики, а с ним и величина перепада скоростей  $\Delta n$  между двумя значениями моментов вращения (например, от  $0,25 M_{\text{НОМ}}$  до  $1,0 M_{\text{НОМ}}$ ) тем больше, чем больше сопротивление цепи якоря  $R_{\Sigma Я}$  (кривые 1 и 2 рис. 6.8).

С уменьшением напряжения  $U$ , приложенного к якору, угол наклона  $\alpha$  не изменяется ( $\alpha_3 = \alpha_2$ ), но вся характеристика смещается вниз (прямые 2 и 3 рис. 6.8). При этом абсолютное значение перепада скоростей не изменяется, но относительный перепад скоростей  $\delta = \frac{\Delta n}{n}$  растет в связи со снижением скорости идеального холостого хода.

Ослабление магнитного потока возбуждения двигателя вызывает изменение обоих членов правой части уравнения (6.1). Уменьшение знаменателя первого члена приводит к увеличению значения скорости холостого двигателя  $n_0$ , а уменьшение знаменателя второго члена – к увеличению угла наклона характеристики. Таким образом, перепад скоростей растет.

Данный подход реализован в серии ПМУ привода серии ПКВ. В этих приводах цепь якоря содержит, кремниевые вентили и обмотки силовых трансформаторов. Регулирование скорости осуществляется введением реостата в обмотку возбуждения, т.е. за счет ослабления магнитного потока. Вследствие этого перепад скоростей на механических характеристиках больше, чем при непосредственном включении двигателя в цепь постоянного тока.

Но в связи с тем, что весь диапазон регулирования скорости невелик

(до 1:2) и кремниевые клапаны имеют малое сопротивление в прямом направлении, снижение жесткости механических характеристик невелико.

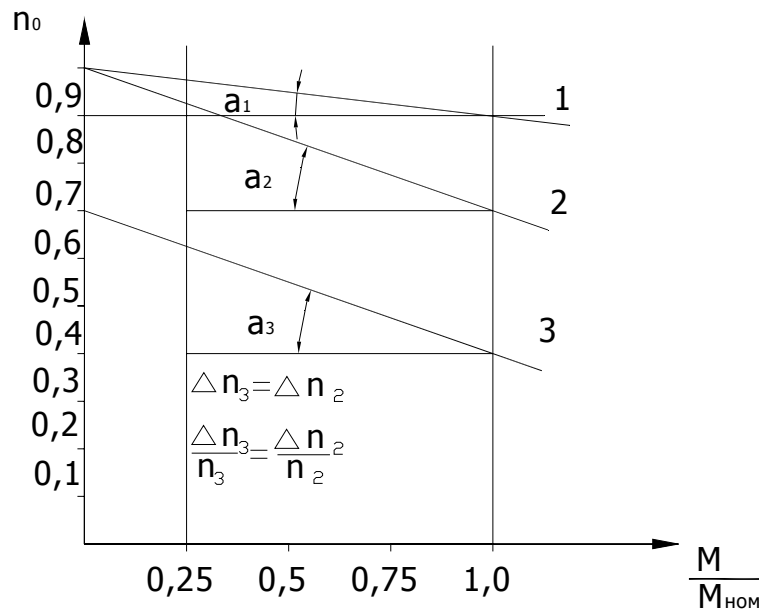


Рис. 6.8. Механические характеристики приводов

Для приводов, имеющих в цепи якоря магнитные усилители и селеновые выпрямители, суммарное сопротивление которых имеет значительную величину, уравнение (6.1) принимает вид:

$$\begin{cases} n = \frac{1}{C_1} U_1 - \frac{1}{C_1} I R_1, \\ U_1 = \sqrt{K_1^2 U_-^2 - I^2 X_{\text{ДР}}^2}, \\ R_1 = R_{\Sigma\text{Я}} + R_{\text{ДР}} + R_{\text{ПР}}, \end{cases} \quad (6.2)$$

где  $U_1$  – напряжение сети (переменного тока),  $X_{\text{ДР}}$  – индуктивное сопротивление рабочих обмоток магнитного усилителя (среднее значение),  $R_{\text{ДР}}$  – активное сопротивление рабочих обмоток магнитного усилителя,  $R_{\text{ПР}}$  – сопротивление селеновых выпрямителей (в направлении проводимости),  $K_1$  – коэффициент формы тока.

