

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**М. А. Прищепов, Е. М. Прищепова, В. И. Крупня**

## **ЭЛЕКТРОПРИВОД. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по аграрному  
техническому образованию в качестве учебно-методического пособия  
для студентов учреждений высшего образования по специальности  
1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства  
(по направлениям), направление специальности 1-74 06 05-01  
Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика),  
направление специальности 1-74 06 05-02 Энергетическое  
обеспечение сельского хозяйства (теплоэнергетика)*

Минск  
БГАТУ  
2019

УДК 62-83(07)  
ББК 31.291я7  
П77

Рецензенты:

кафедра автоматизации производственных процессов  
и электротехники УО «Белорусский  
государственный технологический университет»  
(кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой *Д. С. Карпович*);  
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
РУП «Белорусский теплоэнергетический институт» *М. Р. Кирилюк*

**Прищепов, М. А.**

П77      Электропривод. Лабораторный практикум : учебно-методическое  
пособие / М. А. Прищепов, Е. М. Прищепова, В. И. Крупеня. –  
Минск : БГАТУ, 2019. – 172 с.  
ISBN 978-985-519-980-0.

Изложены вопросы техники безопасности и организации работы студентов  
для выполнения лабораторных работ по учебной дисциплине «Электропривод».

Для студентов учреждений высшего образования по специальности 1-74 06 05  
Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям) и направлению  
специальности 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств  
(сельское хозяйство).

УДК 62-83(07)  
ББК 31.291я7

ISBN 978-985-519-980-0

© БГАТУ, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	6
Лабораторная работа № 1 Определение механической характеристики центробежного вентилятора опытным путем .....	13
Лабораторная работа № 2 Исследование механических и электромеханических характеристик асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при разных напряжениях.....	19
Лабораторная работа № 3 Исследование механических и электромеханических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения.....	26
Лабораторная работа № 4 Исследование электромеханических переходных процессов в электроприводе с асинхронным электродвигателем.....	32
Лабораторная работа № 5 Исследование механических и энергетических характеристик двухскоростного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.....	38
Лабораторная работа № 6 Управление преобразователем частоты в системе электропривода ПЧ-АД .....	44
Лабораторная работа № 7 Исследование механических и электромеханических характеристик электропривода системы ПЧ-АД.....	54
Лабораторная работа № 8 Исследование переходных процессов нагрева и охлаждения электродвигателя.....	59
Лабораторная работа № 9 Испытание схем управления двухскоростным асинхронным электродвигателем .....	65

Лабораторная работа № 10	
Исследование управления преобразователем частоты на базе инвертора L100 (Hitachi).....	72
Лабораторная работа № 11	
Определение механической характеристики асинхронного двигателя в системе автоматической стабилизации скорости на базе стандартного преобразователя частоты .....	81
Лабораторная работа № 12	
Изучение и исследование электроприводов насосных установок водоснабжения .....	88
Лабораторная работа № 13	
Изучение и исследование электропривода тали.....	96
Лабораторная работа № 14	
Испытание схем пуска асинхронного электродвигателя с переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник» .....	104
Лабораторная работа № 15	
Исследование динамического торможения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.....	110
Лабораторная работа № 16	
Управление электроприводом типовой поточной линии .....	116
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	125
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	126

## ВВЕДЕНИЕ

Образовательный стандарт специальности 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям) и направления специальности 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство) предусматривают подготовку инженеров-электриков, способных решать задачи проектирования, наладки и эксплуатации современных электроприводов в сельскохозяйственном производстве. Для этого необходима соответствующая подготовка по профильным дисциплинам. Учебная дисциплина «Электропривод» является базовой дисциплиной специальности. Программа курса «Электропривод» содержит дополнения, продиктованные возрастающими требованиями к технологическим процессам современного сельскохозяйственного производства.

Цель учебной дисциплины – получение знаний, умений и профессиональных компетенций по обеспечению эффективной работы электроприводов в условиях сельскохозяйственного производства.

## **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) предупреждать нарушения требований безопасности со стороны товарищей;

5) выполнять все требования руководителя, относящиеся к соблюдению правил техники безопасности, порядку выполнения работ и поведению студентов, а также требования по сохранности лабораторного оборудования и приборов;

6) заблаговременно готовиться к предстоящему занятию в лаборатории, используя инструкции, методические указания к лабораторным работам и рекомендованную литературу;

7) при выполнении лабораторной работы находиться только на своем рабочем месте, не трогать оборудование и приборы, не относящиеся к работе, соблюдать тишину и порядок.

#### ***Запрещается:***

а) без разрешения трогать или переносить со стола на стол аппараты, приборы и пр.;

б) заниматься делами, непосредственно не связанными с выполняемой работой;

в) садиться на столы, вращать электрические машины и электромагнитные тормоза руками или ногами, 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 допущен к их исполнению 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 следовать **основным правилам техники безопасности**:

1. Электрическую схему можно собирать только при отключенном автоматическом выключателе.

2. Включать схему под напряжение разрешается только после ее проверки преподавателем или лаборантом.

3. О включении схемы необходимо предупредить присутствующих, убедиться, что никто не касается токоведущих или вращающихся частей.

4. Вносить в схему любые изменения можно только при отключенной электрической сети.

5. В процессе проведения опытов категорически запрещается прикасаться к неизолированным точкам схемы.

6. Во избежание случайного прикосновения к неизолированным 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 ограждения.

7. При срабатывании автоматического выключателя студенты с помощью преподавателя устанавливают и устраняют причину возникновения перегрузки или короткого замыкания; включают схему снова под наблюдением преподавателя.

8. При проведении опытов необходимо следить, чтобы в процессе работы никто из присутствующих не приближался к вращающимся частям.

9. Категорически запрещается касаться руками или ногами вращающихся частей электрических машин и электромагнитных тормозов для их торможения.

10. При несчастном случае следует немедленно отключить установку от сети и оказать первую помощь пострадавшему. Аптечка находится в аппаратной лаборатории. В случае необходимости – вызвать скорую помощь по телефону 103.

11. В случае пожара следует немедленно отключить электропитание лаборатории и принять меры по ликвидации пожара. Вводный выключатель лаборатории находится в аппаратной лаборатории, ящик с песком – в докольном этаже, а огнетушитель – у дверей лаборатории.

В случае необходимости – вызвать пожарную команду по телефону 101.

Перед началом работы в лаборатории студенты проходят инструктаж по технике безопасности и расписываются в специальном журнале. Студенты, не прошедшие инструктаж по технике безопасности, к работе в лаборатории не допускаются.

### **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 1–2 свободные страницы для записи паспортных данных приборов и оборудования, необходимых расчетов и пояснений. Рекомендуется использовать для черновика отдельную ученическую тетрадь в клетку. 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 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 нуль шкалы с помощью корректора;

в) собрать электрическую схему и пригласить преподавателя или лаборанта для проверки. При сборке электрической схемы следует руководствоваться следующим правилом: вначале соединяются все последовательные цепи от зажимов автоматического выключателя до испытуемой машины, затем подключаются параллельные цепи и цепи управления. Не следует использовать длинные провода там, где можно обойтись короткими. Собранный 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 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 при правильных результатах, с его разрешения) приступить к следующему опыту;

ж) после окончания всей работы сдать черновик на проверку и подпись преподавателю;

з) после подписи черновика с разрешения преподавателя 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) за оставшееся рабочее время оформить 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 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, которая учитывается на экзамене.

При сдаче отчета преподаватель спрашивает 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 экзамену.

## Требования по оформлению отчета о 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 ученической тетради или на листах формата А4. Первый лист отчета – титульный (рис. 1). На следующей странице указывается цель занятия, приводится принципиальная электрическая схема установки, таблица с перечнем элементов схемы лабораторной установки в соответствии с рис. 2. На последующих листах размещают таблицы, графики и расчеты. На последней странице записывают выводы по работе, ставят дату выполнения работы и подпись исполнителя. Все листы отчета склеиваются или сшиваются и нумеруются. Отчет по каждой лабораторной работе представляется отдельно.

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра ЭСХП  
Лаборатория электропривода

**Отчет  
о лабораторной работе № \_\_\_\_\_**

\_\_\_\_\_ (название работы)

Выполнил: студент \_\_ курса  
\_\_\_\_\_ группы

\_\_\_\_\_ Ф. И. О.

\_\_\_\_\_ дата

Принял: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ должность

\_\_\_\_\_ Ф. И. О.

20\_\_

*Рис. 1. Форма титульного листа отчета о лабораторной работе*

Позиц. обозначения	Наименование	Кол.	Примечание
20	110	10	45

Рис. 2. Форма таблицы «Перечень элементов схемы лабораторной установки»

Кроме перечня элементов схемы лабораторной установки в отчете приводятся основные технические данные оборудования, выписанные из его паспортного щитка или из данных, приведенных в перечне элементов схемы лабораторной установки или на лабораторном столе, которые необходимы для дополнительных расчетов.

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

Графики могут строиться на листах в клетку, но лучше выполнять их на миллиметровой бумаге. Масштаб выбирается 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 масштаб выбирается так, 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.

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА ОПЫТНЫМ ПУТЕМ

#### **Цели занятия:**

1. Освоить методику определения механической характеристики центробежного вентилятора опытным путем.
2. Исследовать изменения параметров электропривода центробежного вентилятора опытным путем при регулировании подачи воздуха задвижкой на трубопроводе.

#### **Задачи занятия:**

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки.
3. Выполнить опыты для определения механической характеристики вентилятора  $M_c = f(\omega)$ .
4. Опытным путем определить изменения параметров электропривода вентилятора при закрытии задвижки на воздуховоде и постоянной частоте вращения электродвигателя.

#### **Задания для самоподготовки:**

1. Изучить по учебнику [2] возможные виды механических характеристик рабочих машин и уравнение, описывающее эти характеристики.
2. Ознакомиться с содержанием прилож. А.
3. Письменно ответить на следующие вопросы и выполнить задания:
  - 3.1. Каким уравнением описывается механическая характеристика вентилятора?
  - 3.2. Нарисуйте аэродинамическую характеристику вентилятора при одной частоте вращения [2].
  - 3.3. Запишите формулу, по которой определяется мощность электродвигателя для привода вентилятора.

### Методические указания

#### **К задаче 1**

Лабораторная установка состоит из центробежного вентилятора, рабочее колесо которого насажено на вал электродвигателя пост-

янного тока ПН-10 независимого возбуждения. Якорь электродвигателя получает питание от автотрансформатора  $TV$  через выпрямитель  $UZ2$ , а обмотки возбуждения – от сети переменного тока через выпрямитель  $UZ1$ . Скорость возбужденного потока воздуха измеряется электронным анемометром  $PS$ . Частота вращения колеса вентилятора измеряется индукционным тахометром  $BR$  (табл. 1.1).

*Параметры электродвигателя:* ПН-10;  $U_n = 220$  В;  $I_n = 5,8$  А;  $P_n = 0,95$  кВт;  $n_n = 1450$  об/мин; масса 75 кг;  $R_y = 2,53$  Ом;  $R_{доб. пол} = 0,615$  Ом;  $R_{парал} = 476$  Ом;  $R_{посл} = 0,405$  Ом.

Таблица 1.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
$QF1$	Автоматический выключатель АЕ2033	1	$I_{н.р} = 4$ А
$TV$	Автотрансформатор РНО-250-10	1	$I_n = 40$ А
$M$	Электродвигатель ПН-10	1	$P_n = 0,95$ кВт, $I_n = 5,8$ А
$PA$	Амперметр М366	1	Шкала 7,5 А
$PV$	Вольтметр М367	1	Шкала 10 В
$BR$	Тахометр ТМ-3	1	Цена деления 50 об/мин
$PS$	Электронный анемометр АП1	1	–
$HL1, HL2$	Сигнальная арматура (изготовлена в лаборатории)	2	–
$UZ1, UZ2$	Выпрямитель (изготовлен в лаборатории)	2	–

### К задаче 2

Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки согласно рис. 1.1. Амперметр  $PA$  включить на предел 7,5 А. Автотрансформатор подключить строго по схеме (вход – на  $A2-A3$ , выход – на  $B2-B3$ ).

### К задаче 3

Поскольку механическая характеристика вентилятора – зависимость угловой скорости от момента сопротивления вращению на его валу, то необходимо, изменяя угловую скорость, путем расчета определять момент на его валу (момент сопротивления вращению).

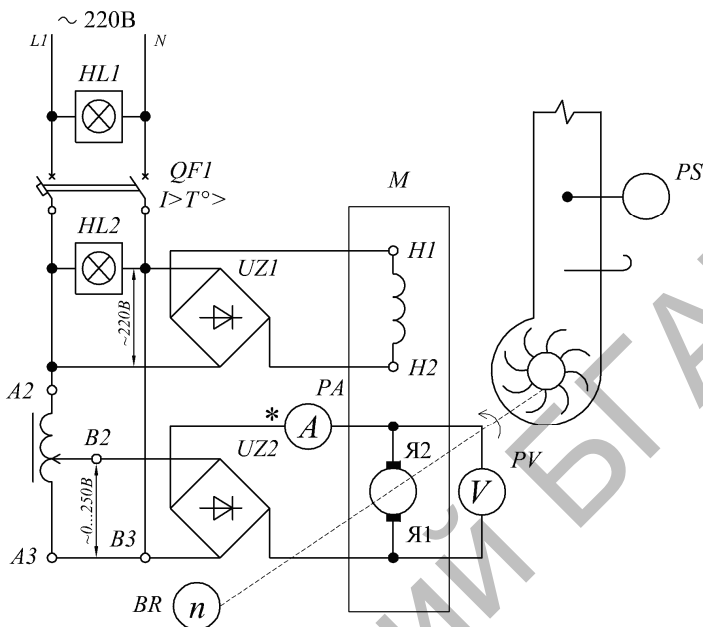


Рис. 1.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Угловая скорость изменяется путем изменения напряжения на зажимах якоря электродвигателя постоянного тока с помощью автотрансформатора *TV*.

Для получения минимальной скорости вращения установить ручку автотрансформатора в крайнее левое положение, соответствующее минимальному напряжению.

Полностью открыть заслонку на воздуховоде.

Плавно повышать напряжение на якоре электродвигателя с помощью автотрансформатора. Вначале установить частоту вращения вала электродвигателя (вентилятора) 300 об/мин. Обратит внимание на направление вращения колеса вентилятора (по стрелке на его корпусе) и на тахометр *BR*.

Занести в табл. 1.2 показания всех электроизмерительных приборов и электронного анемометра (**опыт 1**).

Аналогично проделать опыт при частоте вращения вентилятора 500, 700, 900, 1000 об/мин (**опыты 2–5**). Далее, не отключая установку, перейти к выполнению задачи 4.

Таблица 1.2

## Данные измерений и результаты расчетов

Номер опыта	Измерено				Вычислено									Положение задвижки	
	$n$ , об/мин	$I_{я}$ , А	$U_{я}$ , В	$v$ , м/с	$\omega$ , рад/с	$P_{я}$ , Вт	$\Delta P_{м}$ , Вт	$\Delta P_{доб}$ , Вт	$\Delta P_{х}$ , Вт	$\Delta P_{шет}$ , Вт	$\sum \Delta P$ , Вт	$P_{в}$ , Вт	$M_c$ , Н·м		$Q$ , м <sup>3</sup> /с
1	300														Открыта
2	500														Открыта
3	700														Открыта
4	900														Открыта
5	1000														Открыта
6	1000														Закрото 25 % сечения
7	1000														Закрото 50 % сечения
8	1000														Закрото 75 % сечения
9	1000														Закрото 100 % сечения



#### К задаче 4

Не изменяя частоты вращения электродвигателя (1000 об/мин), закрыть задвижку на  $\frac{1}{4}$  сечения. Записать показания приборов (**опыт 6**).

Закрыть задвижку на  $\frac{1}{2}$  сечения, поддерживая частоту вращения электродвигателя 1000 об/мин. Записать показания приборов (**опыт 7**).

Закрыть задвижку на  $\frac{3}{4}$  сечения, поддерживая частоту вращения электродвигателя 1000 об/мин. Записать показания приборов (**опыт 8**).

Закрыть задвижку полностью, поддерживая частоту вращения электродвигателя 1000 об/мин. Записать показания приборов (**опыт 9**).

#### Расчетные формулы

Угловая скорость вала вентилятора (рад/с):

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \approx 0,1045n. \quad (1.1)$$

Мощность, потребляемая якорем двигателя (Вт):

$$P_{\text{я}} = U_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (1.2)$$

Потери мощности в обмотке якоря (Вт):

$$\Delta P_{\text{м}} = I_{\text{я}}^2 (R_{\text{я}} + R_{\text{д.п}}), \quad (1.3)$$

где  $R_{\text{я}}$ ,  $R_{\text{д.п}}$  – сопротивления обмотки якоря и дополнительных полюсов (из паспорта электродвигателя), Ом.

Добавочные потери (Вт):

$$\Delta P_{\text{доб}} = 0,01P_{\text{я}}. \quad (1.4)$$

Потери холостого хода (Вт) принимаются по ранее тарированной кривой потерь электродвигателя  $\Delta P_{\text{х}} = f(n)$  (рис. 1.2).

Потери в щетках двигателя (Вт):

$$\Delta P_{\text{щет}} = \Delta U I_{\text{я}}, \quad (1.5)$$

где  $\Delta U$  – падение напряжения в щеточном контакте, В ( $\Delta U = 2$  В).

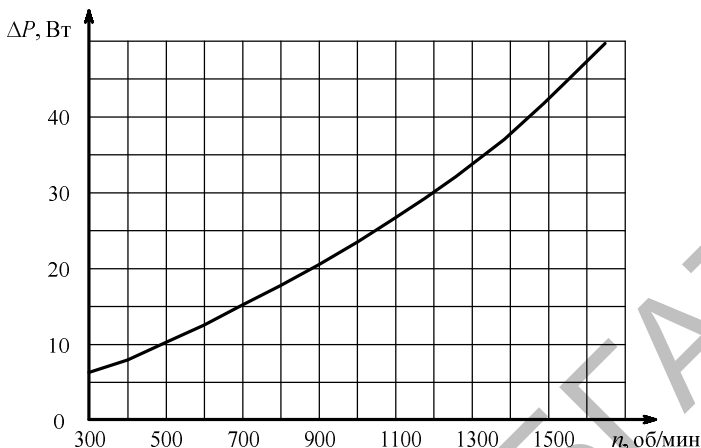


Рис. 1.2. Зависимость потерь холостого хода электродвигателя ПН-10 от частоты вращения

Сумма потерь в электродвигателе

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_x + \Delta P_{\text{щет}}. \quad (1.6)$$

Мощность на валу вентилятора (Вт):

$$P_b = P_{\text{я}} - \Sigma \Delta P. \quad (1.7)$$

Момент сопротивления вентилятора (Н·м):

$$M_c = \frac{P_b}{\omega}. \quad (1.8)$$

Подача вентилятора (м<sup>3</sup>/с):

$$Q = Fv, \quad (1.9)$$

где  $F$  – площадь выходного сечения воздуховода ( $F = 0,04 \text{ м}^2$ ).

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки (рис. 1.1) и табл. 1.1.

3. Выполненные в письменном виде задания для самоподготовки.
4. Табл. 1.2.
5. Графики  $M_c = f(\omega)$ ,  $P_B = f(\omega)$ ,  $Q = f(\omega)$ .
6. Графики  $P_я = f(Q)$ ,  $M_c = f(Q)$ ,  $P_B = f(Q)$  при постоянной частоте вращения электродвигателя ( $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ).
7. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Как зависят мощность и момент сопротивления вращению вентилятора от частоты вращения или угловой скорости?
2. В какое положение надо поставить задвижку на воздуховоде для облегчения запуска центробежного вентилятора?
3. Изложите методику снятия механической характеристики вентилятора. Какое оборудование необходимо в этом случае?
4. Вышел из строя электродвигатель центробежного вентилятора. Параметры электродвигателя:  $P_n = 1,1 \text{ кВт}$ ,  $n_n = 900 \text{ об/мин}$ . В хозяйстве имеются электродвигатели частотой  $n_n = 1400 \text{ об/мин}$ . Какой мощности надо взять электродвигатель для привода вентилятора частотой вращения  $1400 \text{ об/мин}$ ?
5. Технолог поставил задание увеличить производительность вентиляционной установки в 1,5 раза. Электродвигатель имел мощность на валу  $P = 1 \text{ кВт}$  при  $n_n = 900 \text{ об/мин}$ . Какой новый электродвигатель по мощности и частоте вращения надо взять для привода вентилятора? Во сколько раз увеличатся подача и давление вентиляционной установки?

### Лабораторная работа № 2

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ РАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

##### *Цели занятия:*

1. Опытным путем определить механические и электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

2. Исследовать влияние напряжения на механические и электро-механические характеристики асинхронного электродвигателя.

**Задачи занятия:**

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему установки (рис.).
3. Опытным путем получить данные для построения механических и электро-механических характеристик электродвигателя при напряжении питания 140 В.
4. Выполнить опыты п. 3 при напряжении питания 160 В.
5. Выполнить опыты п. 3 при напряжении питания 200 В.

**Задания для самоподготовки:**

1. Изучить по учебнику [1] уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя, а также влияние напряжения на момент и ток асинхронного электродвигателя.
2. Письменно ответить на следующие вопросы:
  - 2.1. Уменьшается ли частота вращения магнитного поля при уменьшении напряжения питания асинхронного электродвигателя?
  - 2.2. Зависит ли критическое скольжение ротора электродвигателя от напряжения его питания?
  - 2.3. Какие зависимости называют механическими и электро-механическими характеристиками?

**Методические указания**

**К задаче 1**

Лабораторная установка состоит из трехфазного регулятора напряжения типа ТС-6, асинхронного электродвигателя и электро-магнитного тормоза, создающего момент на валу электродвигателя.

Изменение момента осуществляется путем регулирования тока в цепи возбуждения тормоза с помощью потенциометра *RP*. Частота вращения измеряется тахометром *BR*, присоединенным к валу электродвигателя.

*Технические данные электродвигателя:* тип А41-6;  $P_n = 1$  кВт;  $U_n = 220/380$  В;  $\Delta/Y$ ;  $n_n = 930$  об/мин;  $\eta = 77$  %;  $n_n = 1450$  об/мин;  $\cos\varphi_n = 0,72$ ;  $k_i = 5,5$ ;  $\mu_{кр} = 2,2$ ;  $\mu_{мин} = 1,6$ ;  $\mu_n = 1,8$ ;  $J_{рот. дв} = 0,017$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_{max} = 0,128$  кг·м<sup>2</sup>.

### К задаче 2

При сборке схемы (рис.) обратите внимание, что автотрансформатор включается в сеть после автоматического выключателя  $QF1$ , закрепленного в ящике на стене. Его выходное напряжение подано на вход автоматического выключателя  $QF2$ . Туда же подключен вольтметр  $PV$  (табл. 2.1). Обмотка электродвигателя должна быть соединена в схему  $\Delta$  «треугольник».

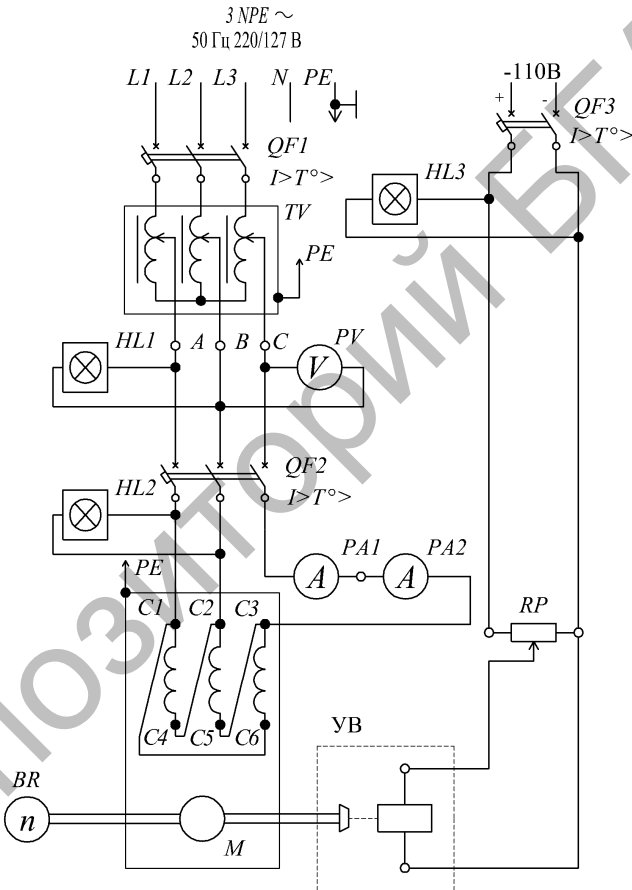


Рис. Принципиальная схема лабораторной установки для исследования механических и электромеханических характеристик асинхронного электродвигателя при разных значениях напряжения питания

Таблица 2.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель АД-14	1	$I_n = 25 \text{ А}$ , тип С
<i>QF2</i>	Автоматический выключатель АЕ2025	1	$I_n = 5 \text{ А}$
<i>QF3</i>	Автоматический выключатель ВА47-29	1	$I_n = 10 \text{ А}$ , тип С
<i>TV</i>	Трехфазный автотрансформатор ТС-6	1	$S_n = 6 \text{ кВА}$
<i>M</i>	Электродвигатель А41-4	1	$P_n = 1 \text{ кВт}$
<i>PV</i>	Вольтметр Э365-1	1	Шкала 500 В
<i>PA1</i>	Амперметр Э365-1	1	Шкала 3 А
<i>УВ</i>	Электромагнитный тормоз ЭТ-1	1	–
<i>PA2</i>	Амперметр Э365-1	1	Шкала 20 А
<i>BR</i>	Тахометр ТМЗ-П	1	Цена деления 50 об/мин
<i>RP</i>	Лабораторный реостат РПШ-1	1	200 Ом, 1 А

### К задаче 3

Осуществить пуск электродвигателя. Для этого включить автотрансформаторный регулятор напряжения *TV* и установить на выходе напряжение, равное 140 В. Затем включить электродвигатель автоматическим выключателем *QF2*.

