

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ.  
ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по аграрному  
техническому образованию в качестве учебно-методического  
пособия для студентов учреждений высшего образования  
по специальностям 6-05-0812-01 «Техническое обеспечение  
производства сельскохозяйственной продукции»; 6-05-0812-02  
«Техническое обеспечение хранения и переработки  
сельскохозяйственной продукции»; 6-05-1021-01 «Охрана  
труда на производстве»*

Минск  
БГАТУ  
2025

УДК 62-83(07)  
ББК 31.291я7  
Э45

Составители:

кандидат технических наук, доцент кафедры *И. Г. Рутковский*,  
старший преподаватель *А. С. Силлюцкий*

Рецензенты:

кафедра «Автоматизация производственных процессов  
и электротехника» УО «Белорусский государственный  
технологический университет»  
(кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой *Д. С. Карпович*;  
кандидат технических наук, заместитель директора  
по научной работе и проектированию РНПУП «Институт  
энергетики НАН Беларуси» *Н. Е. Шевчик*

Э45 **Электропривод и электрооборудование. Практикум :**  
учебно-методическое пособие / сост.: И. Г. Рутковский,  
А. С. Силлюцкий. – Минск : БГАТУ, 2025. – 152 с.  
ISBN 978-985-25-0304-4.

Изложены техника безопасности и организация работы студентов в лаборатории электропривода. Включены лабораторные занятия по основным разделам учебной дисциплины. Приводятся краткие теоретические сведения по изучаемому электрооборудованию, описания лабораторных установок, необходимый справочный и информационный материал, контрольные вопросы.

Для студентов учреждений высшего образования по специальностям 6-05-0812-01 «Техническое обеспечение производства сельскохозяйственной продукции»; 6-05-0812-02 «Техническое обеспечение хранения и переработки сельскохозяйственной продукции»; 6-05-1021-01 «Охрана труда на производстве».

УДК 62-83(07)  
ББК 31.291я7

ISBN 978-985-25-0304-4

© БГАТУ, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Техника безопасности и организация работы студентов в лаборатории электропривода.....	5
<i>Лабораторная работа № 1</i>	
Исследование механических характеристик электродвигателя постоянного тока.....	11
<i>Лабораторная работа № 2</i>	
Исследование механических характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя.....	23
<i>Лабораторная работа № 3</i>	
Подготовка к пуску трехфазного асинхронного электродвигателя.....	30
<i>Лабораторная работа № 4</i>	
Исследование нагрева и охлаждения электродвигателей.....	39
<i>Лабораторная работа № 5</i>	
Исследование аппаратов и схем управления электродвигателями.....	51
<i>Лабораторная работа № 6</i>	
Исследование электрических аппаратов защиты.....	60
<i>Лабораторная работа № 7</i>	
Исследование газоразрядных источников видимого излучения.....	69
<i>Лабораторная работа № 8</i>	
Исследование регулируемого электропривода осевого вентилятора.....	86
<i>Лабораторная работа № 9</i>	
Исследование элементных водонагревателей.....	93
<i>Лабораторная работа № 10</i>	
Исследование электродных водонагревателей.....	101
<i>Лабораторная работа № 11</i>	
Исследование компенсационных устройств.....	108
<i>Лабораторная работа № 12</i>	
Исследование насосной установки.....	115
<i>Лабораторная работа № 13</i>	
Исследование асинхронного регулируемого электропривода с преобразователем частоты.....	124
<i>Лабораторная работа № 14</i>	
Наладка и испытание преобразователя частоты тока.....	135
Литература.....	149

## **ВВЕДЕНИЕ**

Учебным планом предусмотрено проведение лабораторных занятий по основным разделам курса «Электропривод и электрооборудование».

Практикум по дисциплине «Электропривод и электрооборудование» подготовлен в соответствии с действующей программой курса и призван обеспечить студентов учебно-методической информацией по лабораторным занятиям по данному курсу.

Темы лабораторных занятий тесно связаны с прочитываемыми в этот же временной период лекциями, что облегчает студенту понимание изучаемых процессов.

Данный лабораторный практикум предназначен для студентов вузов специальности 6-05-0812-01 «Техническое обеспечение производства сельскохозяйственной продукции», 6-05-0812-02 «Техническое обеспечение хранения и переработки сельскохозяйственной продукции», 6-05-1021-01 «Охрана труда на производстве».

В лабораторном практикуме имеются методические рекомендации, примеры, справочные данные, необходимые для выполнения лабораторных работ и подготовки к зачету.

Для успешного выполнения лабораторных работ студенты обязаны заранее ознакомиться с темой предстоящего занятия и подготовить отчет.

В конце занятия студент показывает преподавателю результаты испытаний и расчетов и ответы на контрольные вопросы.

По окончании изучаемого курса студент должен обладать соответствующими знаниями, умениями и навыками для самостоятельного решения практических задач связанных с вопросами электропривода и электрооборудования.

# ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

## Общие положения

Студент, выполняющий работу в лабораторных условиях, **обязан:**

- 1) изучить настоящие правила, принять их к обязательному исполнению и расписаться в специальном журнале;
- 2) соблюдать правила внутреннего распорядка, утвержденные ректором университета;
- 3) соблюдать требования техники безопасности, охраны труда и сохранности лабораторного оборудования и приборов;
- 4) предотвращать нарушения требований безопасности со стороны товарищей; выполнять все требования руководителя, относящиеся к соблюдению правил техники безопасности, порядку выполнения работ и поведению, а также требования по сохранности лабораторного оборудования и приборов;
- 5) заблаговременно готовиться к предстоящему занятию в лаборатории, используя инструкции, методические указания к лабораторным работам и рекомендованную литературу;
- 6) при выполнении лабораторной работы находиться только на своем рабочем месте, не трогать оборудование и приборы, не относящиеся к работе, соблюдать тишину и порядок.

### ***Запрещается:***

- 1) без разрешения трогать или переносить со стола на стол аппараты, приборы и др.;
- 2) заниматься делами, не связанными с выполняемой работой;
- 3) садиться на столы, ставить ноги на электрические машины, установки или другое оборудование.

При нарушении настоящих правил или требований руководителя студент может быть отстранен от проведения работ и вновь допускается к их выполнению лишь с разрешения заведующего кафедрой или декана.

При порче машин, приборов, аппаратов и другого оборудования или засорении рабочего места студент обязан во внеурочное время устранить повреждения или привести в порядок рабочее место.

За порчу инвентаря и оборудования лаборатории, вызванную несоблюдением настоящих правил, студент несет материальную ответственность.

## **Правила техники безопасности**

При выполнении работ в лаборатории студенты обязаны помнить о возможности поражения электрическим током и необходимости соблюдения правил техники безопасности. Невыполнение правил безопасности, неосторожное обращение с аппаратурой, невнимательность и, как следствие, случайное прикосновение к токоведущим частям схем могут повлечь за собой серьезные несчастные случаи. Поэтому при работе в лаборатории электропривода, имеющей разнообразное электротехническое оборудование и вращающиеся электрические машины, нужно соблюдать особую осторожность и следующие основные правила техники безопасности:

- 1) электрическую схему можно собирать только при отключенном автоматическом выключателе;
- 2) включать схему под напряжением разрешается только после ее проверки преподавателем или лаборантом;
- 3) о включении схемы надо сделать предупреждение присутствующим; убедиться, что никто не касается токоведущих или вращающихся частей;
- 4) любые изменения в схеме можно делать только при отключенной электрической сети;
- 5) в процессе проведения опытов категорически запрещается прикасаться к незащищенным точкам схемы;
- 6) во избежание случайного прикосновения к незащищенным точкам схемы запрещается:
  - а) пользоваться временным соединением двух или нескольких проводов скручиванием;
  - б) включать или отключать схему разрывом цепи проводов (вместо выключателя);
  - в) применять провода с поврежденной изоляцией;
  - г) перемещать измерительные приборы без снятия напряжения;
  - д) располагать тетради при записи показаний на измерительных приборах;
  - е) оставлять без наблюдения включенные установки;
  - ж) заходить за установленные ограждения;
- 7) при срабатывании автоматического выключателя студенты с помощью преподавателя устраняют причину возникновения перегрузки или короткого замыкания; снова включают схему под наблюдением преподавателя;

8) при несчастном случае немедленно отключить установку от сети и оказать первую помощь пострадавшему. Аптечка скорой помощи находится в аппаратной лаборатории. В случае необходимости вызвать скорую помощь по телефону 103;

9) в случае пожара немедленно отключить электропитание лаборатории и принять меры по ликвидации пожара. Вводный выключатель лаборатории находится в аппаратной лаборатории, ящик с песком – в цокольном этаже, а огнетушитель – у дверей лаборатории.

В случае необходимости вызвать подразделение МЧС по телефону 101.

### **Порядок выполнения и сдачи лабораторных работ**

1. Работы выполняются бригадами по 3–4 человека в соответствии с графиком проведения лабораторных работ.

2. К работе в лаборатории электропривода допускаются студенты, представившие черновик предстоящей работы и сдавшие отчет по предыдущей работе. Черновик предстоящей работы должен включать наименование работы, схему установки, вычерченную от руки, таблицы, в которые будут заноситься результаты опытов, и свободную страницу или две для записи паспортных данных приборов и оборудования, необходимых расчетов и пояснений. Рекомендуется для черновика использовать отдельную ученическую тетрадь в клеточку. Перед началом опытов преподаватель проверяет подготовленность бригады к работе путем опроса по содержанию и методике выполнения предстоящей работы. Предварительная подготовка к сдаче и выполнению работы проводится дома с использованием лабораторного практикума и рекомендуемой литературы.

3. Объем выполняемой в лаборатории работы определяется преподавателем и включает в себя как экспериментальную, так и расчетную части. В отдельных случаях преподаватель может изменить объем и характер опытов.

4. При выполнении работы студенты должны:

а) ознакомиться с основным оборудованием и вспомогательной аппаратурой, записать их паспортные данные;

б) подобрать электроизмерительные приборы с учетом рода тока и ожидаемых значений измеряемых величин, записать основные данные приборов. Указательные стрелки измерительных приборов поставить на ноль шкалы с помощью корректора;

в) собрать электрическую схему и пригласить преподавателя или лаборанта для проверки. При сборке электрической схемы следует руководствоваться следующим правилом: вначале соединить все последовательные цепи от зажимов автоматического выключателя до испытуемой машины, затем подключить параллельные цепи и цепи управления. Не следует использовать длинные провода там, где можно обойтись короткими проводами. Собранная схема обязательно проверяется всеми студентами, выполняющими данную работу. При этом необходимо обратить особое внимание на целостность соединительных проводов, плотность контактов, затяжку соединительных клемм, положение рукояток аппаратов управления и положение подвижных контактов реостатов (в соответствии с инструкцией к лабораторной работе);

г) включить схему под напряжение и проделать опыт, не производя записей, чтобы ознакомиться с характером процесса;

д) произвести необходимые измерения и занести результаты измерений в черновик. Запись в черновик и последующая обработка опытов должны производиться индивидуально каждым студентом. При замерах следует иметь в виду, что характер экспериментальных кривых с достаточной для лабораторных работ точностью может быть отражен по 4–5 замерам. Меньшее число замеров может привести к искажению действительного характера кривой;

е) показать результаты опыта преподавателю и (только после правильных результатов, с его разрешения) приступить к следующему опыту;

ж) после окончания всей работы черновики сдаются на проверку и подпись преподавателю;

з) после подписи черновиков с разрешения преподавателя необходимо разобрать схему, уложить на место провода, приборы, привести в порядок рабочее место. Если в работе использовались конденсаторы, то перед разборкой схемы их следует разрядить путем соединения клемм конденсатора проводником;

и) в оставшееся рабочее время следует оформлять выполненную работу. Уходить из лаборатории до звонка можно только с разрешения преподавателя.

Защита отчета по выполненной лабораторной работе проводится, как правило, в конце занятия, в часы, отведенные на выполнение работы или на консультации. Принимаются к защите отчеты,



оформленные с учетом требований, изложенных ниже, и с учетом требований лабораторной работы. Отчет, выполненный небрежно, с ошибками, подлежит переделке и защищается в дополнительно назначенное время (например, на консультации).

По каждой лабораторной работе выставляется оценка; на основании ряда оценок выводится средняя оценка по циклу лабораторных работ, которая учитывается при оценке знаний на экзамене.

При сдаче отчета преподаватель опрашивает студента в объеме материала выполненной работы. Студент должен изложить цель, физическую сущность, методику выполненной работы, назначение использованных машин и оборудования, объяснить и проанализировать полученные результаты.

Студент, выполнивший все работы и своевременно сдавший отчеты по ним, получает допуск к зачету.

Пропущенные лабораторные работы отрабатываются в течение 10 дней после пропуска.

### **Требования по оформлению отчета по лабораторной работе**

Отчет о выполненной работе составляется каждым студентом самостоятельно и должен быть представлен преподавателю перед началом очередного занятия.

Как правило, отчет выполняется на нескольких листах бумаги в клеточку из обычной ученической тетради или на листах формата А4. Первый лист отчета – титульный. На следующей странице указывается цель занятия, приводится принципиальная электрическая схема установки, таблица перечня элементов схемы лабораторной установки. На последующих листах размещаются таблицы, графики и расчеты. На последней странице записываются выводы по работе, ставится дата выполнения работы и подпись исполнителя. Все листы отчета склеиваются или сшиваются и нумеруются. Отчет по каждой лабораторной работе представляется отдельно.

Схемы и график следует выполнять аккуратно, карандашом, с применением линейки, лекала, циркуля. Схемы и графики должны быть пронумерованы и содержать подрисовочные подписи.

Построение графиков можно выполнять на листах в клеточку, но лучше всего выполнять их на миллиметровой бумаге. Масштаб нужно выбирать таким образом, чтобы в принятой единице длины

содержалось 1, 2 или 5 измеряемых величин или их десятых долей. По экспериментальным данным наносятся точки в виде кружков, треугольников или звездочек (для каждой функции – свои обозначения), через которые проводится плавная усредненная кривая. На одном графике допускается изображать несколько различных функций одного и того же аргумента (обычно – не более трех). При этом масштабы выбираются таким образом, чтобы кривые разместились равномерно по всему полю рисунка. Для каждого графика ось функции наносится отдельно с указанием размерности, например, для момента  $M$  – Н·м. Вдоль осей проставляются размерные единицы, причем цифровые значения осей в выполняемых работах обычно начинаются с нуля. Для построения графиков рекомендуется использовать программу MS Excel.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** изучить методику построения механических характеристик электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения экспериментальным путем и по номинальным данным; исследовать механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных способах регулирования его угловой скорости.

**Студент должен знать:** принцип действия и конструкцию машин постоянного тока.

**Студент должен уметь:** строить механические характеристики электродвигателей постоянного тока по экспериментальным данным.

### Порядок выполнения

1. Изучить схему лабораторной установки, приборы и оборудование.
2. Исследовать процесс регулирования угловой скорости электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением сопротивления якорной цепи, изменением величины магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения и изменением напряжения питания обмотки якоря.
3. Построить механические характеристики двигателя.

### Теоретические сведения

Схема электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением представлена на рис. 1.1.

Механическая характеристика электродвигателя устанавливает связь между моментом на его валу  $M$  и угловой скоростью  $\omega$ :

$$M = \frac{U_c \Phi}{R} - \frac{C_E^2 \Phi^2}{R} \omega, \quad (1.1)$$

где  $U_c$  – напряжение на зажимах якоря, В;

$I$  – ток якорной цепи, А;  
 $R$  – сопротивление якорной цепи, Ом;  
 $C_E$  – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров электродвигателя;  
 $\Phi$  – магнитный поток, Вб;  
 $\omega$  – угловая скорость, рад/с.

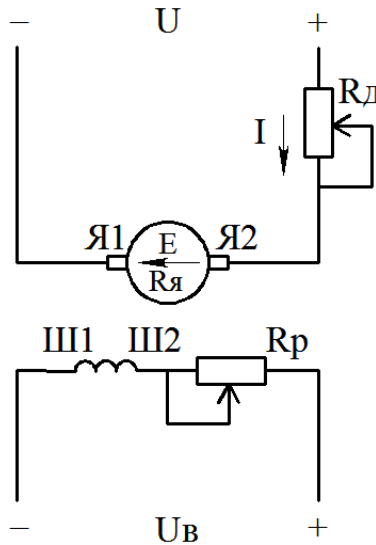


Рис. 1.1. Схема включения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения

Эта формула может быть представлена в виде:

$$\omega = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R}{C_E^2 \Phi^2} M. \quad (1.2.)$$

Так как  $U$ ,  $C_E$ ,  $\Phi$  и  $R$  в определенных условиях величины постоянные, то зависимость  $\omega = f(M)$  можно представить линейной зависимостью вида:

$$\omega = A - BM.$$

Формулы (1.3) и (1.4) позволяют определить пусковой момент и угловую скорость при идеальном холостом ходе  $\omega_0$ :

$$M_H = \frac{U \cdot C_E \cdot \Phi}{R}, \quad (1.3)$$

$$\omega_0 = \frac{U}{C_E \Phi}. \quad (1.4)$$

Пусковой момент и скорость идеального холостого хода можно определить и графически. Для этого прямую  $M = f(\omega)$  необходимо продолжить до пересечения с осью абсцисс (получим  $\omega_0$ ) и осью ординат (получим  $M_H$ ).

Механическую характеристику можно построить по двум точкам:

$$\omega = \omega_0, M = 0 \text{ и } \omega = \omega_H, M = M_H.$$

Иногда вторую точку удобнее брать для момента пуска  $\omega = 0$ ,  $M = M_H$ .

Механическая характеристика  $M = f(\omega)$ , построенная при  $U = U_H$ ,  $R = R_{\text{я}}$ ,  $\Phi = \Phi_H$ , называется *естественной*.

Если любая из этих величин не соответствует указанным равенствам, то характеристика называется *искусственной*.

Искусственная характеристика используется в том случае, если естественная не может удовлетворять требованиям производственного механизма. Например, для регулирования скорости искусственную характеристику можно получить введением дополнительного резистора в цепь якоря (рис. 1.2), путем ослабления магнитного потока  $\Phi$  обмотки возбуждения (рис. 1.3) и путем изменения напряжения питания обмотки якоря (рис. 1.4).

На рис. 1.5 представлены механические характеристики: естественная – 1 и искусственная при изменении  $R_{\text{я}} - 2$ ; при ослаблении магнитного потока  $\Phi$  с помощью  $R_{\text{д}} - 3$  и при уменьшении напряжения питания обмотки якоря  $U_{\text{я}} - 4$ .

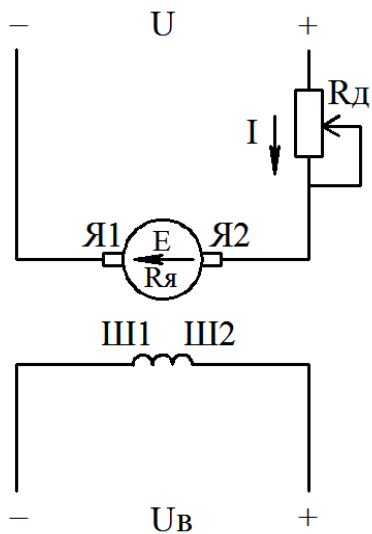


Рис. 1.2. Схема включения двигателя постоянного тока с дополнительным резистором в цепи якоря

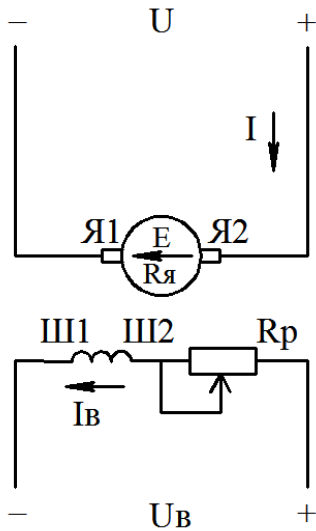


Рис. 1.3. Схема включения двигателя постоянного тока с регулировочным резистором в цепи обмотки возбуждения

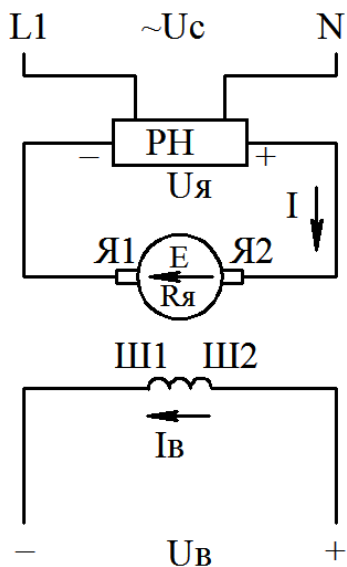


Рис. 1.4. Схема включения двигателя постоянного тока при регулировании напряжения в якорной цепи

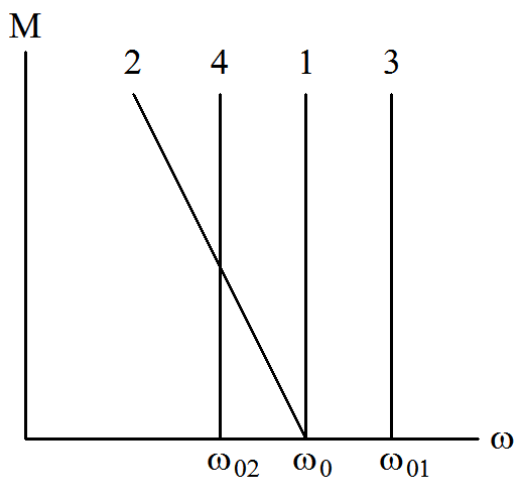


Рис. 1.5. Механические характеристики двигателя постоянного тока

Возможность регулирования скорости указанными способами легко пояснить с помощью уравнения механической характеристики.

Так, при регулировании скорости изменением сопротивления якорной цепи формула (1.2) будет иметь вид:

$$\omega = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_{я} + R_{д}}{C_E^2 \cdot \Phi^2} M. \quad (1.5)$$

В этом случае изменяется только угловой коэффициент  $B = \frac{R_{я} + R_{д}}{C_E^2 \cdot \Phi^2}$ , а первая часть остается без изменения. Это значит, что при увеличении сопротивления регулировочного резистора  $R_{д}$  будет изменяться только наклон механической характеристики (рис. 1.5, зависимость 2).

При изменении величины магнитного потока  $\Phi$  (допускается только уменьшение) в формуле (1.5) изменяется первая часть  $\frac{U}{C_E \Phi}$  и угловой коэффициент второй части  $\frac{R}{C_E^2 \Phi^2}$ . Следовательно, скорость идеального холостого хода изменяется (при уменьшении  $\Phi$  скорость  $\omega_0$  увеличивается), и наклон прямой тоже изменяется (рис. 1.5, зависимость 3).

При уменьшении напряжения на обмотке якоря изменяется только первая составляющая формулы (1.5). Угловой коэффициент остается при этом без изменения. Следовательно,  $\omega_0 = \frac{U}{C_E \cdot \Phi}$  уменьшается, а наклон прямой остается без изменения.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 1.6) состоит из электродвигателя постоянного тока (ДПТ) и генератора постоянного тока, валы которых соединены муфтой. Генератор предназначен для создания нагрузки на валу двигателя. Момент сопротивления на валу генератора пропорционален угловой скорости и току нагрузки



в цепи якоря генератора. В качестве нагрузки используются резисторы  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ , которые подключаются к генератору выключателями  $SA1$ ,  $SA2$ ,  $SA3$ .

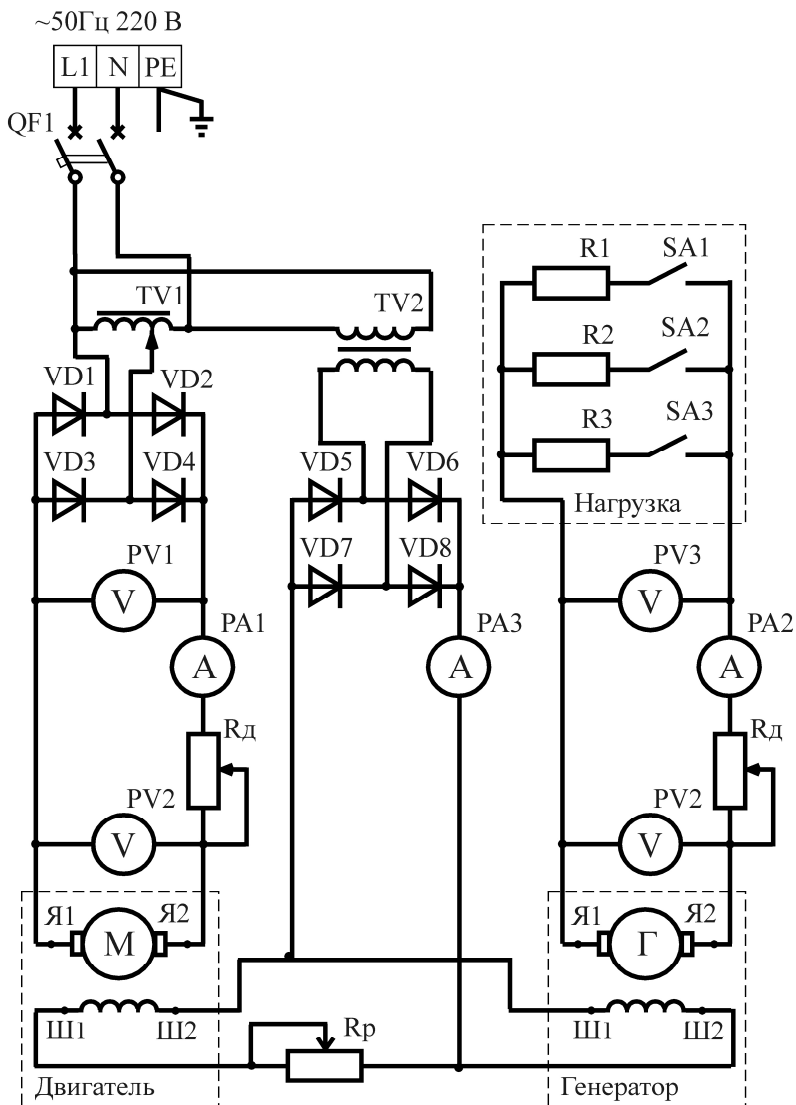


Рис. 1.6. Схема лабораторной установки

Регулирование напряжения в цепи якоря двигателя постоянного тока осуществляется регулятором напряжения, состоящим из автотрансформатора  $TV1$  и мостового выпрямителя на диодах  $VD1-V D4$ . Трансформатор  $TV2$  и мостовой выпрямитель  $VD5-V D8$  предназначены для питания обмоток возбуждения электродвигателя генератора. Добавочный резистор  $R_d$  в цепи якоря ДПТ предназначен для регулирования силы тока якоря; резистор  $R_p$  позволяет регулировать силу тока, а следовательно, магнитный поток обмотки возбуждения ДПТ.

Вольтметр  $PV1$  измеряет напряжение на выходе регулируемого выпрямителя, вольтметр  $PV2$  измеряет напряжение на якоре ДПТ, а вольтметр  $PV3$  измеряет напряжение на нагрузке генератора. Ток якоря ДПТ контролируется амперметром  $PA1$ , ток нагрузки генератора – амперметром  $PA2$ , ток обмотки возбуждения – амперметром  $PA3$ .

Установка подключается к сети переменного тока напряжением 220 В автоматическим выключателем  $QF1$ .

Частота вращения вала измеряется цифровым тахометром. На свободном конце вала электродвигателя насажена крыльчатка, которая вращается в прорези фотодатчика, состоящего из светодиода и фотодиода. Крыльчатка содержит 60 прорезей, поэтому за 1 оборот на вход цифрового тахометра поступает 60 импульсов. Так как время измерения составляет 1 с, на цифровом индикаторе высвечиваются показания в об/мин.

## **Методика выполнения лабораторной работы**

*1. Естественная механическая характеристика электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением.*

Перед включением установки резисторы  $R_d$  и  $R_p$  установить в положение «0».

Ручку автотрансформатора  $TV1$  установить в крайнее левое положение. Выключатели  $SA1$ ,  $SA2$ ,  $SA3$  должны быть выключены. Включить лабораторную установку автоматическим выключателем  $QF1$  и при помощи автотрансформатора установить показание вольтметра  $PV1 = 110$  В. После установления стабильных показаний цифрового тахометра записать показания приборов, соответствующих режиму холостого хода ДПТ, в табл. 1.1.

Включить выключатель  $SA1$ , и после установления показаний приборов занести их показания в табл. 1.1. Опыт повторить для нагрузок  $R2$ ,  $R3$ , для чего последовательно включить  $SA2$ ,  $SA3$ .

При выполнении каждого опыта следить за показаниями вольтметра и поддерживать напряжение 110 В.

*2. Искусственные механические характеристики электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении сопротивления резистора в цепи якоря.*

Установить рукоятку резистора  $R_d$  в положение «I», включить установку автоматическим выключателем  $QF1$ . Увеличивая нагрузку генератора выключателями  $SA1$ ,  $SA2$ ,  $SA3$ , записать показания приборов в табл. 1.1. Опыт повторить при положении резистора  $R_d$  на отметке «II» и «III». Во всех случаях резистор  $R_p$  должен быть выведен в положение «0».

*3. Искусственные механические характеристики электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении напряжения питания якоря.*

Установить резисторы  $R_d$  и  $R_p$  в положение «0», ручку автотрансформатора – в крайне левое положение.

Включить установку автоматическим выключателем  $QF1$  и, изменяя напряжение питания якоря автотрансформатором, снять механические характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при различных напряжениях. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

*4. Искусственные механические характеристики электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении магнитного потока обмотки возбуждения.*

Установить напряжение питания якоря  $U_1 = 110$  В. Снять механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных значениях магнитного потока обмотки возбуждения.

Магнитный поток уменьшается при увеличении сопротивления  $R_p$  в цепи обмотки возбуждения.

Результаты измерения занести в табл. 1.3.

Произвести вычисления по следующим формулам:

$$P_1 = U_2 I_1,$$

$$P_2 = U_3 I_2,$$

где  $P_1$  – мощность, потребляемая двигателем от сети, Вт;

$P_2$  – мощность, отдаваемая генератором в сеть, Вт;

$$DP = P_1 - P_2,$$

где  $DP$  – суммарные потери в двигателе и генераторе.

Считая потери в двигателе и генераторе равными, мощность на валу двигателя определяют по формуле:

$$P_B = P_1 - DP / 2.$$

Момент на валу определяют по формуле:

$$M = \frac{P_B}{\omega} \text{ (Н·м)},$$

где  $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$  – угловая скорость, рад/с.