Характеристики уравнений (6.2) не линейны, угол наклона их к оси

абсцисс зависит от скорости и от нагрузки, а перепады скоростей значительно больше, чем при непосредственном включении двигателя в сеть постоянного тока. Несмотря на это приводы серии ПМУ, ПМУ-М и особенно ПМУ-П имеют механические характеристики с малыми перепадами скоростей, что достигается применением замкнутых систем регулирования с теми или иными обратными связями.

#### **4. Описание лабораторной установки**

В качестве лабораторной установки используется привод ПМУ-М, принципиальная схема которого представлена на рис. 6.9.

Регулирование скорости вращения привода осуществляется вниз от номинальной скорости электродвигателя путем изменения напряжения на якоре при неизменном напряжении возбуждения. Напряжение к якору двигателя подается от статического преобразователя переменного тока в постоянный. Для изменения выпрямленного напряжения служат магнитные усилители, рабочие обмотки ( $\omega_1$ ) которых включены в плечи выпрямителя 1В, выполненного для приводов серии ПМУ1М и ПМУ2М по однофазной схеме выпрямления, а для приводов серий ПМУ5М, ПМУ6М, ПМУ7М по трехфазной схеме выпрямления.

Изменение величины выпрямленного напряжения происходит за счет изменения реактивного сопротивления рабочих обмоток магнитного усилителя, величина которого определяется током нагрузки и током, протекающим в обмотке управления  $\omega_2$ . Чем больше ток нагрузки и ток управления, тем меньше реактивное сопротивление рабочих обмоток, тем больше значение выпрямленного напряжения, подводимого к якору двигателя.

Такой выпрямитель имеет большое внутреннее сопротивление, обусловленное сопротивлением рабочих обмоток магнитного усилителя и выпрямителей. Большое внутреннее сопротивление является причиной недопустимо большой погрешности привода от колебаний нагрузки, сетевого напряжений и нагрева.

С целью снижения этой погрешности в схеме привода имеются внутренняя обратная связь по току и две внешние связи: отрицательная и положительная по



току. Таким образом, схема привода представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования скорости вращения электродвигателя.