Выполнить опыты для определения механических и электро-механических характеристик двигателя. Занести в табл. 2.2 показания измерительных приборов при холостом ходе агрегата (**опыт 1**).

Затем включить с помощью автоматического выключателя *QF3* цепь катушки электромагнитного тормоза *УВ* и с помощью резистора *RP* установить различные тормозные моменты так, чтобы частота вращения составляла 900 об/мин (**опыт 2**), 850 об/мин (**опыт 3**), 800 об/мин (**опыт 4**). Во всех опытах поддерживается напряжение 140 В. Максимальный момент зарегистрировать в **опыте 5**, для чего после опыта 4 медленно увеличивать ток в цепи тормоза и на грани

ползучести (ухода) скорости из устойчивого вращения записать показания момента и тока.

Для того чтобы измерить пусковой ток и момент (**опыт 6**), необходимо установить максимальное напряжение на обмотках электромагнитного тормоза, включить электродвигатель, осторожно придерживая рукой остов катушек тормоза от резкого поворота, и, плавно его отпустив, записать значения момента и тока двигателя. Замеры параметров при неподвижном роторе нужно делать быстро; сразу после замера следует отключить электродвигатель от сети, а резистор  $RP$  – перевести в нулевое положение. В принципиальной электрической схеме лабораторной установки (рис.) для управления тока статора  $I_1$  используются амперметры  $PA1$  и  $PA2$  с разными пределами измерения – 3 и 20 А. Прибор с пределом 3 А используется для измерений на холостом ходу и при малых нагрузках.

Таблица 2.2

Результаты опытов и расчетов

Номер опыта	Измерено				Вычислено	
	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$n$ , об/мин	$M$ , Н·м	$\omega$ , рад/с	$P_2$ , Вт
1	140			0		
2			900			
3			850			
4			800			
5						
6			0			
1	160			0		
2			900			
3			850			
4			800			
5						
6			0			
1	200			0		
2			900			
3			850			
4			800			
5						
6			0			

Номер опыта	Измерено				Вычислено	
	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$n$ , об/мин	$M$ , Н·м	$\omega$ , рад/с	$P_2$ , Вт
1	220			0		
2			900			
3			850			
4			800			
5						
6				0		

**К задаче 4**

Установить напряжение 160 В при отключенном двигателе и выполнить опыты, как в п. 3.

**К задаче 5**

Установить напряжение 200 В и выполнить опыт, как в п. 3.

**Расчетные формулы**

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = 0,1045n;$$

$$P_2 = M\omega. \quad (2.1)$$

Расчетные формулы для пересчета момента и тока в опытах при  $U = 200$  В на номинальное напряжение 220 В при частоте вращения  $n$ , соответствующей  $U = 200$  В:

$$M = M_{\text{опыта}} \left( \frac{220}{200} \right)^2; \quad (2.2)$$

$$I = I_{\text{опыта}} \left( \frac{220}{200} \right). \quad (2.3)$$

Расчетные формулы для построения естественной механической характеристики асинхронного электродвигателя по характерным точкам.

Точка 1:

$$\begin{cases} M = 0; \\ \omega = \omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = 0,1045n_0. \end{cases} \quad (2.4)$$



Точка 2:

$$\begin{cases} M = M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \\ \omega = \omega_H = 0,1045n_H. \end{cases} \quad (2.5)$$

Точка 3:

$$\begin{cases} M = M_K = M_H \mu_{кр}; \\ \omega = \omega_{кр} = \omega_0 (1 - s_{кр}). \end{cases} \quad (2.6)$$

$$s_{кр} = \frac{s_H \left( \mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 + 2s_H (\mu_{кр} - 1) - 1} \right)}{1 - 2s_H (\mu_{кр} - 1)}; \quad (2.7)$$

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}. \quad (2.8)$$

Точка 4:

$$\begin{cases} M = M_{мин} = M_H \mu_{мин}; \\ \omega = \omega_{мин} = 0,15\omega_0. \end{cases} \quad (2.9)$$

Точка 5:

$$\begin{cases} M = M_H = M_H \mu_H; \\ \omega = 0. \end{cases} \quad (2.10)$$

Образец построения механической характеристики приведен в прилож. Б (рис. Б.1).

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и табл. 2.1.
3. Письменные ответы на вопросы самоподготовки.
4. Табл. 2.2.
5. Графики зависимости  $\omega = f(M)$  для  $U = 140, 160, 200$  В и естественная механическая характеристика, построенная по пяти точкам расчета (на одном графике).
6. Графики зависимости  $\omega = f(I)$  для  $U = 140, 160, 200$  В (на одном графике).

## Контрольные вопросы

1. При напряжении 220 В (на фазу) электродвигатель развивает момент 12 Н·м. Какой момент будет развивать электродвигатель при той же угловой скорости, если к электродвигателю подвести 127 В (на фазу)?

2. Как по данным каталога на электродвигатели определить пусковой, критический и минимальный (при пуске) моменты асинхронного электродвигателя?

3. Какие характерные точки момента и скорости можно выделить на механической характеристике асинхронного электродвигателя?

4. Вам поручили переделать электропривод ленточного транспортера так, чтобы можно было уменьшить частоту вращения в два раза. Известно, что момент сопротивления транспортера не зависит от частоты вращения. Можно ли использовать для этой цели асинхронный короткозамкнутый электродвигатель с регулятором напряжения?

5. Асинхронные электродвигатели большой мощности (более 15 кВт) выпускаются со следующими паспортными данными соединения обмоток: 1 вариант – 220/380,  $\Delta/Y$ ; 2 вариант – 380/660,  $\Delta/Y$ . Какой вариант следует использовать для уменьшения пускового тока с переключением обмоток двигателя в сети 380 В? Во сколько раз уменьшится пусковой ток в линии?

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

#### *Цели занятия:*

1. Опытным путем определить механические и электромеханические характеристики двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением.

2. Опытным путем исследовать влияние напряжения, сопротивления в цепи якоря и тока возбуждения на механические и электромеханические характеристики ДПТ.

### **Задачи занятия:**

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки (рис. 3.1).
3. Опытным путем определить механические и электромеханические характеристики ДПТ при двух разных значениях напряжения.
4. Опытным путем определить механические и электромеханические характеристики при включении сопротивления в цепь ротора ДПТ.
5. Опытным путем определить механические характеристики ДПТ при уменьшении тока в цепи возбуждения.
6. По расчетам построить естественную механическую характеристику испытуемого ДПТ.

### **Задания для самоподготовки:**

1. По учебникам [1, 3], учебным пособиям [4, 5] и прилож. В изучить механические характеристики ДПТ.
2. Письменно ответить на следующие вопросы и выполнить задания:
  - 2.1. Запишите уравнения электромеханической и механической характеристик ДПТ независимого возбуждения.
  - 2.2. Какая угловая скорость называется скоростью идеального холостого хода?
  - 2.3. Приведите определение понятия «номинальное сопротивление двигателя».

## **Методические указания**

### **К задачам 1 и 2**

Лабораторная установка состоит из ДПТ независимого возбуждения малой мощности типа ПЛ-062 ( $P_n = 0,12$  кВт,  $n_n = 2700$  об/мин), вал которого соединен с валом аналогичного ДПТ, работающего в качестве генератора, якорь которого включен на резистор. ДПТ получает питание от автотрансформатора через выпрямитель (табл. 3.1). Это дает возможность питать ДПТ выпрямленным напряжением различной величины.

*Паспортные данные электродвигателя ПЛ-062:*  $P_n = 0,12$  кВт;  $U_n = 110$  В;  $I_n = 1,9$  А;  $n_n = 2700$  об/мин;  $\eta_n = 57$  %;  $J_p = 0,0000325$  кг·м<sup>2</sup>;  $R_\pi = 6,3$  Ом.

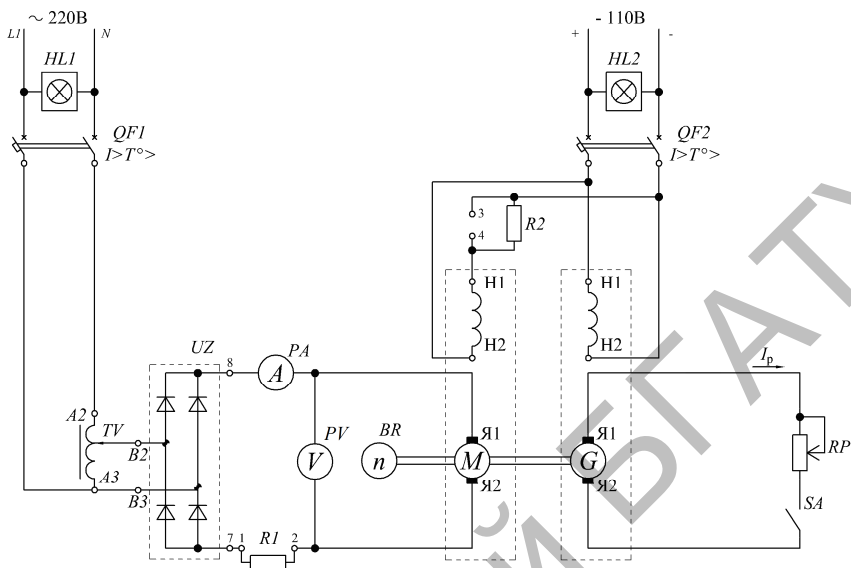


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Таблица 3.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
<i>QF1, QF2</i>	Автоматический выключатель АБ2016	2	$I_{н.р} = 6 \text{ А}$
<i>TV</i>	Автотрансформатор РНО-250-5	1	$I_n = 20 \text{ А}$
<i>UZ</i>	Выпрямитель собственного изготовления	1	–
<i>PA</i>	Амперметр М381	1	Шкала 2 А
<i>PV</i>	Вольтметр М330	1	Шкала 150 В
<i>M, G</i>	Электрическая машина ПЛ-62	2	$P_n = 0,12 \text{ кВт}$
<i>BR</i>	Тахометр ТМ-4	1	Цена деления 16,6 об/мин
<i>RP</i>	Лабораторный реостат РПМ-1	1	1 А, 200 Ом
<i>R1</i>	Резистор в цепи якоря приводного ДПТ ПЛ-62	1	–
<i>R2</i>	Резистор в цепи обмотки возбуждения приводного ДПТ ПЛ-62	1	–

### К задаче 3

Замкнуть переключателями (проводниками) клеммы 1–2 и 3–4, а выключатель *SA* разомкнуть. Установить автотрансформатор *TV* в положение наименьшего выходного напряжения. Для этого рукоятку регулирующего механизма установить в крайнее левое положение. Включить *QF2*, а потом *QF1*.

Установить на якоре двигателя напряжение, при котором частота вращения двигателя достигнет наибольшего значения (2000 об/мин). Записать при этой частоте вращения показания приборов (**опыт 1**, холостой ход генератора). Далее замкнуть цепь якоря генератора выключателем *SA*. Загружать генератор до тока 1,9 А, уменьшая сопротивление реостата *RP* (**опыты 2, 3 и 4**). Данные занести в табл. 3.2.

Повторить опыты при другом напряжении на якоре, при котором в опыте холостого хода (**опыт 5**) частота вращения составит 1000 об/мин. Данные **опытов 5–8** занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты опытов и расчетов

Номер опыта	$U_{дв}$ , В	$I_{дв}$ , А	$n_{дв}$ , об/мин	$\omega$ , рад/с
1			2000	
2				
3				
4				
5			1000	
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				

#### **К задаче 4**

Разомкнуть переключку 1–2, тем самым включить в цепь якоря двигателя резистор  $RI$ . Обмотка возбуждения остается включенной на полное напряжение.

Разомкнуть  $SA$ . Включить  $QF2$ , потом  $QF1$  (при нулевом напряжении на выходе автотрансформатора).

Установить на якоре напряжение, соответствующее холостому ходу в опыте 1. Увеличивать нагрузку генератора, уменьшая  $RP$ . Прodelать **опыты 9–12**. Результаты опытов занести в табл. 3.2.

#### **К задаче 5**

Замкнуть переключку 1–2 и разомкнуть переключку 3–4. Тем самым в обмотку возбуждения двигателя включается резистор  $R2$  и ток этой обмотки уменьшается.

Разомкнуть  $SA$ . Включить  $QF2$  и  $QF1$ . С помощью автотрансформатора установить на якоре напряжение, соответствующее опыту 5. Не меняя положение рукоятки автотрансформатора, включить  $SA$ . Нагружать генератор. Прodelать **опыты 13–16**. Результаты опытов занести в табл. 3.2.

#### **К задаче 6**

Естественная механическая характеристика ДПТ  $\omega = f(M)$  строится по двум точкам.

*Точка 1:*  $M = 0$  при

$$\omega = \omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi}; \quad (3.1)$$

$$k\Phi = \frac{U_n - I_n R_x}{\omega_n}. \quad (3.2)$$

*Точка 2:*  $M = M_n$  при  $\omega = \omega_n$ ,

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}. \quad (3.3)$$

Угловая скорость вала электродвигателя (рад/с):

$$\omega_n = 0,1045n_n.$$

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и табл. 3.1.
3. Выполненные в письменном виде задания для самоподготовки.
4. Табл. 3.2.
5. Графические зависимости  $\omega = f(M)$  на одном графике для всех опытов табл. 3.2 и для естественной механической характеристики, определенной в п. б.
6. Графические зависимости  $\omega = f(I_{\text{дв}})$  на одном графике для всех опытов табл. 3.2.
7. Выводы о влиянии  $U_{\text{я}}$ ,  $R_{\text{доб}}$  и тока возбуждения  $I_{\text{в}}$  на механические и электромеханические характеристики ДПТ.

## Контрольные вопросы

1. Как изменяется скорость идеального холостого хода при уменьшении тока возбуждения?
2. Как зависит скорость ДПТ от напряжения на якоре?
3. Как зависит скорость ДПТ от сопротивления в цепи якоря?
4. Как строится естественная механическая характеристика ДПТ с независимым возбуждением?
5. К чему приводит обрыв цепи возбуждения ДПТ?
6. Определите величину добавочного резистора для уменьшения пускового тока ДПТ в данной работе до значения  $2,5I_{\text{ном}}$ .
7. Можно ли утверждать, что уменьшение тока возбуждения в два раза вызывает увеличение скорости ДПТ в два раза?
8. Можно ли утверждать, что уменьшение напряжения на якоре ДПТ в два раза приводит к уменьшению скорости вращения ДПТ в два раза?
9. Можно ли утверждать, что увеличение добавочного сопротивления в два раза по сравнению с сопротивлением якоря приводит к падению скорости, в два раза большему, чем падение скорости на естественной характеристике?

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

#### **Цели занятия:**

1. Опытным путем исследовать электромеханические процессы при прямом пуске асинхронного двигателя (АД) и при основных электрических торможениях.
2. Освоить методику опытного определения приведенного момента инерции асинхронного электропривода рабочей машины (опыт свободного выбега).
3. Исследовать энергетику переходных процессов.

#### **Задачи занятия:**

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Построить кривую самоторможения рабочей машины после проведения опыта.
3. Провести опыт пуска электродвигателя.
4. Провести опыт торможения АД противовключением.
5. Провести опыт динамического торможения АД.

#### **Задания для самоподготовки:**

1. По учебнику [3] и учебному пособию [5] изучить тормозные режимы АД и переходные процессы в электроприводе с АД.
2. Письменно ответить на следующие вопросы:
  - 2.1. Какие существуют методы электрического торможения электродвигателей?
  - 2.2. Каковы сравнительные преимущества и недостатки методов электрического торможения АД?
  - 2.3. Какой вид имеют механические характеристики АД с короткозамкнутым (КЗ) ротором при торможении противовключением?
  - 2.4. Какой вид имеют механические характеристики АД с КЗ ротором при динамическом торможении?

### Методические указания

#### **К задаче 1**

В лабораторной установке используется заточной станок типа ТАД-1 для стригальных машин, имеющий приводной АД с КЗ ротором,



насаженным на вал с двумя выходами, на которых установлены заточные чугунные диски (один диск снят, на его место установлен датчик цифрового тахометра ТЭ-Д).

*Технические данные АД:*  $P_n = 0,4$  кВт;  $U_n = 380$  В;  $I_n = 1,15$  А;  $n_n = 1420$  об/мин;  $\eta_n = 68$  %;  $\cos\varphi = 0,75$ ;  $\mu_{кр} = 2,2$ ;  $\mu_n = 2$ ;  $J_{рот} = 0,00142$  кг·м<sup>2</sup>.

*Данные дисков:* диаметр  $d = 0,35$  м; толщина диска  $\delta = 0,01$  м; плотность материала  $\rho = 7500$  кг/м<sup>3</sup>.

Управляется электродвигатель вручную с помощью переключателя SA, имеющего три рабочих положения. В первом рабочем положении электродвигатель запускается; во втором обмотка АД подключается к сети постоянного тока для динамического торможения; в третьем электродвигатель реверсируется (торможение противовключением). В нулевом положении электродвигатель отключен (табл. 4.1, рис.).

### **К задаче 2**

Кривая самоторможения электропривода показывает изменение скорости вала электродвигателя в процессе выбега после отключения от сети.

Таблица 4.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель	1	Шкала 2,5 А
<i>QF2</i>	Автоматический выключатель АП502МТ	1	$I_{н.р} = 10$ А
<i>SA2</i>	Универсальный переключатель УП5000	1	$I_n = 10$ А
<i>PA</i>	Амперметр М330	1	Шкала 5 А
<i>M</i>	Электродвигатель ТНГ-4	1	$P_n = 0,4$ кВт
<i>BR</i>	Цифровой тахометр ТЭ-Д	1	–
<i>PW</i>	Ваттметр Д571, 5 А, 380 В	1	Шкала 3 кВт
<i>R1, R2</i>	Резисторы в цепи динамического торможения	2	–
<i>SA1</i>	Тумблер в цепи динамического торможения	1	–

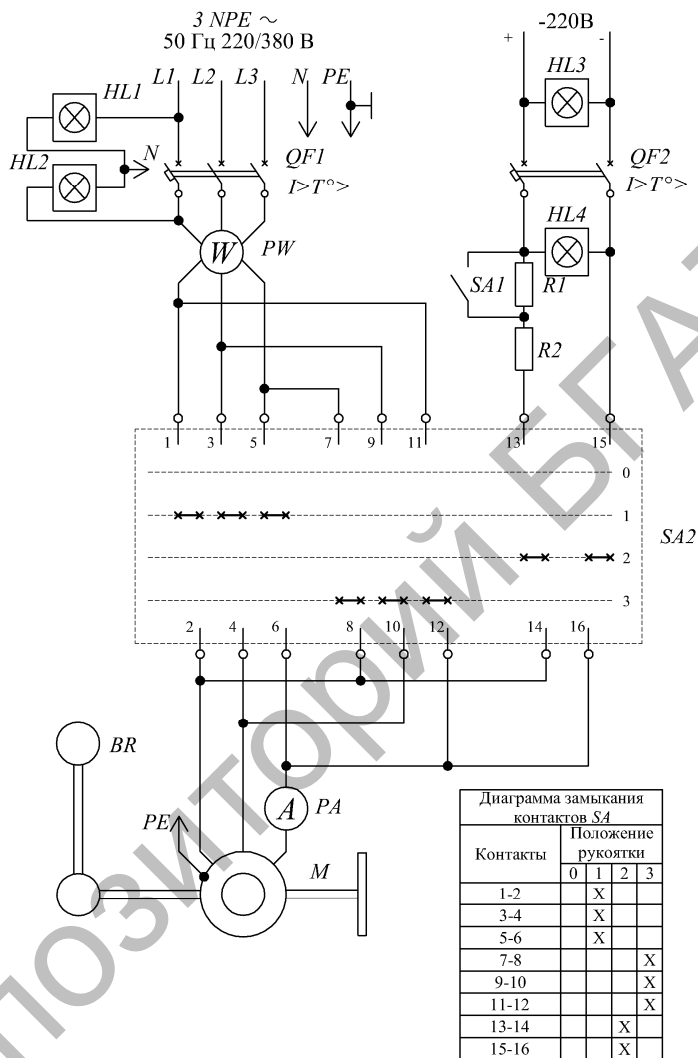


Рис. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для исследования переходных процессов пуска и торможения асинхронного электродвигателя

Кривая самоторможения нужна для определения приведенного момента инерции электропривода по методу свободного выбега (прилож. Г).

Переключатель SA2 устанавливают в положение 1, и электропривод разгоняется. Частоту вращения определяют по цифровому тахометру. Далее переводят SA2 в нулевое положение и включают секундомер. Замеряют частоту вращения через каждые 20 с (пять измерений), а также полное время остановки электродвигателя. Результаты опыта заносят в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты опыта самоторможения

Показатель	Измерения						
	1	2	3	4	5	6	7
Частота вращения $n$ , об/мин							0
Время $t$ , с	0	20	40	60	80	100	
Угловая скорость $\omega$ , рад/с							0

### **К задаче 3**

При запуске электродвигателя измеряют пусковой ток и время пуска. Цифровой тахометр изменяет свои показания каждые 2 с, поэтому вносит большую погрешность в измерения. Наиболее точно можно оценить время пуска по поведению стрелки ваттметра. При включении электродвигателя стрелка ваттметра резко отклоняется вправо, а в конце разбега возвращается к установившемуся значению. Этот промежуток времени измеряют с помощью секундомера.

При пуске АД стрелка амперметра, аналогично стрелке ваттметра, резко уходит вправо по инерции, и отсчеты тока получаются неточными. Для точного замера пускового тока рекомендуется проделать пуск, а затем включить АД на реверс. В момент, когда скорость двигателя станет равной нулю, засечь показания амперметра. Контролировать нулевую скорость двигателя можно по вращению диска, закрепленного на валу двигателя.

Опыт провести два раза. В табл. 4.3 записать средние значения тока и времени пуска.

### **К задаче 4**

Опыт торможения противовключением проделать также два раза и записать в табл. 4.3 среднее значение.

### **К задаче 5**

Опыт динамического торможения проделать для двух значений постоянного тока. В первом случае (при меньшем токе) тумблер SA1

отключить, а во втором (при большем токе) – включить. Ток измерить при неподвижном электродвигателе. Опыты повторить дважды. Записать в табл. 4.3 средние значения тока и времени.

Таблица 4.3

Результаты опытов и расчетов

Переходной процесс	Измерено			Вычислено	
	$I, A$	$\Delta t, c$	$\Delta n, об/мин$	$\Delta \omega, рад/с$	$M_{эф}, Н \cdot м$
Пуск					
Торможение противовключением					
Динамическое торможение:					
$SAI$ разомкнут					
$SAI$ замкнут					

Примечание:  $\Delta n$  – изменение частоты вращения за время пуска и торможения,  $мин^{-1}$ .

В табл. 4.3 эффективный момент вычислить из основного уравнения электропривода:

$$M_d - M_c = J_{пр} \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.1)$$

Принять  $M_d = M_{эф}$ ,  $M_c = 0,11 Н \cdot м$  (эти данные определены ранее специальным опытом).

$J_{пр}$  определить расчетом

$$J_{пр} = J_{рот} + J_{диск}, \quad (4.2)$$

где  $J_{рот}$  – момент инерции ротора (из каталожных данных),  $кг \cdot м^2$ .

$$J_{диск} = \frac{mR^2}{2}, \quad (4.3)$$

где  $R$  – радиус диска,  $м$  ( $R = 0,175 м$ );

$m$  – масса диска,  $кг$ .

$$m = \pi R^2 \delta p, \quad (4.4)$$

где  $\delta$  – толщина диска,  $м$  ( $\delta = 0,01 м$ );

$p$  – плотность материала диска,  $кг/м^3$  ( $p = 7500 кг/м^3$ ).

При пуске:

$$M_{\text{эф. пуск}} = J_{\text{пр}} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} + 0,11, \quad (4.5)$$

где  $\Delta\omega = 0,1045\Delta n$ .

При торможении противовключением и динамическом торможении:

$$M_{\text{эф. т. пр}} = J_{\text{пр}} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} - 0,11. \quad (4.6)$$

Результаты всех расчетов занести в табл. 4.3.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и табл. 4.1.
3. Письменные ответы на вопросы самоподготовки.
4. Табл. 4.2 и 4.3.
5. Кривая свободного выбега электропривода, графические построения (прилож. Г) и расчеты для определения  $J_{\text{пр}}$  по формуле (4.2).
6. Расчеты  $M_{\text{эф}}$  для табл. 4.3.
7. Выводы о точности определения  $J_{\text{пр}}$  и о преимуществах и недостатках различных способов торможения.

### Контрольные вопросы

1. Что такое момент инерции и какова его размерность?
2. Как определить момент инерции по кривой выбега (самоторможения)?
3. От чего зависит время пуска электропривода?
4. От чего зависит время самоторможения и время электрического торможения электропривода?
5. Вам предложили разработать схему для обеспечения быстрой остановки машины, имеющей большой момент инерции. Неревверсивный привод осуществляется асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором и недоступным валом. Какой способ вы выберете: противовключением или динамическим торможением?