Таблица 1.1

Результаты измерений и расчетов по определению механической характеристики электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении сопротивления в цепи якоря

Положе- ние рео- стата	На- груз- ка	Измерено					Вычислено					
		$V_2$ , В	$I_1$ , А	$V_3$ , В	$I_2$ , А	$n$ , об/мин	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$P_B$ , Вт	$M_B$ , Н·м	$\omega$ , рад/с	$\Delta P / 2$ , Вт
$R_P = 0$ ; $R_D = 0$ ; $V_1 = 110 \text{ В}$	0											
	1											
	2											
	3											
$R_P = 0$ ; $R_D = I$ ; $V_1 = 110 \text{ В}$	0											
	1											
	2											
	3											

Окончание таблицы 1.1

Положе- ние рео- стата	На- груз- ка	Измерено					Вычислено					
		$V_2$ , В	$I_1$ , А	$V_3$ , В	$I_2$ , А	$n$ , об/мин	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$P_B$ , Вт	$M_B$ , Н·м	$\omega$ , рад/с	$\Delta P / 2$ , Вт
$R_p = 0$ ; $R_d = II$ ; $V_1 = 110 \text{ В}$	0											
	1											
	2											
	3											
$R_p = 0$ ; $R_d = III$ ; $V_1 = 110 \text{ В}$	0											
	1											
	2											
	3											

Таблица 1.2

Результаты измерений и расчетов по определению механической характеристики электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении напряжения питания якоря

Напря- жение питания якоря, В	На- груз- ка	Измерено					Вычислено					
		$V_2$ , В	$I_1$ , А	$V_3$ , В	$I_2$ , А	$n$ , об/мин	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$P_B$ , Вт	$M_B$ , Н·м	$\omega$ , рад/с	$\Delta P / 2$ , Вт
110	0											
	1											
	2											
	3											
80	0											
	1											
	2											
	3											
50	0											
	1											
	2											
	3											

Таблица 1.3

Результаты измерений и расчетов по определению механической характеристики электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении магнитного потока обмотки возбуждения

Сопротивление резистора $R_p$ в цепи обмотки возбуждения, Ом	Нагрузка	Измерено					Вычислено					
		$V_2$ , В	$I_1$ , А	$V_3$ , В	$I_2$ , А	$n$ , об/мин	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$P_{в\cdot}$ , Вт	$M_{в\cdot}$ , Н·м	$\omega$ , рад/с	$\Delta P / 2$ , Вт
0	0											
	1											
	2											
	3											
500	0											
	1											
	2											
	3											
1000	0											
	1											
	2											
	3											

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Технические данные исследуемого электродвигателя, нагрузочного генератора и приборов, используемых в работе.
3. Электрическая схема установки.
4. Таблица с опытами и расчетными данными.
5. Формулы, используемые при расчетах.
6. Графические зависимости.

### Контрольные вопросы

1. Способы регулирования скорости двигателя постоянного тока.
2. Чем отличаются естественная и искусственная механические характеристики электродвигателя?
3. Как осуществляется пуск электродвигателя постоянного тока?
4. Области применения электродвигателей постоянного тока.
5. Объяснить работу лабораторной установки и ее принципиальную электрическую схему.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** изучить методику построения механической характеристики электродвигателя опытным путем и по каталожным данным; исследовать влияние питающего напряжения и степени загрузки асинхронного электродвигателя на его характеристики.

**Студент должен знать:** принцип действия и конструкцию трехфазных асинхронных электродвигателей.

**Студент должен уметь:** строить механические характеристики трехфазных асинхронных электродвигателей по опытным данным.

### Порядок выполнения

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, приборами и оборудованием.
2. Построить механическую характеристику асинхронного трехфазного электродвигателя по опытным данным.
3. Построить механическую характеристику электродвигателя по опытным данным при питании обмотки статора пониженным напряжением.

### Теоретические сведения

Трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором получили наибольшее распространение в современном электроприводе.

Основными характеристиками этих электродвигателей являются механические  $M = f(\omega)$  или  $M = f(s)$ , которые могут быть построены по опытным и каталожным данным.

Внешний вид механической характеристики представлен на рис. 2.1 (кривая 1–2–3–4–5).

Для построения механических характеристик опытным путем необходимо иметь нагрузочное устройство и приборы для измерения момента нагрузки  $M$  и частоты вращения  $n$ .

При построении зависимости  $M = f(s)$  текущие значения скольжения  $s$  определяют по формуле:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (2.1)$$

где  $\omega_0$  – синхронная угловая скорость (угловая скорость магнитного поля статора), рад/с;

$\omega$  – текущее значение угловой скорости, рад/с;

$n$  – частота вращения вала электродвигателя, измеренная тахометром.

$\omega_0$  определяется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (2.2)$$

где  $f$  – частота питающего тока, Гц;

$p$  – число пар полюсов статора.

Скольжение определяется по формуле:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

где

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}.$$

При изменении момента нагрузки на валу  $M$  получают ряд точек на рабочей части механической характеристики (рис. 2.1, кривая 3–4–5).

Участок кривой 1–3 описанным способом получить нельзя, так как при увеличении нагрузки сверх критического момента  $M_k$  двигатель остановится.



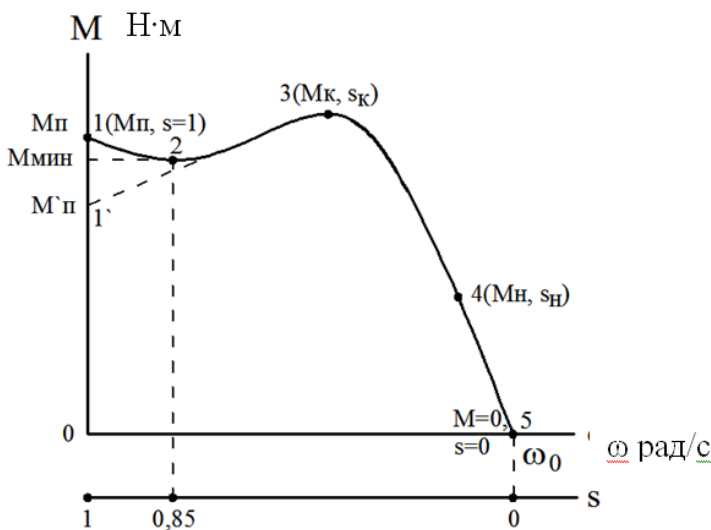


Рис. 2.1. Механическая характеристика трехфазного асинхронного электродвигателя

При изменении нагрузки изменяются коэффициент полезного действия  $\eta$  и коэффициент мощности  $\cos\varphi$  электродвигателя:

$$\eta = \frac{P_B}{P_C}, \quad (2.3)$$

где  $P_B$  – мощность двигателя на валу, Вт:

$$P_B = M \cdot \omega; \quad (2.4)$$

$P_C$  – мощность, потребляемая двигателем из сети, Вт.

Активная мощность  $P_C$  измеряется ваттметром.

Коэффициент мощности  $\cos\varphi$  определяется по формуле:

$$\cos\varphi = \frac{P_C}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}, \quad (2.5)$$

где  $U$  – линейное напряжение, В;  
 $I$  – ток одной фазы, А.

Для построения механической характеристики по каталожным данным необходимо иметь следующие данные:

- 1) номинальную мощность на валу электродвигателя  $P_H$ , кВт;
- 2) номинальную частоту вращения  $n_H$ , об/мин;
- 3) кратность максимального момента  $\mu_K$ ;
- 4) кратность пускового момента  $\mu_H$ ;
- 5) кратность минимального момента  $\mu_{\min}$ .

На основании этих данных находят четыре точки механической характеристики, по которым можно приблизительно построить кривую изменения момента.

1. Точка пуска:  $M_H = \mu_H \cdot M_H$ ,  $\omega = 0$  (или  $s_H = 1$ ),

где  $M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$ ;  $\omega_H = \frac{\pi \cdot n}{30}$ .

2. Точка минимального момента:  $\mu_{\min} = \frac{M_{\min}}{M_H}$ ,  $s_{\min} = 0,85$ .

3. Критическая точка:  $M_K = \mu_K \cdot M_H$ ;  $s_K = s_H (\mu_K + \sqrt{\mu_K - 1})$  или  $\omega_K = \omega_0 (1 - s_K)$ .

4. Номинальный режим:  $M_H$ ;  $\omega_H$  или  $s_H = \frac{(\omega_0 - \omega)}{\omega_0}$ .

5. Точка идеального холостого хода:  $M_0 = 0$ ;  $\omega_0$  или  $s_0 = 0$ .

Общий вид механической характеристики, построенной по каталожным данным, показан на рис. 2.1 (кривая 1–2–3–4–5).

Механическая характеристика может быть построена по уравнению Клосса:

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}. \quad (2.6)$$

Кривая 1–3–4–5, построенная по этому уравнению, требует уточнения на участке 1–3. Для этого определяют  $M_{\min}$  и полученную точку соединяют с точкой 3, где  $M = M_K$ .

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 2.2, состоит из асинхронного трехфазного электродвигателя, на валу которого насажен маховик 2 электромагнитного тормоза 3. Электромагнитный тормоз состоит из магнитной системы с полюсными наконечниками 4 и катушками 5. Магнитная система может поворачиваться на оси, установленной в опорах 7. На свободном конце оси закреплен груз 8 и стрелка указателя момента 9. При вращении маховика в магнитном поле, создаваемом электромагнитами, возникающие в маховике вихревые токи создают собственное магнитное поле. Магнитное поле маховика, взаимодействующее с полем электромагнитов, создает вращающий момент, вызывающий поворот всей массы электротормоза вместе с противовесом 8 и стрелкой 9 в сторону вращения маховика.

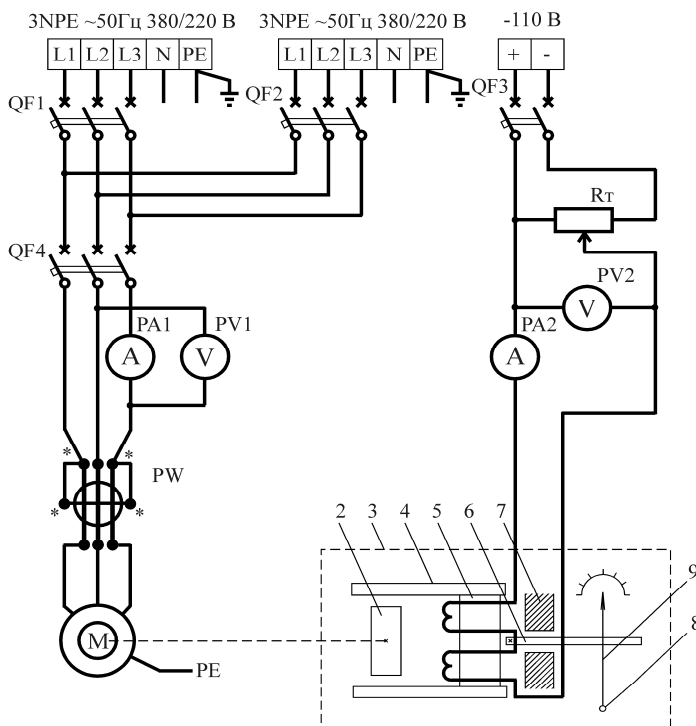


Рис. 2.2. Схема лабораторной установки

Частота вращения электродвигателя измеряется цифровым тахометром.

Таким образом, угол отклонения стрелки пропорционален вращающему моменту электродвигателя. Изменяя ток в цепи катушек электромагнитов, можно изменять нагрузку на валу электродвигателя, что необходимо для снятия зависимости  $M = f(\omega)$ .

### Методика исследования

Нужно ознакомиться с оборудованием, аппаратурой управления и измерительными приборами и изучить установку для исследования электродвигателя.

Снятие механической характеристики начинают с точки, соответствующей холостому ходу двигателя. Для этого напряжение питания электромагнитного тормоза должно быть отключено. Измеряют значение частоты вращения и другие величины ( $P$ ,  $U$ ,  $I$ ). Затем подают напряжение на обмотку электромагнитного тормоза включением  $QF3$  и, изменяя силу тока реостатом  $R_T$ , снимают показания приборов для 3–4 значений силы тока тормоза.

Результаты измерений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Опытные и расчетные данные для построения механической характеристики асинхронного электродвигателя

Напря- жение сети $U$ , В	№ опыта	Результаты измерений							Расчетные результаты					
		Электродвигатель					Электро- тормоз							
		$P$ , Вт	$U$ , В	$I$ , А	$M$ , Н·м	$n$ , об/мин	$U$ , В	$I$ , А	$\omega$ , рад/с	$s$	$P$ , Вт	$\cos\varphi$	$\eta$	
380	1													
	2													
	3													
	4													
	5													
220	1													
	2													
	3													
	4													
	5													

Механическую характеристику, снятую опытным путем, построить для двух значений напряжения питания:  $U = 380 \text{ В}$  и  $U = 220 \text{ В}$ .

### **Содержание отчета**

1. Цель и задачи исследований.
2. Электрическая схема лабораторной установки.
3. Таблицы с опытными и расчетными данными.
4. Формулы, используемые при выполнении работы.
5. Графические зависимости  $M = f(s)$  или  $M = f(\omega)$ , построенные по опытным данным для двух значений напряжения.
6. Графические зависимости  $\eta = f(P_B)$ ;  $\cos\varphi(P_B)$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Объяснить устройство трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Объяснить устройство лабораторной установки, назначение приборов и оборудования.
3. Объяснить методику построения механической характеристики электродвигателя по опытным данным.
4. Написать формулы для определения мощности на валу электродвигателя, коэффициента мощности, частоты вращения, пускового и критического момента, скольжения и дать необходимые пояснения.
5. Написать формулу механической характеристики асинхронного электродвигателя.
6. Объяснить методику построения механической характеристики асинхронного электродвигателя по каталожным данным и по уравнению Клосса.
7. Написать формулу синхронной угловой скорости. Определить максимально возможную частоту вращения магнитного поля статора при питании электродвигателя от сети 50 Гц.

## Лабораторная работа № 3

### ПОДГОТОВКА К ПУСКУ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** изучить требования к техническому состоянию электродвигателя при подготовке его к пуску; ознакомиться со способами обнаружения повреждений в обмотках электродвигателей; ознакомиться со схемами включения трехфазного асинхронного электродвигателя в сеть.

**Студент должен знать:** способы пуска трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя и маркировку выводов обмоток.

**Студент должен уметь:** оперировать принципами построения схем управления электродвигателей.

#### Порядок выполнения

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные приборов и оборудования.
2. Изучить способы обнаружения коротких замыканий между обмотками или обмоткой и корпусом двигателя, а также наличие обрывов в обмотках.
3. Изучить инструкцию по измерению сопротивления изоляции при помощи мегаомметра.
4. Научиться определять начала и концы обмоток двигателя методами трансформации и подбора.
5. Изучить методику определения номинального напряжения электродвигателя, если оно неизвестно.
6. Ознакомиться с паспортной табличкой электродвигателя и уметь пользоваться представленными на ней данными.
7. Подключить трехфазный двигатель к трехфазной сети на напряжение 220 В и 380 В.
8. Подключить трехфазный двигатель к однофазной сети.

#### Теоретические сведения

В настоящее время в промышленности и сельском хозяйстве широко применяют асинхронные трехфазные электродвигатели серий 4АИ и АИР.

Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (рис. 3.1) состоит из: статора 10 – неподвижного кольцевого сердечника, набранного из листов электротехнической стали, в пазах которого уложена статорная обмотка; ротора 9, вращающегося в подшипниках 2 и 6, укрепленных в подшипниковых щитах 3 и 7. Сердечник ротора набран также из листов электротехнической стали и укреплен на валу 1 электродвигателя, на котором устанавливается вентилятор 5. В пазах магнитопровода ротора 9 укладывается стержневая обмотка, накоротко замкнутая кольцами по торцам.

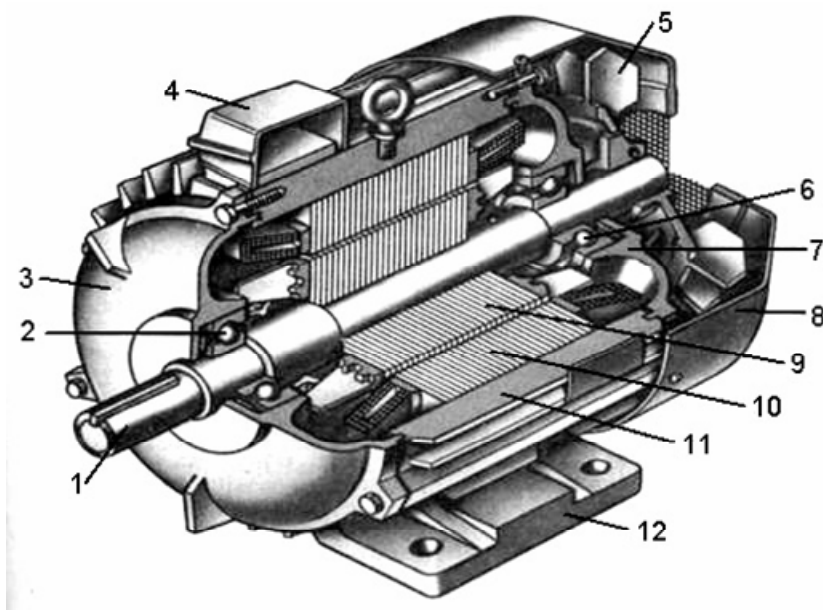


Рис. 3.1. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором:  
 1 – вал ротора; 2, 6 – подшипники; 3, 7 – щиты подшипников; 4 – клемная коробка;  
 5 – вентилятор; 8 – крышка; 9 – магнитопровод ротора; 10 – статорная обмотка;  
 11 – корпус; 12 – лапа

На паспортной табличке (рис. 3.2) асинхронного короткозамкнутого электродвигателя указывается его тип и номинальные данные; мощность на валу (кВт), линейное напряжение на зажимах (В), линейный ток (А), частота тока (Hz), число оборотов (об/мин), КПД (%), коэффициент мощности (косинус угла между векторами

напряжения и тока фазы обмотки статора) cosφ. Для двигателя с фазным ротором указывается, кроме того, напряжение на контактных кольцах (при неподвижном роторе) и ток обмотки ротора (при нормальном режиме). На паспортной табличке также указаны схема соединения обмотки статора, режим работы, для которого предназначен двигатель, степень защиты, его масса (кг), класс изоляции.



Рис. 3.2. Заводской щиток асинхронного электродвигателя серии АИР:

- 1 – режим работы; 2 – номинальная частота вращения электродвигателя;
- 3 – число фаз и род тока питающей сети; 4 – рабочая частота;
- 5 – логотип производителя; 6 – тип двигателя; 7 – заводской номер;
- 8 – номинальный ток обмоток; 9 – cos φ;
- 10 – степень защиты оболочки от внешнего воздействия (код IP);
- 11 – стандарт выполнения; 12 – дата выпуска; 13 – КПД в %;
- 14 – номинальное напряжение обмоток; 15 – класс изоляции;
- 16 – номинальная мощность электродвигателя;
- 17 – схема соединения обмоток (звезда); 18 – масса двигателя

Обозначение типа электродвигателя, например, 4А100S2У3 или 4АН90LB8У4, расшифровывается следующим образом: 4 – номер серии; А – вид двигателя (асинхронный); Н – защищенный IP23 (для закрытого исполнения обозначение не дается); А – алюминиевые станина и щиты (Х – алюминиевая станина и чугунные щиты; если станина и щиты чугунные, никакого обозначения не дается); 100 (90) – высота оси вращения, мм; S, M, L – установочные размеры по длине корпуса; А, В – длина сердечника (дается в том случае, когда на одном установочном размере предусмотрены две мощности);



2, 4, 6, 8 – число полюсов; У – климатическое исполнение, 3 (4) – категория размещения. Степень защиты IP44 (закрытое обдуваемое исполнение) не допускает попадания внутрь электродвигателя посторонних предметов диаметром больше 1 мм и воды, разбрызгиваемой с любого направления.

При установке двигателя, полученного со склада или вновь приобретенного, следует произвести операции, которые предусматриваются правилами при включении двигателя в сеть после длительного перерыва.

Согласно правилам эксплуатации сельских установок, длительным перерывом в эксплуатации электродвигателя считается месяц и более.

Проверка механической части электродвигателей производится внешним осмотром. Износ подшипников определяется по осевому и радиальному люфтам. Для подшипников качения люфт не должен наблюдаться.

Явный пробой изоляции на корпус проверяется по схеме на рис. 3.3.

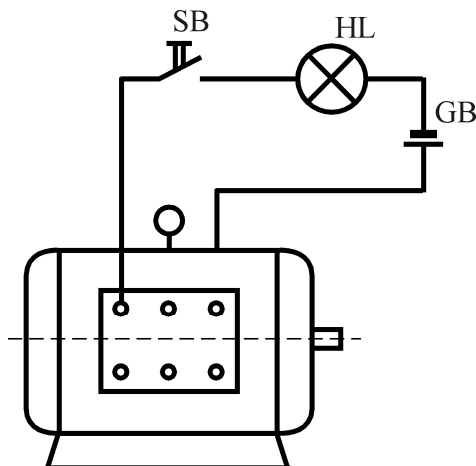


Рис. 3.3. Проверка пробоя изоляции на корпус

Если лампочка не загорается, то замыканий обмоток на корпус нет, если же загорается, то имеется замыкание (пробой) на корпус.

Аналогично проверяют отсутствие замыканий между разными обмотками (рис. 3.4).

Сопротивление изоляции измеряется мегаомметром (рис. 3.5).

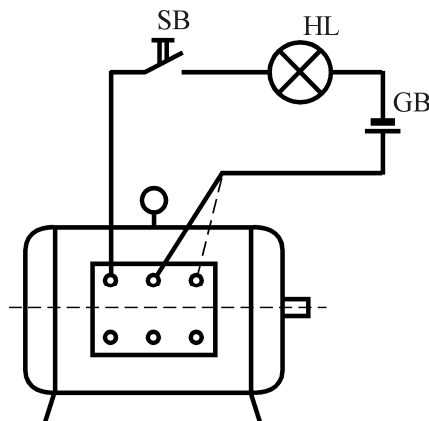


Рис. 3.4. Проверка отсутствия замыкания между разными обмотками

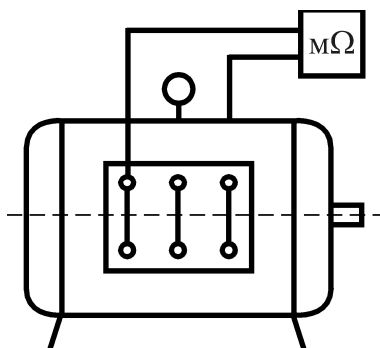


Рис. 3.5. Измерение сопротивления изоляции мегаомметром

Качество изоляции считается хорошим и электродвигатель разрешается включать в сеть, если сопротивление изоляции по отношению к корпусу будет больше, чем 1000 Ом на каждый вольт напряжения сети. Для низковольтных двигателей (до 500 В) наименьшим допускаемым сопротивлением изоляции обычно считается 500 000 Ом (0,5 МОм).

Если сопротивление изоляции окажется меньше допустимого, но замыканий на корпус нет, двигатель должен быть подвергнут сушке.

Отсутствие обрывов и одновременное определение выводов обмоток производится при помощи омметра или лампы, включенной последовательно с обмоткой и низковольтным источником питания.

Маркировка концов, т. е. определение «начала» и «конца» обмотки, производится методом трансформации. Для этого соединяют две любые обмотки последовательно и подключают их в сеть переменного тока на пониженное напряжение, а к третьей обмотке подключают вольтметр (рис. 3.6).

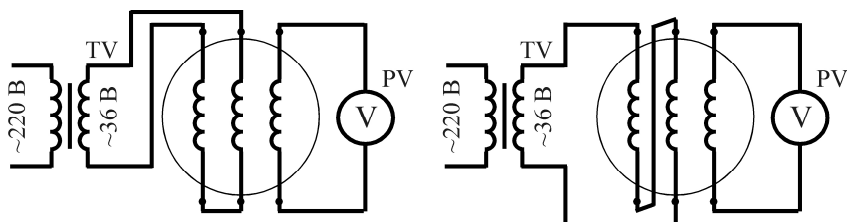


Рис. 3.6. Определение маркировки концов обмотки

Один из выводов обмотки статора принимают за начало одной из фаз. Если наведенная в третьей обмотке ЭДС равна нулю, то обмотки первых двух фаз соединены одноименными выводами. В этом случае магнитные потоки первой и второй обмоток складываются так, что суммарный магнитный поток направлен перпендикулярно оси третьей обмотки и не наводит в ней ЭДС. Если соединены разноименные выводы обмоток, результирующий магнитный поток направлен вдоль оси третьей обмотки и наводит в ней ЭДС; вольтметр при этом покажет наличие напряжения.

Для двигателей мощностью до 3 кВт можно применить метод подбора. Для этого, после определения принадлежности выводов соответствующим фазам обмоток, три вывода обмоток, принятые условно за «концы» соединяют вместе, а три вывода («начала» обмоток) присоединяют к выводам сети. Если после включения двигатель работает без рывков, не гудит, то выводы подобраны правильно. При неправильном включении обмоток по обмоткам двигателя протекает ток, значительно превышающий нормальное значение при холостом ходе, а двигатель при этом гудит. Меняя местами выводы фаз, добиваются нормальной работы двигателя, после чего маркируют выводы следующим образом:

	первая фаза	вторая фаза	третья фаза
начало	C1	C2	C3
конец	C4	C5	C6

Однофазные асинхронные электродвигатели выпускаются мощностью до 0,6 кВт. Они имеют меньший КПД, чем трехфазные.

При необходимости в однофазном режиме можно использовать обычные трехфазные электродвигатели. Известны различные схемы включения трехфазных электродвигателей в однофазную сеть.

Если напряжение в однофазной сети 220 В, а в паспорте электродвигателя указаны напряжения 220/380 В, то его обмотки соединяют по схеме (рис. 3.7).

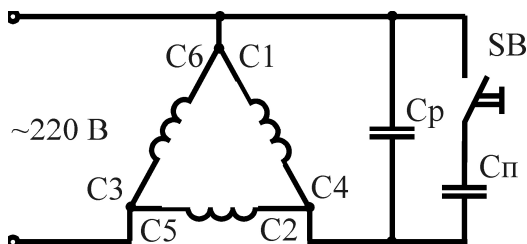


Рис. 3.7. Схема включения трехфазного АД в однофазном режиме с использованием конденсаторов

Емкость рабочего конденсатора  $C_p$  (мкФ) для этой схемы при напряжении 220 В и частоте 50 Гц определяют по формуле:

$$C_p = 66P_H,$$

где  $P_H$  – номинальная мощность электродвигателя, кВт.

Если двигатель при такой емкости конденсатора не запускается, подключают пусковой конденсатор  $C_{п}$ , емкость которого  $C_{п} = (2,5-3,0)C_p$ . Допустимое напряжение конденсаторов должно быть больше напряжения сети примерно в 1,5 раза.

В качестве рабочих рекомендуется применять конденсаторы типа МБГ4, в качестве пусковых допускается использование электролитических конденсаторов.

Применение конденсаторов позволяет получить от трехфазного электродвигателя при питании от однофазной сети 65–70 % его номинальной мощности.

Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в однофазном режиме можно осуществить с помощью активного сопротивления (резистора), включаемого последовательно с одной из обмоток (рис. 3.8).

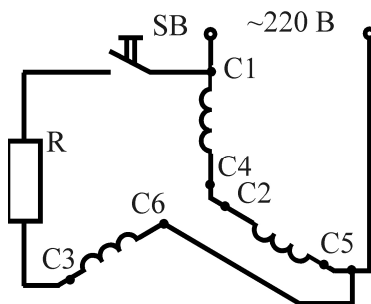


Рис. 3.8. Схема включения трехфазного АД в однофазном режиме с использованием резистора

Величину активного сопротивления, включаемого последовательно с обмоткой, можно определить по приближенной формуле:

$$R_{\Pi} = 22 / P_{\text{н}}.$$

Пусковой резистор  $R_{\Pi}$  включают кнопкой  $SB$  только на время пуска.

Двигатель, включенный по схеме, изображенной на рис. 3.8, развивает 45–50 % мощности, указанной в паспорте для трехфазного режима.

### Методика выполнения лабораторной работы

1. Произвести проверку обмоток статора электродвигателя на обрыв, на короткие замыкания между обмотками и между обмотками и корпусом двигателя. Для проверки можно пользоваться омметром или источником пониженного напряжения и лампой накаливания.

2. При помощи мегаомметра измерить сопротивление изоляции между обмотками, а также между обмотками и корпусом. Сделать заключение о состоянии изоляции электродвигателя.

3. Произвести маркировку выводов обмотки статора трансформаторным методом. Для этого собрать схему в соответствии с рис. 3.6.

4. Собрать схему для включения электродвигателя в сеть (рис. 3.9) «звездой» и «треугольником». Пуск электродвигателя в каждом случае производить после проверок схем преподавателем. Сравнить рабочие токи электродвигателя при включении его «звездой» и «треугольником».

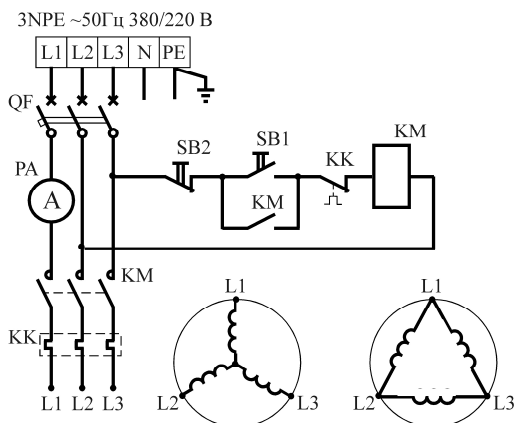


Рис. 3.9. Схема включения электродвигателя в сеть «звездой» или «треугольником»

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Паспортные данные электродвигателя.
3. Перечень и технические данные используемых приборов и оборудования.
4. Электрические схемы и рисунки.
5. Заключение о состоянии обмоток и электрической изоляции электродвигателя.

## Контрольные вопросы

1. Как произвести проверку механических узлов электродвигателя.
2. Как произвести проверку обмоток статора электродвигателя на наличие обрывов, междупазных замыканий и замыканий на корпус.
3. Как произвести проверку состояния изоляции электродвигателя.
4. Как произвести маркировку выводов обмоток статора электродвигателя способом подбора.
5. Как произвести маркировку выводов обмоток статора трансформаторным методом.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

**Цель работы:** экспериментальное исследование процессов нагрева и охлаждения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в режиме *S1* с постоянным моментом сопротивления на валу; изучить методы определения постоянной времени нагрева и охлаждения электродвигателя.

**Студент должен знать:** процессы нагрева и охлаждения электродвигателей в различных режимах работы; классификацию электрической изоляции, используемой в электродвигателях по классам нагревостойкости.

**Студент должен уметь:** строить кривые нагрева и охлаждения электродвигателей.

### Порядок выполнения

1. Ознакомиться с лабораторной установкой. Записать технические данные электродвигателя лабораторной установки.
2. Провести исследования процессов нагрева и охлаждения электродвигателя.
3. Определить постоянные времени нагрева и охлаждения электродвигателя по экспериментальным данным.

### Теоретические сведения

Решающую роль при определении мощности электродвигателя играет нагрев его обмоток. Теплота при работе электродвигателя выделяется обмотками и стальным сердечником. Теплообмен между обмоткой и сердечником происходит через слой изоляции. Теплота рассеивается в окружающую среду в результате продувания охлаждающей среды через воздушный зазор между статором и ротором по специальным воздушным каналам.

Полное использование электродвигателя происходит при предельно допустимой температуре изоляции обмоток ( $\theta$ ), которую определяют как сумму предельно допустимого превышения температуры

для конкретного класса изоляции ( $\tau_{\text{доп}}$ ) и температуры окружающей среды ( $t_{\text{ср}}$ ):

$$\theta = \tau_{\text{доп}} + t_{\text{ср}}.$$

Если температура изоляции обмоток электродвигателя равна температуре окружающей среды или превышает ее на 3 °С, то считают, что электродвигатель находится в холодном состоянии.

Температура окружающей среды, в которой может работать электродвигатель, составляет –50...+50 °С. Следовательно, мощность, которую может обеспечить рассчитываемый электродвигатель, без перегрузок сверх допустимых пределов, ограничена используемой в нем изоляцией и будет различной. Поэтому принимают расчетную температуру окружающей среды +40 °С.

Изменение превышения температуры электродвигателя примет вид:

$$\tau = \tau_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_H}) + \tau_{\text{нач}} \cdot e^{-t/T_H},$$

где  $\tau_{\text{уст}}$  – установившаяся температура электродвигателя,  $\tau_{\text{уст}} = Q/A$ ;

$Q$  – количество теплоты, сообщенное в единицу времени;

$A$  – теплоотдача – количество теплоты, рассеиваемое теплоотдающей поверхностью электродвигателя в единицу времени при разности температур 1 °С. За установившуюся температуру принимают температуру, которая может измениться за 1 ч на 1 °С;

$T_H$  – постоянная времени нагрева – время, в течение которого двигатель нагрелся бы до  $\tau_{\text{уст}}$ , не отдавая теплоту в окружающую среду,  $T_H = C/A$ ;

$C$  – теплоемкость электродвигателя (ЭД), т. е. количество теплоты, необходимое для повышения температуры ЭД на 1 °С, кДж/град. Постоянную времени нагрева определяют методом касательной по трем точкам экспериментальной кривой нагрева и аналитически.