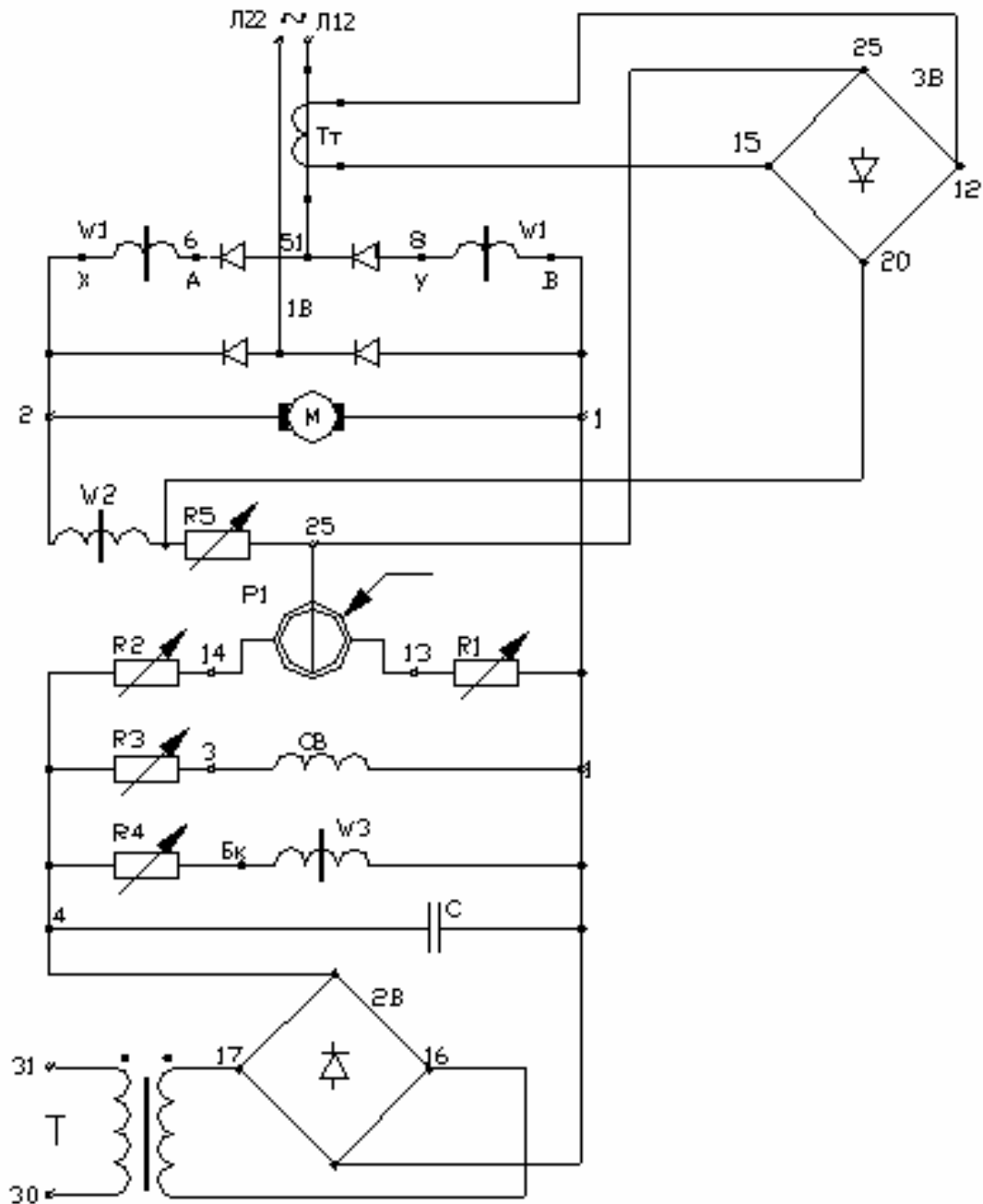


Рис. 6.9. Принципиальная электрическая схема привода ПМУ-М

Внутренняя обратная связь по току достигается включением в плечи выпрямителя 1В рабочих обмоток ( $\omega_1$ ) магнитного усилителя, через каждую из которых протекает однополупериодный ток, содержащий постоян-

ную и переменную составляющие. Чем больше постоянная составляющая, тем ниже индуктивное сопротивление рабочих обмоток магнитного усилителя.

Величина постоянной составляющей тем больше, чем больше ток нагрузки. Благодаря этому внутреннее сопротивление выпрямителя автоматически снижается с ростом нагрузки и наоборот.

Отрицательная обратная связь по напряжению и положительная обратная связь по току достигается питанием обмотки управления  $\omega_2$  от трех источников: от задающего потенциометра  $P1$ , якоря двигателя и трансформатора тока  $T_T$ . Результирующий ток в обмотке  $\omega_2$  зависит от алгебраической суммы трех напряжений: задающего -  $U_3$ , напряжения на якоре двигателя  $U_{я}$  и напряжения  $U_{\infty}$  токовой связи, снимаемого с сопротивления  $R_5$ . Сопротивление  $R_5$  является нагрузкой выпрямителя 3В. Выпрямитель 3В включен на выходе трансформатора тока  $T_T$ . Поэтому  $U_{\infty}$  является функцией тока в якоре двигателя. При изменении нагрузки на валу двигателя, например, при ее увеличении ток якоря растет. В первый момент скорость вращения двигателя снижается. Это обусловлено увеличением падения напряжения на якоре и уменьшением подводимого к якору напряжения.

После этого вступает в действие система автоматического регулирования. Так как задающее напряжение остается неизменным, а напряжение на якоре уменьшается, то разность между ними возрастает. Ток в обмотке управления ( $\omega_2$ ), включенной на эту разность, увеличивается. Кроме того, он увеличивается благодаря действию узла токовой связи, т.к. увеличение нагрузки влечет за собой рост тока в цепи якоря, или, что то же самое, увеличение тока, потребляемого из сети. В результате этого на выходе выпрямителя 3В увеличивается напряжение, обеспечивающее увеличение тока в обмотке  $\omega_2$ . Нарастание тока в обмотке  $\omega_2$  увеличивает намагничивание сердечников магнитных усилителей, в результате чего их индуктивное сопротивление уменьшается, в итоге растет выпрямленное напряжение  $U_{я}$ , компенсирующее снижение скорости вращения под влиянием увеличения нагрузки. Нарастание напряжения  $U_{я}$  прекращает рост тока в обмотке  $\omega_2$ , и система приходит в равновесие до следующего возмущения.