6. Вам поручили провести опыт, чтобы уточнить механическую характеристику дробилки при разгоне вхолостую. Самоторможение происходит в течение нескольких десятков секунд. Приведенный момент инерции известен. Как можно выполнить это поручение?

### **Лабораторная работа № 5**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСКОРОСТНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

### ***Цели занятия:***

1. Изучить основные схемы и маркировку обмоток многоскоростных электродвигателей.
2. Опытным путем определить механические, электромеханические и энергетические характеристики двухскоростного электродвигателя.

### ***Задачи занятия:***

1. Ознакомиться с оборудованием лабораторной установки.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки (рис.).
3. Включить электродвигатель на первую (низшую) частоту вращения и опытным путем определить исходные данные для расчета характеристик электродвигателя.
4. Включить электродвигатель на вторую (высшую) частоту вращения и провести те же опыты, что в п. 3.

### ***Задания для самоподготовки:***

1. По учебникам [1, 3] и прилож. Д изучить принцип изменения числа пар полюсов двухскоростного асинхронного электродвигателя и его характеристики.
2. Письменно ответить на следующие вопросы и выполнить задания:
  - 2.1. Приведите схему обмоток, поясняющих изменение числа полюсов в соотношении 2:1.
  - 2.2. Нарисуйте механические характеристики двухскоростного электродвигателя, имеющего схему переключения  $\Delta/Y$ .
  - 2.3. Какой диапазон регулирования скорости имеют многоскоростные электродвигатели?

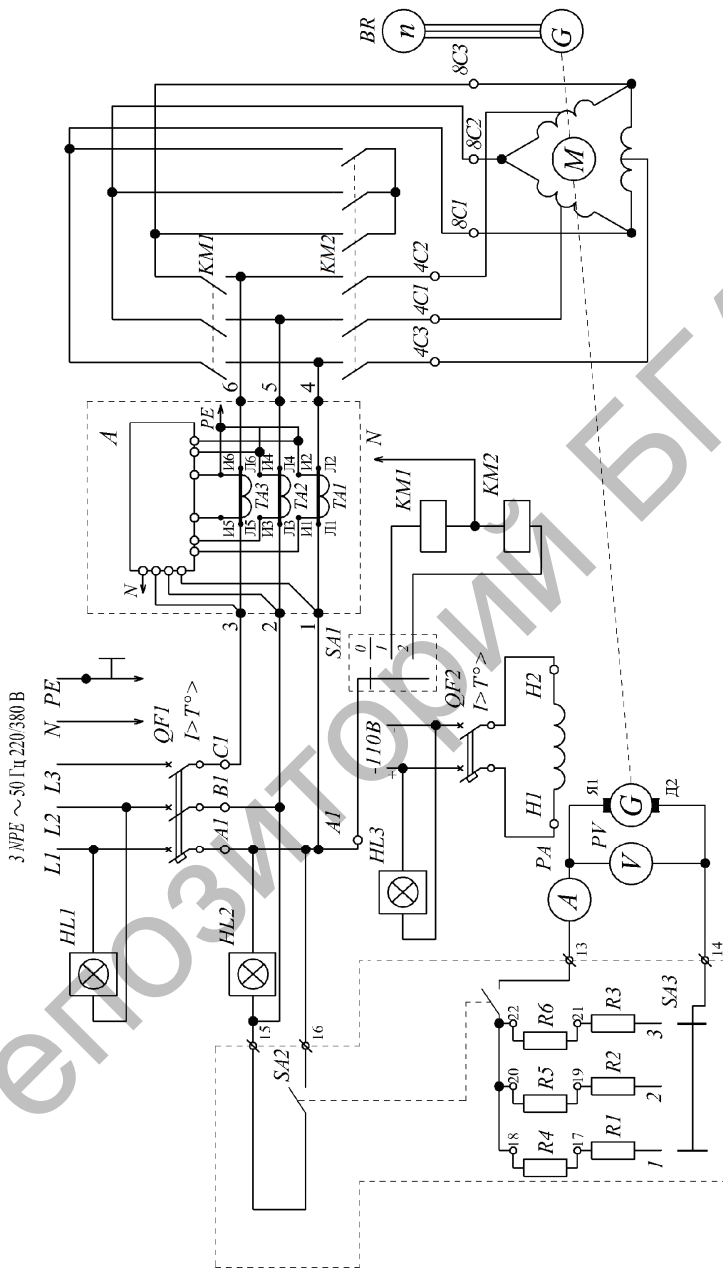


Рис. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для испытания двухскоростного асинхронного электродвигателя

## Методические указания

### К задаче 1

В лабораторной установке используются двухскоростной асинхронный электродвигатель 4А112МВ8/4У3, нагруженный генератором постоянного тока с независимым возбуждением, выполненным на базе электродвигателя П-31. Якорь генератора, в свою очередь, можно нагружать резисторами  $R1-R4$ ,  $R2-R5$ ,  $R3-R6$  через переключатель SA2. Дистанционно измеряется частота вращения вала электродвигателя. Потребляемые асинхронным электродвигателем мощность, ток и напряжение измеряются с помощью цифрового измерительного прибора А (табл. 5.1).

*Технические данные электродвигателя 4А112МВ8/4У3:*

– при числе полюсов 8:  $P_n = 2,2$  кВт;  $n_n = 710$  об/мин;  $I_1 = 6,5$  А;  $\eta = 73$  %;  $\cos\varphi_n = 0,69$ ;  $\mu_n = 1,2$ ;  $\mu_{\min} = 1,0$ ;  $\mu_{\text{кр}} = 1,8$ ;  $s_n = 3,9$  %;  $s_{\text{кр}} = 25,5$  %;  $k_i = 7,5$ ;  $R_{1\phi} = 8,91$  Ом;  $J_{\text{рот.дв}} = 0,024$  кг·м<sup>2</sup>;

– при числе полюсов 4:  $P_n = 3,6$  кВт;  $n_n = 1430$  об/мин;  $I_1 = 8,1$  А;  $\eta = 77$  %;  $\cos\varphi_n = 0,88$ ;  $\mu_n = 1,0$ ;  $\mu_{\min} = 0,8$ ;  $\mu_{\text{кр}} = 1,8$ ;  $s_n = 3,9$  %;  $s_{\text{кр}} = 32$  %;  $k_i = 7,5$ ;  $R_{1\phi} = 2,23$  Ом.

*Технические данные ДПП: тип ПЗ1;  $P_n = 1,5$  кВт;  $U_n = 110$  В;  $I_n = 17,8$  А;  $n_n = 1500$  об/мин.*

Таблица 5.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
QF1	Автоматический выключатель АЕ2016	1	$I_{н.р} = 10$ А
QF2	Автоматический выключатель М611	1	$I_{н.р} = 1,6$ А
M	Электродвигатель 4АМ112М8/4У3	1	$P_n = 3,6/2,2$ кВт
G	Генератор ПЗ1	1	$P_n = 1,5$ кВт
KM1, KM2, KM3	Контактор ПМЛ-110004В	2	$I_n = 10$ А
A	Цифровой измеритель UMG 96	1	–
BR	Тахогенератор ТЭ-1	1	Цена деления 50 об/мин
PA	Амперметр М42300	1	Шкала 30 А
PV	Вольтметр М381	1	Шкала 150 В



Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
SA1	Переключатель скоростей	1	–
SA2	Переключатель включения нагрузки	1	–
SA3	Переключатель нагрузки	1	–

### К задаче 3

Переключатель SA1 поставить в положение 1, тем самым включить электродвигатель на низшую частоту вращения (при этом обмотки электродвигателя соединяются в треугольник, частота вращения магнитного поля – 750 об/мин). Выполнить опыты для получения механических, электромеханических и энергетических характеристик электродвигателя. Для этого занести в табл. 5.2 показания измерительных приборов при холостом ходе агрегата (**опыт 1**).

Измерять значения тока, активной мощности и  $\cos\phi$  по цифровому прибору UMG 96. В этом опыте возбуждение генератора не включать.

Для **опыта 2** включить возбуждение генератора (автоматический выключатель QF2). Включить SA2, который подаст питание на катушку контактора KM3. Контактор KM3 замкнет свои контакты в цепи якоря генератора G. Затем установить SA3 в положение 1, якорь генератора тем самым замкнется на резисторы R1 и R4. Возникнет ток в цепи якоря генератора, а соответственно, и нагрузка на валу асинхронного электродвигателя. Занести в табл. 5.2 показания измерительных приборов.

Для **опыта 3** установить SA3 в положение 2 (включены резисторы R2 и R5), а для **опыта 4** – SA3 в положение 3 (включены резисторы R3 и R6). Показания измерительных приборов занести в табл. 5.2.

### К задаче 4

Переключателем SA1 подать питание на катушку KM2, тем самым включить электродвигатель на высшую частоту вращения (при этом обмотки электродвигателя соединены в параллельную звезду YY, частота вращения магнитного поля – 1500 об/мин). Для создания большей нагрузки генератору зашунтировать перед этим резисторы R4, R5 и R6 перемычками. Выполнить опыты аналогично п. 3. Результаты опытов занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

## Результаты опытов и расчетов

Номер опыта, соединение обмоток	Измерено											Вычислено							
	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт	$\cos\varphi_A,$ о. е.	$\cos\varphi_B,$ о. е.	$\cos\varphi_C,$ о. е.	$I_\Delta,$ А	$U_\Delta,$ В	$n,$ об/мин	$\omega,$ рад/с	$I_{1cp},$ А	$P_1,$ Вт	$\cos\varphi_{cp},$ о. е.	$P_2,$ Вт	$M,$ Н·м	$\eta,$ о. е.
1. $\Delta$ (холо- стой ход)																			
2. $\Delta$																			
3. $\Delta$																			
4. $\Delta$																			
5. $YU$ (холо- стой ход)																			
6. $YU$																			
7. $YU$																			
8. $YU$																			

## Расчетные формулы

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; \quad (5.1)$$

$$P_1 = P_A + P_B + P_C; \quad (5.2)$$

$$\cos\varphi = \frac{\cos\varphi_A + \cos\varphi_B + \cos\varphi_C}{3}; \quad (5.3)$$

$$P_2 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + \Delta P_{\text{хх}}, \quad (5.4)$$

где  $R_{\text{я}} = 0,5 \text{ Ом}$ ;

$\Delta P_{\text{хх}}$  для опытов 1–4 принять 58 Вт, для опытов 5–8 принять 75 Вт.

$$M = \frac{P_2}{0,1045n}; \quad (5.5)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (5.6)$$

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Рисунок и табл. 5.1. Данные электродвигателей.
3. Табл. 5.2.
4. Построенные по результатам табл. 5.2 графики зависимости:  $\omega = f(M)$  для обоих выключений обмоток ( $\Delta$  и  $YU$ ) на одном графике;  $\omega = f(I_{\text{ср}})$  для обоих выключений обмоток ( $\Delta$  и  $YU$ ) – на втором графике;  $\eta = f(P_2)$  и  $\cos\varphi = f(P_2)$  – на третьем графике.
5. Естественные механические характеристики  $\omega = f(M)$  для обоих соединений обмоток (пар полюсов) на одном графике. Методика построения механической характеристики по пяти точкам рассмотрена в лабораторной работе № 2.
6. Выполненные в письменном виде задания для самоподготовки.

## Контрольные вопросы

1. Как шифруется обозначение типоразмера многоскоростных электродвигателей?

2. Нарисуйте механические характеристики двухскоростного электродвигателя, имеющего схему подключения: а)  $Y/YU$ ; б)  $\Delta/YU$ .

3. Имеется асинхронный электродвигатель с шестью выводами обмоток без их маркировки. Как и какими приборами можно определить, что двигатель не односкоростной, а двухскоростной, с двумя независимыми обмотками?

4. На складе имеется асинхронный двигатель без паспортной таблички. Как определить, что он двухскоростной: а) при внешнем осмотре; б) при попытке включить его в сеть?

5. Вам поручили вместо односкоростного электродвигателя установить двухскоростной. Какие изменения нужно будет сделать в механическом и электромеханическом монтаже?

6. Как обозначаются обмотки многоскоростных электродвигателей?

### Лабораторная работа № 6

## УПРАВЛЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЧ-АД

**Цель занятия:** изучить вопросы устройства, монтажа, подключения, запуска, управления и порядка программирования ПЧ с инвертером фирмы LG.

#### **Задачи занятия:**

1. Ознакомиться с лабораторным стендом.  
2. Заполнить табл. 6.1 техническими данными аппаратов, используемых в схеме на рис. 6.1.

3. Изучить требования к монтажу преобразователя частоты, подключению и заземлению.

4. Изучить управление преобразователем частоты LG от встроенного пульта управления. Произвести пуск и остановку электродвигателя с ПЧ, регулировку частоты вращения электродвигателя от встроенного пульта управления ПЧ. Прodelать опыт регулирования частоты вращения электродвигателя на холостом ходу.

#### **Задания для самоподготовки:**

1. Нарисуйте схему преобразования переменного трехфазного тока в постоянный нерегулируемый (схема выпрямителя) [1, 3] (прилож. Е).

2. Нарисуйте схему преобразования переменного трехфазного тока в постоянный регулируемый [1, 3].

3. Нарисуйте схему включения ваттметра в цепь однофазного и трехфазного переменного тока.

## Методические указания

### К задаче 1

Лабораторная установка включает преобразователь частоты (ПЧ) модели SV040iG5-4 LG, нагруженный на асинхронный электродвигатель (АД). Для измерения величины тока в питающей сети 50 Гц используется амперметр *PA1*, а для измерения величины тока в цепи после инвертера – амперметр *PA2*. Для измерения линейных напряжений в сети 50 Гц используется вольтметр *PV1*, а на выходе ПЧ – вольтметр *PV2*. Потребляемую из сети мощность одной фазы измеряет ваттметр *PW1*. В питающей сети 50 Гц установлен автоматический выключатель *QF1* и сетевые дроссели *L1–L3*.

На стойке стенда закреплены внешние элементы управления. Тумблер *SA1* имеет три положения управления движением АД: 1 – вперед; 0 – отключение; 2 – назад. Переключатель *SA2* в положении 2 отключает выход ПЧ мгновенно.

Кнопка *SB1* служит для сброса сообщения «Авария ПЧ» или другого сообщения. Кнопка *SB2* – для выбора JOG (токового) режима работы. Переключатель *SA3* на четыре положения служит для ступенчатого задания трех частот вращения. Вольтметр *PV3* служит для отсчета запрограммированного значения мощности, напряжения или тока (в процентах от всей величины).

Расшифровка обозначения ПЧ SV040iG5-4:

SV – модель;

040 – максимальная мощность подключения электродвигателя (3,7 кВт);

iG5 – серия;

4 – входное напряжение (380–400 В, 50–60 Гц).

### Основные характеристики ПЧ

На стенде закреплен ПЧ SV040iG5-4. Его основные характеристики следующие:

- 1) максимальная мощность подключения двигателя – 3,7 кВт;
- 2) максимальный выходной ток – 8 А;
- 3) трехфазное питание – 380–400 В, 50–60 Гц ( $\pm 10\%$ );
- 4) несущая частота – 1–10 Гц;
- 5) метод управления – скалярный, задание частоты и напряжения по закону  $U/f$ ;
- 6) встроенный ПИД-регулятор;
- 7) возможность копировать параметры в таблицу из пульта;

8) время разгона – 0–6000 с. Для быстрого торможения есть возможность подключить тормозной резистор. При этом тормозной момент может повыситься до 150 % от номинального;

9) автозащита после пропадания и восстановления напряжения питания в сети. При постоянном наличии сигнала «Пуск» есть возможность выбрать либо автоматический перезапуск, либо ожидание появления сигнала «Пуск»;

10) ПЧ отключается и выдает сообщение об этом при следующих ненормальных (аварийных) ситуациях:

- а) выход напряжения сети за допустимые пределы;
- б) перегрузка по выходному току;
- в) перегрев инвертера;
- г) перегрев двигателя;
- д) обрыв фазы;
- е) перекос фазы;

11) ПЧ имеет следующую допустимую перегрузку:

- а) 150 % от номинального тока в течении 1 мин;
- б) 200 % от номинального тока в течении 0,5 с.

Следовательно, защитная характеристика обратно пропорциональна перегрузке;

12) ПЧ позволяет задать отдельно параметры для разгона, торможения и установившегося значения;

13) команды «Пуск» и «Стоп» задаются:

- а) на встроенном пульте (клавиатура);
- б) от внешних клемм;
- в) по последовательному каналу RS-485;

14) частота тока задается:

- а) на встроенном пульте;
- б) от внешних клемм: вход 0–10 В или 4–20 мА;
- в) по каналу RS-485;

15) порт RS-485 встроенный; протоколы LG-Bus, ModBus-RTU;

16) степень защиты IP20;

17) окружающая среда:

- а) относительная влажность – не более 90 %;
- б) рабочая температура – от –10 до +40 °С.

### ***К задаче 2***

Заполнить табл. 6.1 техническими данными аппаратов, используемых в схеме на рис. 6.1.

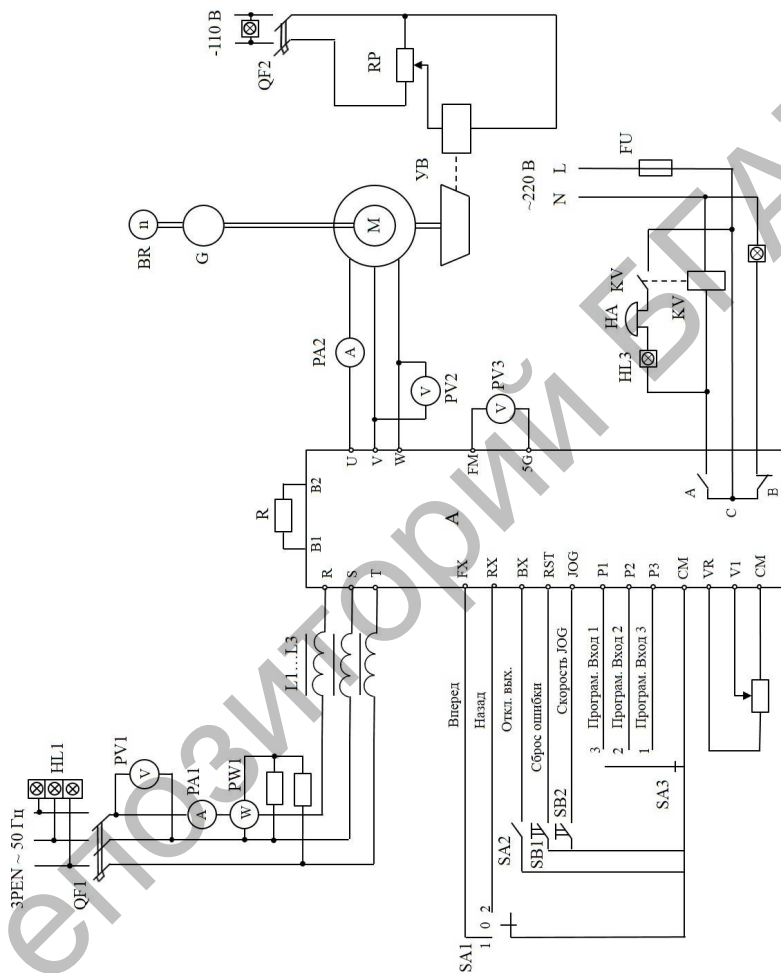


Рис. 6.1. Принципиальная электрическая схема стенда для испытания электропривода по схеме ПЧ-АД

Перечень основных элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
A			
QF1			
HL1			
HL2			
PV1			
PA1			
PW1			
PV2			
PA2			
M			
QF2			
G			

**К задаче 3***Требования к монтажу и установке ПЧ*

1. Отдельные части ПЧ могут нагреваться до 150 °С, поэтому устанавливайте ПЧ только на негорючие поверхности.
2. Для соблюдения режима охлаждения устанавливайте ПЧ вертикально.
3. При установке ПЧ в шкаф соблюдайте условия, указанные на рис. 6.2.

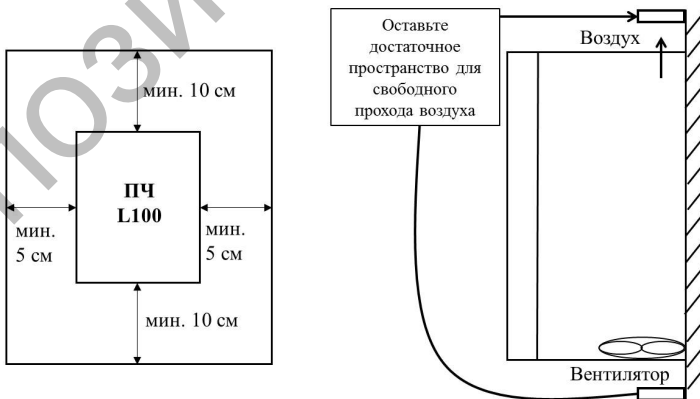


Рис. 6.2. Расположение ПЧ в низковольтном комплектном устройстве (НКУ)



### Требования к подключению ПЧ

1. Подключайте трехфазную сеть только к клеммам  $R, S, T$ , а однофазную сеть – к клеммам  $R$  и  $T$  (рис. 6.3). При подключении сети к любым другим клеммам ПЧ выйдет из строя.

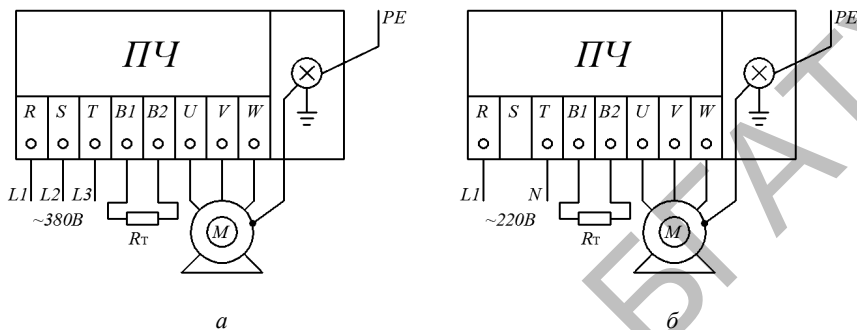


Рис. 6.3. Схемы подключения и заземления ПЧ в трехфазной (а) и однофазной (б) сети:  
 $R_T$  – тормозной резистор

2. Не используйте контактор на входе ПЧ для пуска и остановки двигателя (используйте для этого управляющие сигналы)

3. Не подключайте на выходе регулятора конденсаторную нагрузку, в частности конденсаторы коррекции коэффициента мощности и фильтры радиопомех с емкостными элементами.

4. При использовании схемы с контакторами на выходе не коммутируйте выход в режиме RUN. Сначала снимите напряжение с выхода регулятора (перейдите в режим STOP).

5. Не используйте длинные кабели. Это вызывает в них падение напряжения, что уменьшает вращательный момент двигателя и увеличивает его ток. Кроме того, данный кабель увеличивает электромагнитные помехи ПЧ и емкостный ток.

6. Не замыкайте клеммы  $B1$  и  $B2$  накоротко, если не используете тормозной резистор.

7. В силовых цепях преобразователя присутствуют высокочастотные гармоники, которые могут создавать помехи аппаратуре, расположенной вблизи. Для снижения помех используйте входной фильтр и располагайте силовые кабели на как можно большем расстоянии друг от друга и от цепи управления.

8. Во избежание поломок не устанавливайте сглаживающие конденсаторы или фильтры помех в выходные силовые цепи.

9. Помните, что при отключении преобразователя конденсатор фильтра остается заряженным. Не прислоняйтесь к клеммам преобразователя в течение 10 мин после отключения.

#### *Требования к заземлению*

По требованию электробезопасности ПЧ и двигатель должны быть заземлены. Для заземления регулятора используйте только клеммы со знаком заземления. Не допускайте использование корпуса или других винтов. Для напряжения 400 В и мощности двигателя 3,7 кВт сечение медной заземляющей жилы кабеля должно составлять не менее 2 мм<sup>2</sup>.

#### **К задаче 4**

Управлять ПЧ можно с помощью следующих органов управления:

- 1) встроенного пульта;
- 2) внешних органов управления, подключенных к клемнику ПЧ;
- 3) последовательного порта RS485 (MODBUS-RTU).

При управлении от встроенного пульта запуск SV040iG5-4 рекомендуется производить в следующей последовательности.

Пульт управления входит в стандартную комплектацию преобразователя частоты. Он может устанавливаться непосредственно на преобразователь или выноситься с преобразователя с помощью специального кабеля. Для выноса пульта используется фальш-панель и специальный кабель.

*Примечание:* не присоединяйте и не отсоединяйте пульт при включенном преобразователе. Не прикасайтесь к контактам разъема пульта, т. к. это может привести к поражению электрическим током.

Пульт управления с 7-сегментным четырехразрядным индикатором служит для управления и индикации рабочих величин и программирования параметров преобразователя частоты. На рис. 6.4 показан пульт управления. Назначение каждой его части приведено в табл. 6.2.

Для программирования ПЧ в объеме задач лабораторной работы необходимо выполнить следующее.

Установите на стойке лабораторного стола тумблер SA1 в положение 0, переключатель SA2 – в положение 1, переключатель SA3 –

в положение 0. Затем подайте напряжение на ПЧ, включив автоматический выключатель *QF1*. Вольтметр *PV1* покажет линейное напряжение сети, загорится сигнальная лампа *HL2*. ПЧ готов к работе. На пульте ПЧ основной индикатор высветит установленную частоту тока «XX.XX».