Если начальная температура равна нулю, то

$$\tau = \tau_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T_H}).$$



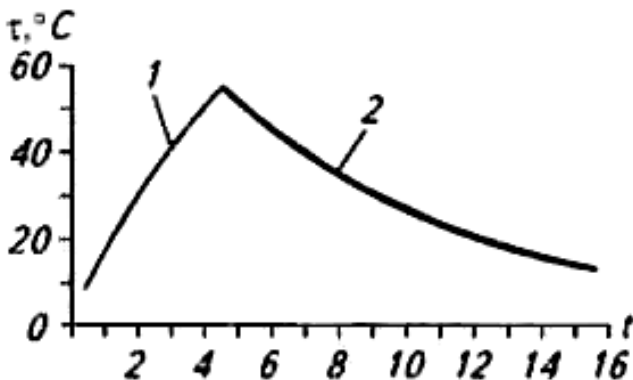


Рис. 4.1. Кривые нагрева 1 и охлаждения 2 двигателя

Установившееся значение температуры превышения можно найти опытным путем.

Если опыт проводят в течение 25–35 мин, то получить установившуюся температуру двигателя не удастся, так как температура машины считается установившейся, если ее изменение в течение часа не превышает  $1^\circ\text{C}$ . Но, имея часть кривой нагрева, можно графическим построением найти установившуюся температуру двигателя (рис. 4.2).

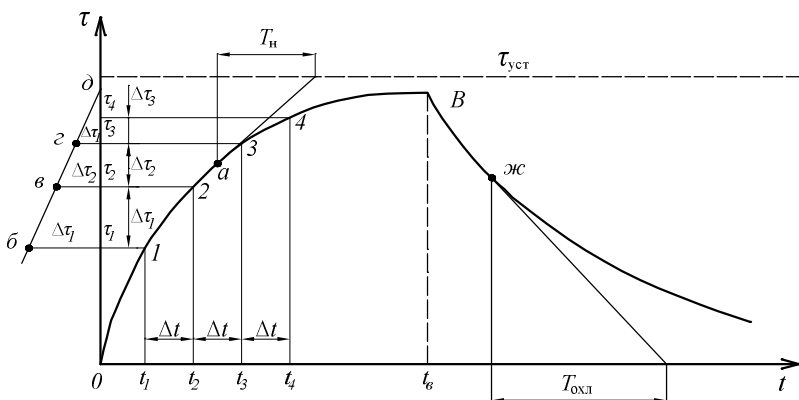


Рис. 4.2. Нахождение установившейся температуры двигателя

Для этого находят приращение превышения температуры  $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \Delta\tau_3$  и т. д. за равные промежутки времени  $\Delta t$ . Через точки кривой нагрева 1, 2, 3, 4 проводят горизонтальные линии и на них влево от оси ординат откладывают или истинные величины  $\tau_H$ , или пропорциональные им. Получают точки б, в, г, через которые проводят прямую до пересечения с осью  $\tau$  в точке д. Отрезок  $Od$  в выбранном масштабе равен установившемуся превышению температуры  $\tau_{уст}$ . Горизонтальная прямая, проведенная через точку д, будет асимптотой для кривой нагрева.

Аналитический метод:

$$T_H = \frac{6m \cdot \tau_{уст} \cdot \eta_{ном}}{P_{ном}(1 - \eta_{ном})},$$

где  $m$  – масса электродвигателя, кг.

Постоянную времени нагрева находят следующими методами:

1. *Метод касательных*: в любой точке на экспоненте нагрева проводится касательная до пересечения с  $\tau_{уст}$ , из этой точки на ось  $\tau_{уст}$  опускают перпендикуляр, отрезок между перпендикуляром и точкой пересечения касательной с осью превышения температуры – постоянная нагрева  $T_H$ . Постоянную времени охлаждения  $T_0$  определяют по аналогичной методике (рис. 4.2);

2. *По трем точкам экспериментальной кривой нагрева* (рис. 4.3):

$$T_{нагр} = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_4}}.$$

3. *По кривой нагрева и охлаждения, находим точку с координатами* (рис. 4.3). На оси  $t$  откладываем отрезок  $0,632\tau_{уст}$  (для кривой нагрева) и  $0,368\tau_{уст}$  (для кривой охлаждения). Проводим отрезки до пересечения с кривыми нагрева и охлаждения и опускаем перпендикуляры на ось  $t$ , где  $\Delta t$  – отрезок времени,  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$  – превышение температуры.

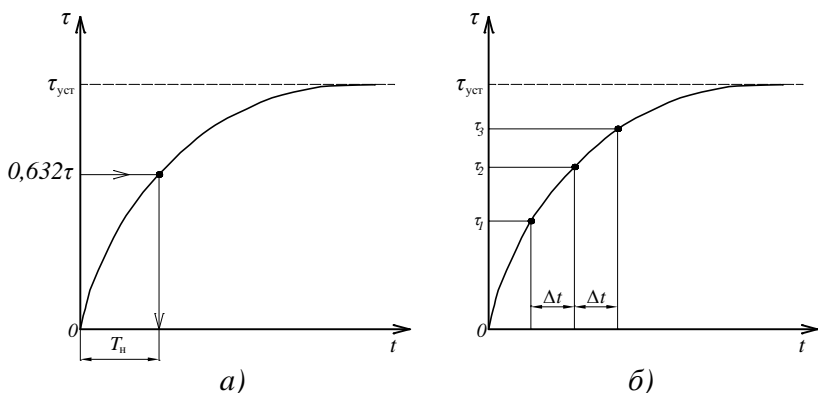


Рис. 4.3. Определение  $T_H$  по точке  $\tau = 0,632\tau_{уст}$  (а) и по методу трех температур (б)

Если нагретый электродвигатель отключить от сети, то он начнет охлаждаться. При этом уравнение охлаждения имеет вид:

$$\tau = \tau_{нач.охл} e^{-t/T_{охл}},$$

где  $T_{охл}$  – постоянная времени охлаждения двигателя,  $T_{охл} = C/A_{охл}$ .

Практически без большой погрешности можно принять, что в длительном режиме работы температура нагрева электродвигателя устанавливается, т. е. практически не отличается от средней за время  $(3-5)T_H$ , а при охлаждении – за время  $(3-5)T_{охл}$ . При этом  $T_{охл} = T_H/\beta$ . Коэффициент  $\beta$  учитывает условия охлаждения (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Коэффициент  $\beta$

Вид двигателя	$\beta$	Вид двигателя	$\beta$
С независимой вентиляцией	1	Самовентилируемый (с крыльчаткой)	0,45–0,55
Без принудительного охлаждения (без крыльчатки)	0,95–0,98	Защищенный самовентилируемый двигатель	0,25–0,35

Незначительное превышение рабочей температуры изоляции предельно допустимой ( $\theta_{\text{доп}}$ ) резко сокращает срок ее службы. Например, перегрев на 8–10 °С сокращает срок службы обмоток в 2 раза.

Двигатели малой и средней мощности, применяемые ранее в сельском хозяйстве серии А02, выполнялись главным образом с изоляцией класса А и Е, а современные двигатели серии АИР – с изоляцией класса В и F.

Каждый класс изоляции характеризуется своей предельно допустимой температурой  $\theta_{\text{доп}}$ , до которой изоляция не теряет своих диэлектрических свойств.

Предельно допустимые температуры нагрева применяемых материалов приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Предельно допустимые температуры нагрева

Класс изоляции	Y	A	E	B	F	C	H
Предельно допустимая температура, °С	90	105	120	130	155	180	Более 180

Однако предельно допустимая температура отдельных частей электрической машины, например, обмотки или сердечника, принимается меньшая, чтобы учесть некоторый запас на неточность измерения.

Нормированное превышение температуры  $t_H$  изоляции обмоток электрических машин следующие: А – 60 °С; Е – 75 °С; В – 80 °С; F – 100 °С.

В соответствии с госстандартом принимают следующие типовые режимы работы электроприводов.

*Продолжительный режим* (типовой режим S1) – режим работы с постоянной нагрузкой и продолжительностью, достаточной для достижения теплового равновесия (рис. 4.4).

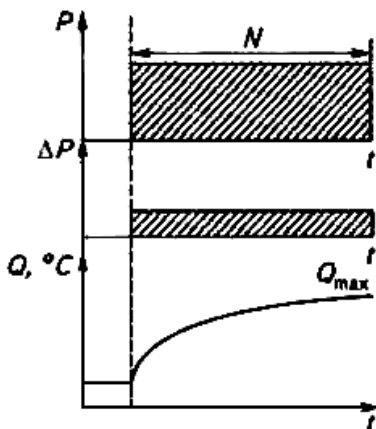


Рис. 4.4. Продолжительный режим работы ЭП

*Кратковременный режим* (типовой режим S2) – режим работы с постоянной нагрузкой в течение определенного времени ( $t_{\text{РАБ}}$ ), недостаточного для достижения теплового равновесия, за которым следует состояние покоя в течение времени ( $t_{\text{ПАУЗ}}$ ), достаточного для того, чтобы температура машины сравнялась с температурой охлаждающей среды с точностью до 2 К. Характерной величиной в этом режиме служит продолжительность работы, составляющая 10, 30, 60 и 90 мин (рис. 4.5).

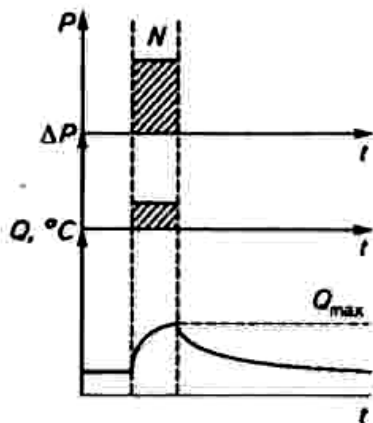


Рис. 4.5. Кратковременный режим работы ЭП

*Периодический кратковременный режим* (типовой режим S3) – последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из периода работы с постоянной нагрузкой и периода покоя. За время работы машины ( $t_{\text{РАБ}}$ ) двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы ( $t_{\text{ПАУЗ}}$ ) не успевает охладиться до температуры окружающей среды (рис. 4.6). В этом режиме цикл работы таков, что пусковой ток не оказывает заметного влияния на превышение температуры. При этом продолжительность цикла недостаточна для теплового равновесия.

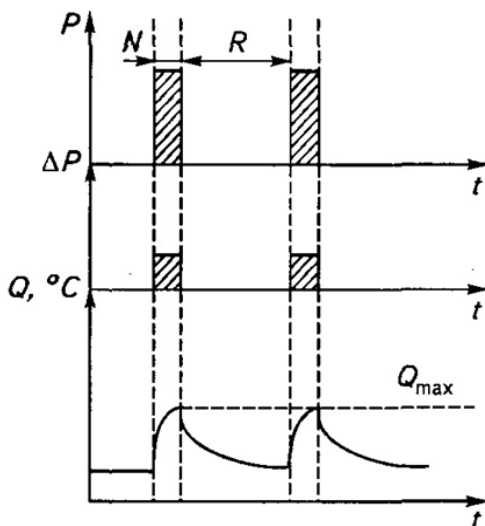


Рис. 4.6. Типовой режим S3

Важная характеристика этого режима – продолжительность включения (ПВ):

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{РАБ}}}{t_{\text{РАБ}} + t_{\text{ПАУЗ}}} \cdot 100 \% .$$

ПВ принимает следующие значения: 15, 25, 40, 60 %. Если нет оговорок, то продолжительность одного цикла ( $t_{\text{РАБ}} + t_{\text{ПАУЗ}}$ ) принимают равной 10 мин.

Теоретически время, в течение которого достигается температура  $\tau_{уст}$ , равно бесконечности. На практике принимают, что температуру двигателя можно считать установившейся примерно через время  $t = (4-5)T_H$  (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Отношение  $\tau / \tau_{уст}$  за время  $t$

$t$	$T_H$	$2T_H$	$3T_H$	$4T_H$	$5T_H$
$\tau / \tau_{уст}$	0,632	0,865	0,950	0,982	0,998

После  $t = 4T_H$  превышения температуры двигателя достигает  $\tau = 0,982\tau_{уст}$  и дальнейшее повышение температуры идет очень медленно.

### Описание лабораторной установки

Электрическая принципиальная схема установки приведена на рис. 4.7. Установка состоит из испытуемого асинхронного электродвигателя  $M$  и нагрузочного генератора постоянного тока  $G$ , валы которых соединены муфтой, аппаратов управления и приборов для контроля и измерения параметров.

Для получения экспериментальных данных переходного процесса при нагреве электродвигатель подключают к сети переменного тока. Нагрузка создается машиной постоянного тока, работающей в режиме генератора. Возбуждение генератора независимое.

Температура обмотки электродвигателя  $M$  измеряется термистором, заложенным в обмотку и подключенным к цифровому термометру.

Для снятия кривой нагрева электродвигателя включают тумблер «Сеть» прибора В7-16А, при этом на электронном табло появляется буква «П», и высвечивается значение сопротивления термистора (в Ом) и ряд цифр, после 7–10 мин прогрева опять нажимают на кнопку ручного измерения, при этом исчезает буква «П».

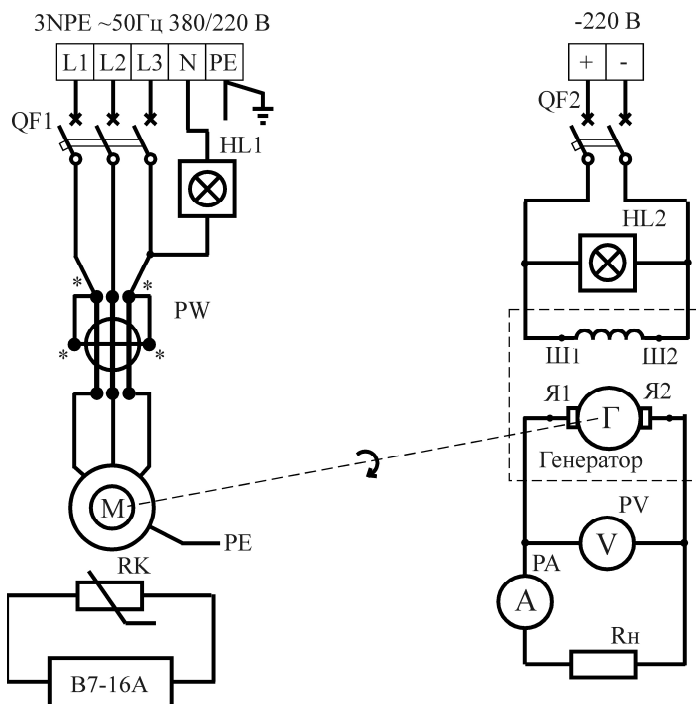


Рис. 4.7. Схема лабораторной установки

### Методика исследования

1. Ознакомиться со схемой установки.
2. Ознакомиться с аппаратурой управления и защиты, измерительными приборами.
3. Включить прибор В7-16А и измерить сопротивление термистора перед включением электропривода.
4. Включить автоматический выключатель  $QF1$  и  $QF2$  и снять кривую нагрева нагруженного электродвигателя. Интервалы времени указаны в табл. 4.4.
5. Температура двигателя определяется по графику зависимости  $R$  от температуры  $\tau$  °С (график находится на рабочем месте).
6. По результатам проведенных исследований определить постоянные времени нагрева и охлаждения тремя методами, рассчитать установившуюся температуру, используя данные из табл. 4.4.



Таблица 4.4

Экспериментальные данные процесса нагрева и охлаждения электродвигателя

Режим работы	Время отсчета, мин	Интервал времени, мин	Сопротивление термистора, Ом	Температура двигателя, °С
Нагрев	0	0		
	1	1		
	4	3		
	7	3		
	10	3		
	14	4		
Охлаждение	0	0		
	1	1		
	4	3		
	7	3		
	10	5		
	15	5		
	20	5		

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и технические характеристики используемого электрооборудования.
3. Ответы в письменном виде на контрольные вопросы.
4. Данные измерения и расчетов.
5. Графические зависимости по данным табл. 4.4.

$$\tau = f_1(t) ,$$

где  $\tau = \Theta_{\text{ОБМ}} - \Theta_{\text{ОКР.СР}}$  – температура превышения, °С;

$t$  – время, мин (кривые нагрева и охлаждения).

6. Пользуясь графиком, найти постоянную времени нагрева и охлаждения электродвигателя по методу касательных и по кривой нагрева и охлаждения.

7. Вычислить коэффициент ухудшения теплоотдачи электродвигателя:

$$\beta_0 = \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{о}}}.$$

8. Рассчитать аналитически постоянную времени нагрева.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие существуют классы нагревостойкости изоляции, применяемой в современных электрических машинах, и их допустимые температуры?

2. Как объясняется принцип действия и электрическая схема экспериментальной установки?

3. Каким способом можно определить температуру обмоток электрических машин?

4. Какой вид имеет уравнение, описывающее процессы нагрева и охлаждения электродвигателя?

5. Как объясняется физический смысл постоянной времени нагрева?

6. Какие существуют методы определения постоянной времени нагрева?

## ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТОВ И СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

**Цель работы:** изучить назначение, принцип действия и конструкции электрических аппаратов ручного и дистанционного управления; изучить типовые схемы дистанционного управления асинхронными электродвигателями.

**Студент должен знать:** конструкцию и принцип действия рубильников, переключателей, магнитных пускателей, промежуточных реле и реле времени; условные обозначения и принцип работы схем.

**Студент должен уметь:** составлять принципиальные электрические схемы управления, рассчитывать и выбирать аппараты управления.

### Порядок выполнения

1. Ознакомиться с представленными на лабораторном стенде аппаратами управления.
2. Собрать схему дистанционного управления асинхронным короткозамкнутым электродвигателем.
3. Изучить собранные на стенде схемы управления и произвести их включение.
4. Изучить действие используемых в схемах управления блокировок и защит.

### Теоретические сведения

Коммутационные устройства делятся на *аппараты управления силовыми цепями* и *аппараты для цепей управления*. Они различаются величиной коммутируемого тока. Кроме того, все электрические аппараты подразделяются на аппараты *ручного и дистанционного управления*.

#### Аппараты ручного управления

К аппаратам ручного управления относятся силовые коммутационные аппараты: *рубильники, кулачковые контроллеры и пакетные выключатели*, а также маломощные устройства – *кнопки и ключи управления*.

*Рубильник* представляет собой простейший коммутационный аппарат, предназначенный для нечастого замыкания и размыкания силовых цепей постоянного и переменного тока напряжением до 600 В. В установках напряжением выше 1000 В подобные устройства называются *разъединителями* и предназначаются для коммутации высоковольтных цепей без нагрузки (для отключения холостого хода высоковольтных линий и трансформаторов).

Рубильники могут быть одно-, двух-, и трех полюсными. Рубильники с боковой рукояткой (РБ), с боковым рычажным приводом (РПБ), с центральным рычажным приводом (РЦП) предназначены для коммутации электрических цепей под нагрузкой в пределах 50–100 % номинального тока.

Первая цифра после буквенного обозначения определяет количество полюсов (1, 2 и 3), вторая – номинальный ток рубильника: 1 (100 А), 2 (250 А), 4 (400 А), 6 (600 А). Например, РПЦ 22 означает: рубильник с центральным рычажным приводом, двухполюсный, номинальный ток 250 А.

*Пакетные выключатели и переключатели* применяют в качестве коммутационных аппаратов в электроустановках постоянного тока напряжением до 220 В и переменного тока напряжением до 400 В. Обозначение пакетного выключателя, например, ПВМЗ-100 расшифровывается следующим образом: трехполюсный, номинальный ток 100 А. Для включения, отключения, реверсирования и переключения числа пар полюсов асинхронных короткозамкнутых электродвигателей используют пакетно-кулачковые переключатели ПКП и выключатели ПКВ на номинальные токи 10, 25, 63 и 160 А.

*Кулачковые контроллеры* – это многопозиционные и многоценные аппараты ручного управления, предназначенные для изменения схем соединений силовых цепей электродвигателей напряжением до 500 В либо для изменения величины включенных в эти сопротивления. Размыкание и замыкание контактов производится смонтированными на барабане кулачками, которые обеспечивают нужную последовательность коммутации электрических цепей. Рубильники и переключатели выбирают по номинальному напряжению, номинальному току, числу полюсов, конструктивному и климатическому исполнению.

Автоматические выключатели применяются для нечастых ручных включений и отключений электроприемников, а также для

автоматического отключения цепей при перегрузках и коротких замыканиях. В электроустановках применяют автоматические выключатели типов АН-50, АЕ20, ВА14, ВА51.

Автоматические выключатели выбирают по номинальному напряжению, номинальному току, по предельному отключаемому току, по токам срабатывания теплового и электромагнитного расцепителей, по конструктивному исполнению и категории размещения.

### **Аппараты дистанционного управления**

Электрические аппараты дистанционного управления являются двухпозиционными коммутационными аппаратами с самовозвратом, переключение контактов которых происходит при протекании тока по катушке управления. К ним относятся *контакторы, электромагнитные пускатели и реле*.

*Контактор* представляет собой аппарат с электромагнитным приводом, предназначенный для частых (до 1500 в час) коммутаций силовых цепей электродвигателей.

Контакторы постоянного тока изготавливаются с одним и двумя полюсами на токи главных контактов от 4 до 2500 А. Контакторы переменного тока выпускаются на токи от 63 до 1000 А и содержат от 2 до 5 главных контактов. Катушки выполняются на напряжения от 36 до 600 В. Кроме главных контактов, предназначенных для коммутации силовых цепей, контакторы содержат дополнительные маломощные контакты, предназначенные для выполнения переключений в цепях управления, блокировки и сигнализации.

*Электромагнитные пускатели* предназначены для дистанционного управления асинхронными электродвигателями. Они совмещают в себе функции аппарата управления и защиты. В комплекте с тепловыми реле пускатели выполняют защиту электродвигателей от перегрузки. При исчезновении напряжения или при его снижении на 40–60 % от номинального силовые контакты размыкаются (осуществляется нулевая защита). Нереверсивный электромагнитный пускатель состоит из одного трехполюсного контактора и трехэлементного теплового реле; реверсивный – из двух контакторов и теплового реле. Реверсивные пускатели имеют механическую блокировку для исключения одновременного включения двух контакторов. Наиболее распространены электромагнитные пускатели серий ПМЛ, ПМЕ.

Электромагнитные пускатели и контакторы выбирают по номинальному напряжению, номинальному току, по напряжению втягивающей катушки и по конструктивному исполнению.

*Электромагнитные реле постоянного и переменного тока* применяются в схемах управления в качестве промежуточных элементов для коммутации слаботочных цепей и для размножения контактов. Реле постоянного тока имеют лучшие, чем у реле переменного тока, параметры, но для их включения необходим источник постоянного тока (выпрямитель).

В схемах управления применяются РП8, РП9, РПЛ140, РПЛ131 и др. Электромагнитные реле выбирают по напряжению и току обмотки, по длительному допускаемому току контактов и их коммутационной способности.

Реле времени предназначены для введения в работу схем управления выдержек времени. По принципу действия бывают электромагнитные, моторные, пневматические и электронные. Применяются моторные реле времени ВС-10, Е-52; электромеханические – ЭВ-24, ЭВ-217; пневматические – РВН-1М, РВН-72; электронные серии ЕЛ.

Реле контроля скорости предназначены для фиксации наличия вращения рабочих органов машин, электродвигателей. Применяются в схемах динамического и реверсивного торможения электроприводов.

*Кнопки управления* используют для дистанционного управления контакторами, пускателями и другими аппаратами. Кнопки управления, смонтированные в общем корпусе или на панели, называют *кнопочной станцией*. Распространены кнопки КМЕ, КЕ; посты управления ПКЕ, ПКУ, ПКТ.

*Путевые и конечные выключатели* применяются в схемах управления электроприводами для ограничения движения транспортными механизмами или для изменения направления их движения (при нажатии на них деталями движущихся механизмов). Применяются контактные путевые выключатели ВК-211, ВК-411, ВК-101, бесконтактные БВК-24, КВД-3/24 и др.

### **Примеры схем дистанционного управления электроприводами**

На рис. 5.1 изображена принципиальная электрическая схема управления асинхронным короткозамкнутым электродвигателем (АД), позволяющая включать и выключать его из двух мест.

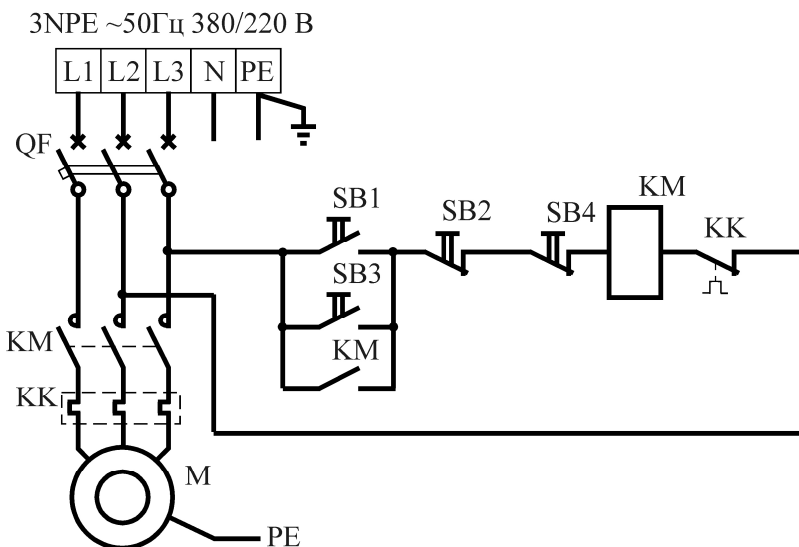


Рис. 5.1. Схема управления трехфазным асинхронным электродвигателем (неревверсивная)

Пуск двигателя производится нажатием на кнопку *SB1* или *SB3*, остановка – нажатием на кнопку *SB2* или *SB4*.

Перед пуском электродвигателя *M* включают автоматический выключатель *QF*, в результате чего на схему управления подается напряжение. При нажатии на кнопку *SB1* или *SB3* ток течет по катушке магнитного пускателя *KM*, пускатель срабатывает и замыкает свои силовые контакты *KM* в цепи электродвигателя и блок контакты, шунтирующие кнопки пуска *SB1*, *SB3*. При отпускании кнопки пуска ее контакт размыкается, но катушка *KM* останется включенной через блок-контакт *KM*.

Электродвигатель останавливается кратковременным нажатием на кнопку *SB2* или *SB4*, при этом цепь катушки *KM* разрывается, контакты *KM* в цепи электродвигателя размыкаются. Размыкается также блок-контакт *KM*.

В цепь электродвигателя включены нагревательные элементы теплового реле *KK*, которое конструктивно объединено с электромагнитным пускателем и служит для защиты электродвигателя от длительных перегрузок. Размыкающий контакт теплового реле *KK* включен в цепь катушки *KM*. Если ток в цепи электродвигателя

превысит вставку теплового реле, то в результате нагрева элементов  $KK$  произойдет размыкание контакта  $KK$  в цепи катушки  $KM$ , и электродвигатель отключится магнитным пускателем.

Повторный пуск электродвигателя будет возможен только после возврата контакта теплового реле  $KK$  в замкнутое состояние нажатием на кнопку на тепловом реле (после его охлаждения). Защита от коротких замыканий в силовой цепи осуществляется автоматическим выключателем  $QF$ .

Схема (рис. 5.1) обеспечивает так называемую нулевую защиту. При исчезновении напряжения в сети или при его значительном снижении эта защита обеспечивает отключение электродвигателя и предотвращает его самопроизвольное включение (самозапуск) после восстановления напряжения.

В реверсивной схеме управления (рис. 5.2) используются электромагнитные пускатели  $KM1$ ,  $KM2$ .

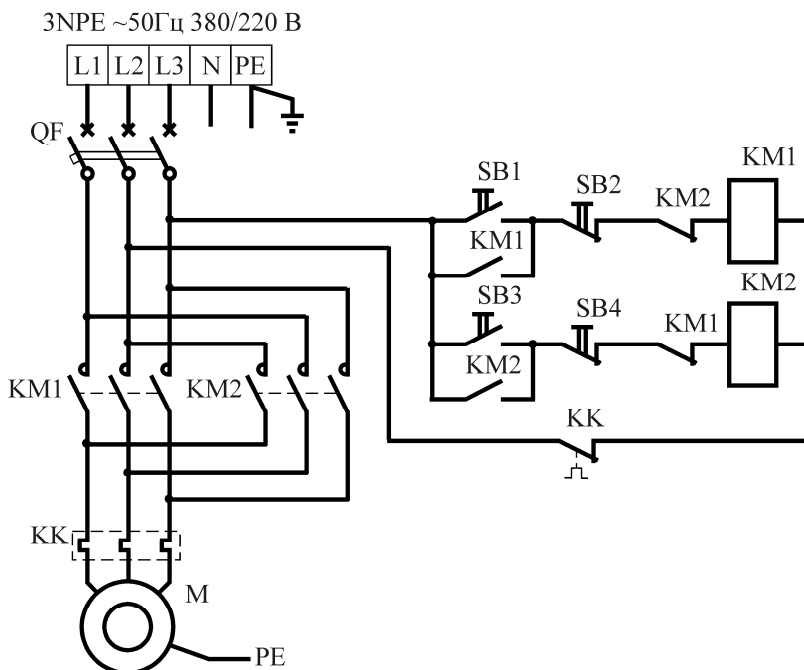


Рис. 5.2. Схема реверсивного управления трехфазным асинхронным электродвигателем



Пуск двигателя в направлениях «вперед» или «назад» осуществляется нажатием, соответственно, на кнопку *SB1* или *SB3*, а остановка – нажатием на кнопки *SB2*, *SB4*. При включении *KM1* ротор электродвигателя вращается в прямом направлении, при включении *KM2* на обмотку статора подается питание с обратным порядком чередования фаз (меняются местами *L2* и *L3*). Магнитное поле АД и, следовательно, ротор изменяют направление вращения. Во избежание короткого замыкания, которое может возникнуть при одновременном нажатии кнопок *SB1* и *SB3*, размыкающий контакт пускателя *KM1* включен последовательно с катушкой *KM2*, а размыкающий контакт *KM2* – последовательно с катушкой *KM1*. В некоторых конструкциях электромагнитных пускателей предусматривается механическая блокировка в виде рычажной системы, предотвращающей втягивание магнитной системы одного пускателя, если включен другой.

На рисунке 5.3 показана схема управления АД с ограничением пусковых токов при помощи токоограничивающих резисторов *R1*, *R2*, *R3*.

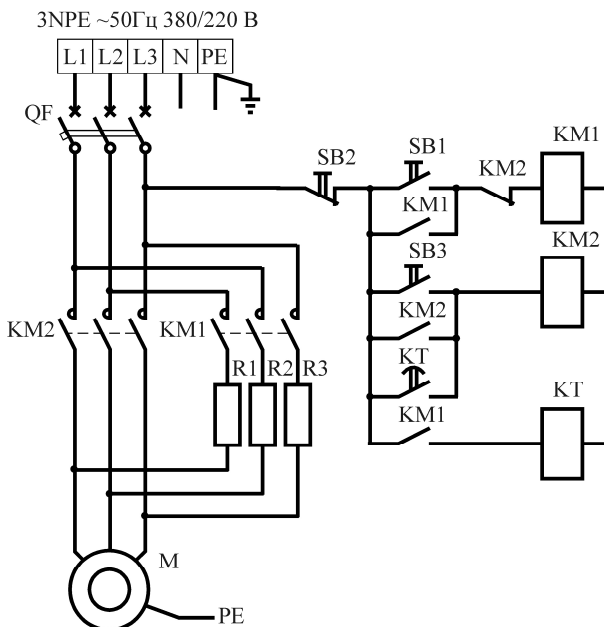


Рис. 5.3. Схема управления трехфазным асинхронным короткозамкнутым электродвигателем с включением токоограничивающих резисторов при пуске

При нажатии на кнопку *SB1* включается пускатель *KM1*, силовые контакты которого подключают обмотку статора АД к сети через резисторы *R1*, *R2*, *R3*. По мере разгона электродвигателя ток в его цепи снижается.