Цепи обмотки возбуждения электродвигателя, обмотки смещения

и обмотки управления ( $\omega_3$ ) питаются от общего выпрямителя 2В через трансформатор напряжения Т.

На выходе выпрямителя в качестве фильтра включают конденсатор С или дроссель.

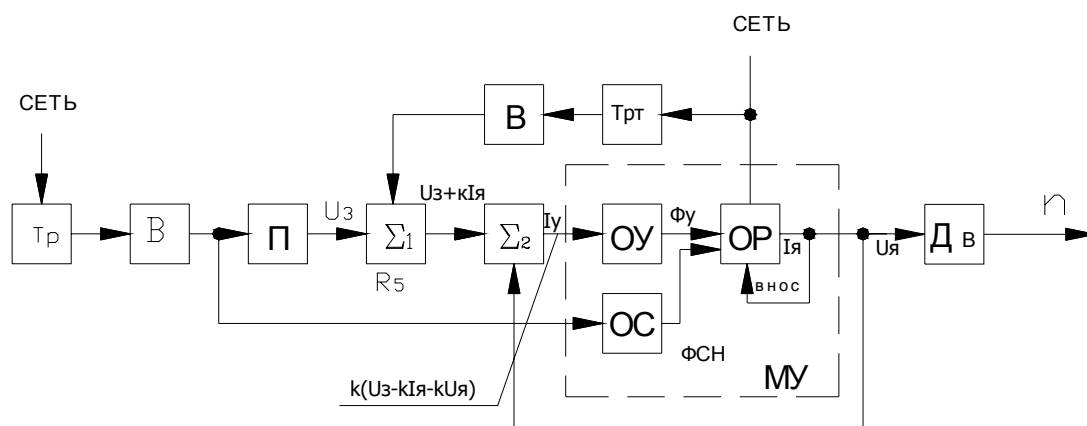


Рис. 6.10. Блок-схема привода с магнитным усилителем

Скорость вращения двигателя задается положением движка потенциометра  $P_1$  (задатчика регулятора скорости), включенного последовательно с ограничительными «наладочными» сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ . Сопротивлением  $R_1$  задается минимальная скорость вращения,  $R_2$  – максимальная. Сопротивлением  $R_3$  устанавливается напряжение возбуждения, сопротивлением  $R_4$  – ток смещения магнитного усилителя, сопротивлением  $R_5$  выбирается коэффициент усиления цепи положительной обратной связи (по току).

Блок-схема исследуемого МУ представлена на рис. 6.10. Здесь приняты следующие обозначения:

- П – потенциометр задания скорости с передаточной функцией  $(W_1(p))$ ;
- $\Sigma$  – сумматор  $(W_2(p)W_3(p))$ ;
- ОС – обмотка смещения МУ  $(W_7(p))$ ;
- ОУ – обмотка управления МУ  $(W_4(p))$ ;
- ОР – обмотка рабочая МУ  $(W_5(p))$ ;
- $\left. \begin{array}{l} \text{Тр} - \text{трансформатор} \\ \text{Трт} - \text{трансформатор} \end{array} \right\} W_{ac.1}(p)$
- В – выпрямитель (К);
- Д – исполнительный двигатель  $(W_6(p))$ .

Структурная схема МУ представлена на рис. 6.11, на котором кроме обозначенных выше передаточных функций звеньев показаны цепи обратных связей по напряжению двигателя и току с передаточными функциями:  $W_{OC2}(p)$ ,  $W_{OC3}(p)$ .