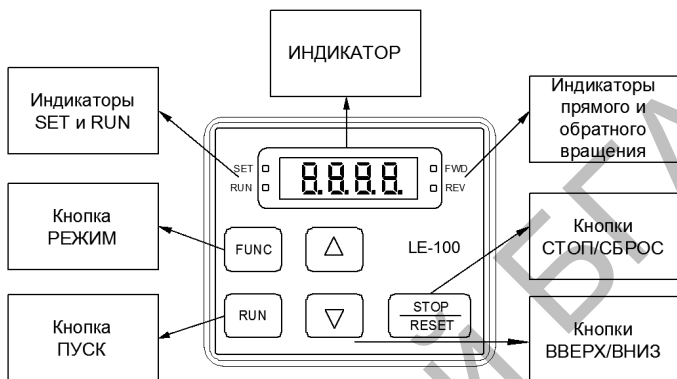


Рис. 6.4. Функциональная схема встроенного пульта управления ПЧ

Таблица 6.2

Назначение элементов встроенного пульта

Обозначение	Наименование	Описание
<b>Кнопки</b>		
FUNC	«Режим»	Применяется для переключения режимов программирования и индикации
▲ (UP)	«Вверх»	Применяется для изменения номера и величины параметра (увеличение)
▼ (DOWN)	«Вниз»	Применяется для изменения номера и величины параметра (уменьшение)
RUN	«Пуск»	Применяется для запуска преобразователя частоты
STOP/RESET	«Стоп/Сброс»	Применяется для остановки преобразователя во время работы и для сброса ошибки

Обозначение	Наименование	Описание
<b>Индикаторы</b>		
REV	«Вращение в обратном направлении»	Горит при вращении двигателя в обратном направлении
FWD	«Вращение в прямом направлении»	Горит при вращении двигателя в прямом направлении
SET	«Установка»	Горит в режиме просмотра и установки параметров
RUN	«Работа»	Постоянно горит при достижении заданной скорости и мигает при разгоне и торможении

Для установки частоты тока 10 Гц нажмите на пульте кнопку FUNC «Режим», загорится индикатор SET «Установка параметра». Нажимая на кнопку ▼ «Вниз», уменьшите на индикаторе частоту до 10 Гц. Запишите это значение в программу микроконтроллера ПЧ, нажав на кнопку FUNC. Основной индикатор высветит частоту 10 Гц. ПЧ готов к включению. Нажмите на кнопку RUN «Пуск». Загорится индикатор RUN «Работа» и индикатор FWD «Вращение в прямом направлении», двигатель начнет вращаться. Остановить электродвигатель можно нажав на кнопку STOP.

Запишите показания приборов в табл. 6.3. Аналогично установите частоту 20, 30, 40, 50 Гц и произведите запуск двигателя, пользуясь в этих случаях кнопкой ▲ «Вверх» на пульте ПЧ.

Для измерения времени разгона электродвигателя следует запрограммировать ПЧ. Для этого нажмите на кнопку ▲ «Вверх». Основной индикатор покажет символ ACC – время разгона. Нажмите на кнопку FUNC, и загорится индикатор SET, а основной индикатор покажет установленное время разгона. Пользуясь кнопками ▲ или ▼, настройте время 10 с. Запишите это время в программу микроконтроллера ПЧ, нажав на кнопку FUNC. Заморгает основной индикатор, установится параметр ACC.

После возврата к параметру частоты 50 Гц запустите электродвигатель, нажав на кнопку RUN, и проконтролируйте с помощью часов время разгона электродвигателя.

Результаты опытов и расчетов

$f$ , Гц	$U_1$ , В	$P_1$ , Вт	$I_1$ , А	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$P_{\text{пот}} = 3P_1$ , Вт
10							
20							
30							
40							
50							

Для измерения времени торможения электродвигателя следует вызвать параметр dEC «Время торможения», два раза нажав на кнопку ▲ «Вверх». Как только указанный параметр появится на основном индикаторе, нажмите на кнопку FUNC. Основной индикатор покажет установленное время торможения. Измените его с помощью кнопок ▲ или ▼ до значения 20 с. Запишите его в память микроконтроллера ПЧ, нажав на кнопку FUNC. Основной индикатор заморгает и высветит параметр dEC «Время торможения». Вернитесь к параметру «Частота», два раза нажав на кнопку ▼ «Вниз».

Запустите электродвигатель, нажав на кнопку RUN. После запуска и записи частоты вращения электродвигателя (до 20 с), остановите электродвигатель, нажав на кнопку STOP, и с помощью часов проконтролируйте время торможения. Зарисуйте диаграмму изменения частоты вращения от начала включения электродвигателя до его полной остановки. Изменение частоты вращения во времени имеет линейную зависимость (рис. 6.5).

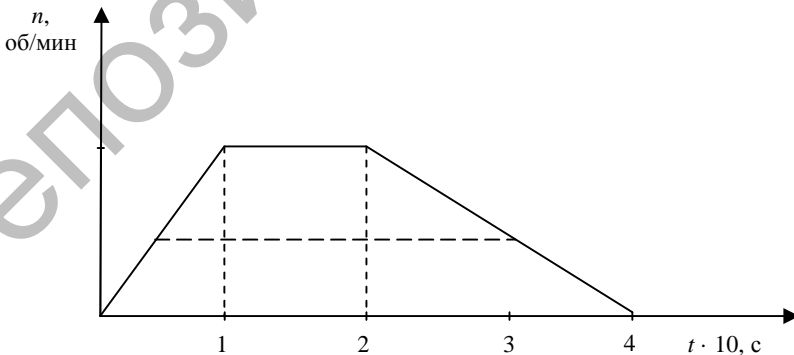


Рис. 6.5. Диаграмма изменения частоты вращения за цикл работы

Установите в два раза меньшую частоту тока и повторите опыт для построения диаграммы изменения частоты вращения во времени. Проконтролируйте с помощью часов, изменилось ли время разбега и торможения, если время работы на установившейся скорости осталось прежним. Вторую диаграмму нарисуйте на том же графике.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема установки (рис. 6.1).
3. Табл. 6.1, 6.2 и 6.3.
4. Графические зависимости (на одном графике)  $U_1 = f(f)$ ,  $U_2 = f(f)$ ,  $P_{\text{пот}} = f(f)$ ,  $I_1 = f(f)$ ,  $I = f(f)$ ,  $n = f(f)$ .
5. Диаграмма изменения частоты вращения за цикл работы.
6. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. К каким клеммам ПЧ подсоединяется сеть 50 Гц, тормозной резистор и электродвигатель?
2. Какая формула связывает частоту вращения АД и частоту питающего тока?
3. Каков алгоритм программирования в ПЧ частоты тока?
4. Каков алгоритм программирования в ПЧ времени разгона, времени торможения?

### Лабораторная работа № 7

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ ПЧ-АД

**Цель занятия:** опытным путем определить механические и электромеханические характеристики электропривода системы ПЧ-АД.

**Задачи занятия:**

1. Ознакомиться с лабораторным стендом.
2. Заполнить табл. 7.1 техническими данными основных аппаратов, используемых в схеме на рис. 6.1.
3. Провести опыты нагрузки электропривода при разных частотах.

### **Задания для самоподготовки:**

1. Изучить особенности ПЧ для электропривода и характеристики системы электропривода ПЧ-АД [1, 3].

2. Письменно выполните следующие задания (прилож. Е):

2.1. Запишите закон частотного управления асинхронным электродвигателем, предложенный в 1925 г. профессором М. П. Костенко [1, 3].

2.2. Нарисуйте механические характеристики идеализированного асинхронного электродвигателя при  $U / f = \text{const}$ .

2.3. Нарисуйте механические характеристики идеализированного асинхронного электродвигателя при  $U / f^2 = \text{const}$ .

### **Методические указания**

#### **К задачам 1 и 2**

Лабораторная установка включает преобразователь частоты модели SV040iG5-4 фирмы LG, нагруженный на асинхронный электродвигатель (АД).

Таблица 7.1

Перечень основных элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
A			
QF1			
HL1			
PV1			
PA1			
PW			
PV2			
PA2			
M			
PV3			
G			

Для измерения величины тока в питающей сети 50 Гц используется амперметр PA1, а для измерения тока в цепи после инвертора – амперметр PA2. Для измерения линейного напряжения в питающей

сети 50 Гц используется вольтметр *PV1*, а на выходе ПЧ – вольтметр *PV2*. Потребляемую из сети мощность одной фазы измеряет ваттметр *PW1*.

В питающей сети установлен автоматический выключатель *QF* и сетевые дроссели *L1–L3*.

Расшифровка обозначения ПЧ SV040iG5-4:

SV – модель;

040 – максимальная мощность подключения электродвигателя (3,7 кВт);

iG5 – серия;

4 – входное напряжение (380–400 В, 50/60 Гц).

*Технические данные АД*: тип АИР80В4У3;  $P_n = 1,5$  кВт;  $n_n = 1410$  об/мин;  $U_n = 380$  В;  $I_n = 3,5$  А;  $\eta = 78,5$  %;  $\cos\varphi = 0,8$  %; класс изоляции *F*; *IP54*.

### ***К задаче 3***

В данной лабораторной работе управление ПЧ производится от внешних элементов управления, находящихся на стойке лабораторного стола (не от встроенного пульта ПЧ).

Тумблер *SA1* имеет три положения управления движением АД: 1 – вперед; 0 – отключено; 2 – назад. Переключатель *SA2* в положении 2 отключает выход ПЧ мгновенно.

Кнопка *SB1* служит для сброса сообщения «Авария ПЧ» или другого сообщения. Кнопка *SB2* – для выбора функции JOG, обеспечивающей толчковый режим управления двигателем. Переключатель *SA3* на четыре положения служит для ступенчатого задания трех частот вращения. Вольтметр *PV3* служит для отчета запрограммированного значения мощности, напряжения тока (в процентах от всей величины).

Установите *SB1* в положение 0, *SA2* – в положение 1, *SA3* – в положение 0.

Включите автоматический выключатель *QF1*, т. е. подайте напряжение на ПЧ. Загорится индикатор *HL2*. Запустите электродвигатель, переведя *SA3* в положение 1 (первая скорость, частота тока 30 Гц) и *SB1* – в положение 1 «Вперед». Электродвигатель разгонится вхолостую. Занесите показания приборов в табл. 7.2 (**опыт 1**). Затем нагрузите электродвигатель электромагнитным тормозом. Для этого включите *QF2* и, перемещая ползунок реостата *RP2*, увеличивайте ток в цепи тормоза. Загрузите электродвигатель моментом 2 Н·м (**опыт 2**).



Нагрузите электродвигатель еще больше (**опыт 3**), установив на электромагнитном тормозе момент 4 Н·м, а затем 6 Н·м (**опыт 4**). Данные опытов занесите в табл. 7.2.

Снимите нагрузку с АД, переключите SA3 в положение 2 (вторая скорость, частота тока 40 Гц) и повторите опыты 1–4, загружая двигатель до 8 Н·м.

Повторите опыты 1–4 в положении 3 переключателя SA3 (третья скорость, частота тока 50 Гц).

Снимите нагрузку с АД, отключите АД, переведя переключатель SB1 в положение 0. Отключите ПЧ (QF1).

Таблица 7.2

Результаты опытов и расчетов

Номер опыта	Измерено								Вычислено					
	$f_1$ , Гц	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , кВт	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$M$ , Н·м	$n$ , об/мин	$\omega$ , рад/с	$P_2$ , кВт	$U_{2cp}$ , В	$P_{пот}$ , кВт	$\eta$	$\cos\varphi$
1	30						0							
2							2							
3								4						
4								6						
1	40						0							
2							2							
3								4						
4								6						
1	50						0							
2							2							
3								4						
4								6						

Примечание: цена деления тахометра – 50 об/мин. Показания тахометра делятся на 2.

### Расчетные формулы

Угловая скорость вала (рад/с):

$$\omega = 0,1045n.$$

Мощность на валу АД (Вт):

$$P_2 = M\omega.$$

При заполнении табл. 7.2 переведите  $P_2$  в киловатты.  
Потребляемая из сети мощность

$$P_{\text{пот}} = 3P_1. \quad (7.1)$$

КПД асинхронного электродвигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_{\text{пот}}}. \quad (7.2)$$

Коэффициент мощности электропривода

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{пот}}}{\sqrt{3}U_1 I_1}, \quad (7.3)$$

где  $P_{\text{пот}}$  – потребляемая мощность из сети, Вт.

Среднее значение выходного напряжения ПЧ при постоянной частоте тока

$$U_{2\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^2 U_2}{4}. \quad (7.4)$$

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Рис. 6.1 и табл. 7.1.
3. Табл. 7.2.
4. Графические зависимости при разных частотах тока на одном графике  $\omega = f(M)$ ,  $\eta = f(P_2)$ ,  $\cos \varphi = f(P_2)$ ,  $I_1 = f(P_2)$ ,  $I_2 = f(\omega)$ ,  $U_2 = f(\omega)$ .
5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Объясните графические зависимости, полученные в опытах.
2. Объясните достоинства и недостатки ПЧ.
3. Объясните достоинства и недостатки ПЧ со звеном постоянного тока.
4. Объясните законы изменения напряжения при изменении частоты тока, применяемые в ПЧ.

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

#### *Цели занятия:*

1. Экспериментально установить характер протекания процессов нагрева и охлаждения электродвигателя.
2. Изучить методы определения постоянной времени нагрева и охлаждения.

#### *Задачи занятия:*

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки (рис.).
3. Провести опыт нагрева электродвигателя в режиме  $S1$ .
4. Провести опыт нагрева электродвигателя в режиме  $S3$ .
5. Провести опыт охлаждения электродвигателя.

#### *Задания для самоподготовки:*

1. По учебным пособиям [2, 4] изучить нагрев и охлаждение электродвигателя в различных режимах работы.
2. Письменно ответить на следующие вопросы:
  - 2.1. Какие классы изоляции по теплостойкости используются в электродвигателе? Какова их предельная допустимая температура нагрева?
  - 2.2. Какое значение температуры окружающей среды принимается номинальным?
  - 2.3. Что такое температура превышения? Как она вычисляется?

### Методические указания

#### *К задаче 1*

В лабораторной установке исследуется нагрев и охлаждение асинхронного электродвигателя. Для измерения температуры обмотки используется термopара типа ХА (хромель-алюмель), заложенная в обмотку. Концы ее присоединены к цифровому термометру А2.

Асинхронный электродвигатель М1 нагружен генератором постоянного тока G2, работающим на нагрузочные резисторы R1–R6 (табл. 8.1). Возбуждение генератора независимое.

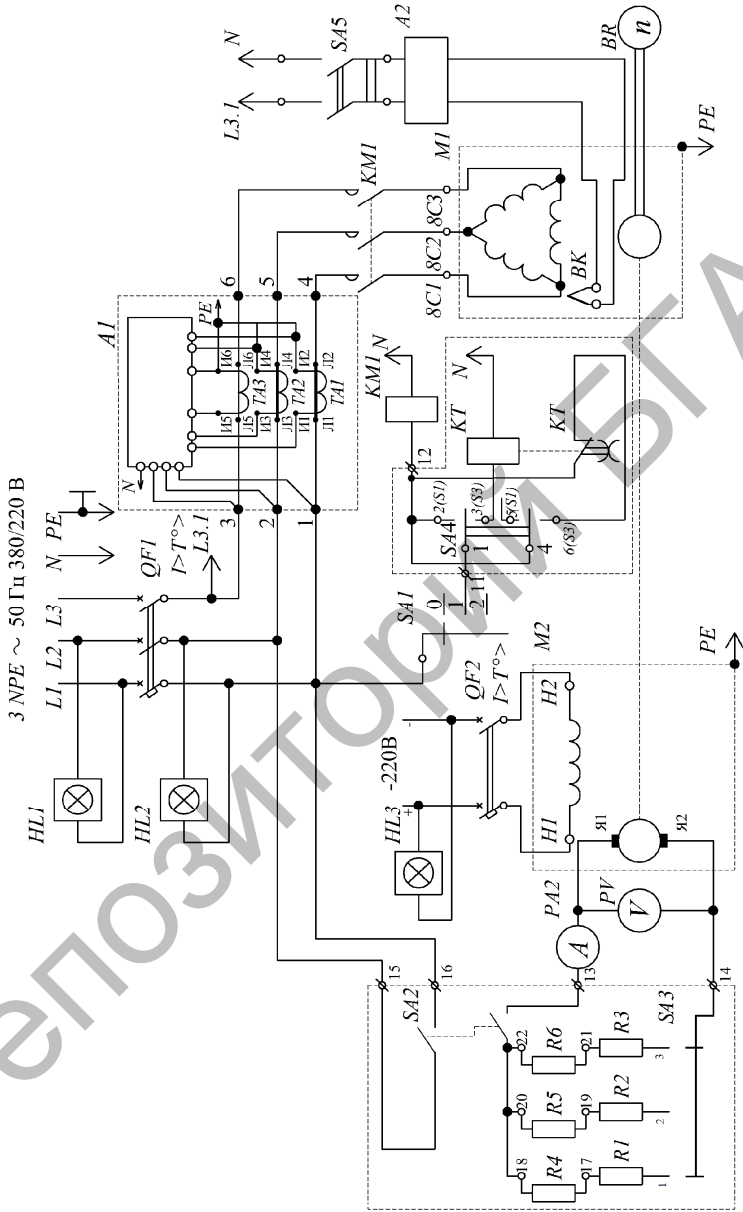


Рис. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для исследования нагрева и охлаждения электродвигателя

Для выбора режима работы электродвигателя используются переключатели SA1 и SA4. При установке SA1 в положение 1, а SA4 в верхнее положение двигатель включается в режим работы S1, а при установке SA1 в положение 2 и SA4 в нижнее положение – в режим работы S3. Переключение электродвигателя в режиме S3 осуществляется с помощью реле времени KT.

Потребляемые асинхронным электродвигателем мощность, ток и напряжение измеряются с помощью цифрового измерительного прибора A1. Нагрузка на генератор G подключается через переключатель SA2. Величина нагрузки выбирается переключателем SA3. Цифровой термометр получает питание через переключатель SA5.

*Технические данные электродвигателя M1 4A112M8/4У3:*

– при числе полюсов 8:  $P_n = 2,2$  кВт;  $n_n = 710$  об/мин;  $I_1 = 6,5$  А;  $\eta = 73$  %;  $\cos\varphi_n = 0,69$ ;  $\mu_n = 1,2$ ;  $\mu_{\min} = 1,0$ ;  $\mu_{\text{кр}} = 1,8$ ;  $s_n = 3,9$  %;  $s_{\text{к}} = 25,5$  %;  $k_i = 7,5$ ;  $R_{1\phi} = 8,91$  Ом;  $J_{\text{рот. дв}} = 0,024$  кг·м<sup>2</sup>;

– при числе полюсов 4:  $P_n = 3,6$  кВт;  $n_n = 1430$  об/мин;  $I_1 = 8,1$  А;  $\eta = 77$  %;  $\cos\varphi_n = 0,88$ ;  $\mu_n = 1,0$ ;  $\mu_{\min} = 0,8$ ;  $\mu_{\text{кр}} = 1,8$ ;  $s_n = 3,9$  %;  $s_{\text{к}} = 32$  %;  $k_i = 7,5$ ;  $R_{1\phi} = 2,23$  Ом.

*Технические данные ДПТ G:* тип ПЗ1;  $P_n = 1,5$  кВт;  $U_n = 110$  В;  $I_n = 17,8$  А;  $n_n = 1500$  об/мин.

Таблица 8.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
QF1	Автоматический выключатель АЕ2016	1	$I_{н.р} = 10$ А
QF2	Автоматический выключатель М611	1	$I_{н.р} = 1,6$ А
M1	Электродвигатель 4АМ112М8/4У3	1	$P_n = 3,6/2,2$ кВт
G	Генератор ПЗ1	1	$P_n = 1,5$ кВт
KM1, KM2	Электромагнитный пускатель (контактор) ПМЛ-110004В	2	$I_n = 10$ А
A2	Цифровой термометр ИР «Сосна-003»	1	–
BR	Тахогенератор ТЭ-1	1	Цена деления 50 об/мин

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
<i>BK</i>	Тепловой датчик	1	–
<i>PA</i>	Амперметр М42300	1	Шкала 30 А
<i>PV</i>	Вольтметр М381	1	Шкала 150 В
<i>AI</i>	Цифровой измеритель UMG-96	1	–

**К задаче 2**

Цепи термопары, термометра и тахометра собирать не нужно.

**К задаче 3**

Установить *SA1* в положение 0, *SA4* – в положение 1 (вверх по схеме). Создать нагрузку в цепи генератора, т. е. включить *KM2* переключателем *SA2* и замкнуть цепи переключателя *SA3* в положение 1, 2 или 3 (по заданию преподавателя). Включить возбуждение генератора (*QF2*).

Для снятия кривой нагрева и охлаждения электродвигателя пользуются показаниями термометра *A2* и часами (табл. 8.2). Включить термометр *A2* выключателем *SA5*. Включить электродвигатель, переключив *SA1* в положение 1. Записывать показания термометра через промежутки времени, указанные в табл. 8.2. Записать температуру окружающей среды (термометр закреплен на лабораторном стенде). Через 30 мин отключить электродвигатель.

Таблица 8.2

Данные опыта нагрева электродвигателя в режиме *S1*

Температура	Время <i>t</i> (от начала отсчета), мин															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	15	20	25	30
обмотки $\theta_{\text{обм}}, ^\circ\text{C}$																
окружающего воздуха $\theta_{\text{окр. ср}}, ^\circ\text{C}$	В начале опыта: _____ В конце опыта: _____															

**К задаче 4**

Снять кривую нагрева электродвигателя в режиме *S3*. Для этого переключить *SA4* в положение 2 (вниз по схеме). Двигатель будет периодически включаться и отключаться с помощью реле времени *KT*. Данные опыта занести в табл. 8.3. Опыт проводить в течение 15 мин.

Таблица 8.3

Данные опыта нагрева электродвигателя в режиме  $S3$ 

Температура	Время $t$ (от начала отсчета), мин													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	15	
обмотки $\theta_{\text{обм}}, ^\circ\text{C}$														
окружающего воздуха $\theta_{\text{окр. ср}}, ^\circ\text{C}$	В начале опыта: _____ В конце опыта: _____													

**К задаче 5**

Отключить электродвигатель и снять кривую охлаждения электродвигателя (до конца занятия). Данные опыта занести в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Данные опыта охлаждения электродвигателя

Температура	Время $t$ (от начала отсчета), мин													
	0	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	
обмотки $\theta_{\text{обм}}, ^\circ\text{C}$														
окружающего воздуха $\theta_{\text{окр. ср}}, ^\circ\text{C}$	В начале опыта: _____ В конце опыта: _____													

Построить график  $\tau = f(t)$  по данным табл. 8.2 и найти установившуюся температуру нагревания  $\tau_{\text{уст}}$  (прилож. И).

Найти постоянную времени нагрева электродвигателя:

– по методу касательной при  $t = 0$ ;

– в точке  $\tau = 0,632\tau_{\text{уст}}$ ;

– по методу трех температур (прилож. И).

Вычислить среднее арифметическое значение постоянной времени нагрева  $T_{\text{н}}$ .

Построить график  $\tau = f(t)$  по данным табл. 8.3.

Построить график  $\tau = f(t)$  по данным табл. 8.4 и найти постоянную времени охлаждения электродвигателя по методу касательной и по методу двух точек (прилож. И). Определить среднее значение постоянной времени охлаждения  $T_{\text{о}}$ .

Вычислить коэффициент ухудшения теплоотдачи электродвигателя:

$$\beta_0 = \frac{T_n}{T_o}. \quad (8.1)$$

Определить  $T_n$ :

$$T_n = \frac{C}{A} = \frac{420m}{\Delta P_n / \tau_n}, \quad (8.2)$$

где  $C$  – теплоемкость электродвигателя, Дж/°С;  
 $A$  – теплоотдача электродвигателя, Дж/(с·°С);  
420 – удельная теплоемкость электродвигателя, Дж/(кг·°С);  
 $m$  – масса электродвигателя, кг ( $m = 72$  кг);  
 $\Delta P_n$  – номинальные потери, Вт;  
 $\tau_n$  – допустимая температура превышения, °С ( $\tau_n = 65$  °С).

Номинальные потери

$$\Delta P = P_n \left( \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right), \quad (8.3)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность, Вт ( $P_n = 2200$  Вт);  
 $\eta_n$  – номинальный КПД ( $\eta_n = 73$  %).

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки (рис.) и табл. 8.1.
3. Письменные ответы на вопросы самоподготовки.
4. Табл. 8.2–8.4.
5. График зависимости  $\tau = f(t)$  по данным табл. 8.2 (температура превышения  $\tau = \theta_{\text{обм}} - \theta_{\text{окр. ср}}$ , °С;  $t$  – время, мин) с необходимыми построениями.
6. График зависимости  $\tau = f(t)$  по данным табл. 8.3.
7. График зависимости  $\tau = f(t)$  по данным табл. 8.4 с необходимыми построениями.



## Контрольные вопросы

1. Какие классы изоляции применяются в современных электрических машинах? Назовите их допустимые температуры.
2. Каким способом можно определить температуру обмоток электрических машин?
3. Каким уравнением описывается тепловой баланс электродвигателя?
4. Каким уравнением описывается процесс нагрева электродвигателя?
5. Какой физический смысл имеет постоянная времени нагрева?
6. Каковы методы определения постоянной времени нагрева?
7. Как определить время нагрева электродвигателя до установившегося значения превышения температуры?
8. Почему для самовентилирующихся электродвигателей постоянная времени охлаждения больше постоянной времени нагрева?
9. Что называется коэффициентом ухудшения теплоотдачи?
10. Как определить номинальную мощность электродвигателя, если известно, что в процессе нагрева, при известной мощности на валу 10 кВт, он нагрелся до температуры превышения 55 °С?