Блок контакт пускателя *KM1* одновременно с пуском двигателя включает реле времени *KT*, контакт которого с выдержкой времени включает катушку пускателя *KM2*. При срабатывании пускателя *KM2* размыкается его контакт в цепи катушки *KM1*, замыкается блок-контакт *KM2*, шунтирующий контакт реле времени *KT* и замыкаются силовые контакты *KM2* в цепи электродвигателя. В результате все контакты *KM1* размыкаются, а обмотка статора электродвигателя подключается в сеть напрямую через силовые контакты *KM2*.

Эта схема может применяться для включения электродвигателя с тяжелым затяжным пуском.

### **Методика исследования**

1. В соответствии с программой работы изучить назначение, устройство и принцип действия аппаратов ручного и дистанционного управления по рекомендованной литературе, плакатам и образцам.

2. Изучить схемы управления электродвигателем (рис. 5.1, 5.2, 5.3).

3. Собрать схемы управления и после проверки преподавателем или лаборантом произвести их включение.

4. Изучить методику выбора аппаратов ручного и дистанционного управления.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Электрические схемы.
3. Расчеты по выбору аппаратов управления (по индивидуальному заданию).

## **Контрольные вопросы**

1. Где применяются и для чего предназначены электрические аппараты ручного и дистанционного управления?
2. Какое устройство и принцип действия у электромагнитного пускателя?
3. Какое устройство и принцип действия автоматического выключателя?
4. Какое устройство и принцип действия электромагнитного реле постоянного и переменного тока?
5. Как объясняется работа электрических принципиальных схем дистанционного управления асинхронными электродвигателями?
6. Как выбрать рубильник и переключатель?
7. Как выбрать автоматический выключатель?
8. Как выбрать электромагнитный пускатель?
9. Как выбрать тепловое реле?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ

**Цель работы:** изучить назначение, принцип действия и конструкции плавких предохранителей, электротепловых реле и автоматических выключателей; исследовать защитные характеристики автоматического выключателя и электротеплового реле.

**Студент должен знать:** устройство и принцип действия плавких предохранителей, электротепловых реле и автоматических выключателей.

**Студент должен уметь:** рассчитывать и выбирать плавкие предохранители, автоматические выключатели и тепловые реле.

### Порядок выполнения

1. Ознакомиться с представленными на лабораторном стенде аппаратами защиты.
2. Изучить схему лабораторной установки и в соответствии с предложенной методикой снять защитные характеристики тепловых расцепителей автоматического выключателя и электротеплового реле.
3. Изучить методику выбора и настройки электротепловых реле и автоматических выключателей.

### Теоретические сведения

Электрические аппараты защиты служат для отключения электрических цепей в аварийных режимах.

Для защиты проводок и электрооборудования от токов коротких замыканий применяются плавкие предохранители и автоматические выключатели без выдержки времени, а для защиты от перегрузок – автоматические выключатели с выдержкой времени и электротепловые реле магнитных пускателей.

Плавкие предохранители включаются в каждую фазу электродвигателя или другого электроприемника. Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка, контактная система

и корпус с дугогасительным устройством. При аварийном увеличении тока отключение электрической цепи происходит за счет расплавления калиброванной плавкой вставки.

Для защиты электрических цепей напряжением до 1000 В используются следующие виды предохранителей: трубчатые без наполнителя ПР2, трубчатые разборные с закрытыми патронами и наполнителем ПН2.

На рис. 6.1 показано устройство плавких предохранителей типа ПН и ПР.

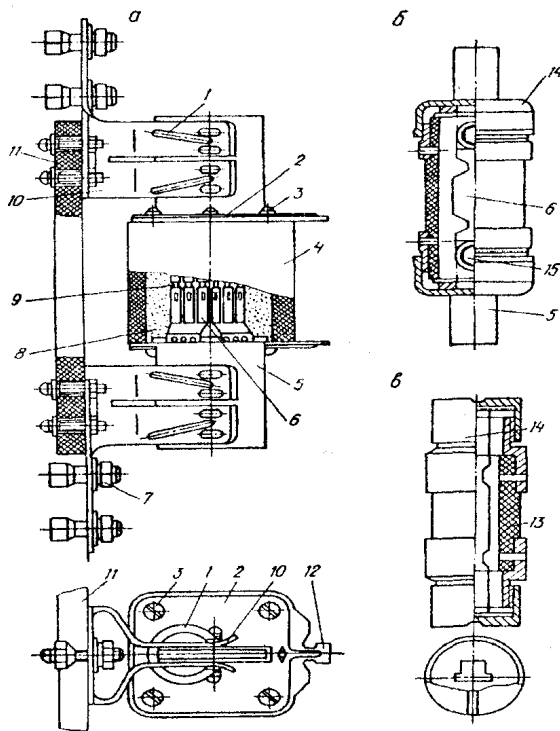


Рис. 6.1. Трубчатые предохранители:

*а* – типа ПН; *б, в* – типа ПР с патронами на токи 100 и 60 А;

1 – стальные пружинящие кольца контактов; 2 – металлические крышки; 3 – винт;

4 – фарфоровый патрон; 5 – контактные ножи; 6 – плавкие вставки;

7, 8 – контактные болты; 9 – плавкий элемент; 10 – контактные стопки;

11 – основание; 12 – Т-образные выступы; 13 – фибровая трубка;

14 – латунные колпачки; 15 – винт

Автоматические выключатели предназначены для коммутации электрических цепей, а также для их защиты от перегрузок и коротких замыканий. Контактная система автоматического выключателя замыкается и размыкается вручную с помощью рукоятки или кнопок; для отключения цепей при коротких замыканиях служит максимальное токовое реле прямого действия, для отключения при перегрузках – тепловое реле прямого действия (электромагнитный и тепловой расцепители) (рис. 6.2).

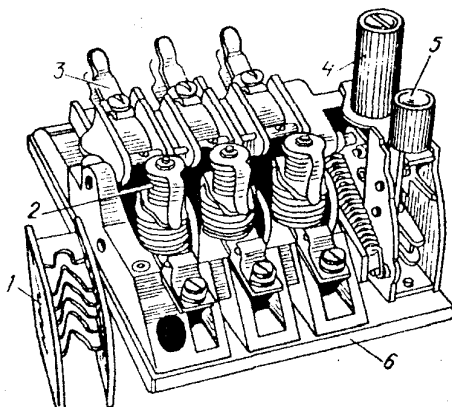


Рис. 6.2. Устройство автоматического выключателя АП-50:

1 – дугогасительная камера; 2 – электромагнитный расцепитель;  
3 – контакты; 4 – кнопка включения; 5 – кнопка выключения; 6 – основание

Принцип действия автоматического выключателя поясняется на рис. 6.3. Ток нагрузки  $I_H$  протекает через контакт 11 автоматического выключателя, через нагреватель теплового расцепителя 6, катушку электромагнитного расцепителя 9. При коротком замыкании в защищаемой цепи ток резко возрастает, сердечник 10 втягивается в катушку 9 и толкателем 8 воздействует на рычаг 5. Рычаг 5 приподнимает защелку 4, которая освобождает рычаг 3, и под действием пружины 2 контакт 1 выключателя размыкается.

При перегрузке цепи отключение происходит с выдержкой времени, обратной величине тока перегрузки. Когда ток в защищаемой цепи больше допустимого, но меньше тока короткого замыкания, происходит нагрев элемента 6 теплового расцепителя, вызывающий

нагрев и деформацию биметаллической пластины 7. В результате изгиба пластины 7 рычаг 5 освобождает защелку 4, и под действием пружины 2 контакт 1 размыкается.

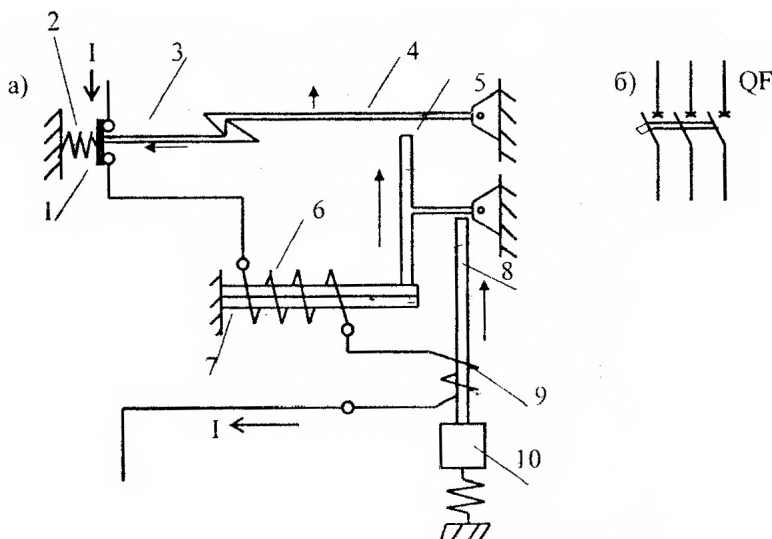


Рис. 6.3. Устройство (а) и условное обозначение (б) автоматического выключателя: 1 – контакты; 2 – пружина; 3, 5 – рычаги; 4 – защелка; 6 – нагревательный элемент; 7 – биметаллическая пластина; 8 – толкатель; 9 – катушка; 10 – сердечник

Применяемые для коммутации и защиты силовых и осветительных сетей автоматические выключатели типов ВА47-29, ВА47-100 и др. различаются между собой количеством контактов (полюсов), номинальными значениями токов и напряжений, отключающей способностью, временем отключения. Диапазон их номинальных токов от 10 до 10 000 А, а предельно коммутируемых токов – до 100 кА. Время срабатывания электромагнитного расцепителя 0,02–0,7 с; время срабатывания теплового расцепителя зависит от тока перегрузки и изменяется от нескольких секунд до десятков секунд. Некоторые типы автоматических выключателей содержат дистанционный расцепитель, позволяющий производить отключение по внешнему сигналу тока или напряжения. Существуют автоматические выключатели с электромагнитным приводом, обеспечивающие дистанционное включение аппарата.

Защита электродвигателей от перегрузок может осуществляться при помощи электротепловых реле. Принцип действие и устройство электротепловых реле аналогичны устройству тепловых расцепителей автоматических выключателей. Применяются электротепловые реле типов ТРН (двухполюсные) и РТЛ (трехполюсные). Диапазон регулирования тока вставки тепловых реле от 0,75 до 1,25  $I_H$ .

Электротепловые реле используются вместе с электромагнитными пускателями. Реле типа ТРН применяются с пускателями ПМЕ и ПАЕ, реле РТЛ – с пускателями ПМЛ.

### **Выбор аппаратов защиты**

Плавкие предохранители выбирают по напряжению, предельно отключаемому току и номинальному току плавкой вставки. Номинальный ток плавкой вставки ( $I_{ВСТ}$ ) должен удовлетворять двум условиям. Первое условие:

$$I_{ВСТ} > I_{ДЛ},$$

где  $I_{ДЛ}$  – длительный расчетный ток электроприемника или линии.

Второе условие:

$$I_{ВСТ} > I_M / \alpha,$$

где  $I_M$  – максимальный кратковременный ток (для электродвигателей – пусковой ток  $I_{ПУСК}$ );

$\alpha$  – коэффициент, зависящий от продолжительности и частоты пусков электродвигателя:  $\alpha = 2,5$  для электродвигателей с нормальными условиями пуска (относительно редкие пуски и небольшая длительность разгона – 5–10 с);  $\alpha = 1,6–2,0$  – для двигателей с тяжелыми условиями пуска (длительность разгона до 40 с).

Автоматические выключатели выбирают по номинальному напряжению, номинальному току и номинальному току расцепителей.

Номинальный ток автоматического выключателя должен соответствовать длительному току электроприемника или линии:



$$I_{\text{Н.АВТ}} > I_{\text{ДЛ}}.$$

Номинальный ток электромагнитного или теплового расцепителя должен соответствовать длительному току электроприемника или линии:

$$I_{\text{Н.РАСП}} > I_{\text{ДЛ}}.$$

Защита от перегрузки (тепловая защита) считается эффективной, если выполняется условие:

$$I_{\text{ТР}} > 1,25I_{\text{ДЛ}},$$

где  $I_{\text{ТР}}$  – уставка теплового расцепителя;

$I_{\text{ДЛ}}$  – длительный рабочий ток электродвигателя.

После определения  $I_{\text{ТР}}$  по справочнику выбирают выключатель с ближайшим паспортным значением уставки теплового расцепителя.

Ток срабатывания электромагнитного расцепителя для автоматических выключателей типов АП50, ВА определяется как  $I_{\text{Э}} = 12I_{\text{ТР}}$  (указывается в паспортных данных и на крышке корпуса выключателя). Для выключателей типов АЗ700, ВА и некоторых других значение уставки электромагнитного расцепителя выбирается по таблице из справочных данных в соответствии с ранее определенным значением  $I_{\text{ТР}}$ .

Выбранный автоматический выключатель необходимо проверить по условию

$$I_{\text{ЭМ}} > 1,25 \cdot I_{\text{max}},$$

где  $I_{\text{ЭМ}}$  – справочное значение уставки электромагнитного расцепителя;

$I_{\text{max}}$  – максимальный ток электродвигателя ( $I_{\text{max}} = I_{\text{Н}}K_i$ );

$K_i$  – кратность пускового тока.

Защитные характеристики тепловых реле аналогичны характеристикам тепловых расцепителей автоматических выключателей. Номинальный ток нагревательного элемента теплового реле выбирается по длительному расчетному току линии:  $I_{\text{ТР}} > I_{\text{ДЛ}}$ .

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из испытуемых автоматического выключателя и теплового реле, трех амперметров, электронного секундомера Ф291, магнитных пускателей  $KM1$  и  $KM2$ , автотрансформатора (ЛАТРа)  $TV1$  и трансформатора  $TV2$ . Схема установки представлена на рис. 6.4, а, б.

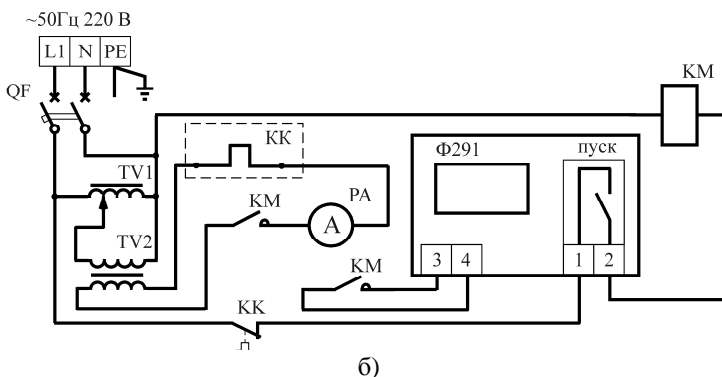
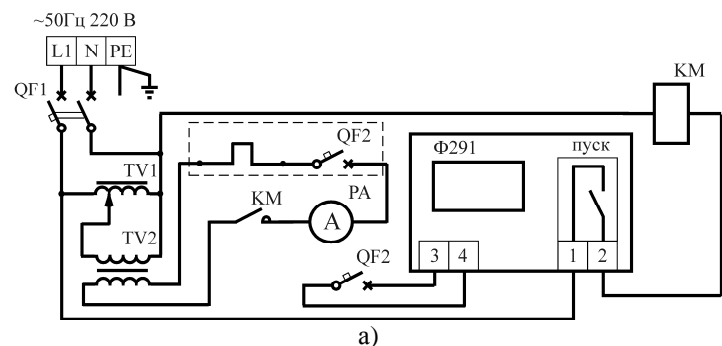


Рис. 6.4. Схема лабораторной установки:  
а – схема испытания автоматического выключателя;  
б – схема испытания теплового реле

## Методика исследования

Нужно записать паспортные данные автоматического выключателя, теплового реле, измерительных приборов; изучить устройство автоматических выключателей, тепловых реле и плавких предохранителей.

Испытания теплового расцепителя автоматического выключателя и теплового реле произвести в следующей последовательности.

1. Переключатель «Автомат–тепловое реле» установить в положение «Автомат».

2. Ручку ЛАТРа вывести в крайнее левое положение.

3. Включить секундомер Ф291 кнопкой «Сеть».

4. Включить испытуемый автоматический выключатель *QF2* и при помощи ЛАТРа установить заданный ток (начальное значение тока и пределы его изменения задаются преподавателем).

5. Отключить *QF2* для охлаждения нагревательных элементов теплового расцепителя на 4–5 мин.

6. Нажать на кнопку «Сброс» секундомера.

7. Включить *QF2* и после его срабатывания от тока перегрузки произвести отсчет времени по цифровому индикатору прибора Ф291.

8. После охлаждения нагревательного элемента теплового расцепителя в течение 5–7 мин повторить опыт в соответствии с п.п. 5–8.

9. Результаты записать в табл. 6.1.

10. Установить переключатель в положение «Тепловое реле». Ручку ЛАТРа вывести в крайнее левое положение.

11. Включить *QF*, затем нажать на кнопку *SB1* и установить заданный ток через нагревательный элемент теплового реле *KK1*.

12. Нажать на кнопку *SB2* для отключения нагревательного элемента *KK1* и его охлаждения в течение 5–7 мин.

13. Нажать на кнопку «Сброс» секундомера, после чего нажать на кнопку *SB1*. После срабатывания теплового реле произвести отсчет времени по секундомеру.

14. После охлаждения нагревательного элемента теплового реле повторить опыт в соответствии с п.п. 11–14. Результаты измерений занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты испытаний автоматического выключателя и теплового реле

Параметр	Автоматический выключатель					Тепловое реле					
	20	15	10	8	6	8	6	4	3	2	1
Ток через тепловой расцепитель, А											
Время срабатывания, с											
Кратность тока $I / I_N$											

## **Содержание отчета**

1. Технические характеристики исследуемых автоматического выключателя и теплового реле.
2. Электрическая схема лабораторной установки.
3. Таблица с опытными и расчетными данными.
4. Графические зависимости времени срабатывания от кратности тока для автоматического выключателя и теплового реле.
5. Анализ результатов, выводы, пояснения.

## **Контрольные вопросы**

1. Как устроены плавкие предохранители, их выбор?
2. Как устроен автоматический выключатель?
3. Как определяется ток срабатывания электромагнитного расцепителя автоматического выключателя?
4. Как устроено тепловое реле, их выбор?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Цель работы:** изучить назначение, устройство и схемы включения газоразрядных ламп низкого и высокого давления; изучить устройство и принцип действия пускорегулирующих аппаратов (ПРА) для газоразрядных ламп; исследовать вольт-амперные характеристики газоразрядных ламп низкого и высокого давления; исследовать влияние величины питающего напряжения на характеристики ламп.

**Студент должен знать:** принцип работы газоразрядных ламп низкого и высокого давления.

**Студент должен уметь:** строить графические зависимости светового потока,  $\cos \phi$ , световой отдачи для газоразрядных ламп высокого и низкого давления.

### Порядок выполнения

1. Ознакомиться с теоретической частью работы.
2. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные приборов и оборудования.
3. Произвести исследование характеристик газоразрядных ламп низкого и высокого давления в соответствии с инструкцией по выполнению лабораторной работы.

### Теоретические сведения

В качестве электрических источников света в сельском хозяйстве используют лампы накаливания, люминесцентные и газоразрядные лампы.

#### Люминесцентные лампы низкого давления

Принцип действия этих ламп упрощенно сводится к следующему. В стеклянной трубке между двумя электродами, расположенными на ее концах, происходит электрический разряд в парах ртути; ультрафиолетовое излучение, возникающее при этом, вызывает

свечение специального состава – люминофора, которым покрыта внутренняя поверхность трубки. Стеклоянная трубка становится источником света, который равномерно распространяется по ее длине. В зависимости от состава люминофора получается различная цветность излучения: применяются люминесцентные лампы дневного (типы ЛД и ЛДЦ), белого (тип ЛБ), тепло-белого (тип ЛТБ) и холодно-белого (тип ЛХБ) света. Люминесцентные лампы экономичнее ламп накаливания, срок их службы гораздо больше и достигает 12 000 ч. Недостатками этих ламп являются: необходимость в приборах для зажигания и ограничения тока, большие габариты, чувствительность к температуре окружающей среды. Устройство люминесцентной лампы низкого давления показано на рис. 7.1.

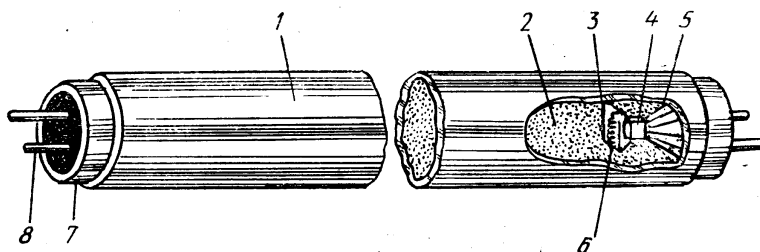


Рис. 7.1. Люминесцентная лампа низкого давления:

1 – стеклянная трубка (колба); 2 – люминофор; 3 – проволочные экраны; 4 – электроды; 5 – ножки; 6 – оксидированная спираль; 7 – цоколь; 8 – ножки-штырьки

Основные типы люминесцентных ламп низкого давления приведены в табл. 7.1. Для работы в условиях повышенной запыленности выпускаются рефлекторные лампы типа ЛБР-40.

Таблица 7.1

Люминесцентные лампы низкого давления на 220 В

Тип	Мощность, Вт	Размеры трубки, мм	
		Диаметр	Длина
ЛБ-30	30	27	909
ЛТБ-30	30	27	909
ЛХБ-30	30	27	909
ЛДЦ-40	40	40	1213
ЛД-40	40	40	1213

Тип	Мощность, Вт	Размеры трубки, мм	
		Диаметр	Длина
ЛБ-40	40	40	1213
ЛТБ-40	40	40	1213
ЛХБ-40	40	40	1213
ЛДЦ-80	80	39,5	1496
ЛД-80	80	39,5	1496
ЛБ-80	80	39,5	1496
ЛТБ-80	80	39,5	1496

Применяется несколько схем включения люминесцентных ламп. На рис. 7.2 показана наиболее распространенная из них. К сети переменного напряжения 220 В подключается лампа *EL*, которая включается с помощью стартера *SV*. Стартер представляет собой стеклянную колбочку, заполненную неоном, с двумя впаянными электродами. Один электрод изготовлен из биметалла. Колбочка заключена в металлический защитный кожух.

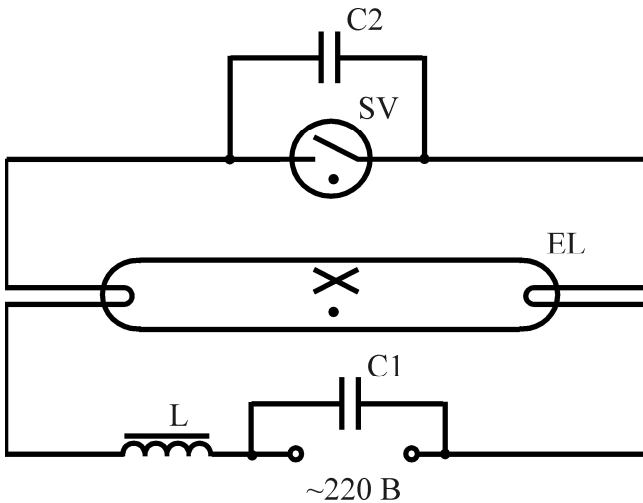


Рис. 7.2. Схема включения люминесцентной лампы низкого давления

В момент включения на разомкнутые электроды стартера подается полное напряжение сети, и между электродами в неооне возникает

тлеющий разряд, нагревающий биметаллическую пластинку. Нагретая пластинка изгибается и замыкает электроды стартера, через них начинает протекать ток, который нагревает биспиральные вольфрамовые нити накала лампы.

После замыкания электродов стартера тлеющий разряд в неоне прекращается, электроды охлаждаются и размыкаются. При размыкании цепи между электродами в трубке возникает повышенное напряжение (импульс напряжения), под действием которого в трубке, заполненной аргоном, происходит разряд. Небольшое количество ртути, находящееся в трубке, под действием электрического разряда испаряется, и электрический разряд продолжается уже в парах ртути. Этот разряд излучает в большом количестве ультрафиолетовые лучи, которые, падая на люминофор, вызывают свечение трубки. Процесс включения и зажигания длится 1–2 с. Конденсатор  $C2$  служит для устранения радиопомех при включении лампы, а дроссель  $L$  является балластным сопротивлением и предназначен для ограничения тока. В связи с понижением напряжения на стартере после зажигания лампы, вызванным падением напряжения на дросселе, тлеющий разряд в стартере не может возникнуть. Цепь стартера остается разомкнутой, когда горит лампа.

В современных осветительных установках люминесцентные лампы низкого давления включаются в сеть через электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА).

### **Люминесцентные лампы высокого давления**

Для освещения производственных площадок и помещений применяют люминесцентные лампы высокого давления типа ДРЛ (дуговые ртутные люминесцентные).

Лампа ДРЛ (рис. 7.3) состоит из кварцевой трубки (горелки) 7, размещенной в колбе 8, внутренняя поверхность которой покрыта слоем люминофора 9 и последовательно включенных резисторов 5. В кварцевую трубку впаяны два основных вольфрамовых электрода, покрытых активированным слоем и присоединенных к центральной части цоколя, контакту 12, и два дополнительных поджигающих электрода 10. Из кварцевой трубки откачан воздух, после чего она заполнена небольшим количеством ртути (40–60 мг) и аргоном под давлением 2,5–4,5 кПа. Лампа зажигается от сети напряжением 220 В с помощью ПРА (схема включения показана



на рис. 7.4). При включении лампы вначале возникает тлеющий разряд между рабочими и поджигающими электродами, который затем переходит на основные электроды. Для повышения  $\cos\phi$  включают конденсатор  $C1$ . После зажигания в лампе электрического разряда начальное напряжение на ней составляет 25–30 В и по мере разгорания повышается до 115–145 В. В момент зажигания ток лампы в 2–2,6 раза превышает номинальный, но по мере разогрева горелки и испарения в ней ртути он постепенно уменьшается.

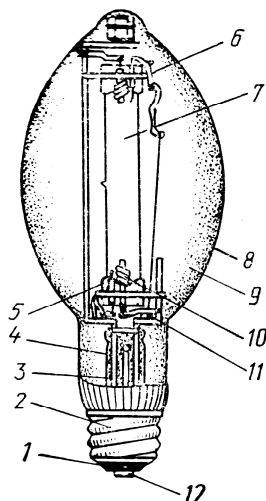


Рис. 7.3. Устройство лампы высокого давления типа ДРЛ:

1 – изолятор; 2 – цоколь; 5, 6 – резисторы;  
7 – кварцевая трубка (горелка) с вольфрамовыми электродами; 8 – колба;  
9 – слой люминофора; 10, 11 – поджигающие электроды; 12 – контакт

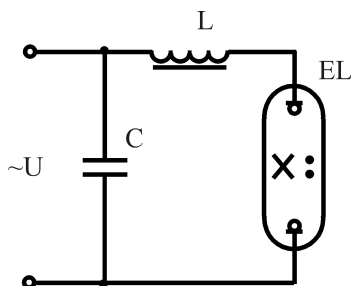


Рис. 7.4. Схемы включения четырехэлектродной лампы ДРЛ

Лампы ДРЛ по сравнению с люминесцентными лампами низкого давления имеют большую яркость (примерно в 10 раз), меньшую зависимость светового потока и время зажигания от температуры окружающей среды. Однако стабилизация их параметров наступает только через 10–15 мин. После выключения повторное включение возможно только через 2–3 мин. Их световая отдача несколько ниже, чем у трубчатых люминесцентных ламп низкого давления (от 40 до 55 лм/Вт) при таком же сроке службы, а единичная мощность выше (от 50 до 2000 Вт).

Технические характеристики люминесцентных ламп высокого давления приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2

Дуговые ртутные лампы высокого давления

Тип	Число электродов	Мощность, Вт	Рабочий ток, А	Диаметр, мм	Длина, мм	Продолжительность горения, ч
ДРЛ-250 ДРЛ-500 ДРЛ-750 ДРЛ-1000	2	250 500 750 1000	2 4 6 8	125 145 170 200	320 360 390 440	3000
ДРЛ-80-2 ДРЛ-125-2 ДРЛ-250-2	4	80 125 250	0,8 1,15 2	72 77 91	165 184 227	6000
ДРЛ-400-2 ДРЛ-700-2 ДРМ-1000-2		400 700 1000	3,2 5,5 6	122 152 181	292 368 410	2000

Для включения четырехэлектродных ламп типа ДРЛ используют дроссели различного типа в зависимости от мощности лампы: ДБ-125/230-Н-Т; ДБ-250/230-Н-Т; ДБ-400/230-Н-Т. Перспективным является применение электронных пускорегулирующих аппаратов для натриевых ламп высокого давления серии ДНаТ.

Принцип действия натриевых ламп высокого давления (НЛВД) основан на резонансном излучении, возникающем при электрическом разряде в парах натрия. Конструктивно НЛВД представляют

собой горелку из светопропускающей поликристаллической керамики (окись алюминия), полость которой заполнена ксеноном с добавками натрия и ртути в виде амальгамы, при этом горелка размещена в колбе с разрежением до  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  Па. Колбе придается цилиндрическая или эллиптическая форма, ее оснащают резьбовым цоколем. НЛВД имеют высокую световую отдачу и большую среднюю продолжительность горения при малом спаде светового потока (не более 15–20 % к моменту истечения продолжительности горения). К числу недостатков следует отнести большой коэффициент пульсации светового потока, удовлетворительную только для ряда случаев цветопередачу и более сложную схему подключения к электрической сети, чем лампа ДРЛ. НЛВД малочувствительны к изменению температуры окружающей среды и работоспособны при ее колебании в пределах от  $-60$  до  $+40$  °С. Колебания напряжения электрической сети довольно сильно сказываются на световых и электрических параметрах ламп. Кроме того, НЛВД требуют соблюдения установленного положения горения: цоколем вверх или вниз с нормированным отклонением от этого положения.

Спектр излучения НЛВД имеет выраженную желто-оранжевую составляющую, способствующую увеличению остроты зрения, поэтому их наиболее широко используют для освещения автострад, улиц и площадей, а также больших открытых пространств. Значительное улучшение качества цветопередачи может быть обеспечено совместным применением НЛВД с РЛВД, создающим преимущественное излучение в сине-зеленой части спектра. Устройство лампы ДНаТ показано на рис. 7.5.

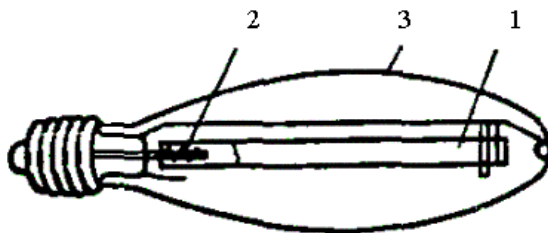


Рис. 7.5. Устройство лампы ДНаТ-400:

1 – внутренняя керамическая разрядная трубка; 2 – вольфрамовый электрод;  
3 – внешняя колба

Лампа содержит тонкостенную трубчатую горелку 1 из поликристаллической окиси алюминия – керамики, хорошо пропускающей световое излучение и устойчивой к длительному воздействию насыщенных паров натрия с температурой 1570–1670 К, содержащихся в горелке во время работы лампы. Кроме паров натрия, горелка заполнена ксеноном и парами ртути. На торцы горелки напаяны металлические колпачки с вольфрамовыми активированными электродами 2. Горелка помещена в колбу 3 из термостойкого стекла, из которой откачан воздух для теплоизоляции горелки.