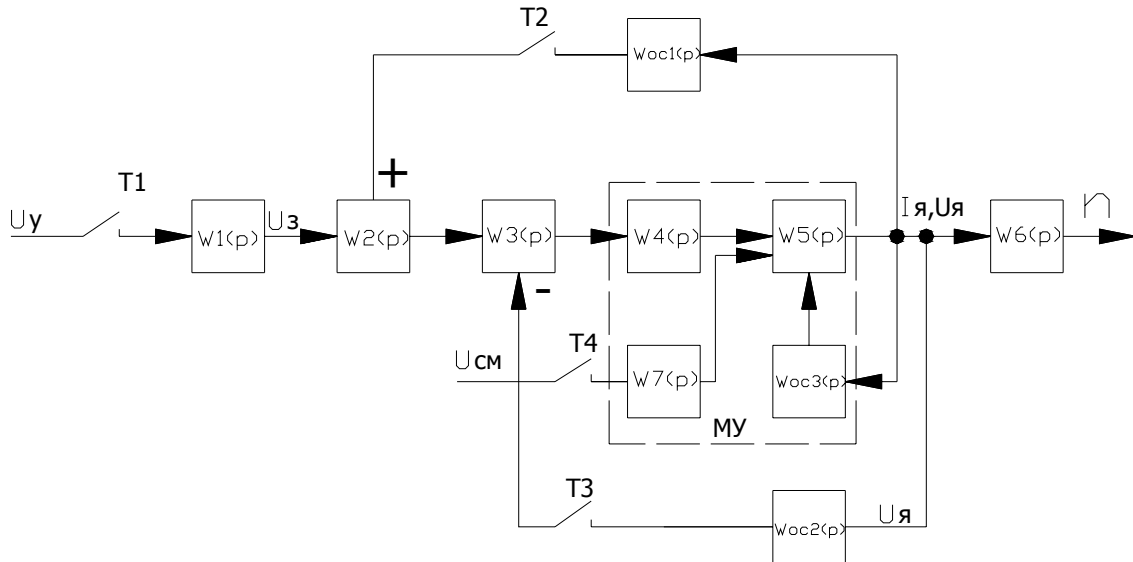


Рис. 6.11. Структурная схема привода с магнитным усилителем

Передаточные функции составных частей привода имеют следующий вид:

$$W_1(p) = \frac{U_1}{U_y} = K_1,$$

$$W_6(p) = \frac{U_{ДВ}(p)}{U_{Я}(p)} = \frac{K_6}{T_3 p + 1},$$

$$W_2(p) = K_2,$$

$$W_{OC1}(p) = \frac{U_y}{I_{Я}} = K_8,$$

$$W_3(p) = \frac{I_y}{U_{\Sigma}},$$

$$W_{OC3}(p) = \frac{\Delta I'_y}{I_{Я}} = K_9,$$

$$W_4(p) = \frac{K_y}{T_1 p + 1} = \frac{\Phi_y(p)}{I_y(p)},$$

$$W_{OC2}(p) = \frac{\Delta I}{U_{Я}} = K_8,$$

$$W_5(p) = \frac{I_{Я}(p)}{\Phi_y(p)} = \frac{K_y}{T_2 p + 1}.$$

$$W_7(p) = \frac{K_7}{T_4 p + 1}.$$

Передаточная функция прямого тракта записывается

$$W_{ПТ}(p) = \prod_{i=1}^5 W_i(p) = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K'_5 K_6}{(T_1 p + 1)(T'_2 p + 1)(T_3 p + 1)},$$

где  $W'_5(p) = \frac{K'_5}{(T'_2 p + 1)}$  – передаточная функция цепи рабочих обмоток с учетом внутренней положительной обратной связи по току.

Положим для простоты, что  $\Delta I_{\text{я}} = K'_8 \cdot U_{\text{я}}$  и действие этой связи аналогично ОС2. Принимая ее отрицательной (на самом деле здесь имеет место функциональная зависимость, т.к.  $\Delta I_{\text{я}} = f(\Delta n, \Delta M)$ ), для передаточной функции системы с учетом обратных связей получим

$$W(p) = W_1(p)W'(p)W_6(p),$$

$$\text{где } W'(p) = \frac{W_3(p)W_4(p)W'_5(p)}{1 + W_3(p)W_4(p)W'_5(p)W_{\text{OC2}}(p)} = \frac{K_3K_4K'_5}{(T_1p+1)(T'_2p+1) + K_3K_4K'_5K_{\text{OC2}}},$$

$$W''(p) = \frac{W'(p)}{1 + W'(p)W_{\text{OC1}}(p)} = \frac{K_3K_4K'_5}{(T_1p+1)(T_2p+1) + K_3K_4K'_5K_{\text{OC2}}K_{\text{OC1}}},$$

$$W(p) = \frac{K_1K_2K_3K_4K'_5K_6}{[(T_1p+1)(T_2p+1) + K_3K_4K'_5K_{\text{OC2}}K_{\text{OC1}}](T_3p+1)}.$$

В установившемся режиме при  $U_3(t) = U_{3m} \cdot 1(t)_{(p=0)}$  передаточная функция системы принимает вид

$$W(p) \Big|_{p \rightarrow 0} = \frac{K_1K_2K_3K_4K'_5K_6}{1 + K_1K_2K_3K_4K'_5K_6K_{\text{OC1}}K_{\text{OC2}}} = K_0.$$

Тумблеры  $T_1 - T_4$ , изображенные на структурной схеме рис. 6.11, располагаются на лицевой панели на стенде.