## Лабораторная работа № 9

### ИСПЫТАНИЕ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХСКОРОСТНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

#### *Цели занятия:*

1. Изучить типовые схемы управления многоскоростными электродвигателями.
2. Испытать схему пуска двухскоростного электродвигателя.

#### *Задачи занятия:*

1. Ознакомиться с лабораторной установкой. Заполнить табл. 9.1. Записать параметры приводного электродвигателя.
2. Собрать схему (рис. 9.1) для ручного переключения обмоток.
3. Провести опыты по определению пусковых токов при прямом пуске на каждую скорость АД и по определению токов переключения с одной скорости на другую.
4. Собрать схему (рис. 9.2) для полуавтоматического переключения скоростей при пуске на высшую скорость двухскоростного АД.

### **Задания для самоподготовки:**

1. По учебному пособию [2] и прилож. Д и К изучить теорию и работу схемы управления двухскоростным АД.
2. Письменно ответить на следующие вопросы и выполнить задания:
  - 2.1. Как обозначаются выводы многоскоростного АД?
  - 2.2. Нарисуйте механические характеристики двухскоростного электродвигателя с переключением обмоток.

## **Методические указания**

### **К задаче 1**

Лабораторная установка состоит из двухскоростного АД *M1* и соединенного с ним через упругую муфту двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения *M2*. Вращение двигателя измеряется тахометром *PR*. Переключение цепей управления двигателя в схеме ручного управления выполняется переключателем *SA*. Коммутация силовых цепей производится электромагнитными пускателями *KM1*, *KM2* и автоматическим выключателем *QF1*. При полуавтоматическом переключении обмоток при пуске используется реле времени *KT* и реле напряжения *KVI* (рис. 9.1, табл. 9.1).

*Технические данные установки:*

- тип АД: 4A112MB8/4УЗ,  $J_{p.д} = 0,024 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ :
  - при 8 полюсах:  $P_n = 2,2 \text{ кВт}$ ;  $n_n = 710 \text{ об/мин}$ ;  $I_n = 6,5 \text{ А}$ ;  $\eta = 75 \%$ ;  $\xi_s = 13,4 \text{ }^\circ\text{C/с}$ ;  $s_k = 25,5 \%$ ;  $r_{1(20)} = 12,1 \text{ Ом}$ ;  $\cos\varphi_n = 0,69$ ;  $\mu_n = 1,2$ ;  $\mu_{кр} = 1,8$ ;  $\mu_{\min} = 1,0$ ; соединение обмоток – «треугольник»;  $k_i = 7,5$ ;
  - при 4 полюсах:  $P_n = 3,6 \text{ кВт}$ ;  $n_n = 1430 \text{ об/мин}$ ;  $I_n = 8,1 \text{ А}$ ;  $\eta = 77 \%$ ;  $\xi_s = 14,6 \text{ }^\circ\text{C/с}$ ;  $s_k = 32 \%$ ;  $r_{1(20)} = 3,02 \text{ Ом}$ ;  $\cos\varphi_n = 0,88$ ;  $\mu_n = 1,0$ ;  $\mu_{кр} = 1,8$ ;  $\mu_{\min} = 1,8$ ; соединение обмоток – «треугольник»;  $k_i = 7,5$ ;
- тип ДПТ: П-31;  $P_n = 1,5 \text{ кВт}$ ;  $U_n = 110 \text{ В}$ ;  $I_n = 17,8 \text{ А}$ ;  $n_n = 1500 \text{ об/мин}$ ;  $\eta = 78,5 \%$ ;  $J_{p.д} = 0,0225 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

### **К задаче 2**

Собрать схему (рис. 9.1).

### **К задаче 3**

Установить переключатель *SA* в положение 0. Включить автомат *QF1*, перевести переключатель *SA* в положение 1. Двигатель будет разгоняться на низшей скорости. Толчок тока по амперметру *PA*

при пуске занести в табл. 9.2. Переключиться с первой скорости на вторую, установив *SA* в положение 2. Толчок тока при переключении занести в табл. 9.2. Отключить *QF1*.

Снова запустить двигатель – сразу на высшую частоту вращения (*SA* в положении 2). Записать пусковой ток. Переключиться с высшей скорости на низшую и записать толчок тока при переключении в табл. 9.2. Установить *SA* в положение 0. Отключить *QF1* и разобрать цепь управления *KM1* и *KM2*.

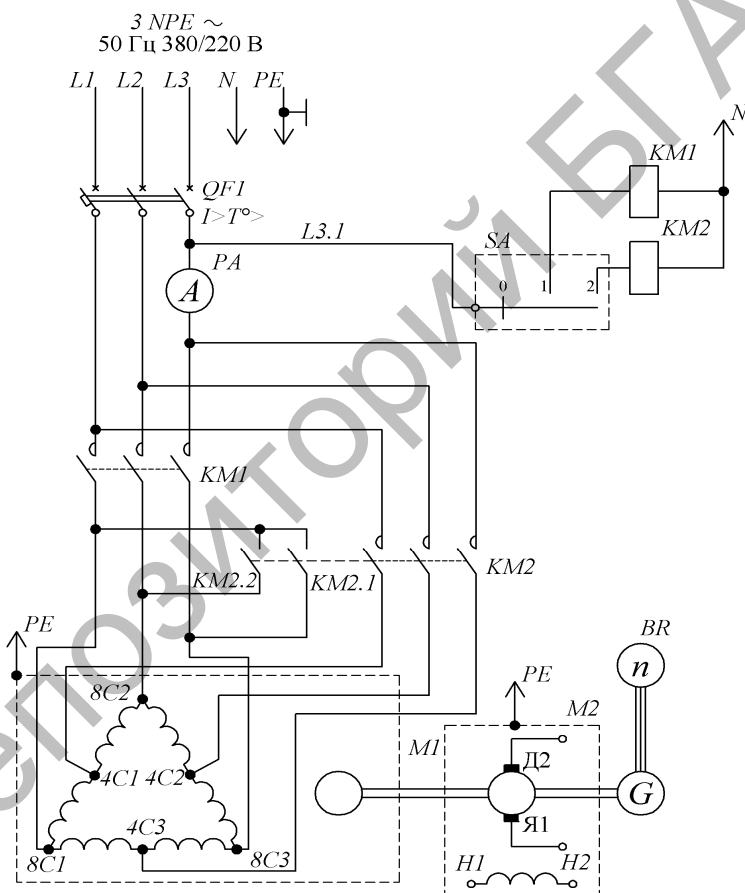


Рис. 9.1. Принципиальная электрическая схема управления двухскоростным электродвигателем с ручным управлением

Таблица 9.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель ...	1	$I_{н.р} = \dots$
<i>KM1, KM2</i>	Электромагнитный пускатель ...	2	$I_n = \dots$
<i>M1</i>	Электродвигатель ...	1	$P_n = \dots$
<i>M2</i>	Электродвигатель ...	1	$P_n = \dots$
<i>BR</i>	Тахогенератор ...	1	Цена деления
<i>SA</i>	Переключатель ...	1	$I_n = \dots$
<i>PA</i>	Амперметр типа ...	1	Цена деления
<i>KT</i>	Реле времени ...	1	$U_n = \dots$
<i>KV</i>	Реле промежуточное ...	1	$U_n = \dots$
<i>SB1, SB3</i>	Кнопочная станция ...	1	—
<i>SB2</i>	Кнопка ...	1	—

**К задаче 4**

Схему на рис. 9.2 рекомендуется собирать по частям.

Сначала собрать цепь реле времени *KT* и цепь включения *KM1*. Включить *QF1* и запустить двигатель, нажав на кнопку *SB1* «Пуск на низшую скорость». Отключить электродвигатель, нажав на кнопку *SB3* «Стоп».

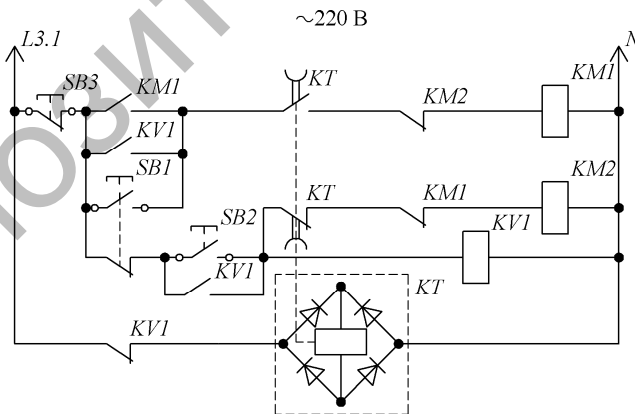


Рис. 9.2. Принципиальная электрическая схема управления двухскоростным электродвигателем с полуавтоматическим переключением обмоток при пуске

Затем собрать цепь питания *KV1* и электромагнитного пускателя *KM2*. Запустить электродвигатель на высшую скорость, нажав на кнопку *SB2* «Пуск на высшую скорость». Убедиться, что вначале включится первая скорость, потом двигатель переключится на вторую. Это произойдет потому, что при включении катушки реле *KV1* замкнется контакт *KV1*, шунтирующий кнопку *SB1*, отчего включится *KM1* и двигатель включится на низшую скорость. Но в это же время контакт *KV1* разомкнет цепь питания реле *KT*, отчего контакты через некоторое время вернуться в исходное состояние. Первый контакт *KT* через некоторое время разомкнет цепь питания электромагнитного пускателя *KM1*. Второй контакт *KT* замкнется в цепи питания электромагнитного пускателя *KM2*, и, как только контакт *KM1* вернется в исходное состояние в цепи катушки *KM2*, электромагнитный пускатель *KM2* включится и электродвигатель запустится на вторую скорость.

*KM1* включает цепи обмотки, соединенные по схеме «треугольник», выводные концы которой обозначаются: 8с1, 8с2, 8с3 (низшая скорость вращения).

*KM2* включает цепи обмотки, образующие схему «двойная звезда», выводные концы которой обозначаются: 4с1, 4с2, 4с3 (высшая скорость вращения).

Таблица 9.2

Результаты опытов и расчетов

Номер опыта	Действие при управлении	Измерено				Вычислено			
		$I$ , А	$n_{уст}$ , об/мин	$I_{n1}$ , А	$t_{n1}$ , с	$I_{n2}$ , А	$t_{n1}$ , с	$W_{n1}$ , Дж	$W_{n2}$ , Дж
1	Пуск на низшую скорость, ручное управление					—	—		—
2	Переключение с низшей скорости на высшую, ручное управление			—	—	—	—	—	—
3	Переключение на высшую скорость, ручное управление			—	—			—	
4	Переключение с высшей скорости на низшую			—	—	—	—	—	—

Примечание:  $n_{уст}$  – установленная частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $I$  – ток в опытах пуска и переключения, А.

## Расчетные формулы

Пусковой ток при пуске на низшую (первую) скорость

$$I_{п1} = I_{н1}k_{i1}, \quad (9.1)$$

где  $I_{н1}$  – номинальный ток первой скорости, А;

$k_{i1}$  – кратность пускового тока первой скорости, о. е.

Пусковой ток при пуске на высшую (вторую) скорость

$$I_{п2} = I_{н2}k_{i2}, \quad (9.2)$$

где  $I_{н2}$  – номинальный ток второй скорости, А;

$k_{i2}$  – кратность пускового тока второй скорости, о. е.

Время пуска электродвигателя вхолостую на низшую (первую) скорость

$$t_{п1} = T_{M1}(1 / s_{k1} + 1,5s_{k1}), \quad (9.3)$$

где  $T_{M1}$  – электромеханическая постоянная времени, с;

$s_{k1}$  – критическое скольжение на низшей скорости, о. е.

$$T_{M1} = J_{прив}\omega_{01} / M_{k1}, \quad (9.4)$$

где  $\omega_{01} = 78,375$  рад/с.

$$J_{прив} = J_1 + J_2 + J_{муф}, \quad (9.5)$$

где  $J_1$  – момент инерции ротора АД, кг·м<sup>2</sup> (см. технические данные АД);

$J_2$  – момент инерции якоря ДПТ, кг·м<sup>2</sup>;

$J_{муф}$  – момент инерции соединительной муфты, кг·м<sup>2</sup>; принять  $J_{муф} = 0,2J_1$ .

$$M_{k1} = M_{н1}\mu_{кр1}. \quad (9.6)$$

Номинальный момент на низшей (первой) скорости

$$M_{н1} = P_{н1} / \omega_{н1}; \quad (9.7)$$

$$\omega_{н1} = 0,1045n_{н1}. \quad (9.8)$$

Время пуска электродвигателя вхолостую на высшую (вторую) скорость

$$t_{п2} = T_{M2}(1 / s_{k2} + 1,5s_{k2}); \quad (9.9)$$

$$T_{M2} = J_{прив}\omega_{02} / M_{k2}, \quad (9.10)$$

где  $\omega_{02} = 157$  рад/с.

$$M_{k2} = M_{н2}\mu_{кр2}. \quad (9.11)$$

Номинальный момент на высшей (второй) скорости

$$M_{н2} = P_{н2} / \omega_{н2}; \quad (9.12)$$

$$\omega_{н2} = 0,1045n_{н2}. \quad (9.13)$$

Потери энергии (Вт·с) при разбеге из неподвижного состояния до высшей (второй) скорости

$$W_{П2} = J_{прив} \frac{\omega_{02}^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (s_{нач}^2 - s_{кон}^2). \quad (9.14)$$

Примем:  $R_1 / R_2 = 1$ ;  $s_{нач} = 1$ ;  $s_{кон} = 0$ . Тогда:

$$W_{П2} = J_{прив} \omega_{02}^2. \quad (9.15)$$

Аналогично потери энергии (Вт·с) при работе электродвигателя из неподвижного состояния до низшей (первой) скорости

$$W_{П1} = J_{прив} \omega_{01}^2. \quad (9.16)$$

Потери энергии при ступенчатом пуске равны сумме потерь от прямого пуска на низшую скорость плюс потери при разбеге от половинной синхронной высшей скорости до высшей синхронной скорости:

$$W_{ступ} = W_{П1} + J_{прив} \omega_{02}^2 (0,5^2 - 0) = W_{П1} + 0,25W_{П2}. \quad (9.17)$$

Отношение потерь энергии при прямом и ступенчатом пуске на высшую скорость

$$K = \frac{W_{П2}}{W_{ступ}}. \quad (9.18)$$

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема установки (рис. 9.1) и табл. 9.1.
3. Выполненные в письменном виде задания для самоподготовки.
4. Табл. 9.2. Расчеты по формулам (9.1–9.18).
5. Вывод о пусковом токе на первую и вторую скорости, о величине потерь при прямом и ступенчатом пуске.

## Контрольные вопросы

1. В чем преимущество ступенчатого пуска на высшую скорость перед прямым пуском на высшую скорость многоскоростного АД?
2. Какой режим работы АД наблюдается при переключении двухскоростного АД с высшей скорости на низшую?
3. Как изменить схему пуска двухскоростного АД, если вышло из строя реле времени? В какой последовательности в этом случае следует нажимать на кнопки при пуске на высшую скорость?
4. Каков принцип действия реле времени  $KT$ , используемого в схеме на рис. 9.2?

## Лабораторная работа № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ НА БАЗЕ ИНВЕРТОРА L100 (HITACHI)

**Цель занятия:** изучить способы монтажа и подключения к электросети, методы настройки (программирования), а также варианты управления преобразователем частоты L100 (Hitachi).

**Задачи занятия:**

1. Ознакомиться с лабораторным стендом.
2. Записать технические данные ПЧ, электродвигателя, приборов, аппаратов (табл. 10.1).
3. Изучить требования к монтажу и подключению преобразователя частоты L100.
4. Изучить управление преобразователем частоты L100 от встроенного пульта управления. Произвести пуск и остановку электро-



двигателя с ПЧ, регулировку частоты вращения электродвигателя от встроенного пульта управления ПЧ.

5. Прodelать опыт регулирования частоты вращения электродвигателя на холостом ходу и под нагрузкой.

**Задания для самоподготовки:**

1. Изучить функции и параметры настройки преобразователя частоты L100 по руководству пользователя.

2. Ознакомиться с принципом широтно-импульсной модуляции для получения выходных напряжений ниже входного уровня [3].

3. Письменно ответить на следующие вопросы:

3.1. Какая силовая схема у современных преобразователей частоты?

3.2. В чем заключается принцип широтно-импульсной модуляции?

Поясните рисунком.

**Методические указания**

**К задачам 1, 2**

Лабораторная установка состоит из вводного автоматического выключателя *QF1* и автоматического выключателя питания электротормоза *QF2*, преобразователя частоты L100 (Hitachi) *A*, асинхронного электродвигателя *M* с нагрузочным прямо показывающим электротормозом *УВ* со шкалой на его валу, управляемым от переключателя нагрузок *SA*. Для измерения напряжения до и после ПЧ установлены вольтметры *PV1* и *PV2*, а для контроля уровней входного и выходного тока – амперметры *PA1* и *PA2* соответственно. Трехфазный выход ПЧ подключен к статорным обмоткам асинхронного двигателя *M*. С валом электродвигателя жестко связан тахогенератор *TG*, сигнал с выхода которого подан на информационный аналоговый вход ПЧ и параллельно выведен на тахометр *BR* (табл. 10.1, рис. 10.1).

Таблица 10.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель ...	1	$I_{н.р} = \dots$
<i>QF2</i>	Автоматический выключатель ...	1	$I_{н.р} = \dots$
<i>PA1</i>	Амперметр ...	1	Цена деления
<i>PA2</i>	Амперметр ...	1	Цена деления

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
PV1	Вольтметр ...	1	Цена деления
PV2	Вольтметр ...	1	Цена деления
SA	Переключатель нагрузки ...	4	—
A	Преобразователь частоты ...	1	L100
M	Асинхронный электродвигатель ...	1	4A90L6Y3
YB	Электротормоз ...	1	—
TG	Тахогенератор ...	1	ТГ-1
BR	Тахометр ...	1	—

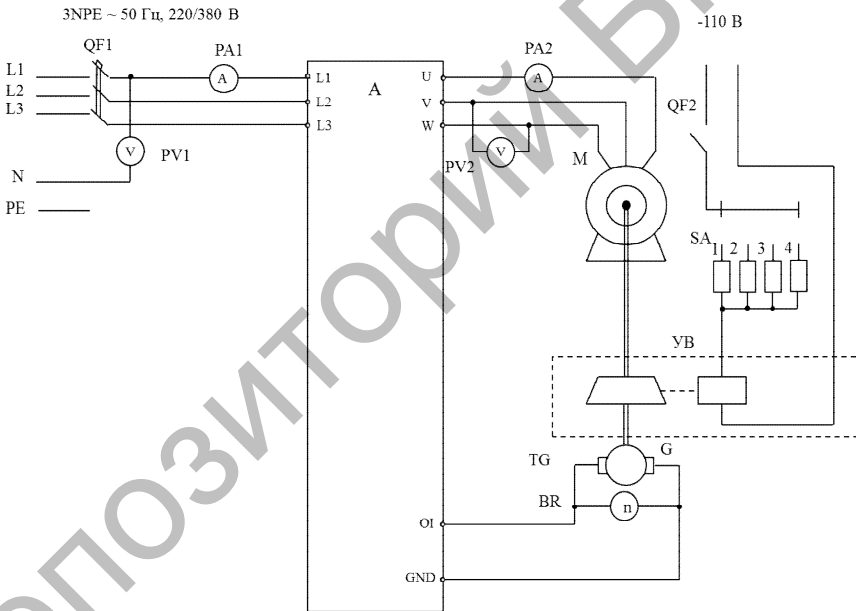


Рис. 10.1. Принципиальная электрическая схема стенда

Переписать параметры асинхронного электродвигателя с его паспортной таблички. Уяснить, какие элементы требуются для управления работой стенда. Определить скорость идеального холостого хода электромашины.

### К задаче 3

Изучить требования к монтажу и подключению преобразователя L100. Его внешний вид и наименования частей приведены на рис. 10.2.

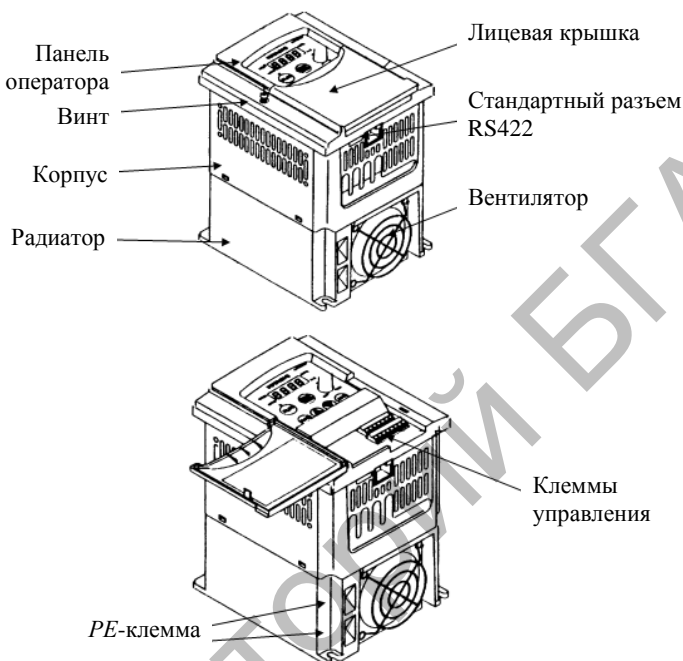


Рис. 10.2. Внешний вид преобразователя частоты L100 (Hitachi)

*Примечание:* клавиши для программирования преобразователя частоты и клеммы управления находятся под лицевой крышкой

### Установка

Для защиты от перегрева преобразователь частоты должен устанавливаться вертикально. Необходимо соблюдать оговоренные допустимые зазоры между преобразователем частоты и боковыми стенками (рис. 10.3), особенно при установке преобразователя частоты в электрические шкафы или другое оборудование.

Предметы, попавшие внутрь преобразователя частоты, могут привести к повреждению или полному выходу из строя оборудования. Поэтому необходимо следить за тем, чтобы во время работы

в корпус преобразователя частоты не попадали такие предметы, как изоляция кабеля, металлическая стружка или пыль. Следует избегать этого и при отключенном преобразователе частоты.

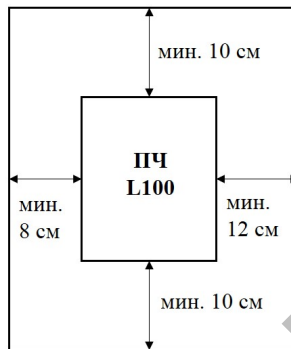


Рис. 10.3. Зазоры между преобразователем частоты и боковыми стенками

Рабочая температура – от  $-10$  до  $+40$  °С (либо до  $+50$  °С, но в этом случае несущая частота должна быть снижена до 2 кГц, а потребляемый двигателем ток должен составлять не более 80 % от номинального тока преобразователя частоты). Высокие температуры окружающего воздуха укорачивают срок службы преобразователя частоты.

Не следует устанавливать преобразователь частоты вблизи устройств, излучающих тепловую энергию.

### *Монтаж*

Монтаж, наладка и техническое обслуживание ПЧ должны осуществляться квалифицированным специалистом по электронике, ознакомленным с инструкцией по эксплуатации.

Прибор имеет конденсаторы в звене постоянного тока, поэтому даже после отключения на силовых клеммах преобразователя частоты некоторое время сохраняется опасное высокое напряжение. В случае снятия верхней крышки для ремонта или проверки состояния оборудования необходимо убедиться, что напряжение на силовых клеммах отсутствует.

Надежное замыкание на землю является защитой только для преобразователя частоты, а не для обслуживающего персонала.

Для подключения силовых клемм необходимо открыть панель оператора. Нельзя подавать напряжение питания на выходные

клеммы  $U/T1$ ,  $V/T2$ ,  $W/T3$ : это приведет к аварии. Преобразователи частоты оснащены электронными тепловыми реле для контроля тока двигателя. При работе в многодвигательном режиме необходимо устанавливать отдельно на каждый двигатель термоконттакт или терморезистор. Если длина кабеля более 50 м, необходимо устанавливать выходные дроссели.

#### К задаче 4

Пульт управления с четырехрядным индикатором (рис. 10.4) служит для управления и индикации рабочих величин и программирования параметров преобразователя частоты. Функции клавиш пульта управления приведены в табл. 10.2.



Рис. 10.4. Внешний вид пульта управления

Таблица 10.2

Описание пульта управления

Обозначение	Функция
Клавиша RUN	Запуск двигателя. Клавиша не активизируется в том случае, когда управление производится с клемм управления
Клавиша STOP/RESET	Остановка двигателя или перезагрузка после отключения
Клавиша STR	Занесение в память выбранных данных
Клавиши (1) и (2)	Изменение данных и параметров
Клавиша FUNC	Ввод данных и параметров

Обозначение	Функция
Встроенный потенциометр	Установка выходной частоты
RUN-LED	Индикация работы инвертора при наличии команды пуска
PRG-LED	Индикация при установке параметров
POWER-LED	Индикация – питания подано
LED Hz und A	Индикация выходной частоты и выходного тока

Прежде чем запускать ПЧ (однократным нажатием на кнопку RUN), необходимо настроить параметры ПЧ. Полный список параметров преобразователя L100 и их назначение приведены в руководстве по эксплуатации, а принцип управления – на рис. 10.5.