Схема включения лампы ДНаТ приведена на рис. 7.6.

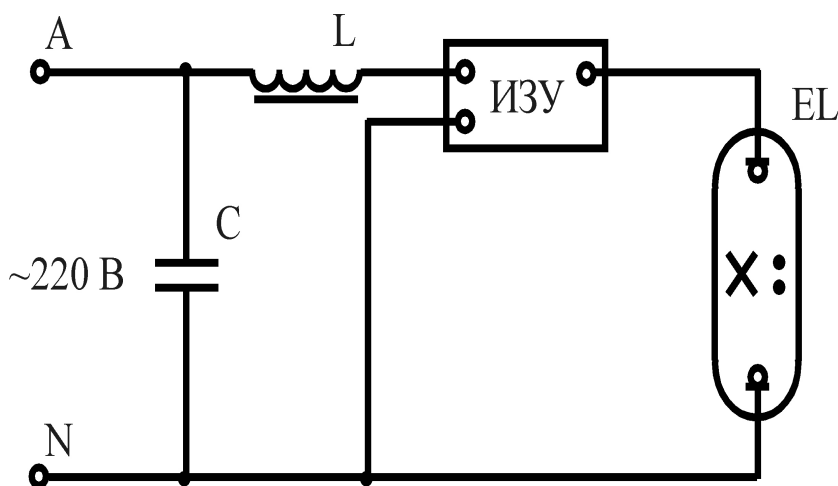


Рис. 7.6. Схема включения лампы ДНаТ

Для работы лампы необходимы: балластное устройство в виде дросселя, ограничивающего и стабилизирующего ток разряда, и импульсное зажигающее устройство ИЗУ (рис. 7.7), представляющее собой генератор импульсов с частотой 500 Гц, образующихся в результате периодического разряда конденсатора на первичную обмотку импульсного трансформатора. При этом во вторичной обмотке импульсного трансформатора, включенной

параллельно лампе, индуцируются импульсы напряжения с амплитудой около 4 кВ, обеспечивающие зажигание разряда в горелке. После зажигания лампы зажигающее устройство прекращает работу.

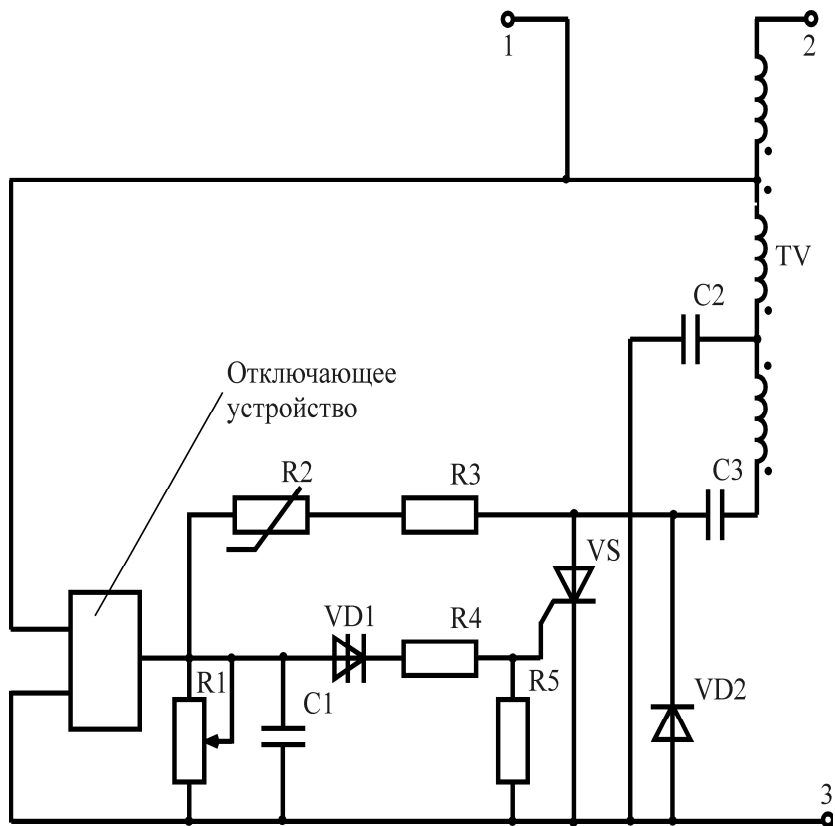


Рис. 7.7. Принципиальная схема импульсного зажигающего устройства типа ИЗУ

Лампы высокого давления ДНаТ-400 имеют светоотдачу 12,5 лм/Вт. Срок службы у отечественных ламп составляет 6,5–10,0 тыс. ч, у импортных – до 15 тыс. ч. За рубежом находят применение натриевые лампы низкого и высокого давления в сочетании с металлогалогенными

и ртутными лампами. Благоприятный спектр для ряда культур дает возможность применять эти лампы с успехом в овощеводстве. Традиционная система электропитания лампы от сети переменного напряжения 220 В (50 Гц) содержит токоограничивающий реактор, последовательно включенный с лампой, и устройство, формирующее высоковольтные импульсы для зажигания разряда. Проблемы, связанные с электромагнитными ПРА, следующие:

- 1) мерцание при питании от сети 50 Гц;
- 2) нестабильность мощности и светового потока лампы при колебаниях сетевого напряжения;
- 3) низкий коэффициент мощности;
- 4) большая масса реактора ПРА, наличие отдельного блока импульсного запуска и необходимость применения дополнительного конденсатора для улучшения коэффициента мощности;
- 5) отсутствие возможности управления освещенностью.

Эти недостатки устраняются при использовании для питания натриевых ламп электронных пускорегулирующих аппаратов (ЭПРА), другое распространенное название которых – электронные балласты. В дополнении к этому ЭПРА позволяет:

- 1) повысить срок службы лампы;
- 2) уменьшить энергопотребление;
- 3) обеспечить комфортную освещенность.

Схема ЭПРА представлена на рис. 7.8. и содержит следующие узлы: сетевой фильтр, выпрямитель, корректор коэффициента мощности, инвертор, устройство розжига и устройство управления мощностью.

Дискретное управление частотой модуляции инвертора осуществляется путем изменения емкости времязадающей  $RC$ -цепи управляющей микросхемы при помощи ключа  $S$ , в цепь которого включен дополнительный конденсатор. Инвертор обеспечивает питание лампы током повышенной частоты в двух режимах: режиме полной мощности и в режиме энергопотребления на уровне 50 % от номинального, что обеспечивает управление яркостью свечения лампы.

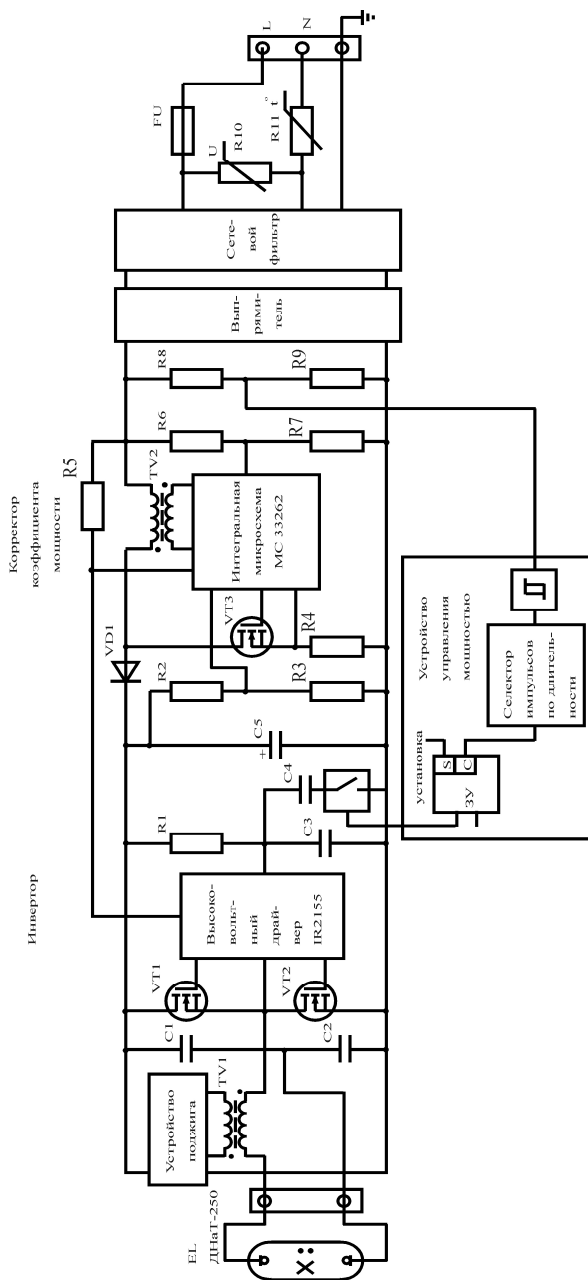


Рис. 7.8. Схема ЭПРА для ДНаТ-250

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из ламп высокого и низкого давления, пускорегулирующих аппаратов и измерительных приборов, расположенных на стенде. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 7.9, а, б.

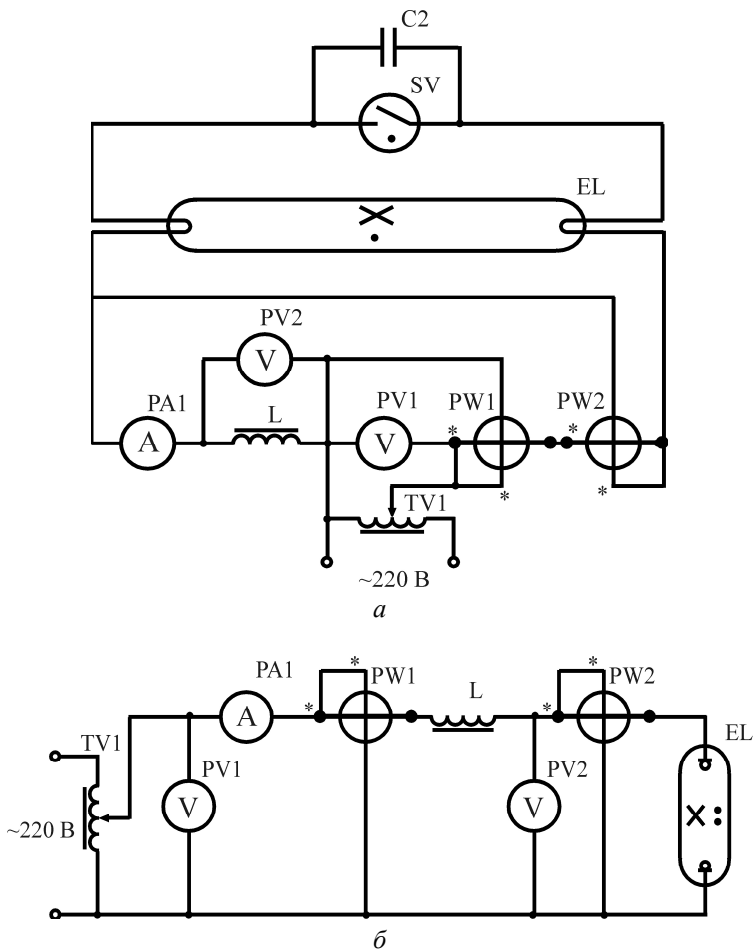


Рис. 7.9. Схема лабораторной установки:  
а – схема испытания люминесцентной лампы низкого давления;  
б – схема испытания люминесцентной лампы высокого давления



## Методика исследований

1. Устройство и принцип действия ламп, стартера и ПРА схемы включения изучить на образцах, представленных в работе, по методическим указаниям и рекомендуемой литературе. Технические характеристики изучаемых устройств записать в табл. 7.3, 7.4.

Таблица 7.3

Характеристика ПРА

Наименование	Тип	Мощность, Вт	Напряжение, В	Ток, А	cosφ	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм

Таблица 7.4

Характеристики ламп

Наименование ламп	Тип	Мощность, Вт	Напряжение, В	Эффективный поток, лк	Диаметр, мм	Длина, мм

2. Изучить схемы включения ламп низкого и высокого давления.

3. Установить с помощью автотрансформатора напряжение на PVI равное 120 В, затем, увеличивая напряжение через каждые 20 В, производить измерение и результаты занести в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Зависимость характеристик люминесцентной лампы от величины напряжения питания

Измерено						Вычислено		
$U$ , В	$U_L$ , В	$I$ , А	$P_L$ , Вт	$P$ , Вт	$E$ , лк	$\Phi$ , лм	$\eta$ , лм/Вт	cosφ

Прим.:  $U$  – напряжение питания;  $U_L$  – напряжение на лампе;  $P_L$ ,  $P$  – мощность лампы и балластного сопротивления;  $I$  – ток лампы;  $E$  – освещенность;  $\Phi$  – световой поток,  $\eta$  – световая отдача; cosφ – коэффициент мощности.

4. В процессе измерений необходимо фиксировать:  $U_{ЗС}$ ,  $U_{ЗД}$ ,  $U_{ПЛ}$  – напряжение зажигания стартера, лампы и погасания лампы.

5. Устройство ламп и пускорегулирующей аппаратуры изучить на образцах, представленных в работе, принцип действия и схемы включения – по методическим указаниям и рекомендуемой литературе.

6. Электрические и светотехнические характеристики лампы ДРЛ-250 измерить при напряжении сети 220 В (через каждые 30 с) с момента включения лампы. Результаты измерений записать в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Изменение электрических и светотехнических параметров лампы при разгорании

Тип	Измерено							Вычислено				
	$T, C$	$P, \text{Вт}$	$I, \text{А}$	$U_B, \text{В}$	$U_L, \text{В}$	$P_L, \text{Вт}$	$E, \text{лк}$	$\Phi, \text{лм}$	$\eta, \text{лм/Вт}$	$S, \text{ВА}$	$P_d, \text{Вт}$	$\cos\phi$
	0											
	30											
	60											
	...											
	420											

7. После разгорания лампы (примерно 6–8 мин) изменить автотрансформатором напряжение на лампе и через 2–4 мин измерить электрические и светотехнические параметры лампы при установленном напряжении. Определить влияние отклонения напряжения сети на параметры лампы. Результаты записать в табл. 7.7.

Таблица 7.7

Влияние отклонения напряжения сети на параметры лампы

Тип лампы	Измерено							Вычислено				
	$U_C, \text{В}$	$P_C, \text{Вт}$	$I, \text{А}$	$U_B, \text{В}$	$U_L, \text{В}$	$P_L, \text{Вт}$	$E, \text{лк}$	$\Phi, \text{лм}$	$\eta, \text{лм/Вт}$	$S, \text{ВА}$	$P_d, \text{Вт}$	$\cos\phi$

Прим. к табл. 7.6, 7.7:  $U_C, U_B, U_L$  – напряжение сети, дросселя, лампы;  $I$  – ток лампы;  $P_C, P_L$  – мощность схемы и лампы;  $E$  – освещенность;  $\Phi$  – световой поток;  $\eta$  – световая отдача;  $\cos\phi$  – коэффициент мощности схемы;  $P_d$  – мощность, теряемая в дросселе;  $S$  – полная мощность схемы.

## Методика вычислений

Световой поток люминесцентной лампы определить по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot \pi^2 \cdot L \cdot H \cdot p}{\frac{\alpha \cdot \pi}{180} + \frac{\sin 2\alpha}{2}},$$

где  $E$  – освещенность, создаваемая люминесцентной лампой на условной поверхности, лк;

$L$  – длина люминесцентной лампы, м;

$H_p$  – ближайшее расстояние от люминесцентной лампы до условной поверхности, на которой измеряется освещенность, м.

С учетом того, что в лабораторной работе  $L = 0,9$  м,  $H_p = 0,1$  м,  $\alpha = 77,4^\circ$ ,  $\gamma = 0$ , то световой поток лампы  $\Phi = 0,56 \cdot E$ .

Световая отдача люминесцентной лампы с учетом мощности, потребляемой балластным сопротивлением:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}.$$

Мощность, теряемая в балластном сопротивлении:

$$P_B = P - P_{\text{л}}.$$

Полная мощность, потребляемая лампой и ПРА из сети:

$$S = U \cdot I.$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

## Методика расчета для газоразрядных ламп высокого давления

Световой поток лампы:

$$\Phi = 4 \cdot L^2 \cdot \pi \cdot k \cdot E,$$

где  $L = 1,0$  м – расстояние между лампой и фотоэлементом люксметра;

$k$  – коэффициент, учитывающий пространственное распределение светового потока (для лабораторной установки  $K$  принять ДРЛ-0,35; ДРИ-0,2; ДнаТ-0,29).

Световая отдача:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}.$$

Полная мощность:

$$S = I \cdot U_{\Sigma}.$$

Мощность, теряемая в дросселе:

$$P_{\text{д}} = P - P_{\text{л}}.$$

Коэффициент мощности схемы:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

### Содержание отчета

1. Таблицы с результатами исследований.
2. Графические зависимости для газоразрядных ламп низкого давления  $\Phi$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi$  от напряжения питания.
3. Графические зависимости для газоразрядных ламп высокого давления:  $U$ ,  $U_{\text{л}}$ ,  $I$ ,  $P_{\text{л}}$ ,  $\Phi$  – от продолжительности зажигания лампы;  $t$ ,  $P_{\text{л}}$ ,  $\Phi$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi$  – от величины напряжения питания.
4. Выводы.

## **Контрольные вопросы**

1. Как устроены газоразрядные лампы низкого и высокого давления?
2. Какой принцип работы пусковой аппаратуры люминесцентной лампы низкого давления?
3. Для чего предназначены люминесцентные лампы?
4. Для чего предназначены дросселя и стартера?
5. Какое назначение и принцип действия ЭПРА?
6. Какие преимущества ЭПРА перед индуктивными балластами?
7. Объяснить, почему загорание и погасание лампы происходит при разном напряжении?
8. Какие основные электрические, светотехнические и эксплуатационные характеристики газоразрядных ламп высокого давления?
9. Какое назначение дросселя в схеме включения четырехэлектродной лампы ДРЛ?
10. Как влияет колебание напряжения питания на основные характеристики газоразрядных ламп высокого давления?

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

**Цель работы:** исследовать зависимости мощности, момента сопротивления и КПД осевого вентилятора от частоты вращения при регулировании питающего напряжения; исследовать энергетические характеристики электродвигателя повышенного скольжения серии при регулировании напряжения в цепи его статора.

**Студент должен знать:** принцип работы осевого вентилятора.

**Студент должен уметь:** строить энергетические характеристики электродвигателя осевого вентилятора.

### Порядок выполнения

1. Изучить конструкции и технические характеристики электропривода осевого вентилятора из комплекта оборудования «Климат 4М».
2. Изучить технические характеристики асинхронных трехфазных электродвигателей повышенного скольжения.
3. Провести исследования электропривода вентилятора при регулировании питающего напряжения.
4. Описание лабораторной работы.

### Теоретические сведения

Исследуемый осевой вентилятор ВО-Ф с электродвигателем Д100Л6П предназначен для привода осевого вентилятора, используемого в комплекте оборудования «Климат 4М».

Комплекты «Климат 4М», применяемые для вытяжной вентиляции животноводческих и птицеводческих помещений, обеспечивают автоматическое регулирование частоты вращения вытяжных вентиляторов при отклонении температуры воздуха в помещении от заданной.

Частота вращения вентиляторов регулируется изменением напряжения питания обмотки статора электродвигателя.

Регулирование напряжения может быть ступенчатым (при помощи автотрансформатора с отводами обмоток) или плавным (при помощи тиристорного регулятора).

Электродвигатели Д10016П имеют повышенное скольжение 10–17 % против 5–9 % в нормальных короткозамкнутых электродвигателях. Их критическое скольжение достигает 30–70 %. Такое большое критическое скольжение позволяет расширить диапазон регулирования скорости вентиляторов, но требует завышения установленной мощности электродвигателя в 1,5–2 раза из-за увеличения потерь в роторе (потерь скольжения):

$$\Delta P = M\omega_0 s, \quad (8.1)$$

где  $M$  – электромагнитный момент (приблизительно равный моменту на валу), Н·м;

$\omega_0$  – синхронная скорость вращающегося магнитного поля, рад/с;

$s$  – скольжение ротора.

Повышенное скольжение обеспечивается использованием ротора с увеличенным активным сопротивлением обмотки.

При регулировании частоты вращения асинхронных электродвигателей с вентиляторной нагрузкой на валу изменением напряжения, максимальные потери в роторе имеют место при скольжении 0,33–0,34, т. е. при  $\omega = (0,66–0,67)$ . Численные значения этих потерь составляют (0,13–0,17)  $P_H$ , где  $P_H$  – номинальная нагрузка на валу (при номинальной угловой скорости). Потери в роторе не зависят от его конструкции, но при повышенном сопротивлении ротора обеспечивается большее критическое скольжение  $s_{кр}$  и меньший ток ротора  $I'_2$ . Это объясняется тем, что потери  $\Delta P$  определяются не только уравнением (8.1), но и уравнением

$$\Delta P = 3(I'_2)^2 r'_2, \quad (8.2)$$

где  $I'_2$  – приведенный (к статору) ток ротора, А;

$r'_2$  – приведенное активное сопротивление ротора, Ом.

Из формулы (8.2) следует, что те же потери могут иметь место при большем значении  $r'_2$  и меньшем значении  $I'_2$ .

При меньшем токе статора будут меньше потери в обмотке, следовательно, и нагрев электродвигателя.

При скольжении  $s = 0,33-0,34$  потери и ток ротора максимальны. Максимум тока соответствует напряжению, при котором достигается скольжение  $s = 0,33-0,34$ , при этом ток двигателя превышает номинальное значение.

Особенности механических характеристик электродвигателей с повышенным скольжением позволяют обеспечить диапазон регулирования подачи воздуха 1:6 при их использовании для привода осевых вентиляторов в системах микроклимата.

В табл. 8.1 приведены основные параметры специальных электродвигателей с повышенным скольжением, предназначенных для привода осевых вентиляторов.

Таблица 8.1

Технические характеристики электродвигателей повышенного скольжения

Наименование параметра	Тип двигателя		
	4АПА80-06У2	4АПА80А6У2	Д100I6П
Тип приводимого вентилятора	ВО-Ф-5,6А	ВО-Ф-7,1А	ВО-7
Номинальная мощность, кВт	0,37	0,55	1,1
КПД, %	65,0	66,0	68,0
Коэффициент мощности	0,65	0,62	0,77
Кратность пускового тока	4,0	4,0	4,0
Кратность пускового момента	2,0	2,0	2,1
Кратность максимального момента	2,0	2,2	2,0
Номинальная частота вращения, об/мин	940,0	930,0	830,0
Масса, кг	9,5	11,2	32,0

Электродвигатели осевых вентиляторов имеют конструктивные особенности. Они крепятся на кронштейнах, коробка выводов расположена в торцевой крышке, смазка подшипников производится без разборки двигателя, отсутствует собственный вентилятор на валу. Электродвигатели имеют степень защиты IP55.



## Методика исследования

1 Вычертить электрическую схему лабораторной установки (рис. 8.1).



2. Включить автоматический выключатель  $QF$  и регулятором напряжения установить напряжение 220 В по вольтметру  $PUI$ .

3. Подать напряжение на обмотку статора электродвигателя выключателем  $QS2$ .

4. Провести измерения для определения энергетических показателей электропривода вентилятора. Для этого записать показания приборов при различных частотах вращения вентилятора. Частоту вращения изменять регулятором напряжения. Зафиксировать максимальную, минимальную частоту вращения и 4–5 промежуточных.

5. Данные измерений и расчетов занести в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Результаты измерений и расчетов по определению энергетических показателей электропривода вентилятора

Измерено					Вычислено					
№	$U$ , В	$I_{\Phi}$ , А	$P_C$ , Вт	$n$ , об/мин	$S$ , ВА	$\cos \varphi$	$\omega$ , рад/с	$s$ , о.е	$P_M$ , Вт	$M_C$ , Нм
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										

Расчетные формулы:

$$S = \sqrt{3}UI ,$$

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} ,$$

$$n_0 = 60f / p ,$$

$$\omega = \pi n / 30 ,$$

$$\cos\varphi = P/S ,$$

$$P_M = P_C - 3I^2 R_\Phi - P_0,$$

$$M_C = P_M / \omega$$

где  $P_C$  – мощность, потребляемая двигателем из сети, Вт;

$P_M$  – механическая мощность на валу вентилятора, Вт;

$I_\Phi$  – фазный ток статора электродвигателя, А;

$R_\Phi$  – омическое сопротивление фазы статора, Ом (принять  $R_\Phi = 7,9$  Ом);

$P_0$  – потери холостого хода, принять  $P_0 = 10$  Вт;

$M_C$  – момент сопротивления на валу двигателя, Нм.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Паспортные данные приборов, аппаратов, оборудования.
3. Электрическая схема лабораторной установки.
4. Таблица с данными опытов и расчетов.
5. Графические зависимости  $P_M = f(\omega)$ ;  $I_\Phi = f(U)$ ;  $\omega = f(U)$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Каким способом регулируется частота вращения вентилятора в лабораторной установке?
2. Какое назначение элементов лабораторной установки?
3. Какие особенности имеют электродвигатели для привода осевых вентиляторов серии ВО?
4. Какие способы регулирования подачи вентиляторов?
5. Почему при регулировании подачи вентилятора изменением напряжения питания необходимо использовать электродвигатели с повышенным скольжением?

6. В каком соотношении находятся: подача вентилятора  $Q$  и угловая скорость  $\omega$ , мощность вентилятора  $P$  и угловая скорость  $\omega$ ?
7. Какая формула механической характеристики вентилятора?
8. Какой наиболее тяжелый режим для двигателя вентилятора по результатам измерений?
9. Какие устройства используют для регулирования напряжения питания асинхронных электродвигателей вентиляторов?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

**Цель работы:** изучить устройство и принцип действия элементных водонагревателей; экспериментально определить энергетические параметры аккумуляционного (емкостного) водонагревателя.

**Студент должен знать:** конструкцию элементных водонагревателей.

**Студент должен уметь:** строить графическую зависимость температуры от времени; определять мощность, производительность и КПД элементных водонагревателей.

### Порядок выполнения

1. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами лабораторной установки.

2. Изучить устройство и принцип действия элементного водонагревателя.

3. Изучить схему управления элементом водонагревателем.

4. Снять зависимость температуры от времени нагрева  $\theta = f(t)$ , определить мощность водонагревателя, его производительность, КПД и удельный расход электроэнергии.

### Теоретические сведения

По способу нагрева электрические водонагреватели подразделяются на *элементные* (косвенного нагрева), *электродные* (прямого нагрева) и *индукционные*. По принципу действия различают *проточные* (прямоточные, быстродействующие) и *непроточные* (аккумуляционные или емкостные) водонагреватели. *Проточные* водонагреватели позволяют получать горячую воду сразу же после их включения, однако имеют следующий недостаток – сравнительно высокую установленную мощность при низком коэффициенте использования. *Непроточные* водонагреватели способны запасать (аккумулировать) горячую воду, имея меньшую установленную мощность на единицу полезного объема, могут включаться в часы провалов суточных графиков нагрузки подстанций и сетей, обеспечивая при этом высокие экономические показатели нагрева воды.

*Элементные* водонагреватели изготавливают с герметическими резистивными нагревателями (ТЭНами), поэтому они более безопасны в эксплуатации по сравнению с электродными, не загрязняют воду, имеют практически неизменную мощность. Однако они менее надежны из-за ограниченного срока службы нагревателей, имеют более высокие стоимостные показатели. По сравнению с электродными водонагревателями элементные имеют невысокую мощность и используются для горячего водоснабжения сравнительно небольших рассредоточенных потребителей. Элементные водонагреватели применяют при повышенных требованиях к электробезопасности.

Элементный аккумуляционный водонагреватель состоит из цилиндрического бака с теплоизоляцией и металлического кожуха. В баке установлены трубчатые электронагреватели (ТЭНы), терморегулятор и термометр. Для забора воды из водопровода открывают вентиль на входном патрубке. При этом вода поступает в нижнюю часть бака и вытесняет из верхней части водонагревателя теплую воду. Как правило, в комплект водонагревателя входит шкаф управления. В сельском хозяйстве используются емкостные водонагреватели типов УАП, ВЭТ, САОС, ЭВА, проточные САЗС, ВНС, ВЭП, ЭВ-Ф-15, ЭВПЗ-15.

### **Техническое описание водонагревателя**

Водонагреватели аккумуляционные с термоизоляцией вентилируемой марки ЭВАО-10/1,6 «Гейзер» и ЭВАО 10/1,25 «Гейзер» предназначены для использования в быту для нагрева воды ниже точки кипения, длительного хранения нагретой воды и автоматического поддержания заданной потребителем температуры в течение всего времени включения водонагревателя.

Водонагреватели могут эксплуатироваться в любых бытовых помещениях с температурой окружающего воздуха от 1 до 35 °С (вид климатического исполнения – УХЛ4 по ГОСТ 15150-69).

Перед началом эксплуатации следует внимательно ознакомиться с техническими характеристиками водонагревателя и правилами техники безопасности водонагревателей серии ЭВАО-10.

Основные правила ввода водонагревателя в эксплуатацию заключаются в следующем:

- 1) перед вводом в действие необходимо убедиться в правильности подключения нагревателей, плотности контактных соединений и проверить надежность заземления;

2) проверить мегаомметром на 1000 В сопротивление изоляции электрических нагревателей, которое должно быть не менее 10 МОм, а сопротивление изоляции токоподводов относительно корпуса водонагревателя не менее 220 кОм. Если сопротивление изоляции электроводонагревателей снизилось, их необходимо тщательно просушить до тех пор, пока сопротивление изоляции не войдет в норму и залить компаундом узлы соединений трубок с изоляторами выводов. При просушке температура поверхности нагревателей не должна превышать 150 °С;

3) на подходящем и отходящем патрубках водопроводной сети должны быть изолирующие вставки из резинового или пластмассового шланга;

4) проверить электропитание щита управления, а также его работоспособность.

Основные правила техники безопасности при обслуживании элементных водонагревателей следующие:

1) корпус водонагревателя должен быть заземлен. В сети напряжением 380/220 В с заземленной нейтралью для заземления корпус присоединяют к защитному (РЕ) проводу сети;

2) запрещается эксплуатация водонагревателя в неисправном состоянии, а так же при отсутствии защиты и предохранительных устройств;

3) запрещается включать незаполненный водой водонагреватель в сеть, так как в этом случае из-за уменьшения теплоотдачи ТЭНы перегорают.

### **Требования безопасности**

1) эксплуатация водонагревателя разрешается только после проверки надежности его закрепления на стене, отсутствия течей и соблюдения правил техники безопасности в соответствии с настоящим руководством по эксплуатации;

2) зануление или заземление водонагревателя обязательно.

При вводе в жилое строение должно быть выполнено заземление нулевого провода. Сопротивление заземляющего устройства – не более 30 Ом. Проводник зануления (заземления) сечением не менее фазного провода должен быть надежно прикреплен к заземляющему контакту розетки и щитку учета электроэнергии со стороны ввода питающей сети. Запрещается использовать для заземления металлоконструкций водопроводных, отопительных и газовых сетей.

Перед включением водонагревателя в сеть убедитесь в исправности шнура питания, вилки и розетки. Не следует вставлять мокрыми руками штепсельную вилку шнура питания в розетку.

Все работы по ремонту и чистке производите только при отключенном от электросети водонагревателе.