#### 4. Порядок выполнения работы

4.1. Ознакомиться с конструкцией стенда и правилами эксплуатации приборов, необходимых для выполнения работы.

4.2. Определить диапазон регулирования привода по скорости  $D_{\Omega}$  для чего:

- а) включить питание;
- б) замкнуть тумблеры  $T_1 - T_4$ ;

в) изменением движка потенциометра задания ( $P_1$ ) установить минимальную и максимальную скорости двигателя; контроль значения скорости осуществлять по напряжению тахогенератора, для чего использовать электронный осциллограф или вольтметр типа ВК7-9;

г) определить диапазон регулирования скорости по результатам измерений:  $D_{\Omega} = \frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{min}}}$ .

4.3. Определить регулировочную характеристику привода, для чего:

- а) включить привод;

б) положением движка потенциометра  $P1$  изменять скорость вращения двигателя от минимальной до максимальной, фиксируя при этом напряжение задания в точке 4 при помощи вольтметра типа ВК7-9 и скорость вращения двигателя описанным выше образом, данные занести в табл. 6.1:

Таблица 6.1

$U_4$					
$n$	дв	об/мин	250	500	750
$U_4'$					

где  $U_4'$  – напряжение  $U_4$  при разомкнутой силовой цепи и прежнем положении потенциометра  $P1$ ;

в) по данным табл. 6.1 построить регулировочные характеристики  $n = f(U_4)$ ,  $n = f(U_4')$ ;

г) определить коэффициент передачи замкнутой и разомкнутой систем, как  $K_0 = \frac{\Delta n}{\Delta U_y}$ ,  $K'_0 = \frac{\Delta n}{\Delta U_y}$ .

4.4. Определить механическую характеристику привода  $n = f(M)$ :

а) включить привод;

б) установить максимальную скорость;

в) прикладывая различные величины момента сопротивления к валу двигателя посредством фрикционного тормоза (величину момента оценивать по величине тока якорной цепи), определить соответствующие им значения скорости, экспериментальные данные свести в табл. 6.2:

Таблица 6.2

$I$	$A$	1	2	3	4	5
$n$	об/мин					

г) построить график зависимости  $n = f(M)$  и определить жесткость механической характеристики, как  $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta n}$ .

4.5. Определить точность стабилизации скорости  $\gamma = \frac{\Delta n}{n}$  при сбросе и

набросе нагрузки, для чего:

а) включить привод;

б) прикладывая момент сопротивления при помощи фрикционного тормоза, устанавливать различные значения сопротивления нагрузки, контролируя их по величине тока якорной цепи (по амперметру), значения скорости контролировать до и после приложения нагрузки; экспериментальные данные занести в табл. 6.3:

Таблица 6.3

$n _{M=0}$	об/мин	500	1000	1500	2000
$n _{M=\text{const}}$	об/мин				
$I_{\text{я}}$	$A$				
$\Delta n$	об/мин				
$\gamma = \frac{\Delta n_i}{n_i}$	$\gamma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^m \gamma_i}{m}$				

4.6. Определить качественные показатели привода при подаче скачкообразного управляющего воздействия  $U_3(t) = U_m \cdot 1(t)$ , для чего:

- а) включить привод;
- б) установить номинальное значение скорости;
- в) выключить привод;
- г) разомкнуть тумблер  $T_1$  и включить тумблер «Сеть»;
- д) выходное напряжение тахогенератора подать на электронный осциллограф, предварительно промасштабировав его развертку по амплитуде  $U_{\text{ТГНОМ}}$  и времени  $t$ ;
- е) включить тумблер  $T_1$  и наблюдать переходный процесс по экрану осциллографа, зарисовать на кальку характер переходного процесса по времени;
- ж) по кривой переходного процесса определить его качественные показатели:  $\sigma$  - перерегулирование;  $t_3$  - быстродействие;  $t_{\text{пп}}$  - время переходного процесса;  $n$  - число перебегов.