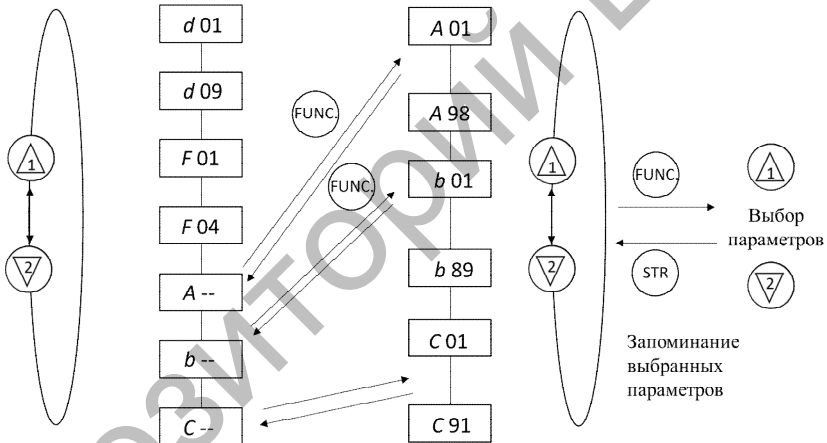


Рис. 10.5. Принцип управления

Встроенный пульт оператора позволяет управлять преобразователем частоты без каких-либо дополнительных подключений к клеммам управления:

- введите в функцию A01 код 00 (управление со встроенного потенциометра) или код 02 (установка частоты с помощью функции F01);
- введите в функцию A02 код 02 и запустите двигатель нажатием на клавишу RUN. В функции F04 задается необходимое направление вращения (00 – прямое вращение, 01 – обратное).

Нажмите на кнопку RUN, запустите привод, установите выходную частоту 50 Гц с помощью встроенного потенциометра. За изменением выходной частоты следите с помощью светодиодного индикатора пульта.

По тахометру *BR* определите частоту вращения двигателя, соответствующую 50 Гц. Данные занесите в табл. 10.3.

Таблица 10.3

Данные измерений и результаты расчетов (без нагрузки)

Номер опыта	$f$ , Гц	$n$ , об/мин	$\omega$ , рад/с
1	50		
2	40		
3	30		
4	20		
5	10		

Аналогично установите выходную частоту 40, 30, 20, 10 Гц и занесите результаты измерений в табл. 10.3.

Нажмите на кнопку STOP, тем самым подав команду на остановку ПЧ. Продолжайте наблюдать за изменением выходной частоты. Примите во внимание, что после выключения питания на силовых клеммах сохраняется опасное высокое напряжение, пока заряжены конденсаторы в звене постоянного тока.

### К задаче 5

Нажмите на кнопку RUN, запустите привод, установите выходную частоту 50 Гц с помощью встроенного потенциометра. За изменением выходной частоты следите с помощью светодиодного индикатора пульта (**опыт 1**). Занесите показания приборов в табл. 10.4.

Нагрузите электродвигатель электромагнитным тормозом. Для этого включите *QF2* и с помощью переключателя *SA* увеличивайте ток в цепи тормоза (**опыты 2–5**). Данные опытов занесите в табл. 10.4. Обратите внимание, что величина момента силы *M* должна быть записана в системе СИ.

Снимите нагрузку с АД, отключив выключатель *QF2*.

Повторите опыты 1–5 для выходной частоты 30 Гц. Данные опытов занесите в табл. 10.4.

Снимите нагрузку с АД, отключите АД. Отключите ПЧ.

Таблица 10.4

Данные измерений и результаты расчетов (с нагрузкой)

Номер опыта	Измерено							Вычислено	
	$f$ , Гц	$n$ , об/мин	$M$ , Н·м	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$\omega$ , рад/с	$P$ , Вт
1	50								
2									
3									
4									
5									
1	30								
2									
3									
4									
5									

### Расчетные формулы

Угловая скорость вала (рад/с):

$$\omega = 0,1045n.$$

Мощность на валу АД (Вт):

$$P = M\omega.$$

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема установки (рис. 10.1), табл. 10.1, 10.3 и 10.4.
3. Графики зависимости  $f = f(\omega)$  по табл. 10.3 и  $\omega = f(M)$ ,  $I_1 = f(P)$ ,  $\omega = f(I_1)$  по табл. 10.4.
4. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Для чего при частотном управлении асинхронным электродвигателем необходимо задавать время разгона и снижать выходную частоту ПЧ?



2. Какие параметры необходимо задать в ПЧ перед первым включением электромашины? Ответ поясните.
3. Для каких целей применяется управление ПЧ по сигналам от внешних цепей: дискретным и аналоговым?
4. Каково назначение встроенного пульта управления ПЧ?

## **Лабораторная работа № 11**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ НА БАЗЕ СТАНДАРТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ**

#### ***Цели занятия:***

1. Изучить структуру ПИД-регулятора и параметры настройки для его использования в рамках стандартного ПЧ, применяемого для построения замкнутых систем автоматического регулирования. В данной лабораторной работе – для системы стабилизации скорости асинхронного электродвигателя.

2. Опытным путем определить естественную механическую характеристику и искусственные механические характеристики в разомкнутой и замкнутой системе стабилизации скорости, построенной на базе стандартного ПЧ и асинхронного электродвигателя.

#### ***Задачи занятия:***

1. Ознакомиться с лабораторной установкой. Нарисовать электрическую принципиальную схему стенда данной работы (рис. 11.1). Выписать технические данные ПЧ, электродвигателя, приборов, аппаратов (табл. 11.1).

Нарисовать структурные схемы разомкнутой и замкнутой системы автоматического регулирования с обратной связью по скорости вращения.

2. Опытным путем построить естественную и три искусственные механические характеристики асинхронного электродвигателя в разомкнутой системе управления ПЧ-АД.

3. Запрограммировать ПИД-регулятор для организации функционирования ПЧ как корректирующего устройства в замкнутой системе с обратной связью по скорости.

4. Опытным путем построить три искусственные механические характеристики асинхронного электродвигателя в замкнутой системе управления ПЧ-АД.

#### **Задания для самоподготовки:**

1. Изучить функции и параметры настройки преобразователя частоты L100 по руководству пользователя.

2. Ознакомиться с принципом функционирования систем регулирования с обратной отрицательной связью [3] и прилож. Л.

3. Ознакомиться с принципом построения цифрового ПИД-регулятора, используемого в ПЧ [3].

4. Письменно ответить на следующие вопросы:

4.1. Какие аппаратные средства применяются в ПЧ для организации замкнутых систем с отрицательной связью?

4.2. Сколько входных клемм ПЧ должно обслуживать систему с отрицательной связью? Поясните рисунком.

4.3. Каким способом может быть установлено задание на регулирование в системах с замкнутой обратной связью в современных ПЧ? Поясните структурной схемой.

### **Методические указания**

#### **К задаче 1**

Лабораторная установка состоит из вводного автоматического выключателя  $QF1$  и автоматического выключателя питания электротормоза  $QF2$ , преобразователя частоты L100 (Hitachi)  $A$ , асинхронного электродвигателя  $M$  с нагрузочным прямо показывающим электротормозом УВ со шкалой на его валу, управляемым от переключателя нагрузок  $SA$ . Для измерения напряжения до и после ПЧ установлены вольтметры  $PV1$  и  $PV2$ , а для контроля уровней входного и выходного тока – амперметры  $PA1$  и  $PA2$  соответственно. Трехфазный выход ПЧ подключен к статорным обмоткам асинхронного двигателя  $M$ . С валом электродвигателя жестко связан тахогенератор  $TG$ , сигнал с выхода которого подан на информационный аналоговый вход ПЧ и параллельно выведен на тахометр  $BR$  (табл. 11.1, рис. 11.1).

Таблица 11.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
<i>QF1</i>	Автоматический выключатель ...	1	$I_{н.р} = \dots$
<i>QF2</i>	Автоматический выключатель ...	1	$I_{н.р} = \dots$
<i>PA1</i>	Амперметр ...	1	Цена деления
<i>PA2</i>	Амперметр ...	1	Цена деления
<i>PV1</i>	Вольтметр ...	1	Цена деления
<i>PV2</i>	Вольтметр ...	1	Цена деления
<i>SA</i>	Переключатель нагрузки ...	4	—
<i>A</i>	Преобразователь частоты ...	1	L100
<i>M</i>	Асинхронный электродвигатель ...	1	4A90L6Y3
<i>YB</i>	Электротормоз ...	1	—
<i>TG</i>	Тахогенератор ...	1	ТГ-1
<i>BR</i>	Тахометр ...	1	—

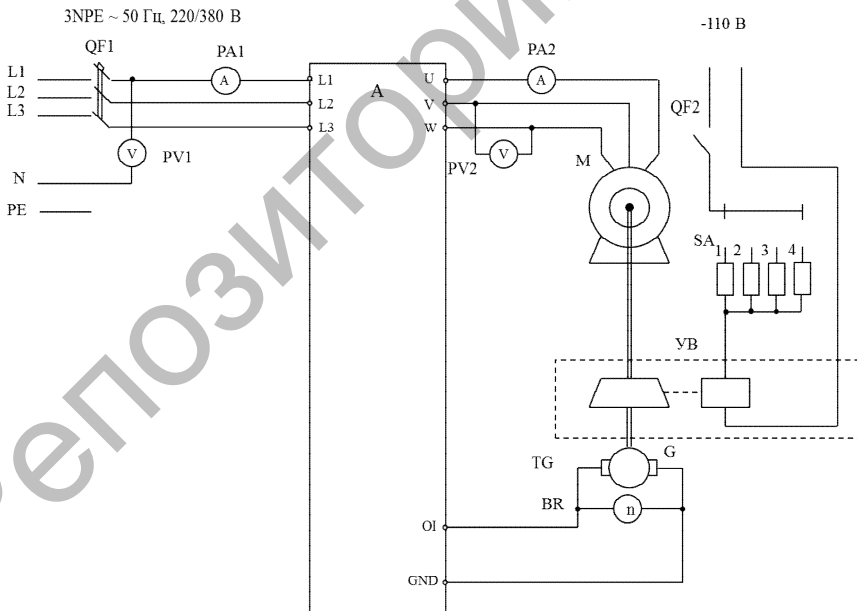


Рис. 11.1. Принципиальная электрическая схема стенда

Переписать параметры асинхронного электродвигателя с его паспортной таблички. Уяснить, какие элементы требуются для управления работой станда. Определить скорость идеального холостого хода электромашины. Ознакомиться с режимами функционирования дисплея и усеченной клавиатурой пульта преобразователя частоты L100.

### ***К задаче 2***

*Естественной механической характеристикой* называется зависимость угловой скорости вала электромашины от механической нагрузки сопротивления на нем при номинальных условиях питания электродвигателя.

Включить автоматический выключатель *QF1*. Для построения естественной механической характеристики АД на встроенном пульте оператора нажать на кнопку RUN, установить встроенный потенциометр в крайнее правое положение, тем самым настроив частоту 50 Гц, т. е. подать на АД напряжение питания с номинальной амплитудой и частотой. Следует убедиться, что для параметра A71 в диапазоне заданного значения установлено 00: параметр не активизирован. Занести в табл. 11.2 данные об измеренных значениях частоты вращения  $n$ , входного и выходного напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , входного и выходного токов  $I_1$  и  $I_2$  (**опыт 1** при частоте 50 Гц). Включить автоматический выключатель *QF2*. При помощи переключателя нагрузок SA задать четыре значения момента нагрузки, занести полученные данные в табл. 11.2 (**опыты 2–5** при частоте 50 Гц). Отключить автоматический выключатель *QF2*.

Для построения искусственных механических характеристик системы ПЧ-АД, т. е. характеристик при изменяющейся частоте и амплитуде напряжения питания, необходимо задавать фиксированную частоту на выходе ПЧ (при помощи встроенного потенциометра цифрового пульта управления ПЧ), соответствующую указанной в табл. 11.2. Включив предварительно автоматический выключатель *QF1*, задать четыре значения момента при помощи переключателя нагрузок, а данные об измеренных значениях занести в табл. 11.2. После завершения опытов отключить генерацию ШИМ сигнала кнопкой STOP/RESET. Отключить автоматические выключатели *QF1* и *QF2*.

Все механические характеристики  $\omega = f(M)$  необходимо выполнять в одном масштабе на одном графике – так, чтобы их можно было легко просмотреть в одном разрезе нагрузок. Таким образом, на одном графике будут изображены четыре кривые.

Таблица 11.2

Данные измерений и результаты расчетов разомкнутой системы управления

Номер опыта	Измерено							Вычислено	
	$f$ , Гц	$n$ , об/мин	$M$ , Н·м	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$\omega$ , рад/с	$P$ , Вт
1	50		0						
2									
3									
4									
5									
1	40		0						
2									
3									
4									
5									
1	30		0						
2									
3									
4									
5									
1	20		0						
2									
3									
4									
5									

### К задаче 3

Воспользоваться руководством пользователя для ПЧ L100 и запрограммировать ПИД-регулятор для организации функционирования ПЧ как корректирующего устройства в замкнутой системе с обратной связью по скорости (рис. 11.2).

A71...A76



Код	Функция	Введенное значение	Диапазон заданного значения	Задание
<b>ПИД-регулятор</b>				
A71	ПИД-регулятор активизирован/не активизирован	00	00: не актив. 01: актив.	
A72	П-составляющая	1.0	0,2–5,0	
A73	И-составляющая	1.0	0,0–150 с	
A74	Д-составляющая	0.0	0,0–100	
A75	Коэффициент масштабирования	1.0	0,01–99,99	
A76	Вход для сигнала ОС	00	00: клеммы О1 01: клемма О	

Рис. 11.2. Параметры ПЧ для активизации функции ПИД-регулятора

Для подключения функции ПИД-регулирования найти параметр A71, в диапазоне заданного значения установить 01, тем самым активизировав его.

#### К задаче 4

После установки соответствующих параметров в ПЧ для активизации функции ПИД-регулирования провести аналогичные опыты по определению механических характеристик асинхронного электродвигателя в замкнутой системе управления ПЧ-АД. Изменять скорость на ПЧ возможно на ходу. Данные об измеренных значениях занести в табл. 11.3.

После завершения опыта отключить генерацию ШИМ сигнала кнопкой STOP/RESET на пульте ПЧ. Построить механические характеристики на одном графике.

Таблица 11.3

Данные измерений и результаты расчетов замкнутой системы управления

Номер опыта	Измерено								Вычислено	
	$f_{уст},$ Гц	$f_{изм},$ Гц	$n,$ об/мин	$M,$ Н·м	$U_1,$ В	$I_1,$ А	$U_2,$ В	$I_2,$ А	$\omega,$ рад/с	$P,$ Вт
1	50			0						
2										
3										
4										
5										

Номер опыта	Измерено							Вычислено		
	$f_{уст}^*$ , Гц	$f_{изм}^*$ , Гц	$n$ , об/мин	$M$ , Н·м	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$\omega$ , рад/с	$P$ , Вт
1	40			0						
2										
3										
4										
5										
1	30			0						
2										
3										
4										
5										
1	20			0						
2										
3										
4										
5										

### Расчетные формулы

Угловая скорость вала (рад/с):

$$\omega = 0,1045n.$$

Мощность на валу АД (Вт):

$$P = M\omega.$$

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки, структурная схема разомкнутой и замкнутой системы управления.
3. Письменные ответы на вопросы самоподготовки.
4. Табл. 11.1, 11.2 и 11.3.

5. Графики механических характеристик  $\omega = f(M)$  разомкнутой и замкнутой системы управления отдельно.
6. Сравнить полученные механические характеристики в каждом из проведенных опытов.
7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Расшифруйте понятие «ПИД-регулятор».
2. В чем преимущества и недостатки системы автоматического регулирования с замкнутой отрицательной обратной связью?
3. Изобразите структурную схему системы автоматической стабилизации давления при переменном разборе жидкости.
4. Как на практике производится настройка параметров ПИД-регулятора для достижения оптимального переходного процесса регулируемой переменной?
5. Поясните принцип подчиненного регулирования в электроприводе. Какой контур регулирования настраивался в данной лабораторной работе?

### **Лабораторная работа № 12**

#### **ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

##### ***Цели занятия:***

1. Изучить управление электроприводами насосных установок по уровню.
2. Исследовать электропривод насосной установки с управлением по уровню.

##### ***Задачи занятия:***

1. Ознакомиться с оборудованием насосной установки.
2. Собрать принципиальную электрическую схему насосной установки.
3. Провести исследование насосной установки.



**Задания для самоподготовки:**

1. По учебному пособию [2] изучить технологическую схему башенной насосной установки, режимы ее работы и управление одноагрегатными насосными установками. Ознакомьтесь с прилож. М.

2. Письменно ответить на следующие вопросы:

2.1. От каких параметров зависит частота включения насосного агрегата, подающего воду в водонапорную башню?

2.2. Какие датчики уровня используются в комплекте станции «Каскад» управления насосным агрегатом? Нарисуйте их конструкцию.

**Методические указания**

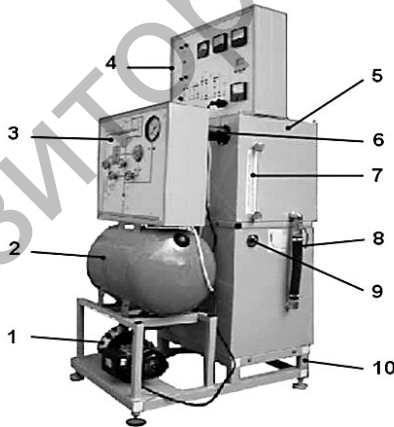
**К задаче 1**

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.



*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

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 – 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; Т – датчик температуры; РА – расходомер; МН – манометр.

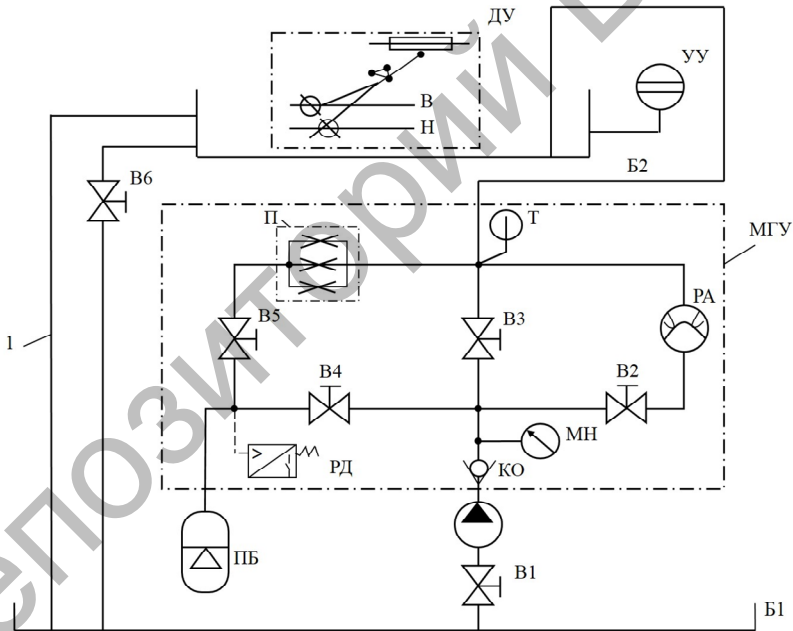


Рис. 12.2. Гидравлическая схема стенда:

КО – клапан обратный; РД – реле давления; В1–В5 – вентили; П – имитатор потребителей воды; Т – датчик температуры; РА – расходомер; МН – манометр; ПБ – пневматический бак; МГУ – модуль гидравлического управления; Б2 – гидробак верхний; ДУ – потенциметрический датчик уровня; УУ – указатель уровня воды в верхнем гидробаке; Б1 – гидробак нижний

Обратный клапан в напорную линию насоса установлен с целью предотвращения утечки 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 станда 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 могут возникнуть при работе станда, в нижнем гидробаке всегда есть вода, что предотвращает выход из строя гидронасоса Н, т. е. работа насоса всухую недопустима.

На передней панели станда размещен электронный секундомер, имеющий трехразрядное цифровое табло секундомера (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 на кнопку «Сброс».

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

В линиях питания электрической системы станда (на входе) установлены предохранители  $FU1$ ,  $FU2$ ,  $FU3$  и  $FU4$ , а также предусмотрена световая индикация исправности электрической системы  $HL1$  (рис. 12.3).

Структурирование электрической системы станда, которое необходимо выполнять перед началом каждой новой лабораторной работы, осуществляется путем установки перемычек со штекерами в гнезда на передней панели модуля электрического управления. Установка перемычек производится в соответствии со схемой электрических соединений (рис. 12.3). 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.

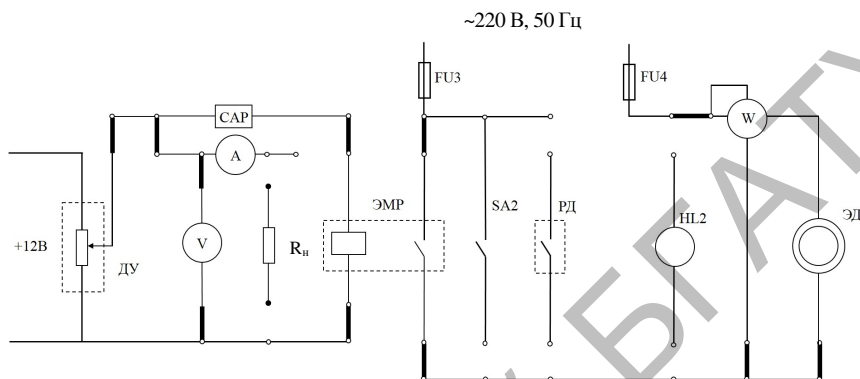


Рис. 12.3. Электрическая схема лабораторного стенда:

ДУ – потенциометрический датчик уровня (установлен в верхнем гидробаке, поз. 6 на рис. 12.1); ЭМР – электромагнитное реле; РД – реле давления (установлено в корпусе модуля гидравлического управления); ЭД – электродвигатель привода гидронасоса;  $R_n$  – сопротивление нагрузки;  $P_A$ ,  $P_V$ ,  $P_W$  – амперметр, вольтметр, ваттметр соответственно;  $HL2$  – световой индикатор

*Перед началом работы на стенде необходимо:*

1. Заправить нижний гидробак стенда водой. Для этого необходимо снять крышку верхнего гидробака (с установленным на ней модулем электрического управления) и через трубу перелива заполнить нижний гидробак. Заправка бака осуществляется до верхней отметки указателя уровня 9 (рис. 12.1), установленного в нижнем гидробаке.

2. Заземлить корпус стенда.

### **К задаче 2**

Перед включением установки необходимо собрать схему, показанную на рис. 12.3 и на передней панели модуля электрического управления. Напряжение питания силовой части стенда составляет 220 В переменного тока, 50 Гц. Напряжение питания потенциометрического датчика уровня – 12 В, ток постоянный.

На модуле гидравлического управления закрыть вентили В3, В4 и В5 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  $PA$ .

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

Провести три опыта при различных степенях открытия вентиля В6:

1. В **опыте 1** вентиль В6 закрыть полностью.

2. Зафиксировать начальное показание  $V_{нач}$  скоростного счетчика объема подачи воды  $PA$ . Результаты испытаний занести в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Результаты опытов

Номер опыта	Время работы насосной установки $t_p$ , 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					
2					
3					

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

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

5. В **опыте 2** открыть В2 почти полностью, установив рукоятку управления вентилем почти параллельно оси трубопровода.

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

При каждом срабатывании насосной установки необходимо, не останавливая секундомера, фиксировать время  $t_p$ , в течение которого работает насосная установка, а также мощность  $P$ , потребляемую из сети.

6. Опыт закончить в момент полного опорожнения верхнего бака (или в момент третьего включения насосной установки). Нажав на кнопку «Пуск», остановить секундомер. Тем самым фиксируется время проведения опыта  $t_{оп}$ . Зафиксировать конечное показание счетчика объема подачи воды  $V_{кон}$ .

7. Для проведения **опыта 3** (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 на кнопку «Сброс» секундомера. Далее действовать согласно п. 6.

8. После проведения опытов 1–3 необходимо отключить электрическое питание стенда и снять перемычки со штекерами с модуля электрического управления.

### Расчетные формулы

Средняя подача насоса

$$Q_{нас} = \frac{V_{кон} - V_{нач}}{t_p}, \quad (12.1)$$

где  $t_p$  – время работы насосной установки, с.

Средний расход воды потребителем

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

Потребляемая в течение опыта энергия

$$W = Pt_p. \quad (12.3)$$

При вычислении  $W$  необходимо подставлять значение  $P$  в киловаттах, а  $t_p$  – в часах.

Число включений в час

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

Регулируемый объем верхнего бака

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

Максимальное число включений в час

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

Результаты расчетов занести в табл. 12.2.

Таблица 12.2

Результаты расчетов

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

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Письменные ответы на вопросы самоподготовки.
3. Гидравлическая схема стенда (рис. 12.2).
4. Табл. 12.1 и 12.2.
5. Расчеты по формулам (12.1–12.6).
6. График зависимости  $Z = f(Q_{\text{расх}})$ .

### Контрольные вопросы

1. Где устанавливается обратный клапан? Для чего он используется?
2. Как устроен датчик уровня?

3. Объясните графики зависимости  $Z = f(Q_{\text{расх}})$ , полученные в опытах.

4. Назовите элементы функциональной схемы САР насосной установки с управлением по уровню. Каково их назначение?

### Лабораторная работа № 13

## ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТАЛИ

#### ***Цели работы:***

1. Изучить общие требования к электроприводу подъемных крановых механизмов.
2. Изучить электрооборудование и особенности электропривода электротельферной установки ТЭП-0,5 и освоить методику выбора мощности электродвигателя.
3. Изучить схемы управления тельферной установкой.