### Устройство водонагревателя ЭВАО 10/1,6 «Гейзер»

Водонагреватель (рис. 9.1) состоит из нержавеющей резервуара 1, размещенного в кожухе 7. Между резервуаром и кожухом находится теплоизоляция 6. Кожух с двух сторон закрыт крышками 2, 10. В верхней части кожуха установлена воронка 5 для залива воды в водонагреватель. Сверху воронка закрыта крышкой 4. На боковой стенке резервуара закреплен нагревательный элемент 13, баллон терморегулятора, термовыключатель 17, отключающий нагрев в случае выхода из строя терморегулятора 15 и ограничивающий нагрев воды до температуры не более 90 °С, а также датчик уровня 12. Внутри резервуара расположена переливная труба 3, служащая для перелива излишков воды при заполнении резервуара. На лицевой стороне кожуха находится светосигнальная арматура 8, а также ручка терморегулятора 9. На внутренней стороне кожуха расположен датчик уровня 16, не позволяющий включаться нагревательному элементу при отсутствии воды в резервуаре и отключающий нагрев при понижении уровня воды ниже датчика уровня. На задней стенке кожуха имеются отверстия для крепления водонагревателя к стене с помощью шурупов и дюбелей, входящих в комплект поставки. Подсоединение водонагревателя к электросети производится с помощью шнура питания с вилкой 11, имеющей заземляющий контакт. С лицевой стороны кожуха крепится водоразборный кран 14 с облицовочной шайбой 18.

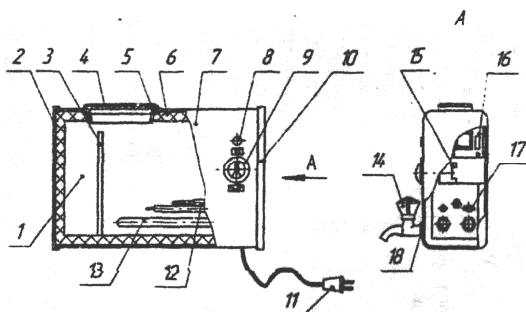


Рис. 9.1. Общий вид элементного водонагревателя



## Описание лабораторной установки

Установка подключается к однофазной сети при помощи автоматического выключателя *QF* (рис. 9.2). Напряжение на водонагревателе и сила тока в цепи трубчатого электроводонагревателя измеряются вольтметром *PV1* и амперметром *PA1*. Мощность, потребляемая водонагревателем, измеряется однофазным ваттметром *PW1*. Термовыключатель (термоконтакт) *SK1* отключает ТЭН при разогреве его поверхности до температуры выше 95 °С. Терморегулятор *SK2* предназначен для поддержания заданной температуры воды. Датчик уровня *SL* отключает ТЭН при понижении уровня воды в баке ниже допустимого. Корпус водонагревателя соединен с защитным проводником *PE*.

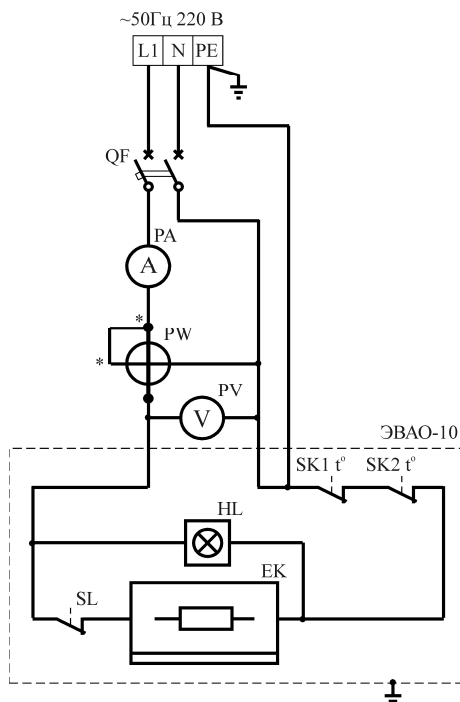


Рис. 9.2. Схема лабораторной установки с элементом водонагревателем:  
*QF* – автоматический выключатель; *PA* – амперметр; *PW* – ваттметр;  
*PV* – вольтметр; *SK1...SK2* – термоконтакты; *SL* – датчик уровня воды;  
*EK* – трубчатый электронагреватель (ТЭН); *HL* – сигнальная лампа

## Методика исследования

1. Выписать технические данные электроводонагревателя.
2. Начертить принципиальную электрическую схему лабораторной установки и таблицу результатов опытов (измерений и вычислений).
3. Включить установку в сеть и приступить к испытанию водонагревателя. Снять показания измерительных приборов и данные измерений (напряжение  $U_C$  по вольтметру  $PV1$ , ток  $I$  по амперметру  $PA1$ ). Измерения проводить через 10 минут. Результаты измерений занести в таблицу 9.1.
4. Исходя из результатов проведенных опытов, вычислить и записать в табл. 9.1 величину мощности, подводимую к водонагревателю  $P$ .

Таблица 9.1

Результаты измерений

№ п/п	Время $t$ , мин	Измерено			Вычислено
		Температура воды $t$ , °C	Линейное напряжение $U$ , В	Ток $I$ , А	Мощность $P$ , Вт
1.	0				
2.	1,0				
3.	2,0				
4.	3,0				
5.	4,0				
6.	5,0				
7.	6,0				
8.	7,0				
9.	8,0				

5. Определить по опытным данным для водонагревателя производительность  $q$ , КПД и удельный расход электроэнергии  $A_{уд}$ .
6. По полученным данным построить графическую зависимость  $P = f(t)$ ,  $Q = f(t)$ .
7. Расчеты произвести по формулам:

$$P = U_C \cdot I ,$$

где  $P$  – мощность, подводимая к водонагревателю;  
 $U_C$  – напряжение сети, В;  
 $I$  – ток в цепи нагревателя, А;  
 $q$  – производительность водонагревателя, л/мин:

$$q = \frac{60 \cdot V}{t},$$

где  $V$  – объем нагреваемой воды, м<sup>3</sup>;  
 $t$  – общее время нагрева, мин;

$$\eta = \frac{m \cdot C (\Theta_{\text{кон}} - \Theta_{\text{нач}})}{60 \cdot P_{\text{ср}} \cdot t},$$

где  $\eta$  – КПД водонагревателя;  
 $m$  – масса нагреваемой воды, кг;  
 $C$  – теплоемкость воды ( $C = 4186$  Дж/кг·°С);  
 $Q_{\text{кон}}$ ,  $\Theta_{\text{нач}}$  – соответственно, конечное и начальное значение температуры нагреваемой воды, °С;  
 $A_{\text{уд}}$  – удельный расход электроэнергии, кДж/кг:

$$A_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{ср}}}{q},$$

где  $P_{\text{ср}}$  – средняя мощность нагревателя, кВт:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{нач}} + P_{\text{кон}}}{2}.$$

### Содержание отчета

1. Таблицы с паспортными данными электроизмерительных приборов, аппаратуры управления.
2. Схема установки.
3. Таблица с результатами измерений.
4. Расчетные данные: производительность, средняя мощность, КПД.
5. График зависимости  $\Theta = f(t)$ .
6. Выводы, пояснения.

## **Контрольные вопросы**

1. Какое устройство и принцип действия аккумуляционного (емкостного) водонагревателя?
2. В чем заключается особенность эксплуатации, и каковы основные правила техники безопасности при использовании элементных водонагревателей?
3. Как объяснить работу принципиальной электрической схемы лабораторной установки с элементным водонагревателем?
4. Какие сравнительные характеристики элементного и электродного водонагревателей?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

**Цель работы:** изучить конструкцию и особенности эксплуатации водонагревателя электродного типа; исследовать энергетические показатели водонагревателя.

**Студент должен знать:** особенности работы водонагревателей электродного типа.

**Студент должен уметь:** определять основные энергетические показатели водонагревателей электродного типа.

### Порядок выполнения

1. Изучить схему лабораторной установки.
2. Изучить устройство трехфазного электродного водонагревателя.
3. Исследовать работу электродного водонагревателя и определить его основные энергетические показатели.

### Теоретические сведения

Существует два типа электрических водонагревателей: *с электродным нагревом* и *с элементным нагревом*.

Оба типа водонагревателей могут быть *трехфазными* или *однофазными*, *проточными* (непрерывного действия) или *непроточными* (периодического действия).

Электродный водонагреватель является простейшим электротепловым прибором, который легко можно изготовить на месте и использовать для нагрева воды, необходимой для различных хозяйственных целей. В практике сельского хозяйства применяются следующие типы электрических водонагревателей (рис. 10.1).

Нагрев воды в электродных водонагревателях происходит за счет прохождения электрического тока непосредственно через воду. Вода здесь служит рабочим сопротивлением водонагревателя. Количество тепла (Дж), выделяемое в воде при протекании тока от одного электрода к другому, определяется законом Джоуля-Ленца:

$$Q = I_{\tau}^2 R_{\tau} t,$$

где  $I_{\tau}$  – сила тока, протекающего через воду, А;  
 $R_{\tau}$  – электрическое сопротивление воды, Ом;  
 $t$  – время протекания тока, с.

Индекс  $\tau$  означает, что величины соответствуют данной температуре нагреваемого тела.

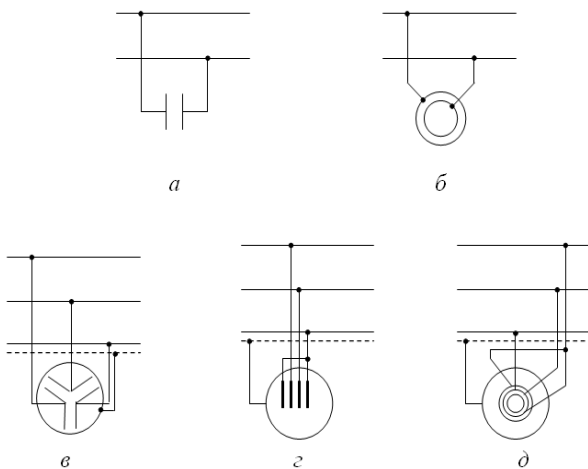


Рис. 10.1. Типы электрических водонагревателей:

- а* – однофазный водонагреватель с плоскими электродами;
- б* – однофазный водонагреватель с цилиндрическими электродами;
- в* – трехфазный водонагреватель с тремя угловыми электродами, расположенными под углом  $120^\circ$  относительно друг друга;
- г* – трехфазный водонагреватель с пластинчатыми электродами;
- д* – трехфазный водонагреватель с цилиндрическими коаксиально расположенными электродами

Величина сопротивления рабочей цепи зависит от размера электродов, расстояния между ними, удельного сопротивления воды и ее температуры.

Электропроводность воды зависит от ее физико-химических свойств, содержания примесей в ней и уровня ее температуры. Удельное сопротивление воды меняется в широких пределах от 200 до 10 000 Ом·см при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

Для любой температуры, отличной от 20 °С, удельное сопротивление воды (Ом·см) определяется по эмпирической формуле:

$$\rho_{\tau} = \frac{40\rho_{20}}{20 + \tau},$$

где  $\rho_{20}$  – удельное сопротивление воды при температуре 20 °С, Ом·см.

Во избежание появления гремучего газа плотность тока для плоских электродов допускается не более 0,5 А/см<sup>2</sup>, для цилиндрических – до 2,0 А/см<sup>2</sup>, а сам водонагреватель подключается только в сеть переменного тока.

При нагреве питьевой воды материалом электродов могут служить графит и нержавеющая сталь.

Напряжение ( $U$ ), приходящееся на 1 см межэлектродного расстояния, подсчитывается по формуле:

$$\tau = \rho_{\tau} \cdot \delta_{\text{доп}},$$

где  $\rho_{\tau}$  – удельное сопротивление горячей воды, Ом·см ;

$\delta_{\text{доп}}$  – допустимая плотность тока на электродах, А/см<sup>2</sup>.

При ориентировочных расчетах расстояние между электродами определяется по формуле:

$$l = \frac{U_{\Phi}}{(100 - 400)},$$

где  $l$  – расстояние между электродами, см;

$U_{\Phi}$  – фазное напряжение, В.

Вода, нагреваемая в электродных водонагревателях, используется, в основном, для технических целей.

По сравнению с элементными водонагревателями электродные водонагреватели значительно проще по устройству и дешевле.

Недостатком электродных водонагревателей является непостоянство потребляемой мощности в процессе нагрева воды, что снижает

коэффициент использования установленной мощности. В процессе нагрева мощность увеличивается в 3–4 раза по сравнению с начальной потребляемой мощностью. Это объясняется тем, что вода является проводником второго рода, сопротивление которого уменьшается при повышении температуры.

Другим недостатком является то, что при их эксплуатации требуются специальные меры по технике безопасности, и объясняется тем, что при работе электродного водонагревателя на его корпусе может возникнуть опасный потенциал. Особенно велико напряжение прикосновений при перегорании одного или двух предохранителей на незаземленном корпусе.

Для обеспечения электробезопасности при эксплуатации входной и выходной патрубков электродного водонагревателя соединяются с водопроводной сетью резиноканевыми вставками длиной не менее 1,5 м, корпус надежно заземляется и около каждого аппарата выполняется устройство повторного заземления нейтрали (рис. 10.2).

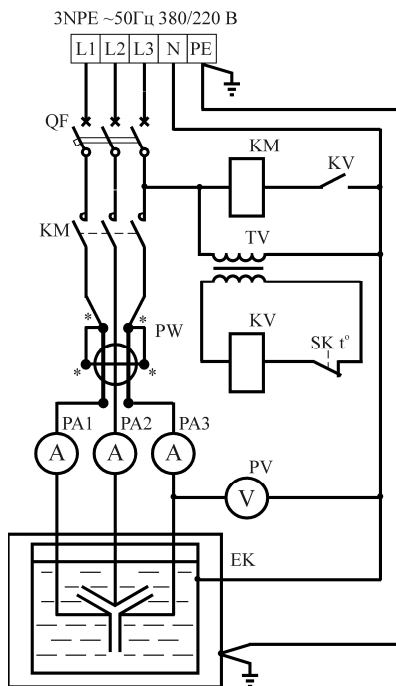


Рис. 10.2. Схема лабораторной установки



## Методика исследований

Перед выполнением работы нужно тщательно ознакомиться с техникой безопасности при работе с электродными водонагревателями, проверить наличие защитного зануления.

Залить в бак холодную водопроводную воду. Включить установку. Результаты замеров занести в табл. 10.1. Измерения проводить 5 мин до выключения водонагревателя.

Таблица 10.1

Результаты измерений и расчетов

Измерено						Вычислено				
Время $t$ , мин	Темпера- тура воды $\tau$ , °C	Токи в фазах			Линейное напряжение $U$ , В	Мощность одной фазы $P$ , Вт	$I_{CP}$ , А	$P$ , Вт	$R$ , Ом	$P$ , Ом·см
		$I_1$	$I_2$	$I_3$						
0										
1,0										
2,0										
3,0										
4,0										
5,0										

По результатам замеров определить:

1) производительность, л/с:

$$q = \frac{\Theta}{60 \cdot t},$$

где  $\Theta$  – объем нагреваемой воды, л;

$t$  – время нагрева, мин.

2) среднюю мощность нагревателя, кВт:

$$P_{CP} = \frac{P_{НАЧ} + P_{КОН}}{2};$$

3) удельный расход электроэнергии:

$$a = \frac{P_{\text{ср}}}{q};$$

4) коэффициент полезного действия нагревателя:

$$\eta = \frac{q \cdot c(\tau_{\text{кон}} - \tau_{\text{нач}})}{P_{\text{ср}}},$$

где  $C$  – весовая теплоемкость воды ( $4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{л} \cdot \text{град}}$ );

5) удельное сопротивление воды (определяется для каждого измерения), Ом·см:

$$\rho_{\text{в}} = \frac{P_{\tau} \cdot S}{I_{\tau}^2 \cdot l},$$

где  $P_{\tau}$ ,  $I_{\tau}$  – мощность (Вт) и ток (А) при температуре нагрева  $\tau$  соответственно;

$S$  – площадь электрода на одну фазу, см<sup>2</sup>;

$l$  – расстояние между электродами, см;

6) стоимость электроэнергии для нагрева воды, руб.:

$$D = A \cdot K,$$

где  $A = P_{\text{потр.ср}} \cdot t$  – электроэнергия, затраченная на нагрев воды, кВт·ч;

$K$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии;

$t$  – время нагрева, ч.

### Содержание отчета

1. Схема установки.
2. Таблица с результатами измерений.

3. Расчетные данные: производительность, средняя мощность, удельный расход электроэнергии, КПД, сопротивление, удельное сопротивление, стоимость электроэнергии.

4. Графики зависимостей:

$$P = f(\tau); I_{\text{CP}} = f(\tau); \rho = f(\tau); P = f(t); I_{\text{CP}} = f(t); \tau = f(t).$$

5. Расчетные формулы.

6. Выводы, пояснения.

### **Контрольные вопросы**

1. Как объяснить устройство водонагревателя?
2. Какой принцип действия электродного водонагревателя?
3. Какие преимущества и недостатки электродных водонагревателей по сравнению с элементными?
4. Какой характер и причины изменения мощности, тока водонагревателя с изменением температуры?
5. Как объяснить площадь электродов и расстояние между ними на ток и мощность водонагревателя?
6. Какие меры безопасности при монтаже и эксплуатации электродных водонагревателей?

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

**Цель работы:** изучить различные способы компенсации реактивной мощности.

**Студент должен знать:** устройства для компенсации реактивной мощности.

**Студент должен уметь:** строить векторные диаграммы для различной емкости конденсаторной батареи.

### Порядок выполнения

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные приборов и оборудования.
2. Ознакомиться со схемами включения статических конденсаторов.
3. Изучить правила техники безопасности при эксплуатации статических конденсаторов.

### Теоретические сведения

Полная мощность  $S$ , потребляемая асинхронным электродвигателем из сети, определяется по формуле:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I.$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta}.$$

где  $P$  – активная мощность, потребляемая электродвигателем из сети, кВт;

$I$  – ток, потребляемый из сети, А.

Следовательно, чем ниже  $\cos \varphi$ , тем больше ток  $I$  и полная мощность  $S$ , потребляемые электродвигателем при неизменной активной мощности  $P$ , что ведет к завышению установленной мощности

трансформатора или генератора и к увеличению сечения проводов питающих линий.

Коэффициент мощности  $\cos\varphi$  характеризует сдвиг вектора тока  $I$  относительно вектора питающего напряжения  $U$  за счет наличия намагничивающего тока  $I_H$ , отстающего от напряжения на  $90^\circ$  (рис. 11.1). Ток, текущий в питающих проводах, является геометрической суммой тока активного  $I_a$  и реактивного  $I_H$ . Активный ток меняется в зависимости от загрузки двигателя. Ток реактивный  $I_H$  остается практически неизменным, поэтому при изменении степени загрузки двигателя меняется  $\cos\varphi$ . Чем больше загружен двигатель, тем меньше угол сдвига  $\varphi$  между векторами тока и напряжения  $U$  (следовательно, больше  $\cos\varphi$ ). Загружая электродвигатель до номинального значения  $P_H$ , можно увеличить коэффициент мощности до значения  $\cos\varphi_H$ , соответствующего паспортным данным.

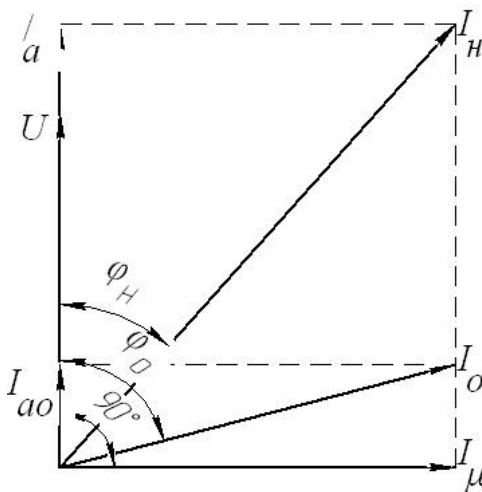


Рис. 11.1. Векторная диаграмма

Анализ векторной диаграммы (рис. 11.1) показывает, что увеличить значение  $\cos\varphi$  таким способом можно только до номинального значения (0,70–0,95). Дальнейшее повышение  $\cos\varphi$  возможно только за счет применения специальных технических средств. Чаще всего используются для этих целей статические конденсаторы, позволяющие компенсировать реактивный ток индуктивного характера  $I_H$ .

Конденсаторы подключаются параллельно электродвигателю. Так как емкостной ток  $I_C$  опережает напряжение питания на  $90^\circ$ , то он оказывается противоположно направленным току  $I_H$ . В результате геометрического сложения общий реактивный ток  $I_P$  уменьшается или становится равным 0. Эффект действия статических конденсаторов показан на рис. 11.2.

Следовательно, задача компенсации реактивной мощности сводится к подбору конденсаторных батарей, имеющих реактивный ток  $I_C$ , равный в предельном случае реактивному току  $I_P$ .

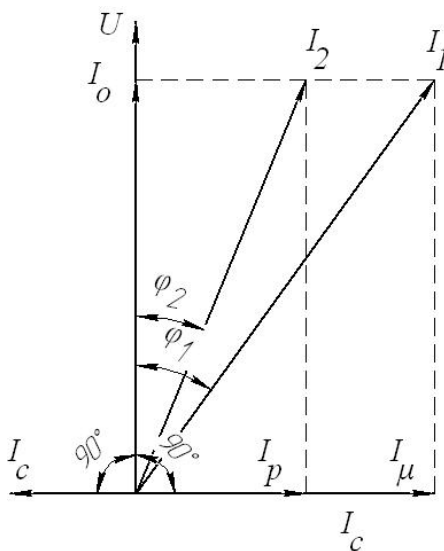


Рис. 11.2. Векторная диаграмма действия статических конденсаторов

В общем случае необходимая мощность  $Q$  (квар) статических конденсаторов определяется по формуле:

$$Q = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2).$$

где  $P$  – активная мощность двигателя или двигателей;

$\varphi_1$  – угол сдвига до компенсации реактивной мощности;

$\varphi_2$  – угол сдвига после компенсации реактивной мощности (желаемый).

Емкость трехфазной батареи статических конденсаторов (в микрофарадах) определяют по следующей формуле:

$$3C = \frac{Q \cdot 10^9}{\omega \cdot U^2},$$

где  $U$  – напряжение на конденсаторе, В;  
 $\omega$  – круговая частота,  $\omega = 314$  рад/с.

При отключении конденсаторов в целях безопасности они должны замыкаться на разрядные сопротивления  $R$  (рис. 11.3).

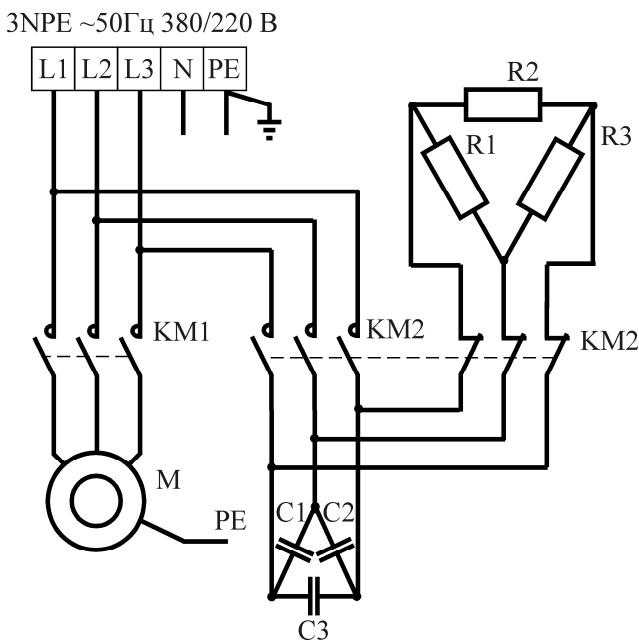


Рис. 11.3. Силовая схема лабораторной установки с конденсаторами замыкающимися на разрядные сопротивления

## Методика исследований

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с техническими характеристиками электродвигателя, пусковой и защитной

аппаратурой, приборов и записать их технические данные в табл. 11.1, 11.2.

Таблица 11.1

Технические данные электродвигателя

Тип	Мощность $P$ , кВт	Напряжение $U$ , В	Ток $I$ , А	$\cos\varphi$	$\eta$	Степень защиты	Примечание

Таблица 11.2

Технические данные аппаратов управления и защиты

Наименование аппаратуры	Тип	Ток $I$ , А	Напряжение $U$ , В	Примечание

Затем поочередно включать конденсаторную батарею, разделенную на три секции: в первой секции конденсаторы –  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$ , во второй и третьей –  $C4$ ,  $C5$ ,  $C6$  и  $C7$ ,  $C8$ ,  $C9$  соответственно.

Таблица 11.3

Результаты измерений

Состояние схемы	Напряжение $PV$ , В	Показания амперметра $PA1$ , А	Показания амперметра $PA2$ , А	Показания амперметра $PA3$ , А	$\cos\varphi$
Без компенсации					
Включена секция $C1$ , $C2$ , $C3$					
Включена секция $C4$ , $C5$ , $C6$					
Включена секция $C7$ , $C8$ , $C9$					



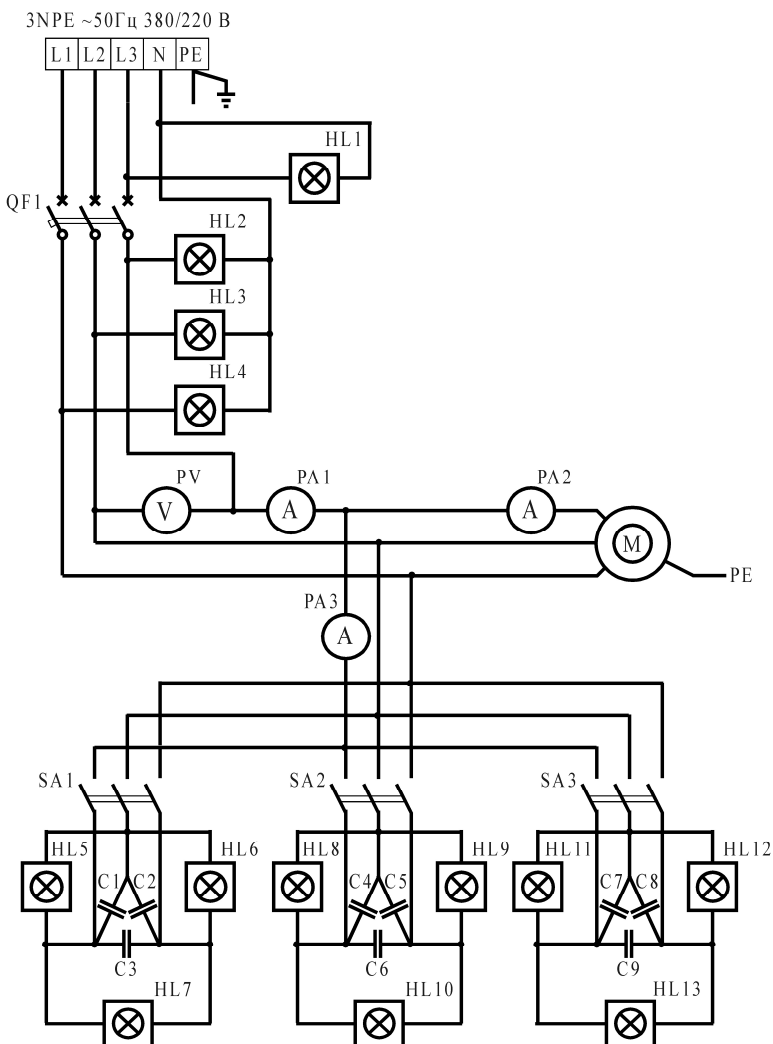


Рис. 11.4. Схема лабораторной установки

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Технические данные электродвигателя, приборов, пусковой и защитной аппаратуры.

3. Электрическая схема установки.
4. Таблица с опытными данными.
5. Формулы для выбора конденсаторных батарей.
6. Векторные диаграммы.
7. Расчет мощности и выбор конденсаторных батарей.
8. Выводы, пояснения.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем причина пояснения реактивного тока?
2. Что такое коэффициент мощности?
3. Как влияет загрузка электродвигателя на величину  $\cos\varphi$ ?
4. Какие существуют технические средства компенсации реактивной мощности?
5. Какие меры безопасности необходимо соблюдать при обслуживании конденсаторных батарей?

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

**Цель работы:** исследовать электропривод насосной установки с управлением по уровню.

### Задачи занятия

1. Изучить технологическую схему башенной насосной установки и режимы ее работы, управление одноагрегатными насосными установками.

2. Ответить в письменном виде на следующие вопросы: от каких параметров зависит частота включения насосного агрегата, подающего воду в водонапорную башню? какие датчики уровня используются в комплекте станции «Каскад» управления насосным агрегатом?

### Теоретические сведения

Стенд предназначен для проведения экспериментальных исследований систем автоматического регулирования (САР) электроприводов, применяемых в водоснабжении:

- 1) с регулированием по уровню;
- 2) с регулированием по давлению.

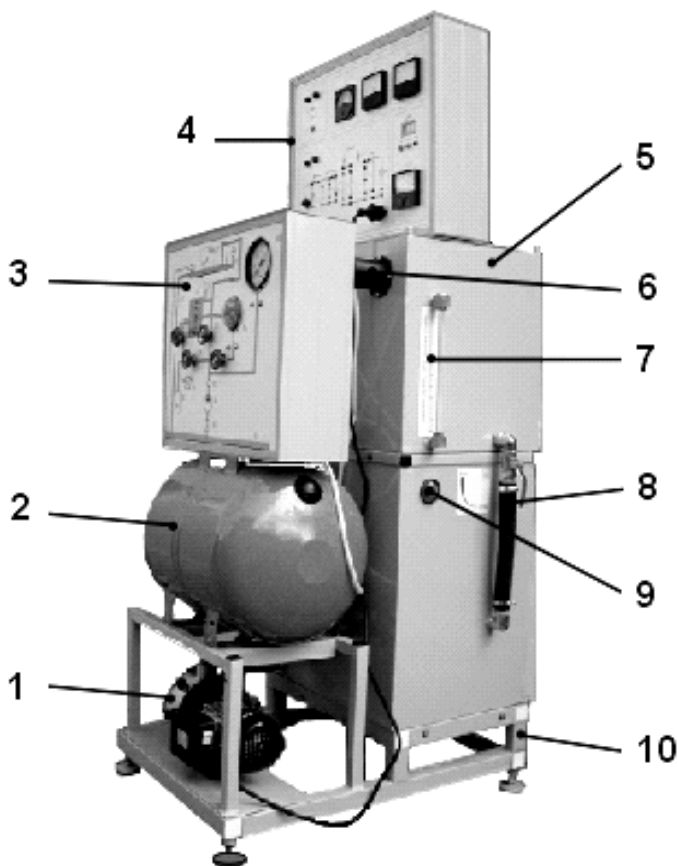
Общий вид стенда представлен на рис. 12.1.

В состав насосной установки входят центробежный насос (Н) и однофазный приводной электродвигатель. Номинальная мощность электродвигателя – 600 Вт. Тип насоса – КРМ 80.

Модули гидравлического и электрического управления, представляющие собой конструктивно законченные устройства, предназначены для управления, измерения регистрируемых величин и контроля работы стенда.