4.7. Определить качественные показатели привода при набросе нагрузки, для чего:

- а) включить привод;
- б) подать напряжение тахогенератора на электронный осциллограф;
- в) установить скорость, близкую к номинальной;
- г) скачком приложить момент к валу двигателя;
- д) определить качественный показатель переходного процесса аналогично п.п. 4.6, ж.

4.8. Определить коэффициенты передачи обратных связей по току и напряжению, для чего:

- а) включить привод;
- б) установить скорость  $n = 1000$  об/мин;
- в) разомкнуть тумблер  $T_2$  и определить значение скорости;
- г) разомкнуть тумблер  $T_3$  и определить значение скорости; результаты занести в табл. 6.4:

Таблица 6.4

T2	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ
T3	ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ
$n$			

д) используя аналитические зависимости между напряжением задания, скоростью и коэффициенты передачи привода, определить коэффициенты передачи обратных связей.

## 5. Перечень приборов

5.1. Универсальный прибор типа ВК7-9.

5.2. Электронный осциллограф типа С1-68.

## 6. Содержание отчета

6.1. Принципиальная электрическая схема привода и стенда.

6.2. Блок-схема и структурная схема привода.

6.3. Передаточные функции привода.

6.4. Характеристики, графики и экспериментальные данные по п. 4.2 – 4.7.

6.5. Заключение и выводы о проделанной работе.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Архипцев, Ю.Ф.* Бесконтактные элементы автоматики / Ю.Ф. Архипцев. – М.: Энергия, 1972. – 87 с.
2. *Беликов, И.Д.* Магнитомодуляционные путевые переключатели / И.Д. Беликов. – М.: Энергия, 1974. – 79 с.
3. *Ивенский, Ю.Н.* Бесконтактная позиционная коммутация в автоматизированном электроприводе / Ю.Н. Ивенский. – М.: Энергия, 1976. – 190 с.
4. *Кобзев, А.А.* Аппараты и устройства электроавтоматики / А. А. Кобзев. – Владимир: ВлГУ. –1997. – 78 с. – ISBN 5-230-04794-1.
5. *Миловзоров, В.П.* Электромагнитные устройства автоматики. / В.П. Миловзоров. – М.: Высш. шк., 1983. – 408 с.
6. *Намитоков, К.К.* Плавкие предохранители / К.К. Намитоков. –М.: Энергия, 1979.–176 с.
7. *Основы промышленной электроники / под ред. В.Г. Герасимова.* – М.: Высш. шк., 1986. – 336 с.
8. *Сотсков, Б.С.* Элементы и устройства систем управления / Б.С. Сотсков. – М.:Наука, 1981. – 208 с.
9. *Таев, И.С.* Основы теории электрических аппаратов / И.С. Таев. – М.:Высш. шк., 1987. – 273 с.
10. *Харизоменов, И.В.* Электрооборудование станков и автоматических линий / И.В. Харизоменов. – М.: Машиностроение, 1987.– 221 с.
11. *Чунихин, А.А.* Электрические аппараты / А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 718 с.
12. *Электротехнический справочник: в 3 т. / под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова [и др.].* – М.: Энергоиздат, 1981. – 640 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	4
Лабораторная работа № 2. РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДВИГАТЕЛЯМИ.....	11
Лабораторная работа № 3. ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТУРЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....	23
Лабораторная работа № 4. ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЕЧНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ.....	33
Лабораторная работа № 5. ИЗУЧЕНИЕ РЕЛЕ ВРЕМЕНИ.....	36
Лабораторная работа № 6. ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКИ НА БАЗЕ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ.....	40
Библиографический список.....	65

УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКИ  
Методические указания к лабораторным работам

Составители:

КОБЗЕВ Александр Архипович  
НАЗАРОВ Алексей Александрович  
КИРИЛИНА Анастасия Николаевна

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор В.Ф. Коростелев

Редактор Е.В. Невская

Корректор Е.В. Афанасьева

Компьютерная верстка С.В. Павлухина

ЛР № 020275. Подписано в печать 31.12.04.

Формат 60x84/16. Бумага для множительной техники. Гарнитура Таймс.

Печать на ризографе. Усл. печ. л. 3.95. Уч.-изд. л.4.21. Тираж 100 экз.

Заказ

Редакционно-издательский комплекс  
Владимирского государственного университета.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.