#### ***Задачи занятия:***

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные приборов и оборудования.
2. Определить рабочие характеристики лабораторной установки.
3. Снять показания для построения нагрузочной диаграммы работы электродвигателя подъема и перемещения.
4. Выбрать мощность электродвигателя подъема и перемещения по аналитическим выражениям и с помощью нагрузочной диаграммы.
5. Изучить схему полуавтоматического управления тельферной установкой. Составить спецификацию к схеме.
6. Провести анализ производственной ситуации.

#### ***Задания для самоподготовки:***

1. По учебному пособию [2] изучить требования к электроприводу подъемных крановых механизмов.
2. Письменно ответить на следующие вопросы:
  - 2.1. Почему мягкие механические характеристики электроприводов для подъемных механизмов лучше, чем жесткие?
  - 2.2. Какое среднее число включений в час характерно: а) для легкого режима работы электрооборудования кранов; б) для весьма



тяжелого? Какая продолжительность включения ПВ% характерна для каждого из этих режимов?

2.3. Сколько двигателей содержится в тельферной установке? Для чего они применяются?

### Методические указания

#### К задаче 1

В лаборатории смонтирован электротельфер ТЭП-0,5 грузоподъемностью 0,5 т. Он имеет тележку с электродвигателем для перемещения по балке, грузоподъемный механизм с электродвигателем подъема, барабаном, электромагнитным дисковым тормозом, подвеской с крюком. Электротельфер получает питание по гибкому кабелю, подвижно подвешенному на тресе. Управление электротельфером возможно от кнопочной станции, прикрепленной на подвесном тресе к корпусу электротельфера, и от кнопок управления, расположенных на стойке лабораторного стола.

Для реализации примера полуавтоматического управления электротельферной установкой смонтированы две площадки и два конечных выключателя SQ (рис. 13.1 и 13.2).

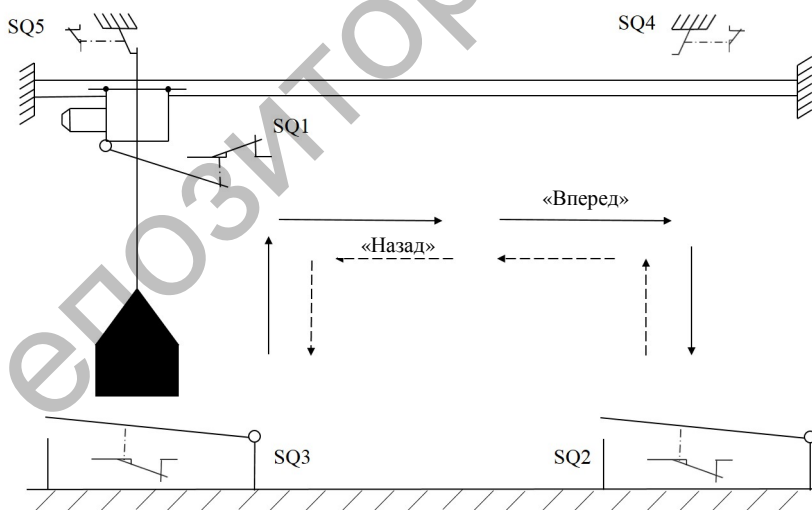


Рис. 13.1. Технологическая схема автоматизированной тельферной лабораторной установки

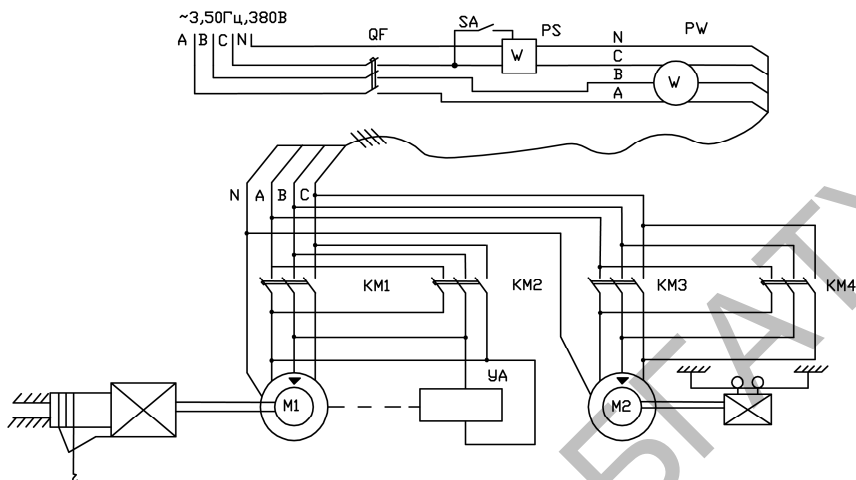


Рис. 13.2. Принципиальная электрическая схема силовой части лабораторной тельферной установки:  
 YA – электромагнитный дисковый тормоз механизма подъема

Технологическая схема полуавтоматической работы установки в лабораторных условиях реализована следующим образом (рис. 13.3). При подаче команды на начало перемещения «Вперед» груз поднимается на определенную высоту, перемещается вдоль балки в заданное место и опускается на платформу. То же повторяется при обратном маршруте. В любом месте таль может быть остановлена и возвращена обратно к месту назначения.

Для реализации описанной программы задействовано пять конечных выключателей  $SQ1-SQ5$  и пять промежуточных реле  $KV1-KV5$ , три дополнительные кнопки («Вперед», «Назад», «Стоп»). Для переключения режима работы с ручного на автоматический и обратно служит переключатель SA.

Работа схемы управления (рис. 13.3) происходит следующим образом. В исходном положении (см. рис. 13.1) контакты конечных выключателей  $SQ5$  и  $SQ3$  разомкнуты, а все другие – замкнуты. (При установке груза на платформе 2 разомкнуты контакты  $SQ4$  и  $SQ2$ , остальные замкнуты.)

При установке SA в положение А (автоматическое управление) срабатывают реле  $KV1$  и  $KV4$ .

При нажатии на кнопку SB6 «Пуск вперед» срабатывает реле  $KV2$ . Его контакт  $KV2.4$  шунтирует кнопку SB6, а контакт  $KV2.1$  замыкается.

Тем самым замыкается цепь  $5 KV2.1-KV4.1-KV1.1-KM2$ , подается питание на катушку электромагнитного пускателя  $KM1$  «Подъем». Выключается электродвигатель на подъем груза.

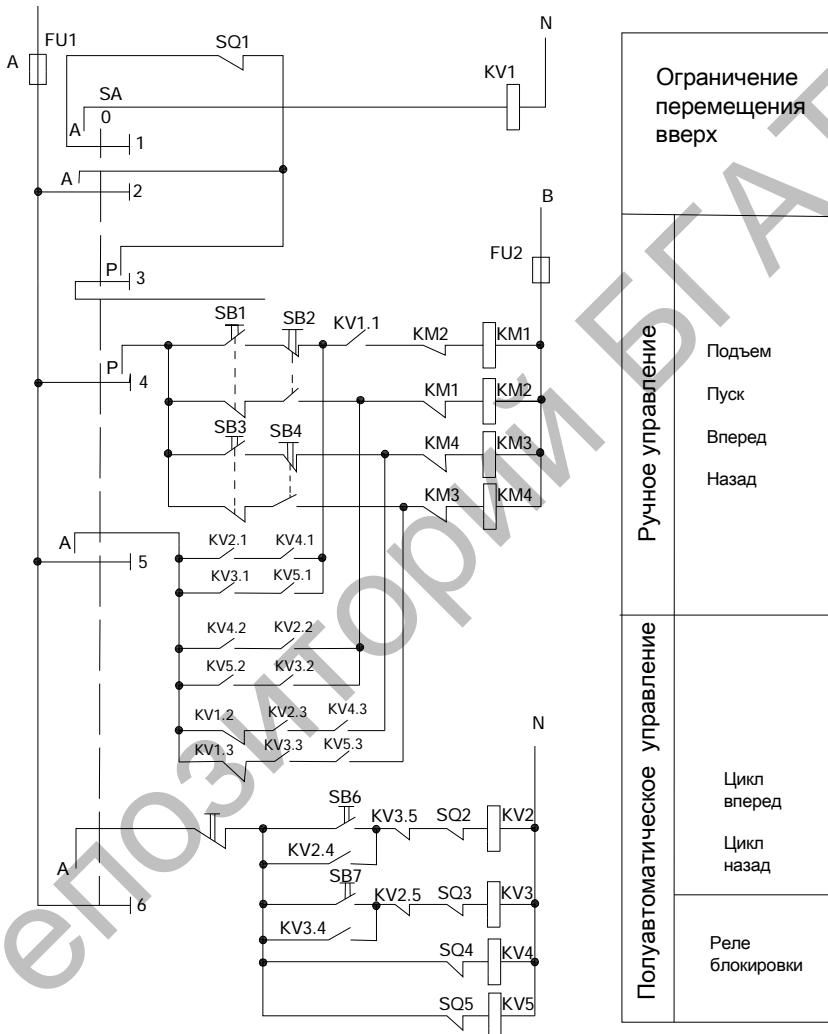


Рис. 13.3. Принципиальная электрическая схема дистанционного, ручного и полуавтоматического управления лабораторной тельферной установкой

При достижении заданной высоты срабатывает *SQ1* и обесточивает реле *KV1*, а следовательно, *KM1* отключается и подъем груза прекращается. Одновременно через контакты *KV1.2*, *KV2.3* и *KV4.3* получает питание контактор *KM3* «Вперед» и начинается горизонтальное перемещение груза. Сразу же включается реле *KV5* (*SQ5* возвращается в исходное состояние, но изменяет работу схемы). Лишь когда тележка доходит до *SQ4*, происходит отключение контактора *KM3* и через контакт *KV4.2* включается контактор *KM2* «Опускание». Груз начинает опускаться и, воздействуя на конечный выключатель *SQ2*, отключает реле *KV2*, а следовательно, и *KM2*. Цикл работы закончен.

В обратном направлении тележка движется после нажатия на кнопку *SB7*. Алгоритм работы схемы в этом случае аналогичен записанному выше.

Для остановки тельфера в любом положении служит кнопка *SA5* «Стоп». Из этого положения тельфер можно отправить в любую сторону.

При ручном управлении тельфером пользуются кнопочной станцией.

Записать паспортные данные двигателей, приборов, аппаратуры управления. Основная характеристика установки ТЭП-0,5 приведена в табл. 13.1.

Таблица 13.1

Основная характеристика установки

Тип	Грузоподъемность, кг	Высота подъема, м	Скорость		Режим работы		Род тока	Масса, кг
			Подъем, м/с	Передвижение, м/с	ПВ%	Число включений		
ТЭП-0,5	500	6			21	120	Трехфазный	110

Характеристика электродвигателей

*Подъема*

Тип: АОС 32-6.

Мощность: 0,65 кВт.

Частота вращения: 875 об/мин.

ПВ = 25 %.

*Передвижения*

Тип: Т 0,06/4.

Мощность: 0,08 кВт.

Частота вращения: 1400 об/мин.

ПВ = 25 %.

### К задаче 2

Определить рабочие характеристики лабораторной установки на рабочем (с грузом) и холостом (без груза) ходу:  $t_{\text{п}}$  – время подъема;  $t_{\text{пер}}$  – время передвижения;  $v_{\text{п}}$  – скорость подъема;  $v_{\text{пер}}$  – скорость передвижения;  $\text{ПВ}_{\text{п}}$  – повторность включений подъема;  $\text{ПВ}_{\text{пер}}$  – повторность включений передвижения.

Данные опытов и расчетов характеристик установки занести в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Результаты опытов и расчетов характеристик установки

Ход	Измерено		Вычислено			
	$t_{\text{п}}, \text{с}$	$t_{\text{пер}}, \text{с}$	$v_{\text{п}}, \text{м/с}$	$v_{\text{пер}}, \text{м/с}$	$\text{ПВ}_{\text{п}}, \%$	$\text{ПВ}_{\text{пер}}, \%$
рабочий						
холостой						

Примечание: высота подъема груза  $H = 4$  м, расстояние передвижения  $L = 1,6$  м.

### К задаче 3

Используя пишущий киловаттметр, снять нагрузочную диаграмму электродвигателя подъема и перемещения. Циклом работы считать операции от подъема груза до опускания его на другую платформу.

### К задаче 4

Определить мощность электродвигателя подъема и перемещения:

1. Расчет мощности электродвигателей для механизмов подъема и перемещения по аналитическим выражениям:

а) для механизма подъема (кВт):

$$P_{\text{п}} = \frac{g(m + m_0)v_{\text{п}}}{1000\eta_{\text{п}}}, \quad (13.1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;

$m$  – масса поднимаемого груза, кг (принимается в соответствии с индивидуальным заданием, выданным преподавателем);

$m_0$  – масса крюка, кг ( $m_0 = 4$  кг);

$v_{\text{п}}$  – скорость подъема груза,  $\text{м/с}$  ( $v_{\text{п}} = 0,135$   $\text{м/с}$ );

$\eta_{\text{п}}$  – КПД механизма подъема ( $\eta_{\text{п}} = 0,75$ );

б) для механизма перемещения (кВт):

$$P_{\text{пер}} = \frac{gk(m + m_1)(l_1 r + l_2) v_{\text{пер}}}{1000 R \eta_{\text{пер}}}, \quad (13.2)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий трение ребер колес о рельсы ( $k = 1,35$ );

$m_1$  – масса механизма перемещения ( $m_1 = 85$  кг);

$l_1$  – коэффициент трения скольжения ( $l_1 = 0,01$ );

$r$  – радиус шейки оси колеса, м ( $r = 0,006$  м);

$l_2$  – коэффициент трения качения, м ( $l_2 = 0,001$ );

$v_{\text{пер}}$  – скорость передвижения тележки, м/с (принять данные из опыта по табл. 13.2);

$R$  – радиус холостого колеса, м ( $R = 0,04$  м);

$\eta_{\text{пер}}$  – коэффициент полезного действия механизма перемещения ( $\eta_{\text{пер}} = 0,7$ ).

2. Расчет мощности электродвигателя механизма подъема по нагрузочной диаграмме.

На основании данных, полученных при выполнении задач 3 и 4, строят нагрузочную диаграмму (рис. 13.4).

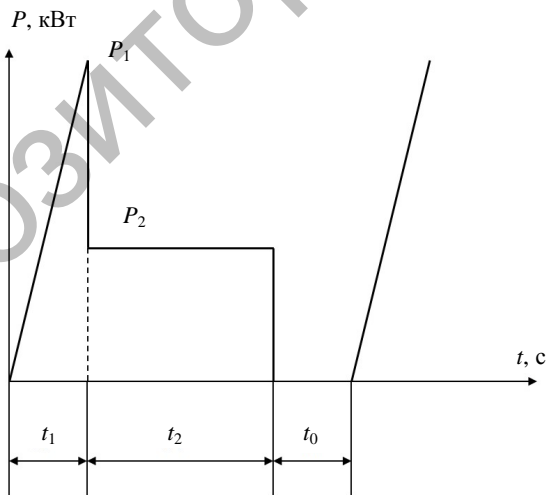


Рис. 13.4. Нагрузочная диаграмма

Используя нагрузочную диаграмму, определяют эквивалентную мощность электродвигателя механизма подъема:

$$P_{э.п} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2}{0,75t_1 + t_2}}, \quad (13.3)$$

где  $P_1$  – максимальная мощность при пуске двигателя, кВт;  
 $P_2$  – мощность подъема в установившемся режиме, кВт;  
 $t_1, t_2$  – продолжительность пуска и работы, с.

Обычно действительная продолжительность включения не совпадает со стандартной продолжительностью включения электродвигателей, которыми комплектуются тельферы (ПВ%<sub>ст</sub> = 21 %). В этом случае эквивалентную мощность приводят к стандартной ПВ по формуле

$$P_{э.ст} = P_{э.п} \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{\text{ПВ}\%_{ст}}}; \quad (13.4)$$

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0}, \quad (13.5)$$

где  $t_0$  – продолжительность паузы, с.

Исходя из условия  $P_{э.ст} \leq P_{кат}$  по каталогу выбирается мощность двигателя.

#### **К задаче 5**

Изучить схему полуавтоматической работы (рис. 13.3) и проверить ее работоспособность. Составить спецификацию к схеме.

#### **К задаче 6**

Провести анализ одной из производственных ситуаций по заданию преподавателя с практическим восстановлением работоспособности установки:

1. Схема на рис. 13.3 работает в ручном режиме и не работает в автоматическом.
2. Тельфер поднимает груз, но не перемещается в автоматическом режиме. В ручном – перемещается.
3. Тельфер не спускает груз.
4. Тельфер не работает в ручном и автоматическом режимах.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Письменные ответы на вопросы самоподготовки.
3. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки.
4. Табл. 13.1, 13.2. Расчеты по формулам (13.1–13.5).
5. График зависимости  $P = f(t)$ .

## Контрольные вопросы

1. Опишите работу схемы автоматизации тельфера.
2. От каких величин зависит мощность электродвигателя механизма подъема?
3. От каких величин зависит мощность электродвигателя механизма перемещения?
4. С какой целью снимается нагрузочная диаграмма электродвигателя механизма подъема?
5. Какова методика определения мощности электродвигателя механизма подъема с помощью нагрузочной диаграммы?

## Лабораторная работа № 14

### ИСПЫТАНИЕ СХЕМ ПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ОБМОТОК СО СХЕМЫ «ЗВЕЗДА» НА СХЕМУ «ТРЕУГОЛЬНИК»

#### *Цели занятия:*

1. Изучить различные схемы пуска АД с переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник».
2. Испытать схему пуска, используемую в лаборатории.

#### *Задачи занятия:*

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Заполнить табл. 14.1. Записать параметры приводного электродвигателя.
3. Собрать схему по рис. 14.1 для ручного переключения обмоток.
4. Провести опыты по определению токов переключения при различных частотах вращения.



5. Собрать схему по рис. 14.2 для автоматического переключения обмоток и наладить работу схемы. Определить ток переключения.

6. Изучить другие схемы переключения обмоток при пуске со схемы «звезда» на схему «треугольник».

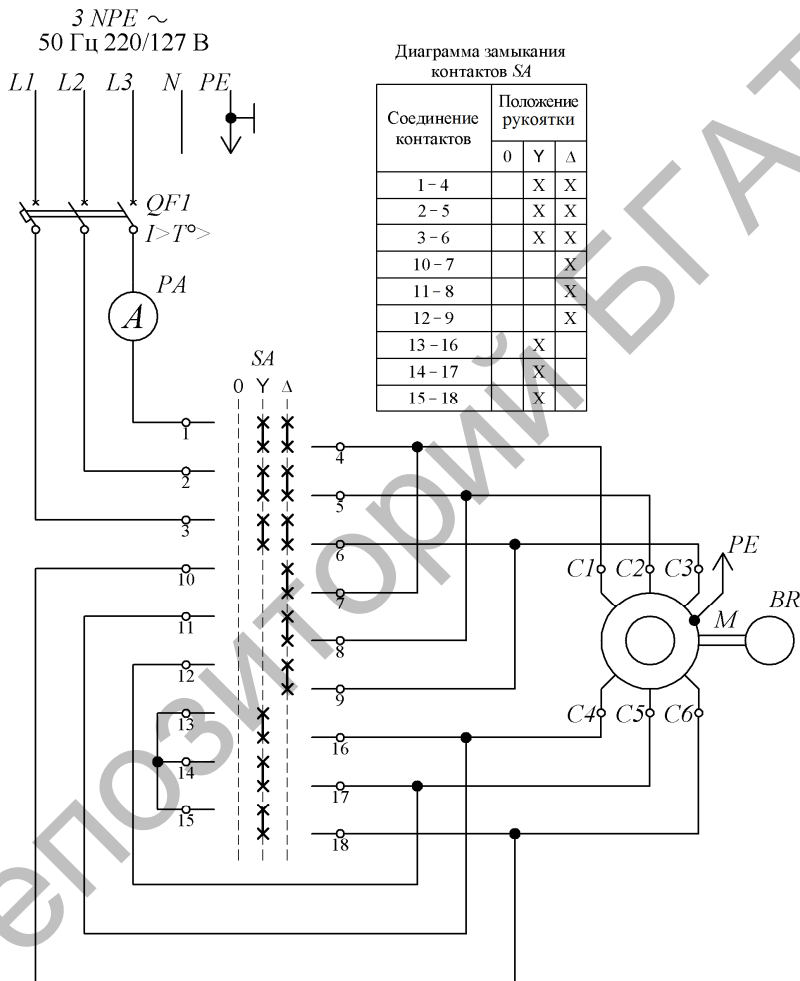


Рис. 14.1. Принципиальная электрическая схема ручного переключения обмоток АД при пуске со схемы «звезда» на схему «треугольник» с помощью универсального переключателя SA

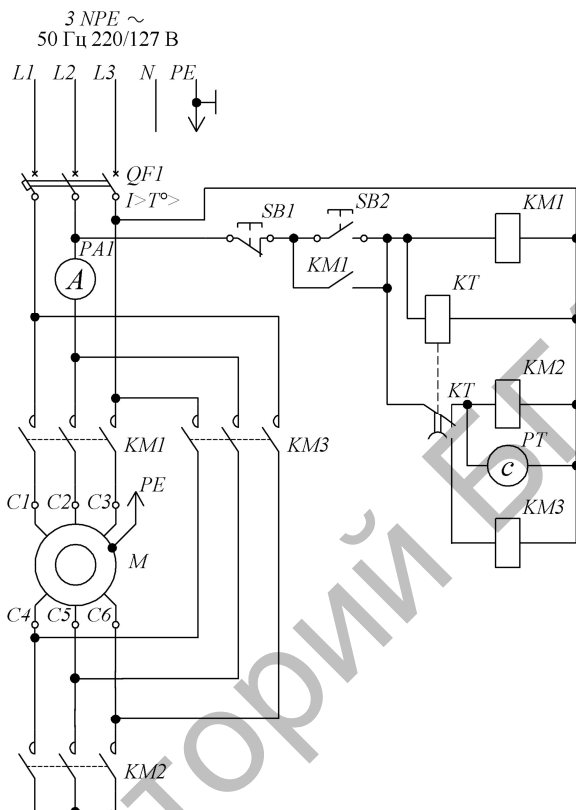


Рис. 14.2. Принципиальная электрическая схема пуска АД с автоматическим переключением со схемы «звезда» на схему «треугольник» в функции времени

### Задания для самоподготовки:

1. Изучить по учебнику [3], учебному пособию [5] и прилож. П работу схем с переключением обмоток при пуске со схемы «звезда» на схему «треугольник».

2. Письменно ответить на следующие вопросы:

2.1. Какое напряжение и схему соединения обмоток должен иметь АД, включаемый в сеть 0,4 кВ, с переключением обмоток при пуске со схемы «звезда» на схему «треугольник»?

2.2. В каких условиях целесообразно применять переключение обмоток при пуске АД со схемы «звезда» на схему «треугольник»? В каких нельзя применять?

## Методические указания

### К задаче 1

Лабораторная установка состоит из асинхронного двигателя  $M$ , рассчитанного на включение обмоток по схеме «треугольник/ звезда» на напряжения 220/380 В. Обмотки АД включаются по схеме «треугольник» на 220 В, поэтому включаем АД в трех-фазную сеть с линейным напряжением 220 В.

*Технические данные электродвигателя:* тип А-41-6;  $P_n = 1$  кВт;  $U_n = 220/380$  В; соединение обмоток – «треугольник/звезда»;  $I_n = 4,8/2,8$  А;  $n_n = 930$  об/мин;  $\eta_n = 77$  %;  $\cos\varphi = 0,72$ ;  $k_t = 5,5$ ;  $\mu_n = 1,8$ ;  $\mu_{кр} = 2,2$ ;  $J_{дв} = 0,017$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_{махов} = 0,128$  кг·м<sup>2</sup>.

### К задаче 2

Заполнить табл. 14.1. Записать параметры приводного электродвигателя.

Таблица 14.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
$PA$	Амперметр ...	1	Шкала ...
$QF1$	Автоматический выключатель ...	1	$I_{н.р} = \dots$
$KM1$	Электромагнитный пускатель ...	1	$I_n = \dots$
$KM2$	Электромагнитный пускатель ...	1	$I_n = \dots$
$KM3$	Электромагнитный пускатель ...	1	$I_n = \dots$
$PT$	Секундомер ...	1	–
$KT$	Реле времени ...	1	$U_n = \dots$
$M$	Электродвигатель ...	1	$P_n = \dots$

### К задаче 3

Собрать схему по рис. 14.1 для ручного переключения обмоток.

### К задаче 4

Установить  $SA$  в положение «треугольник». Включить  $QF1$  и записать в табл. 14.2 пусковой ток (бросок тока) по амперметру  $PA$  и время разбега по секундомеру до номинальной частоты вращения по тахометру  $BR$ . Записать ток холостого хода двигателя  $I_{xx}$ .

Установить  $SA$  в положение «звезда». Включить  $QF1$  и записать в табл. 14.2 пусковой ток (бросок тока) по амперметру  $PA$  и время

разбега по секундомеру до номинальной частоты вращения по тахометру  $BR$ . Записать ток холостого хода двигателя  $I_{xx}$ .

Установить  $SA$  в положение 0. Включить  $QF1$ . Установить  $SA$  сначала в положение «звезда», а при достижении двигателем частоты вращения в 500 об/мин переключить  $SA$  в положение «треугольник». Записать ток  $I_{пк}$  в начальный момент переключения. Записать ток холостого хода.

Продолжить то же при частоте вращения 700, 900 и 1000 об/мин. Результаты опытов занести в табл. 14.2.