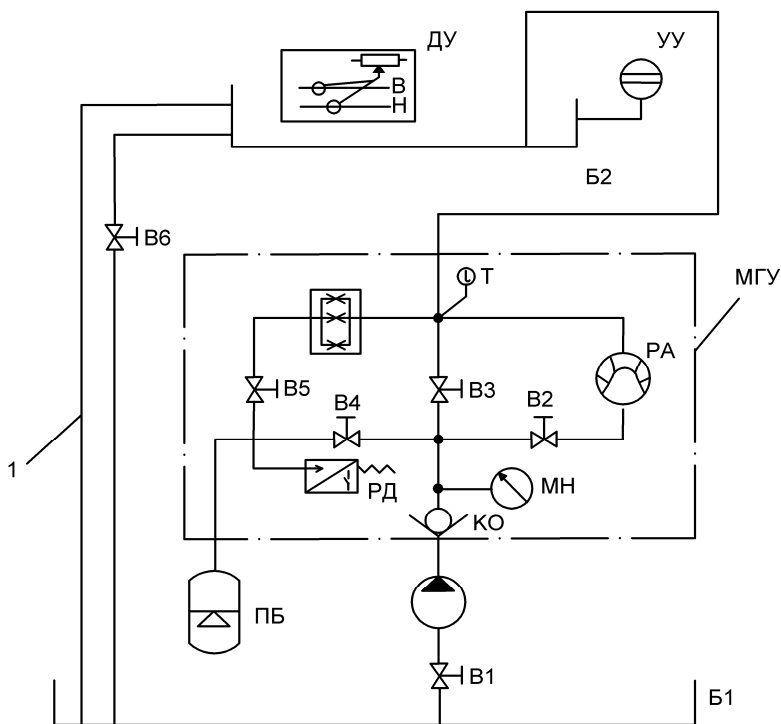
На рис. 12.2 приведена гидравлическая схема стенда (эта же схема показана на передней панели модуля гидравлического управления). В корпусе модуля гидравлического управления установлены все устройства, которые на гидравлической схеме (рис. 12.2) изображены внутри прямоугольника, выделенного

штрихпунктирной линией. Это следующие устройства: КО – клапан обратный; РД – реле давления; В1...В5 – вентили; П – имитатор потребителей воды;  $T$  – датчик температуры; РА – расходомер; МН – манометр.



*Рис. 12.1. Общий вид лабораторного стенда:*

- 1 – насосная установка; 2 – пневматический бак (ПБ);*
- 3 – модуль гидравлического управления (МГУ);*
- 4 – модуль электрического управления; 5 – гидробак верхний (Б2);*
- 6 – потенциометрический датчик уровня (ДУ);*
- 7 – указатель уровня воды в верхнем гидробаке (УУ); 8 – гидробак нижний (Б1);*
- 9 – указатель уровня воды в нижнем гидробаке (заменен на трубчатый указатель);*
- 10 – рама стенда*



*Рис. 12.2. Гидравлическая схема стенда:*  
 ДУ – потенциометрический датчик уровня;  
 УУ – указатель уровня воды в верхнем гидробаке; Б2 – гидробак верхний;  
 В1...В6 – вентили; Т – датчик температуры;  
 МГУ – модуль гидравлического управления; РА – расходомер;  
 РД – реле давления; КО – клапан обратный; МН – манометр;  
 ПБ – пневматический бак; П – имитатор потребителей воды;  
 Б1 – гидробак нижний

Обратный клапан в напорную линию насоса установлен с целью предотвращения утечек воды из пневматического бака ПБ через неработающий гидронасос Н в нижний гидробак Б1.

Вентиль В1 установлен во всасывающем трубопроводе, соединяющем нижний гидробак с насосом. Этот вентиль в процессе эксплуатации стенда всегда открыт. Закрывают вентиль при демонтаже насоса и проведении ремонтных работ. Вентиль В6 установлен в трубопроводе, соединяющем верхний и нижний гидробаки.

В дно верхнего гидробака вварена труба перелива (гидролиния 1 на рис. 12.2) с большим внутренним диаметром. Перелив предусмотрен на высоте 0,26 м от дна верхнего гидробака. Таким образом, максимальный уровень воды в верхнем гидробаке составляет 0,26 м. Вода из верхнего гидробака через трубу перелива перетекает в нижний гидробак. Благодаря этому при любых ситуациях, которые только могут возникнуть при работе стенда, в нижнем гидробаке всегда есть вода, что предотвращает выход из строя гидронасоса Н, так как работа насоса всухую невозможна.

На передней панели стенда размещен электронный секундомер, имеющий трехразрядное цифровое табло (СЕК) и кнопки управления секундомером («Вкл.» – включение питания; «Счет» – включение и выключение секундомера; «Сброс» – сброс показаний цифрового табло).

**Внимание:** при работе секундомера (когда идет подсчет времени) *запрещается нажимать* кнопку «Сброс».

В нижнем правом углу панели модуля электрического управления установлен прибор, регистрирующий температуру рабочей жидкости ( $t$ , °C).

В линиях питания электрической системы стенда (на входе) установлены предохранители  $FU1$ ,  $FU2$ ,  $FU3$  и  $FU4$ , а также предусмотрена световая индикация исправности электрической системы ( $HLI$ ).

Структурирование электрической системы стенда, которое необходимо выполнять перед началом каждой новой лабораторной работы, осуществляется путем установки перемычек со штекерами в гнезда, установленные на передней панели модуля электрического управления. Установка перемычек производится в соответствии со схемой электрических соединений, приводимой в методических указаниях к каждой лабораторной работе. Места установки перемычек на схемах отмечены «жирной» штриховой линией.

Включение питания стенда осуществляется путем установки тумблера «СЕТЬ» в верхнее положение. Тумблер расположен в верхнем левом углу передней панели модуля электрического управления.

## **Методика выполнения лабораторной работы**

1. Заправить нижний гидробак стенда водой. Для этого необходимо снять крышку (с установленным на ней модулем электрического

управления) верхнего гидробака и через трубу перелива заполнить нижний гидробак. Заправка бака осуществляется до верхней отметки указателя уровня, установленного в нижнем гидробаке (поз. 9, см. рис. 12.1).

2. Заземлить корпус стенда.

3. Перед включением установки необходимо собрать схему рис. 12.3 (на передней панели модуля электрического управления). Напряжение питания силовой части стенда составляет 230 В переменного тока (50 Гц). Напряжение питания потенциометрического датчика уровня – 12 В, ток постоянный.

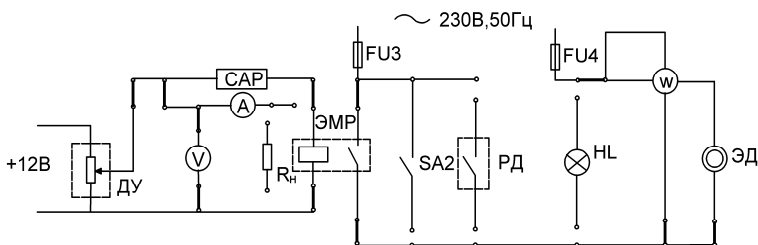


Рис. 12.3. Электрическая схема лабораторного стенда:

ДУ – потенциометрический датчик уровня (установлен в верхнем гидробаке,

поз. 6 на рис. 9.1); ЭМП – электромагнитное реле;

РД – реле давления (установлено в корпусе модуля гидравлического управления);

ЭД – электродвигатель привода гидронасоса;  $R_n$  – сопротивление нагрузки;

РА, PV, PW – амперметр, вольтметр, ваттметр соответственно;

HL2 – световой индикатор

4. На модуле гидравлического управления закрыть вентили В3, В4 и В5 (закрытие вентилей осуществляется путем вращения маховичка управления по часовой стрелке), а вентиль В2 – открыть. При работе насоса вода из нижнего бака будет подаваться в верхний бак через расходомер РА.

5. Включить на модуле электрического управления питание электронного секундомера (нажать кнопку «Вкл.»).

6. Провести четыре опыта при различных степенях открытия вентилей В6.

6.1. В первом опыте вентиль В6 закрыть полностью.

6.2. Зафиксировать начальное показание скоростного расходомера (РА) –  $V_{нач}$ . Результаты испытаний записать в табл. 12.1.

Таблица 12.1

## Результаты опытов

Номер опыта	Порядковый номер срабатывания установки	Время работы насосной установки при $i$ -м срабатывании, $t_p$ , с	Потребляемая мощность, $P$ , кВт	Начальное показание расходомера, $V_{нач}$ , м <sup>3</sup>	Конечное показание расходомера, $V_{кон}$ , м <sup>3</sup>	Продолжительность опыта, $t_{оп}$ , с
1	1					
	2					
2	1					
	2					
3	1					
	2					
4	1					
	2					

7. Включить электрическое питание стенда. Для этого тумблер «Сеть» на модуле электрического управления необходимо установить в верхнее положение и одновременно включить электронный секундомер, нажав кнопку «Счет». При этом насосная установка начнет подавать воду в верхний бак.

8. Отключить секундомер, нажав на кнопку «Пуск», в момент отключения насоса датчиком уровня. Зафиксировать показание скоростного расходомера  $V_{кон}$  и время работы установки  $t_p$ . Отключить питание стенда тумблером «Сеть».

9. Во втором опыте открыть В2 почти полностью (при этом рукоятку управления вентилем необходимо установить почти параллельно оси трубопровода).

10. Включить электрическое питание стенда в нижнем положении воды в баке. Для этого тумблер «Сеть» на модуле электрического управления необходимо установить в верхнее положение и одновременно включить электронный секундомер, нажав кнопку «Счет». При этом насосная установка начнет подавать воду в верхний бак. Одновременно вода будет вытекать из верхнего бака через вентиль В6. В дальнейшем она будет работать в автоматическом режиме.



11. При каждом срабатывании насосной установки необходимо (не останавливая секундомер) фиксировать время  $t_{pi}$ , в течение которого работает насосная установка, а также мощность  $W_{эл}$ , потребляемую из сети.

**Примечание.** Для получения мощности в ваттах показания ваттметра  $W$  необходимо умножать на 100.

12. Опыт закончить в момент полного опорожнения верхнего бака (или в момент третьего включения насосной установки). Нажав кнопку «Пуск», остановить секундомер. Тем самым фиксируется время проведения опыта  $t_{оп}$  (двух включений). Зафиксировать показание скоростного расходомера  $V_{кон}$ .

13. Для проведения третьего опыта (с двумя включениями) прикрыть вентиль В6 и добиться заметного уменьшения расхода воды из верхнего бака в нижний. Затем необходимо дождаться полного опорожнения верхнего бака, включить стенд (тумблер «Сеть») и нажать кнопку «Сброс» секундомера. Далее действовать согласно пункту 7.

14. После проведения четырех опытов (по два включения) необходимо отключить электрическое питание стенда и снять перемычки со штекерами с модуля электрического управления.

15. Произвести расчеты по формулам 12.1–12.6 и записать результаты в табл. 12.2.

Средняя подача насоса:

$$Q_{ср.нас} = \frac{V_{кон} - V_{нач}}{t_{p1} + t_{p2}}, \quad (12.1)$$

где  $t_{p1}$ ,  $t_{p2}$  – время работы насосной установки в каждом опыте при первом и втором включениях, с.

Средний расход (потребителя):

$$Q_{ср.нас} = \frac{V_{кон} - V_{нач}}{t_{оп}}, \quad (12.2)$$

Потребляемая в течение опыта энергия:

$$W = \sum_{i=1}^2 P_i (t_{p1} + t_{p2}). \quad (12.3)$$

При вычислении  $W$  необходимо значение  $P_i$  подставлять в кВт, а  $t_{pi}$  – в часах.

Число включений в час:

$$Z = \frac{3600}{\frac{t_{оп}}{2}}. \quad (12.4)$$

Регулируемый объем верхнего бака:

$$V = V_{кон} - V_{нач}. \quad (12.5)$$

Максимальное число включений в час:

$$Z_{max} = \frac{Q_{ср.нас.}}{4V}. \quad (12.6)$$

Таблица 12.2

Результаты расчетов

Номер опыта	Средняя подача насоса, $Q_{ср.нас.}$ , м <sup>3</sup> /с	Средний расход воды, $Q_{ср.нас.}$ , м <sup>3</sup> /с	Потребляемая энергия, $W$ , кВт·час	Число включений в час, $Z$
1				
2				
3				
4				

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Ответы на контрольные вопросы.

3. Технологическая схема стенда.
4. Таблицы 12.1 и 12.2.
5. Расчеты по формулам 12.1–12.6.
6. Графические зависимости  $W = f(Q_{\text{ср.расх}})$ ;  $Z = f(Q_{\text{ср.расх}})$ .

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Где устанавливается обратный клапан? Для чего он используется?
2. Как устроен датчик уровня, применяемого в лабораторном стенде.
3. Объясните графические зависимости  $W = f(Q_{\text{ср.расх}})$  и  $Z = f(Q_{\text{ср.расх}})$ , полученные в результате опытов.
4. Объясните название и назначение элементов функциональной схемы *САР* насосной установки с управлением по уровню.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ**

**Цель работы:** изучить назначение, принцип действия и конструкцию преобразователя частоты; изучить основные параметры для программирования преобразователя частоты и их назначение; исследовать механические характеристики асинхронного электродвигателя при частотном регулировании его скорости.

**Студент должен знать:** принцип действия и конструкцию преобразователя частоты.

**Студент должен уметь:** строить механическую характеристику асинхронного электродвигателя при частотном регулировании его частоты вращения.

### **Порядок выполнения**

1. Ознакомиться с представленным на стенде преобразователем частоты.
2. Изучить схему управления и произвести включение преобразователя частоты.
3. По индивидуальному заданию произвести программирование преобразователя частоты.
4. Построить механические характеристики электродвигателя при различных частотах вращения.

### **Теоретические сведения**

#### **Преимущества использования регулируемого электропривода в технологических процессах**

Применение регулируемого электропривода обеспечивает энергосбережение и позволяет получать новые качества систем и объектов. Значительная экономия электроэнергии обеспечивается за счет регулирования какого-либо технологического параметра. Если это транспортер или конвейер, то можно регулировать скорость его движения; если это насос или вентилятор – поддерживать давление или регулировать производительность; если это станок, то можно плавно регулировать скорость подачи или главного движения.

Особый экономический эффект от использования преобразователей частоты дает применение частотного регулирования на объектах, обеспечивающих транспортировку жидкостей. До сих пор самым распространенным способом регулирования производительности таких объектов является использование задвижек или регулирующих клапанов, но сегодня доступным становится частотное регулирование асинхронного двигателя, приводящего в движение, например, рабочее колесо насосного агрегата или вентилятора.

### **Структура преобразователя частоты**

Большинство современных преобразователей частоты построено по схеме двойного преобразования. Они состоят из следующих основных частей: звена постоянного тока (неуправляемого выпрямителя), силового импульсного инвертора и системы управления.

Звено постоянного тока состоит из неуправляемого выпрямителя и фильтра. Переменное напряжение питающей сети преобразуется в нем в напряжение постоянного тока.

Силовой трехфазный импульсный инвертор состоит из шести транзисторных ключей. Каждая обмотка электродвигателя подключается через соответствующий ключ к положительному и отрицательному выводам выпрямителя. Инвертор осуществляет преобразование выпрямленного напряжения в трехфазное переменное напряжение нужной частоты и амплитуды, которое прикладывается к обмоткам статора электродвигателя.

В выходных каскадах инвертора в качестве ключей используются силовые IGBT-транзисторы. По сравнению с тиристорами, они имеют более высокую частоту переключения, что позволяет вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы с минимальными искажениями.

### **Принцип работы преобразователя частоты**

Преобразователь частоты (ПЧ) состоит из неуправляемого диодного силового выпрямителя В, автономного инвертора (АИН), системы управления СУИ ШИМ, системы автоматического регулирования (САР), дросселя  $L_B$  и конденсатора фильтра  $C_B$  (рис. 13.1). Регулирование выходной частоты  $f_{\text{вых}}$  и напряжения  $U_{\text{вых}}$  осуществляется в АИН за счет высокочастотного широтно-импульсного (ШИМ) управления. ШИМ характеризуется периодом модуляции, внутри которого обмотка статора ЭД подключается

поочередно к положительному и отрицательному полюсам выпрямителя. Длительность этих состояний внутри периода ШИМ модулируется по синусоидальному закону. При высоких (обычно 2–15 кГц) тактовых частотах ШИМ в обмотках электродвигателя, вследствие их фильтрующих свойств, текут синусоидальные токи.

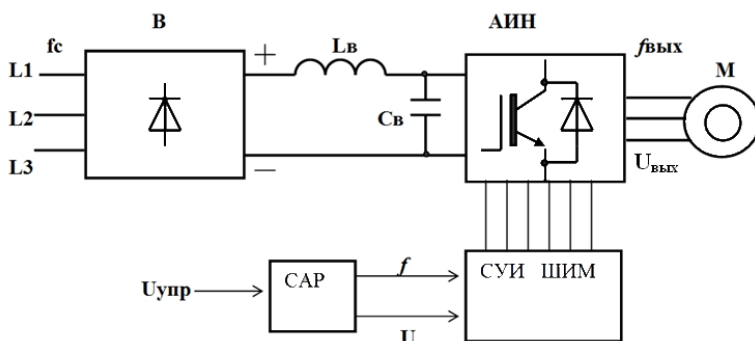


Рис. 13.1. Упрощенная схема автономного инвертора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)

Таким образом, форма кривой выходного напряжения представляет собой высокочастотную двухполярную последовательность прямоугольных импульсов (рис. 13.2). Частота импульсов определяется частотой ШИМ, длительность (ширина) импульсов в течение периода выходной частоты АИН промодулирована по синусоидальному закону. Форма кривой выходного тока (тока в обмотках асинхронного электродвигателя) практически синусоидальна.

Регулирование выходного напряжения АИН можно осуществить двумя способами: амплитудным (АР) за счет изменения входного напряжения  $U_B$  и широтно-импульсным (ШИМ) за счет изменения программы переключения вентилях  $V1-V6$  при  $U_B = \text{const}$ . Второй способ получил распространение в современных преобразователях частоты благодаря развитию современной элементной базы (микропроцессоры, IGBT-транзисторы). При ШИМ-модуляции форма токов в обмотках статора АД получается близкой к синусоидальной благодаря фильтрующим свойствам самих обмоток.

Такое управление позволяет получить высокий КПД преобразователя и эквивалентно аналоговому управлению с помощью частоты и амплитуды напряжения.

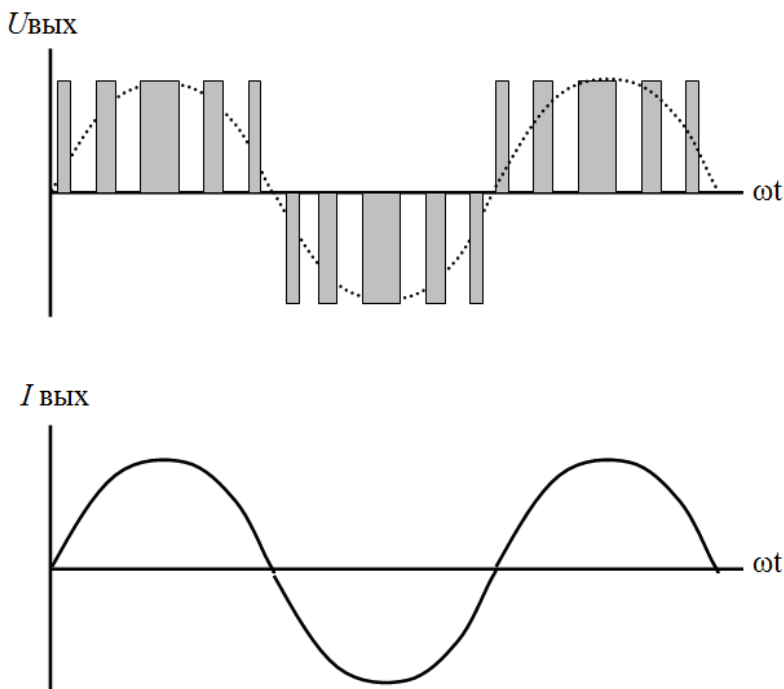


Рис. 13.2. Форма кривых напряжения и тока на выходе инвертора с широтно-импульсной модуляцией

Современные инверторы выполняются на основе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов – запираемых GTO-тиристоров, либо биполярных IGBT-транзисторов с изолированным затвором. На рис. 13.3 представлена трехфазная мостовая схема автономного инвертора на IGBT-транзисторах. Она состоит из входного емкостного фильтра  $C_{\Phi}$  и шести IGBT-транзисторов  $V1-V6$  включенными встречно-параллельно диодами обратного тока  $D1-D6$ . За счет поочередного переключения вентилей  $V1-V6$  по алгоритму, заданному системой управления, постоянное входное напряжение  $U_{\text{в}}$  преобразуется в переменное прямоугольно-импульсное выходное напряжение. Через управляемые ключи  $V1-V6$  протекает активная составляющая тока асинхронного электродвигателя АД, через диоды  $D1-D6$  – реактивная составляющая тока АД.

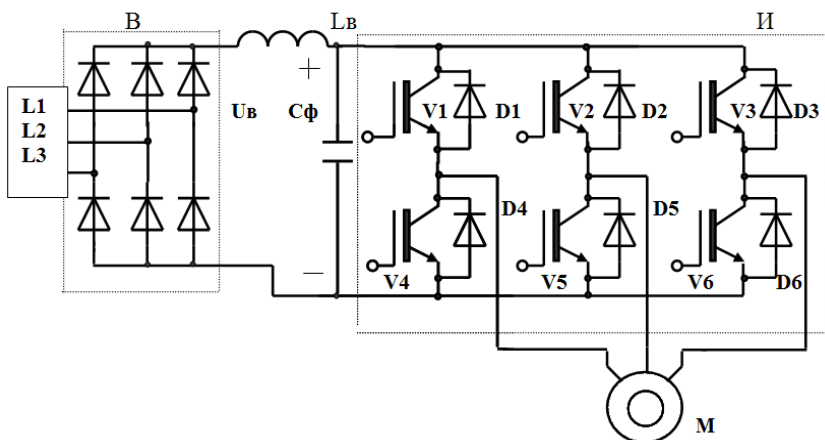


Рис. 13.3. Схема инвертора:  
И – трехфазный мостовой инвертор; В – трехфазный мостовой выпрямитель;  
 $C_{\Phi}$  – конденсатор фильтра

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из асинхронного электродвигателя, который подключен к трехфазной сети 380 В (50 Гц) через преобразователь частоты. Нагрузка на валу асинхронного электродвигателя создается генератором. Валы генератора и электродвигателя соединены муфтой. Генератор нагружен реостатами  $R2$ ,  $R3$ ,  $R4$  и лампами накаливания  $HL3$ – $HL7$ . Ток нагрузки можно изменять подключением различного числа ламп, а также регулированием тока обмотки возбуждения генератора при помощи реостата  $R1$ . Частота вращения электродвигателя измеряется тахометром. Автоматические выключатели  $QF1$ ,  $QF3$  предназначены для включения электродвигателя и источника питания обмотки возбуждения генератора в сеть, а также защиты их цепей от перегрузки и коротких замыканий. Мощность, напряжение и ток на входе преобразователя измеряются ваттметром  $PW$ , вольтметром  $PV1$  и амперметром  $PA1$ . Выходные ток и напряжение генератора измеряют вольтметром  $PV2$  и амперметрами  $PA2$  и  $PA3$ . Частота выходного напряжения и параметры настройки частотного преобразователя отображаются на его цифровом индикаторе.



Схема лабораторной установки представлена на рисунке 13.4.

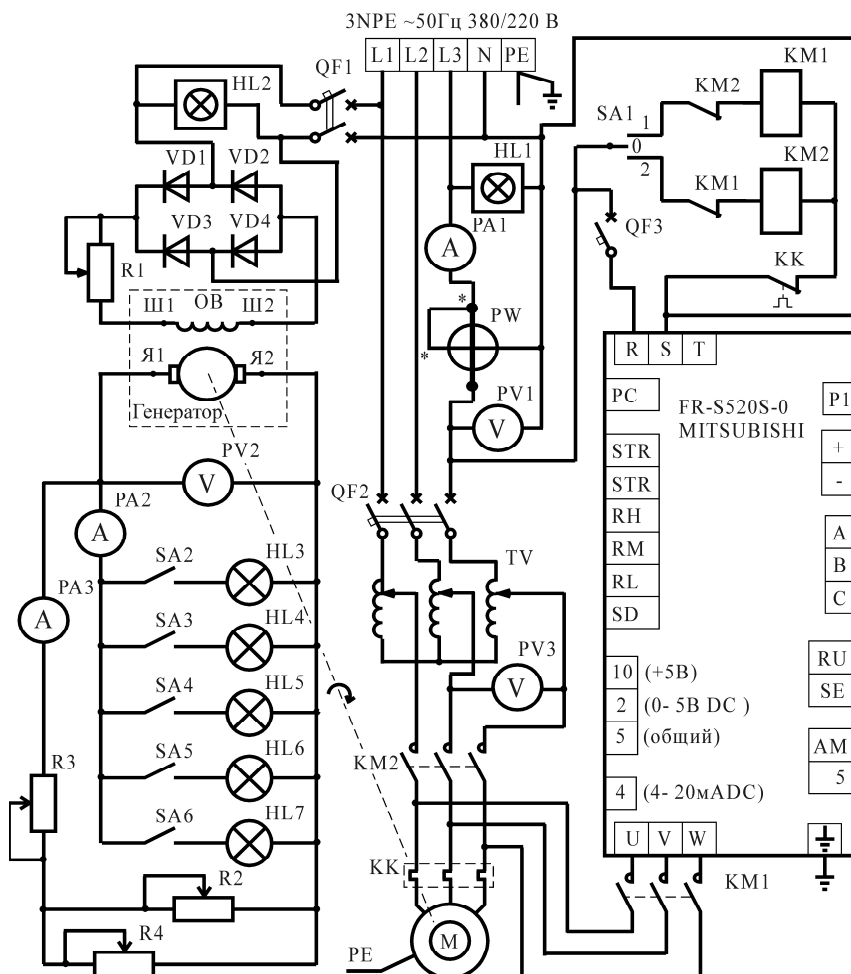


Рис. 13.4. Схема лабораторной установки

### Методика исследования

1. В соответствии с программой работы изучить назначение, устройство и принцип действия частотного преобразователя.

2. Включить установку автоматическим выключателем.
3. Выбрать режим управления преобразователем частоты: для работы с пульта ПЧ нажать на кнопку *PU*; для внешнего управления повторно нажать на кнопку *PU* (режим работы отображается индикаторами *PU* и *EXT*).
4. Для пуска привода с пульта *ПЧ* нажать на кнопку *RUN*.
5. Для остановки привода с пульта нажать на кнопку *STOP/RESET*.
6. Проверить состояние индикаторов *RUN*, *PU*, *EXT*. Преобразователь должен находиться в режиме управления с пульта (нажать на кнопку *PU/EXT*).
7. Нажать на кнопку *MODE* для выбора режима задания параметра.
8. Вращать задатчик до появления нужного номера параметра (см. список перечня параметров).
9. Нажать на кнопку *SET* для индикации установленной величины.
10. Вращением задатчика установить нужное значение параметра.
11. Нажать на кнопку *SET* для установки выбранного значения параметра.
12. После завершения настройки параметра нажать на кнопку *MODE* один раз, чтобы просмотреть сообщение защиты, или два раза, чтобы вернуться к индикации выходной частоты.
13. Для настройки или изменения других параметров выполнить пункты 6–12.

***Пример 1. Задание частоты 15 Гц (параметр P1)***

1. Выбрать режим управления с пульта.
2. Нажать на кнопку *MODE* для выбора режима задания параметров.
3. Вращать задатчик до появления нужного параметра *P1*.
4. Нажать на кнопку *SET* для индикации установленной величины.
5. Вращением задатчика установить значение 15.0, которое мигает около 5 с; за это время нажать на кнопку *SET* для установки частоты.
6. После мигания индикатора в течение 3 с установится значение 0.0.
7. Нажать на кнопку *RUN* для пуска двигателя. После его разгона на индикаторе отображается значение заданной частоты.

**Пример 2. Установка времени разгона (параметр P7)**

1. Выбрать режим управления с пульта.
2. Нажать на кнопку *MODE* для выбора режима задания параметров.
3. Вращать задатчик до появления нужного параметра P7.
4. Нажать на кнопку *SET* для индикации установленной величины.
5. Вращением задатчика установить время разгона в секундах (например, 10.0).
6. Нажать на кнопку *SET* для установки выбранного значения.
7. Нажать на кнопку *MODE* два раза.

По заданию преподавателя произвести изменения указанных параметров.

**Методика исследования механических характеристик  
асинхронного электродвигателя при частотном  
регулировании скорости**

1. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами, входящими в состав лабораторной установки.

2. Изучить схему лабораторной установки (рис. 13.4).

Механическую характеристику начинают снимать с точки, соответствующей холостому ходу электродвигателя. Для этого нагрузка генератора должна быть отключена.

3. Снять механические характеристики асинхронного электродвигателя при различных частотах, устанавливаемых на выходе ПЧ по заданию преподавателя.

4. Результаты измерений занести в таблицу 13.1.

Механическую характеристику, снятую опытным путем, построить для двух значений частоты на одном графике. При построении графиков  $M = f(\omega)$  и  $M = f(s)$  текущие значения угловой скорости  $\omega$  и скольжения  $s$  определить по формулам:

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

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega},$$

где  $w_0$  – синхронная угловая скорость, рад/с.

Таблица 13.1

Результаты измерений

Частота на выходе преобразователя $f$ , Гц	№ опыта	Результаты измерений						Расчетные результаты				
		Электродвигатель				Нагрузка						
		$PW$ , Вт	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$I_{\text{сум}}$ , А	$w$ , рад/с	$s$	$M$ , Н·м
30	1											
	2											
	3											
	4											
40	1											
	2											
	3											
	4											
50	1											
	2											
	3											
	4											

$$w_0 = \frac{2\pi f}{p},$$

где  $f$  – частота питающего тока, Гц;  
 $p$  – число пар полюсов ( $p = 2$ ).

Ток на выходе генератора рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{сум}} = I_2 + I_3,$$

где  $I_2$  – ток через лампы накаливания, А;

$I_3$  – ток через реостаты, А.

Мощность на выходе генератора рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{в}} = I_{\text{сум}} U_2,$$

где  $U_2$  – напряжение на выходе генератора, В.

Момент на валу электродвигателя определяют по формуле (Н·м):

$$M = P_{\text{в}} / \omega.$$

### **Содержание отчета**

1. Тема и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки.
3. Описание смены параметров для своего варианта.
4. Графики зависимостей угловой скорости электродвигателя от момента  $\omega = f(M)$  при различных частотах вращения.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой принцип действия частотного регулирования скорости АД?
2. Какие преимущества частотного способа регулирования скорости электродвигателя?
3. Как объяснить законы изменения напряжения при изменении частоты (при  $M_{\text{с}} = \text{const}$ , при вентиляторном характере нагрузки и при моменте сопротивления, обратно пропорциональном скорости)?

4. Какие существуют способы регулирования частоты вращения исполнительных механизмов в электроприводе?
5. Как объяснить структуру преобразователя частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока?
6. Как объяснить назначение трехфазного силового инвертора в ПЧ?
7. Как объяснить принцип работы ПЧ?
8. Как объяснить принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ) при регулировании выходного напряжения ПЧ?

## НАЛАДКА И ИСПЫТАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ТОКА

**Цель работы:** изучить правила эксплуатации преобразователя частоты в составе асинхронного регулируемого электропривода и освоить его диагностику.

**Студент должен знать:** принцип программирования основных параметров действия преобразователя частоты.

**Студент должен уметь:** производить настройку параметров преобразователя частоты тока.

### Порядок выполнения

1. Изучить основные правила эксплуатации преобразователей частоты (ПЧ) для асинхронного регулируемого электропривода.
2. Изучить техническую документацию и схему включения ПЧ FRS520S.
3. Изучить правила присоединения внешних устройств и цепей питания к ПЧ.
4. Изучить правила монтажа и установки ПЧ в шкаф управления.
5. Выполнить подготовку ПЧ к включению и произвести его наладку в соответствии с заданием преобразователя.

### Методика исследования

1. Основные правила по эксплуатации ПЧ.

Являясь сложными электронными устройствами, ПЧ и УПП требуют тщательного анализа и настройки пользовательских параметров, количество которых может исчисляться десятками и сотнями в зависимости от применяемых моделей и сложности решаемых задач.

Обслуживание современных ПЧ, так же как и их настройка, требует специальной подготовки технического персонала. Решение проблемы своевременного и аварийного обслуживания приводной техники может быть выполнено двумя способами. Первый способ – это создание своей собственной сервисной службы непосредственно

на производстве, а второй – это передача функций обслуживания оборудования специализированной организации, занимающейся решением таких задач на профессиональном уровне.

**Периодическое обслуживание преобразователей частоты.** Главным фактором, определяющим срок службы ПЧ и его безребойную эксплуатацию, является правильное и своевременное обслуживание. По существующей статистике, выход электроприбора из строя в подавляющем ряде случаев связан с нарушениями в его эксплуатации или обслуживании. Необходимо периодически проверять работоспособность вентиляторов. В основном, производители ПЧ рекомендуют производить проверку не реже, чем раз в полгода, а превентивную замену производить один раз в три года. Под воздействием частого заряда и разряда, а также под воздействием повышенной температуры со временем происходит старение электролитических конденсаторов ПЧ, что характеризуется уменьшением их номинальной емкости или возникновением внутренних пробоев.

При пониженной емкости конденсаторов, возникают сбои в системе управления ПЧ, иногда это приводит к выходу из строя источников питания или других цепей управления. Основной рекомендацией является периодическая замена конденсаторов.

Следует периодически проверять падение напряжения на контактах и реле цепей питания ПЧ, а также на силовых полупроводниковых предохранителях защиты. Периодически нужно проверять затяжку силовых винтов, болтов и гаек ответственных соединений ПЧ. Как правило, проверку делают один раз в год, хотя для оборудования, где присутствует сильная вибрация, периодичность проверки следует увеличить. Ослабление затяжки крепежа в точках силовых соединений приводит к возникновению ошибок потери фаз и заканчивается пробоем силовых полупроводниковых элементов (диодов, IGBT-транзисторов) или прогоранием металла шин в точках контакта.

Проверка и плановое обслуживание позволяют предотвратить многие проблемы, но не гарантируют безаварийную работу ПЧ.

На сегодняшний день ни один производитель не обеспечивает достаточно эффективную защиту ПЧ от выхода из строя в результате перегрузок.



Это объясняется тем, что управление защитой реализовано в контроллере ПЧ и пока сигнал о перегрузке на выходе ПЧ будет им обработан и будет дана команда на закрытие выходных транзисторов, некоторые из них уже повреждаются и в режиме пробоя создают замыкание шин постоянного тока.

После выхода преобразователя частоты из строя недопустимо его немедленное повторное включение. Как правило, повторный запуск неисправного ПЧ влечет к еще большим повреждениям. Состояние ПЧ должно быть тщательно проанализировано посредством проведения диагностики. Если на дисплее отображается какой-нибудь аварийный код, то следует проанализировать, что он означает, в дальнейшем эта информация позволит быстрее выявить возникшую проблему. Если на дисплее ПЧ ничего не отображается или его просто нет, то следует проверить наличие опорного напряжения 24 В на соответствующих клеммах платы управления, воспользовавшись схемой подключения в документации на ПЧ. В случае отсутствия напряжения на клеммах платы управления следует обратиться в сервисный центр.

Обычно выполняется еще и проверка силовой части. Перед осуществлением данной процедуры следует дождаться, пока разрядятся конденсаторы шины постоянного тока (см. инструкцию по эксплуатации ПЧ [8]). Время, необходимое на их разряд, составляет 10–15 мин.

Для проверки силовых цепей необходимо установить мультиметр в режим прозвонки диодов, соединить «—» мультиметра и клемму «+» частотного преобразователя, затем поочередно установить «+» мультиметра на клеммы  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ ,  $U$ ,  $V$ ,  $W$ . В данном случае  $P-N$  переход диодов будет открыт и показания мультиметра будут 0,3...0,6 Ом. Затем соединяют «+» мультиметра и «+» преобразователя, а «—» мультиметра поочередно соединяют с клеммами  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ ,  $U$ ,  $V$ ,  $W$ . В данном случае переходы диодов закрыты и мультиметр показывает обрыв. Аналогично проверяют второе плечо инвертора выпрямителя (сначала «+», а потом «—» мультиметра соединяют с клеммой «—» преобразователя частоты). Результаты проверки сравнивают с результатами в табл. 14.1.

Если показания мультиметра не соответствуют приведенным в таблице, то это говорит о том, что имеются повреждения силовой части, поэтому следует обратиться в службу сервиса для обеспечения дальнейшей диагностики и ремонта ПЧ.

Таблица 14.1

## Регламент проверки силовых цепей преобразователей частоты

Проверяемый элемент	«+» мультиметра	«-» мультиметра	Показания мультиметра
Входной мост	Клемма «+» ПЧ	Клемма $L1$ , $L2$ , $L3$	(обрыв)
	Клемма «-» ПЧ	Клемма $L1$ , $L2$ , $L3$	$P-N$ – переход открыт
IGBT-транзисторов	Клемма $U$ , $V$ , $W$	Клемма «-» ПЧ	(обрыв)
	Клемма «-» ПЧ	Клемма $U$ , $V$ , $W$	$P-N$ – переход открыт

Методики, перечисленные выше, не дают однозначного заключения об исправности ПЧ, они лишь позволяют примерно определить неисправность на начальном уровне. Если источник возникновения неисправности определить не удастся, то производится превентивная замена плат и других компонентов.

## 2. Техническая документация и схема включения ПЧ FRS-520S.

На рис. 14.1 представлена электрическая принципиальная схема включения ПЧ с указанием присоединения силовых цепей и цепей управления. Подробное описание этой схемы приведено в заводской инструкции по эксплуатации ПЧ FRS-520S [8].

## 3. Правила присоединения внешних устройств и цепей питания к ПЧ.

На рис. 14.2 приведена схема присоединения силовых контактов преобразователя частоты. Для ПЧ с однофазным питанием, напряжение сети 220 В (50 Гц) подводится к контактам  $L1$ ,  $N$ . Трехфазный асинхронный электродвигатель подключен к силовым контактам  $\overline{U}$ ,  $V$ ,  $W$ . Между контактом « $P1$ » и «+» устанавливается «перемычка».

Подключение должно производиться кабелем с медными жилами сечением не менее 2 мм<sup>2</sup>.

Длина кабеля на участке от клемм  $U$ ,  $V$ ,  $W$  преобразователя частоты не должна превышать 100 мм. Не допускается подключение питающего кабеля к выходным клеммам ПЧ  $\overline{U}$ ,  $V$ ,  $W$ .

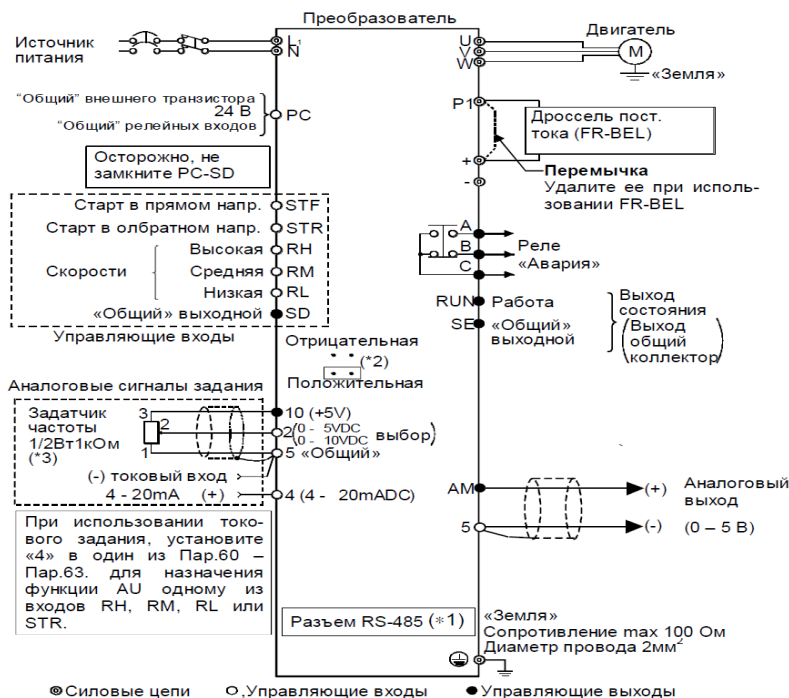


Рис. 14.1. Электрическая принципиальная схема включения ПЧ с указанием присоединения силовых цепей и цепей управления

### ● FR-S520S-0.2K, 0.4K, 0.75K-EC (R)

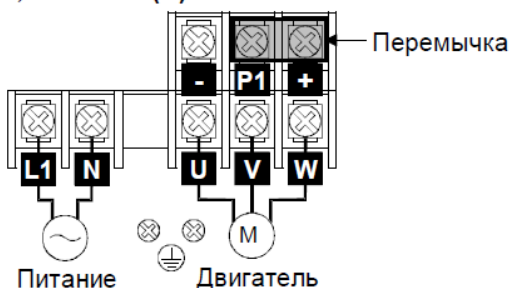



Рис. 14.2. Схема присоединения силовых контактов преобразователя частоты

В табл. 14.2 приведено описание силовых цепей ПЧ, в табл. 14.3 – цепей управления.

Таблица 14.2

## Описание силовых цепей ПЧ

Обознач.	Название	Описание
R, S, T*	Питание	Подключение к стандартным источникам питания.
U, V, W	Выходы	Подключение трехфазного асинхронного двигателя.
-	Минус звена пост. тока	Клемма гальванически связана с силовым питанием и выходами преобразователя.
+, P1	Подключение дросселя постоянного тока	При подключении, удалите перемычку + - P1 и подсоедините дроссель (FR-BEL).
	"Заземление"	Клемма заземления корпуса преобразователя. Заземлите.

\* L1. N обозначения для однофазного питания

Перечень основных параметров ПЧ приведен в табл. 14.3 «Перечень основных параметров».

Таблица 14.3

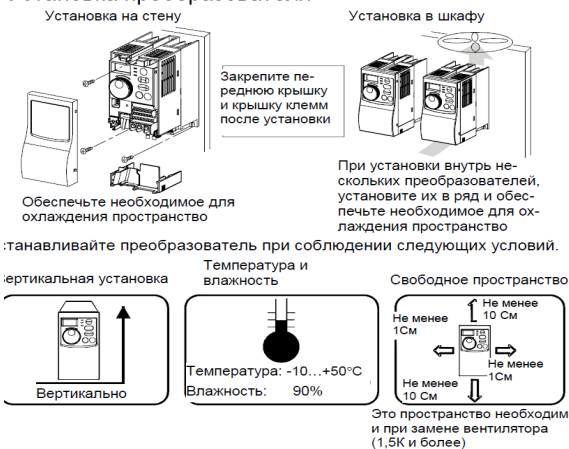
## Описание цепей управления ПЧ

Обознач.	Название	Описание	
Входные сигналы	Входные команды	STF Пуск в прямом направлении	Подайте STF для пуска в прямом направлении и снимите для останова.
		STR Пуск в обратном направлении	Подайте STR для пуска в реверсном направлении и снимите для останова.
		RH RM RL Многоскоростной режим	Используйте для выбора уставок скорости RH, RM и RL. Приоритеты задания скорости: Jog, RH, RM, RL, REX и AU.
		SD (*1) "Общий" вход (отриц. логика)	Используется для подачи команд (STF, STR, RH, RM, RL). «Общий» для выхода FM. Не связан с 5 и SE.
		PC (*1) 24 В (положительная логика)	При управлении преобразователем от выходов типа «открытый коллектор», подсоедините «общий» контакт к этой клемме для предотвращения сбоев вызываемых токами утечки. "Общая точка" для напряжения 24 В 0,1 А (клемма PC). Используется для выдачи команд при выборе положительной логики управления.
		10 Задатчик частоты	5В постоянного тока, нагрузочная способность - 10mA
	Задание частоты	2 Задание частоты (напряжение)	Выходная частота пропорциональна напряжению на входе. Максимальная выходная частота достигается при 5В (10В). С помощью Пар.73 выбирается диапазон задания 5 или 10 В. Входное сопротивление 10 кОм, допустимое напряжение 20В.
		4 Задание частоты (ток)	Выходная частота пропорциональна входному току (4...20mA). Максимальная частота соответствует 20mA. Входное сопротивление 250 кОм. Допустимый входной ток 30 mA. Токое задание действует только при подаче сигнала AU. Для программирования входа AU используйте Пар.60 – 63.

#### 4. Правила монтажа и установки ПЧ.

Преобразователь частоты рекомендуется устанавливать в металлический шкаф. Размеры шкафа должны обеспечивать необходимое пространство для охлаждения преобразователя частоты (см. инструкцию по эксплуатации ПЧ). Допускается установка ПЧ на стене (рис. 14.3). Для уменьшения помех, генерируемых ПЧ в сеть, рекомендуется использовать сетевые дроссели [2]. Основная конфигурация оборудования для включения в сеть и для подключения электродвигателя приведена на рис. 14.4. Для уменьшения помех, генерируемых ПЧ в сеть, рекомендуется использовать сетевые дроссели [2]. Основная конфигурация оборудования для включения в сеть и для подключения электродвигателя приведена на рис. 14.4.

##### Установка преобразователя



- Не устанавливайте и не используйте преобразователь при наличии хотя бы одного из ниже перечисленных условий:



Рис. 14.3. Установка ПЧ

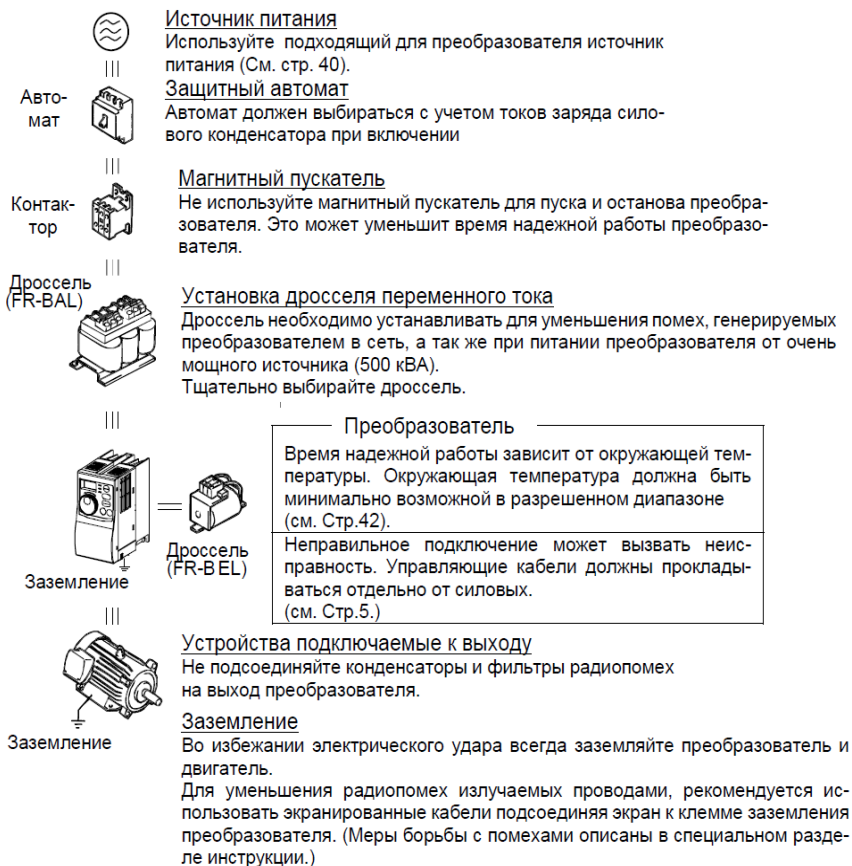


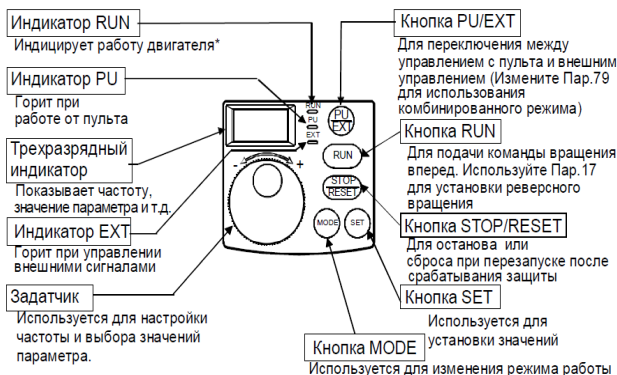
Рис. 14.4. Основная конфигурация ПЧ

5. Подготовка ПЧ к включению и его наладку в соответствии с заданием преподавателя.

Перед включением преобразователя частоты изучить назначение органов управления и индикации по рис. 14.5.

Изучить основные операции по настройке ПЧ в соответствии с рисунками 6 (Основные операции), рис. 14.7 (Задание частоты), рис. 14.8 (Установка параметров), рис. 14.9 (Изменение настройки), рис. 14.10 (Контроль выходного тока), рис. 14.11 (Сброс параметров).

## <Пульт управления>



\* Индикатор RUN горит при вращении вперед  
редко мигает (через 1.4 с): при реверсном вращении  
часто мигает (через 0.2 с): показывает, что операция не  
выполняется, но кнопка **RUN** нажата  
или была выдана команда

Рис. 14.5. Общий вид пульта управления ПЧ и назначение органов управления

## < Основные операции > (Заводская установка)

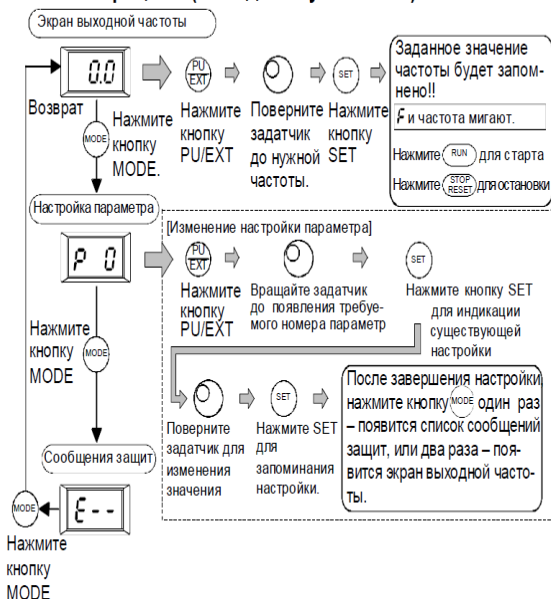


Рис. 14.6. Основные операции, выполняемые ПЧ и порядок настройки

## Задание частоты (Пример: задание частоты 30Гц)

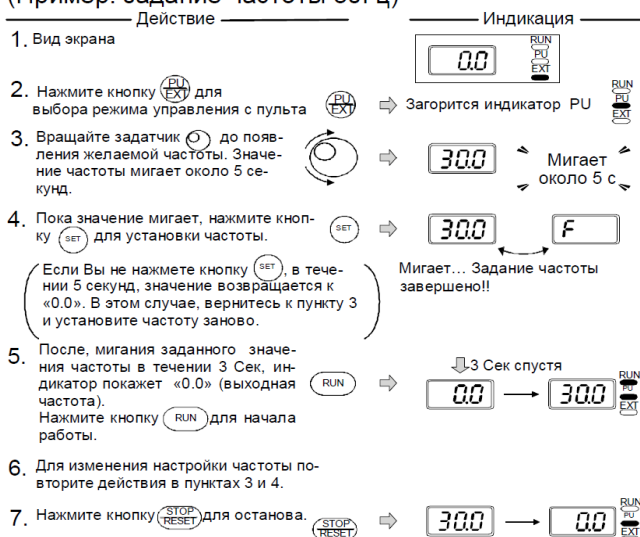
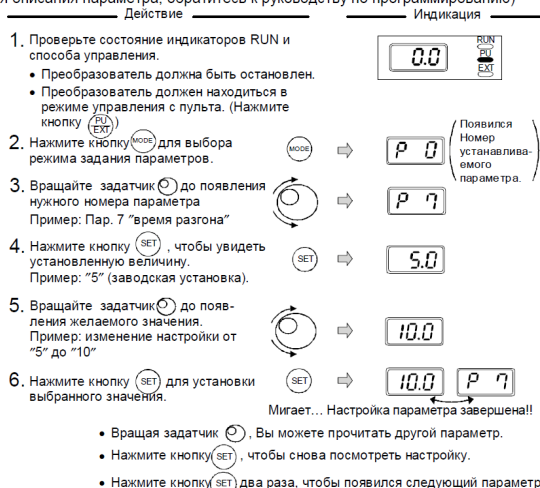


Рис. 14.7. Задание частоты

(Для описания параметра, обратитесь к руководству по программированию)




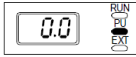










- Вращая задатчик , Вы можете прочитать другой параметр.
- Нажмите кнопку , чтобы снова посмотреть настройку.
- Нажмите кнопку два раза, чтобы появился следующий параметр




После завершения настройки параметра, нажмите кнопку один раз, чтобы просмотреть сообщения защит, или два раза, чтобы вернуться к экрану индикации выходной частоты. Для изменения настроек других параметров, выполните выше-описанные действия в пунктах 3-6.

Рис. 14.8. Установка параметров



(Для описания параметра, обратитесь к руководству по программированию)

Действие	Индикация
1. Проверьте показания индикаторов RUN и способа управления. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Преобразователь должен быть остановлен.</li> <li>• Преобразователь должен находиться в режиме управления с пульта. (Нажмите кнопку )</li> </ul>	
2. Нажмите кнопку  для выбора режима задания параметра.	 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;">             (Появился номер устанавливаемого параметра.)           </div>
3. Вращайте задатчик  до появления P30 (Пар.30).	
4. Нажмите кнопку  , для индикации установленного значения. "0" (заводская установка).	
5. Вращайте задатчик  , пока значение не изменится на "1".	
6. Нажмите кнопку  , для установки выбранного значения.	 <p>Мигает... Настройка параметра завершена!!</p>

- Вращая задатчик , Вы можете прочитать другой параметр.
- Нажмите кнопку , чтобы прочитать сделанную настройку.
- Нажмите кнопку  два раза, чтобы появился следующий параметр


После завершения настройки параметра, нажмите кнопку  один раз, чтобы просмотреть сообщения защит, или два раза, чтобы вернуться в экран выходной частоты. Для изменения настроек других параметров, выполните действия описанные в пунктах 3-6.

Рис. 14.9. Изменение настройки параметров









Указание	
Значение выходного тока появится на индикаторе, если удерживать нажатой кнопку 	
Действие	Индикация
1. Нажмите кнопку  , чтобы выбрать режим отображения выходной частоты.	
2. Независимо от того, находится ли преобразователь в каком-либо режиме управления или находится в режиме останова, появится значение выходного тока, пока будет нажата кнопка 	 (1.0 A) <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;">             (Нажать и не отпускать)           </div>
3. Отпустите кнопку  , чтобы вернуться в режим отображения выходной частоты.	
Примечание	
Если Пар. 52 = "1", то при нажатии кнопки  , отображается выходная частота, а в обычном режиме отображается ток.	


Рис. 14.10. Режим измерения выходного тока

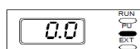
- Параметр сброса CLr является дополнительным и для доступа к нему необходимо установить Пар. 30 = «1» (См. Стр.13)
- Параметры могут быть сброшены установкой "1" в CLr "сброс параметра".

### Действие

– Индикация

1. Проверьте показания индикаторов RUN и способа управления.

- Преобразователь должен быть остановлен.
- Преобразователь должен находиться в режиме управления с пульта. (Нажмите кнопку .)



2. Нажмите кнопку **(MODE)** для выбора режима установки параметров.



Появился номер установленной навливаемой параметра.

3. Вращайте задатчик , пока не появится надпись CLR "сброс".


- Значение Пар. 30 должно быть "1" (См. пункты 3-6 на странице 13).



4. Нажмите кнопку (SET)

q "0" (SET) ➡



Вращайте задатчик , пока значение не изменится на "1".



6. Нажмите кнопку (SET).



Мигает... Установка параметра завершена!!

- Вращая задатчик (9), Вы можете прочитать другой параметр.
- Нажмите кнопку (SET). Появится Пар. 0 (P 0).

Рис. 14.11. Сброс параметров

Таблица 14.4

## Основные параметры ПЧ

Параметр	Название	Показания	Диапазон изменения	Единица измерения	Заводская установка (Версия ЕС)	Установка пользователя
0	Стартовый момент	<i>P 0</i>	0 - 15%	0.1%	6%	
1	Верхняя граница частоты	<i>P 1</i>	0 – 120 Гц	0.1 Гц	50 Гц	
2	Нижняя граница частоты	<i>P 2</i>	0 - 120 Гц	0.1 Гц	0 Гц	
3	Номинальная частота	<i>P 3</i>	0 - 120 Гц	0.1 Гц	50 Гц	
4	Многоскоростной режим (высокая скорость)	<i>P 4</i>	0 - 120 Гц	0.1 Гц	50 Гц	
5	Многоскоростной режим (средняя скорость)	<i>P 5</i>	0 - 120 Гц	0.1 Гц	30 Гц	
6	Многоскоростной режим (низкая скорость)	<i>P 6</i>	0 - 120 Гц	0.1 Гц	10 Гц	
7	Время разгона	<i>P 7</i>	0 - 999 Сек	0.1 Сек	5 Сек	
8	Время торможения	<i>P 8</i>	0 - 999 Сек	0.1Сек	5 Сек	
9	Электронная защита от токовой перегрузки двигателя	<i>P 9</i>	0 – 50 А	0.1 А	Номинальный выходной ток	
30	Доступ к дополнительным параметрам	<i>P30</i>	0, 1	1	0	
79	Способ управления	<i>P79</i>	0 - 4, 7, 8	1	0	

### Замечания

- Доступ к дополнительным параметрам разрешен, если Пар. 30 = "1"

Таблица 14.5

## Дополнительные параметры ПЧ

Параметр	Индикация	Название	Краткое описание	Зав. установка
Параметры 0-9 описаны в перечне основных параметров.				
10	P 10	Частота тормоза постоянного тока	Параметры определяют, соответственно, частоту включения режима торможения (0-120 Гц), время торможения (0-10 Сек) и напряжение торможения (0-15%). При использовании постоянномоментного двигателя, рекомендуется установить Пар.12 = «4»	3 Гц
11	P 11	Время работы тормоза пост. тока		0.5 Сек
12	P 12	Напряжение тормоза пост. тока		6%
13	P 13	Стартовая частота	Данная частота влияет на стартовый момент двигателя. Для подъемников и лифтов рекомендуется ставить ее 1-3 Гц (max 5 Гц). Для других приложений рекомендуется оставить заводскую установку 0.5 Гц. Диапазон изменения 0-60 Гц	0.5 Гц
14	P 14	Тип нагрузки	Выбор вида U/f-характеристики, в зависимости от типа нагрузки. 0: Для нагрузки с постоянным моментом (если большой момент необходим во всем диапазоне частот). 1: Для нагрузки с переменным моментом (где момент мал при низкой скорости, например, вентиляторы и насосы) 2: Для вертикальных подъемников (без усиления момента при реверсном вращении) 3: Для вертикальных подъемников (без усиления момента при прямом вращении)	0
15	P 15	JOG частота	Частота (0-120 Гц) и время разгон/торможения (0-999 Сек) JOG-режима.	5 Гц
16	P 16	Время разгона/торможения до JOG - частоты		0.5 Сек
17	P 17	Направление вращения от кнопки RUN	Параметр определяет направление вращения при старте от кнопки RUN. 0: прямое вращение, 1: реверсное вращение	0
19	P 19	Номинальное напряжение	Величина выходного напряжения при номинальной частоте (Пар. 3). 888: 95% напряжения источника питания ---: 100% источника питания 0-500 В, 888, ---	888
20	P 20	Частота разгона/торможения	Опорная частота для Пар. 7 "время разгона" и Пар. 8 "время торможения" определяют время разгона/торможения от/до частоты 0 Гц. 1-120 Гц.	50 Гц

По заданию преобразователя установить с помощью пульта управления стартовый момент, верхнюю и нижнюю границу частоты, номинальную частоту.

По номинальным данным электродвигателя настроить защиту от токовой перегрузки электродвигателя.

По заданию преобразователя настроить способ управления ПЧ, частоту широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

## **Содержание отчета**

1. Тема и цель работы.
2. Схема включения ПЧ в сеть.
3. Схема подключения внешних устройств силовой цепи (основная конфигурация).
4. Описание варианта настройки параметров ПЧ (по индивидуальному заданию).

## **Контрольные вопросы**

1. Как объяснить структуру преобразователя частоты?
2. Как объяснить тему включения ПЧ в сеть?
3. Как объяснить назначение дополнительных элементов, включаемых в силовую цепь ПЧ?
4. Какие существуют основные виды защит от аварийных режимов работы преобразователя и электродвигателя?
5. Какова методика настройки основных параметров ПЧ?
6. Какова методика настройки дополнительных параметров ПЧ?

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная

1. Кабдин, Н. Е. Электропривод : учебник / Н. Е. Кабдин, В. Ф. Сторчевой. – М. : МЭСХ, 2021. – 286 с.
2. Епифанов, А. П. Электропривод в сельском хозяйстве : учебное пособие / А. П. Епифанов. – СПб : Лань, 2023. – 224 с.
3. Шичков, Л. П. Электрический привод : учебник и практикум для вузов / Л. П. Шичков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во Юрайт, 2023. – 355 с.
4. Базулина, Т. Г. Основы электропривода / Т. Г. Базулина, Н. А. Равинский. – Минск : РИПО, 2020. – 183 с.
5. Сеньков, А. Г. Электропривод и электроавтоматика : учебное пособие / А. Г. Сеньков, В. А. Дайнеко. – Минск : РИПО, 2020. – 177 с.
6. Афанасьев, А. Ю. Электрический привод / А. Ю. Афанасьев. – Вологда : Инфра-инженерия, 2023. – 180 с.
7. Фролов, Ю. М. Регулируемый асинхронный электропривод / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин. – СПб : Лань, 2021. – 464 с.

### Дополнительная

8. Островцов, В. Н. Электропривод и электрооборудование : учебник и практикум для вузов / В. Н. Островцов, А. В. Палицын. – М. : Изд-во Юрайт, 2024. – 212 с.
9. Чернышев, А. Ю. Электропривод переменного тока / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – М. : Изд-во Юрайт, 2020. – 215 с.
10. Быстрицкий, Г. Ф. Общая энергетика: энергетическое оборудование : справочник для вузов : в 2 ч. / Г. Ф. Быстрицкий, Э. А. Киреева. – 2-е изд. испр. и доп. – М. : Изд-во Юрайт, 2023. – Ч. 1. – 222 с.
11. Овсянников, Е. М. Электрический привод : учебное пособие / Е. М. Овсянников. – М. : Изд-во Форум, 2019. – 224 с.
12. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – М. : НИЦ ИНФРА-М, 2024. – 364 с.

### **Технические нормативные правовые акты**

13. ГОСТ 2.710-81 (СТ СЭВ 2182-80). Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах : ЕСКД. – Взамен ГОСТ 2.710-75 ; введ. 01.07.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 14 с.

14. ГОСТ 2.755-87 (СТ СЭВ 5720-86). Обозначения условные графические в схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения : ЕСКД. – Взамен ГОСТ 2.738-68, ГОСТ 2.755-74 ; введ. 01.01.1988. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 21 с.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

Учебное издание

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ.  
ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Составители:

**Рутковский** Иосиф Геннадьевич,  
**Силюцкий** Александр Сергеевич

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*

Редактор *В. Л. Невдах*

Корректор *В. Л. Невдах*

Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*

Дизайн обложки *Д. О. Михеевой*

Подписано в печать 30.10.2025. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 6,91. Тираж 99 экз. Заказ 307.

Издатель и полиграфическое исполнение:

учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.