### К задаче 5

После сборки схемы (рис. 14.2) и пробного включения определить ток переключения. Он не должен превышать пусковой ток (при соединении обмоток «звездой»). Для этого необходимо отрегулировать реле времени так, чтобы толчок тока не превышал пускового тока. С увеличением времени задержки переключения обмоток ток переключения уменьшается. Записать значения токов переключения, частоты вращения, при которой произошло автоматическое переключение обмоток, и ток холостого хода  $I_{xx}$ .

Таблица 14.2

Результаты опытов

Номер опыта	Способ пуска	Измеренные величины					
		$I_{п}, A$	$I_{xx}, A$	$I_{по}, A$	$I_{пк}, A$	$t_{п}, c$	$n, об/мин$
1	Пуск ручной, схема «треугольник»			–	–		0
2	Пуск ручной, схема «звезда»			–	–		0
3	Пуск ручной с переключением «звезда/треугольник»						500
4							700
5							900
6							1000
7	Пуск автоматический с переключением «звезда/треугольник»						

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальные электрические схемы установок (рис. 14.1 и 14.2).

3. Табл. 14.1.
4. Письменные ответы на вопросы самоподготовки.
5. Результаты опытов (табл. 14.2).
6. Пусковые диаграммы  $I = f(t)$  для всех опытов табл. 14.2. Пусковые диаграммы имеют вид как на рис. 14.3. При построении диаграмм следует соблюдать масштаб по осям тока и времени.

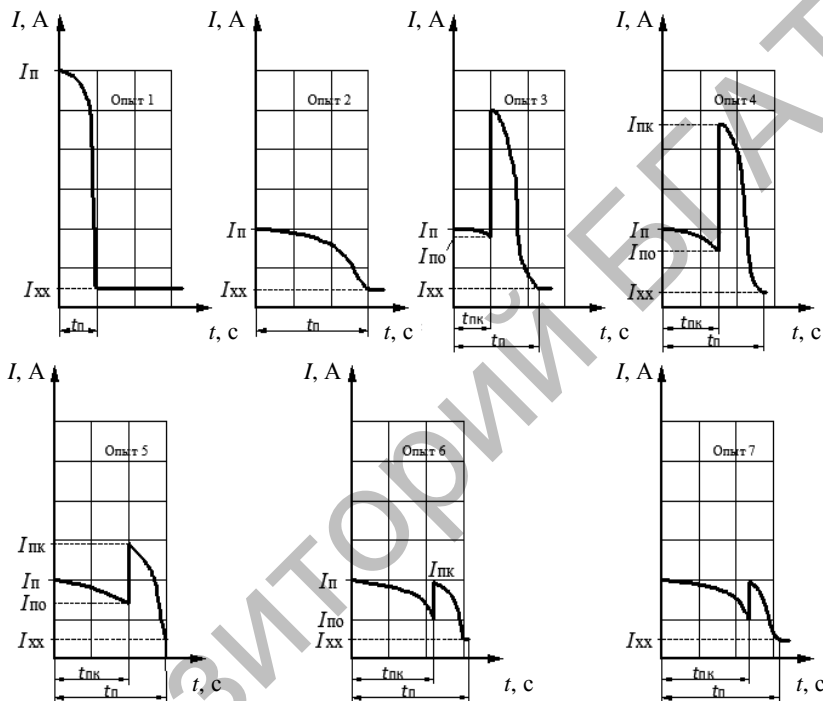


Рис. 14.3. Примерный вид пусковых диаграмм  $I = f(t)$  по данным опытов 1–7 (табл. 14.2)

7. Вывод об особенностях пуска АД с переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник».

### Контрольные вопросы

1. В каких условиях можно применять электромагнитное реле РП-256-44, выдержка которого не превосходит 2 с? Какое реле необходимо, если разбег двигателя продолжается десятки секунд?

2. Можно ли обойтись двумя электромагнитными пускателями для автоматического пуска с переключением обмоток «звезда/треугольник»? Какое дополнительное оборудование нужно в этом случае?

3. Какое номинальное напряжение при соединении обмоток в «звезду» должен иметь двигатель, который запускается с переключением со «звезды» на «треугольник», если линейное напряжение сети – 380 В?

4. Какую выдержку должно обеспечивать реле времени при разгоне электродвигателя дробилки до 150 рад/с, если известно, что пуск осуществляется вхолостую, средний избыточный момент равен 50 Н·м, а приведенный момент инерции –  $3,0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ?

### Лабораторная работа № 15

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

#### *Цели занятия:*

1. Исследовать характеристики АД при динамическом торможении.
2. Научиться определять параметры тока возбуждения для динамического торможения.

#### *Задачи занятия:*

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Собрать принципиальную электрическую схему лабораторной установки (рис. 15.1).
3. Провести опыт самоторможения электропривода.
4. Провести опыт динамического торможения электропривода при различных токах возбуждения.

#### *Задания для самоподготовки:*

1. По учебнику [3], учебным пособиям [4, 5] и прилож. Р изучить динамическое торможение асинхронных электродвигателей.
2. Письменно ответить на следующие вопросы и выполнить задания:
  - 2.1. Какими могут быть схемы включения обмоток статора АД с короткозамкнутым ротором при динамическом торможении?
  - 2.2. Объясните понятие «эквивалентный ток возбуждения АД при динамическом торможении».

2.3. В каком состоянии (насыщения или ненасыщения) находится магнитная система электродвигателя при неподвижном состоянии ротора и возбуждении обмоток эквивалентным постоянным током?

### Методические указания

#### К задачам 1 и 2

В лабораторной установке используется трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором  $M$ , на валу которого установлен стальной диск для увеличения общего момента инерции электропривода. На одном конце вала электродвигателя закреплен тахогенератор постоянного тока (на рис. 15.1 не показан), а на другом – реле контроля скорости  $SR$ .

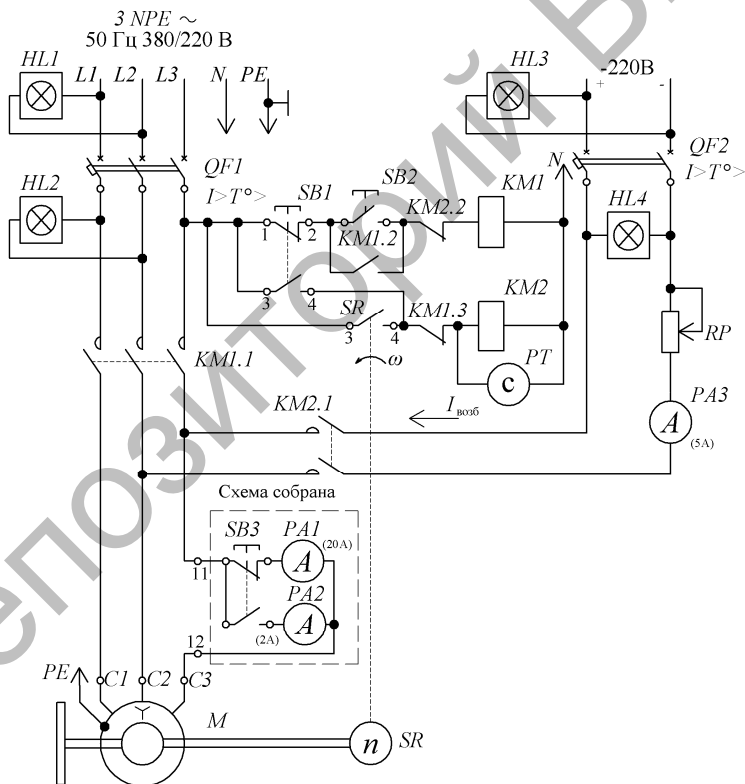


Рис. 15.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Ток возбуждения при динамическом торможении регулируется лабораторным реостатом  $RP$ , включенным в сеть постоянного тока. Время полного торможения замеряется электрическим секундомером  $PT$ , ток возбуждения – амперметром  $PA3$ . Остановка ротора двигателя  $M$  в процессе торможения контролируется с помощью реле контроля скорости  $SR$  (табл. 15.1).

Включение и отключение двигателя производится магнитным пускателем  $KM1$  с соответствующей схемой управления. Включение и отключение возбуждения динамического торможения осуществляются магнитным пускателем  $KM2$  с соответствующей схемой управления.

*Технические данные электроустановки:* тип двигателя 4А80А6У3;  $P_n = 0,75$  кВт;  $n_0 = 1000$  об/мин;  $\eta_n = 69$  %;  $\cos\varphi = 0,74$ ;  $U_n = 380$  В;  $Y$ ;  $\mu_{\min} = 1,6$ ;  $\mu_n = 2,0$ ;  $\mu_{кр} = 2,2$ ;  $s_n = 8,4$  %;  $s_k = 37$  %;  $k_i = 4,0$ ;  $J_{p.d} = 0,0031$  кг·м<sup>2</sup>;  $2R_{1ф} = 21,6$  Ом;  $J_{\max} = 0,01$  кг·м<sup>2</sup>.

Таблица 15.1

Перечень элементов схемы лабораторной установки

Позиционное обозначение	Наименование	Количество	Примечание
$QF1$	Автоматический выключатель MSM600/16	1	$I_{н.р} = 16$ А
$QF2$	Автоматический выключатель ВА51-25-340010РУХЛЗ	1	$I_{н.р} = 6$ А
$M$	Электродвигатель 4А80А6У3	1	$P_n = 0,75$ кВт
$PA1$	Амперметр Э365-1	1	Шкала 2 А
$PA2$	Амперметр Э365-1	1	Шкала 20 А
$KM1, KM2$	Пускатель (контактор) ПМЛ-110004В	2	–
$PA3$	Амперметр М381	1	Шкала 5 А
$SR$	Реле контроля скорости РКС	1	–
$RP$	Переменный резистор РСП	1	50 Ом, 2 А
$PT$	Секундомер ПВ-53Ш	1	–

### К задаче 3

Включить  $QF1$ . Включить  $KM1$  путем нажатия на кнопку  $SB2$  «Пуск». Измерить значение тока холостого хода  $I_{xx}$ , нажав на кнопку  $SB3$ . Амперметр  $PA1$  (на 20 А) отключится, включится амперметр на 2 А ( $PA2$ ). Отключить автоматический выключатель  $QF1$  и замерить время самоторможения электропривода с помощью секундомера. Данные опыта занести в табл. 15.2.



#### К задаче 4

Включить  $QF1$  и  $QF2$ . Установить  $RP$  в такое положение, чтобы ток  $I_{\text{возб}} = 1,5 \text{ А}$ . Для этого нажать на кнопку  $SB1$  «Стоп» и удерживать ее во включенном положении. Включится электромагнитный пускатель  $KM2$ . Его контакты  $KM2.1$  подключат постоянный ток к обмоткам двигателя. С помощью резистора  $RP$  установить  $I_{\text{возб}} = 1,5 \text{ А}$ , после чего отпустить кнопку  $SB1$ . Таким образом можно настроить  $I_{\text{возб}}$  на другое значение тока.

Включить двигатель, нажав на кнопку  $SB2$ . Включится электромагнитный пускатель  $KM1$ , его силовые контакты  $KM1.1$  подключат двигатель в сеть. Первый блок-контакт  $KM1.2$  зашунтирует кнопку  $SB2$  «Пуск», и кнопку  $SB2$  можно будет отпустить. Второй блок-контакт  $KM1.3$  разомкнет цепь катушки  $KM2$ . При разбеге двигателя контакт  $SR$  замкнется.

Провести опыт динамического торможения. Для этого временно нажать на кнопку  $SB1$  «Стоп». Электромагнитный контактор  $KM1$  и электродвигатель отключатся. Блок-контакт  $KM1.3$  включится и замкнет цепь катушки  $KM2$ , отчего электромагнитный пускатель  $KM2$  включится и его контакты  $KM2.1$  подключат постоянный ток к обмоткам двигателя. Одновременно включится секундомер  $PT$ . Будет происходить динамическое торможение двигателя до тех пор, пока скорость не снизится до малых значений, при которых контакт  $SR$  разомкнется и электромагнитный пускатель  $KM2$  отключится. Торможение прекратится, секундомер остановится.

Замерить ток и время торможения. Данные занести в табл. 15.2.

Таблица 15.2

Результаты опытов и расчетов

Номер опыта	Измерено				Вычислено		
	$I_{\text{хх}}, \text{ А}$	$t_{\text{св. выб.}}, \text{ с}$	$I_{\text{возб.}}, \text{ А}$	$t_{\text{торм.}}, \text{ с}$	$\Delta\omega, \text{ рад/с}$	$M_{\text{эф.}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	Момент
1			–	–			холостого хода
2	–	–	1,5				торможения при токе 1,5 А
3	–	–	2,0				торможения при токе 2 А
4	–	–	3,0				торможения при токе 3 А
5	–	–	4,0				торможения при токе 4 А

Повторить опыты при положении резистора  $RP$ , обеспечивающего токи 2,0; 3,0; 4,0 А. Последний опыт соответствует минимальному сопротивлению резистора  $RP$ .

### Расчетные формулы

Эффективный момент вычисляется по формуле

$$M_{\text{эф}} = J_{\text{пр}} \frac{\Delta\omega}{t_{\text{горм}}}; \quad (15.1)$$

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{р. д}} + J_{\text{мах}}; \quad (15.2)$$

$$\Delta\omega = \omega_{\text{н}} - 0;$$

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0(1 - s_{\text{н}}); \quad (15.3)$$

$$\omega_0 = 0,1045n_0, \quad (15.4)$$

где  $n_0$  – синхронная частота вращения (по техническим данным двигателя), об/мин.

Выполнить расчеты для  $I_{\text{возб}} = 3I_0$ . Принять  $n_c = 1000 \text{ мин}^{-1}$ ,

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}; \quad (15.5)$$

$$n = n^* n_c; \quad (15.6)$$

$$M = M^* M_{\text{н}}. \quad (15.7)$$

Например, для  $n^* = 0,7$  находят по рис. 15.2  $M^* = 0,4$ . Следовательно, по формулам (15.6) и (15.7) определяют:

$$n = 0,7 \cdot 1000 = 700 \text{ об/мин};$$

$$M = 0,4M_{\text{н}}.$$

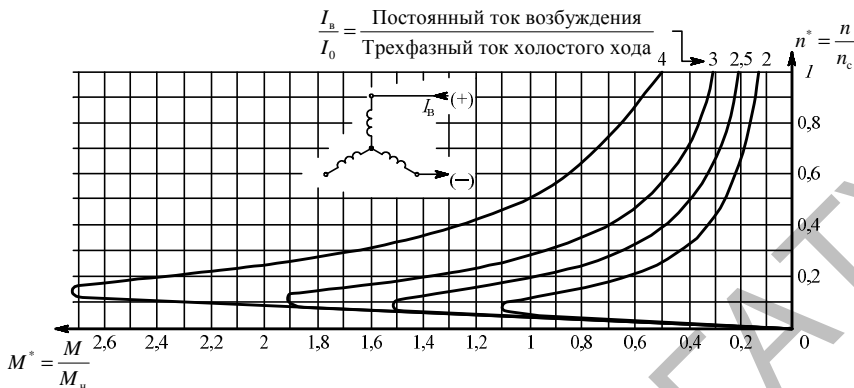


Рис. 15.2. Универсальные механические характеристики динамического торможения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (номинальное скольжение двигателя  $s_n = 0,08$ )

Задавая различные значения относительной частоты вращения  $n^*$ , определяют  $M^*$  и выполняют расчет по формулам (15.6) и (15.7). Данные расчета заносят в табл. 15.3.

Таблица 15.3

Расчет механической характеристики динамического торможения по универсальным характеристикам АД

Показатели	Относительная частота вращения $n^*$										
	0	0,05	0,1	0,12	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1
Относительный момент $M^*$											
Действительный момент двигателя $M$ по формуле (15.7)											
Действительная частота вращения $n$ по формуле (15.6)											

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки и табл. 15.1.

3. Выполненные в письменном виде задания для самоподготовки.
4. Табл. 15.2.
5. График зависимости  $t_{\text{торм}} = f(I_{\text{возб}})$ .
6. Табл. 15.3. Построить механическую характеристику  $n = f(M)$  испытуемого АД расчетом во втором квадранте, пользуясь универсальными механическими характеристиками динамического торможения АД, приведенными на рис. 15.2.
7. Вывод о влиянии тока возбуждения на время торможения и вывод о виде механической характеристики АД при динамическом торможении.

### Контрольные вопросы

1. Объясните вид механической характеристики АД при динамическом торможении.
2. Какие частоты тока индуцируются в роторе: а) в начальный момент торможения; б) в конце торможения; в) при малой скорости?
3. Запишите основные уравнения электропривода при динамическом торможении.
4. Какие упрощения приняты при нахождении динамического момента по формуле  $M_{\text{д}} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$  при динамическом торможении?
5. Какова методика построения механической характеристики АД при динамическом торможении по универсальным характеристикам АД?
6. Как можно повысить точность нахождения зависимости  $n = f(t)$ , полученной в опытах лабораторной работы?

### Лабораторная работа № 16

#### УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТИПОВОЙ ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ

##### *Цели работы:*

1. Изучить основные требования к электроприводу поточных линий.
2. Научиться составлять схему управления электроприводом поточной линии.

### **Задачи занятия:**

1. Ознакомиться с оборудованием лабораторной работы.
2. Собрать схему (рис. 16.1 и 16.2) и включить ее в работу.
3. Записать в спецификацию паспортные данные электрических аппаратов, применяемых в схеме (рис. 16.1 и 16.2).

### **Задания для самоподготовки:**

1. Ознакомиться с материалами учебного пособия [2] и данными методическими указаниями (прилож. С).
2. Письменно ответить на следующие вопросы:
  - 2.1. С какой целью в поточных линиях предусматривается звуковая сигнализация?
  - 2.2. В каком порядке запускаются электродвигатели поточных линий?
  - 2.3. В каком порядке останавливаются электродвигатели поточных линий?

## **Методические указания**

### **К задачам 1 и 2**

На рис. 16.1 и 16.2 представлена типовая принципиальная схема управления тремя электроприводами (тремя рабочими машинами) поточной линии, удовлетворяющая основным требованиям (прилож. С).

Схемы (рис. 16.1 и 16.2) условно можно разбить на пять частей:

- 1) управление электромагнитными пускателями рабочих машин (цепи 1–16);
- 2) цепи предупредительной сигнализации (цепи 17–19);
- 3) управляемый автоматический пуск (цепи 24–27);
- 4) управляемая автоматическая остановка (цепи 28–32);
- 5) сигнализация и защита (цепи 20–23 и 33–40).

Цепь 1 рекомендуется для любой поточной линии. Автоматический выключатель (или переключатель) *QF* обеспечивает защиту от короткого замыкания в цепях управления; кнопки *SB9* и *SB10* – аварийная остановка всей поточной линии. *SB9* находится на щите управления, а *SB10* – возле рабочих машин. Кнопки должны иметь красные (оранжевые) головки штифтов кнопочных элементов.

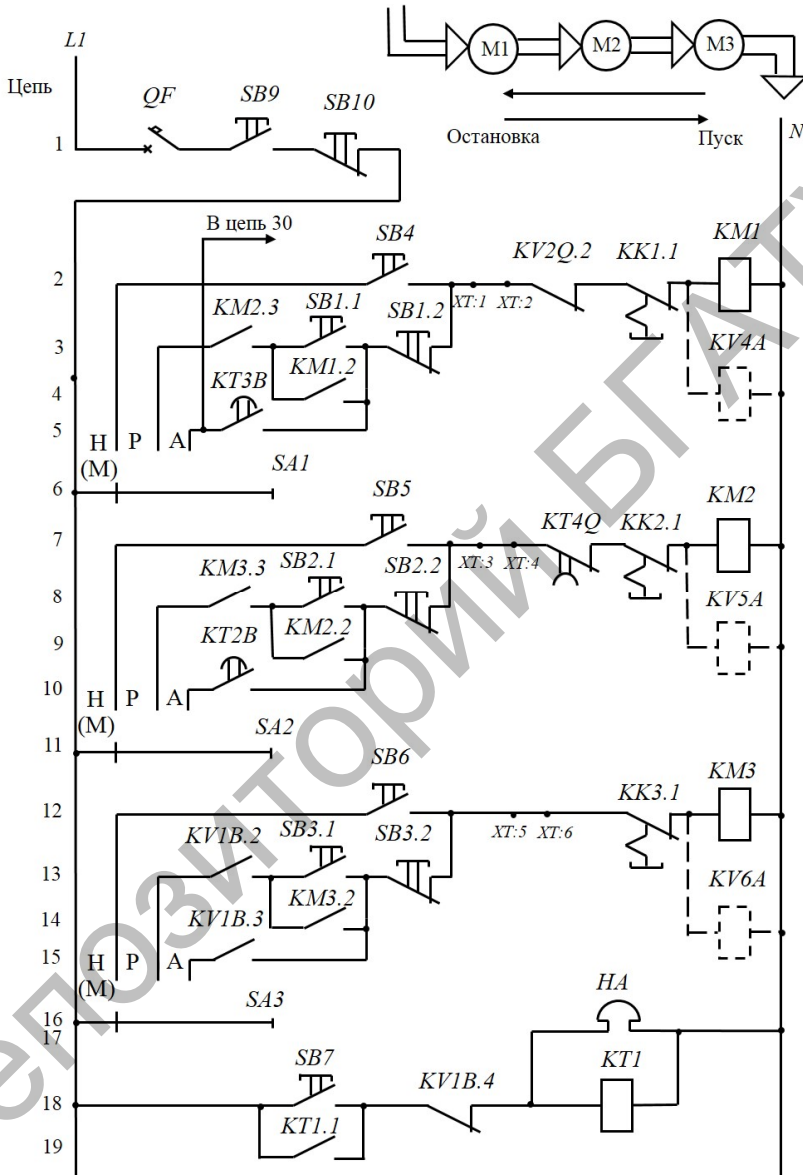


Рис. 16.1. Типовая принципиальная электрическая схема управления поточной линией (начало)

Примечание: вместо реле KV4A использована приставка ПКЛ-1104А к пускателю КМ1

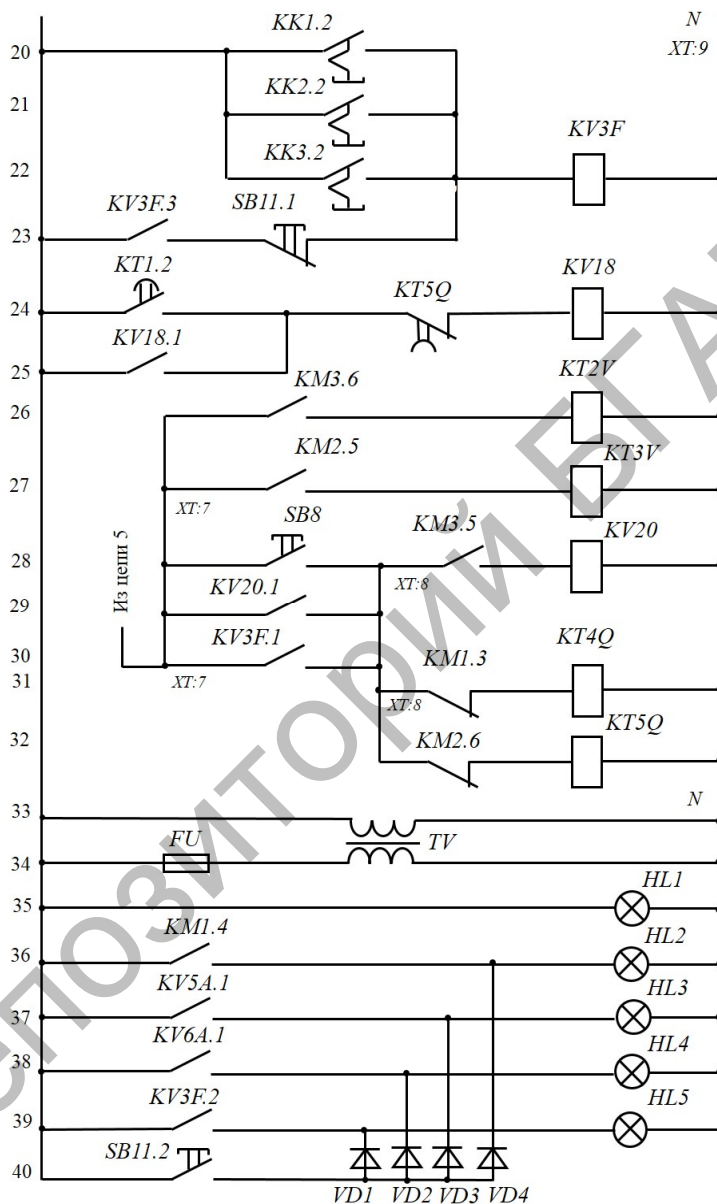


Рис. 16.2. Типовая принципиальная электрическая схема управления поточной линией (окончание)

В поточной линии три электропривода, следовательно используется переключатель управления *SA* с тремя независимыми цепями и на три положения рукоятки, поскольку предусмотрено управление:

1) наладочное (или местное), буквы *H* (*M*) в функциональном обозначении цепей переключателя;

2) ручное (*P*);

3) автоматическое (*A*).

При *наладке* возможно включение любой машины в «толчковом» режиме (пока нажата кнопка).

*Ручное управление* предусматривает включение и отключение электроприводов кнопками управления, причем блокировка обеспечивает требуемую последовательность включения и отключения. В данной схеме пуск в ручном режиме предусмотрен только после предупредительного сигнала.

*Автоматическое управление* предполагает пуск и остановку машин в требуемой последовательности без участия оператора; пуск и остановка каждой машины производятся с выдержкой времени; пуск – только после предупредительного сигнала. В данной схеме используется полуавтоматическое управление, поскольку сигнал на пуск и технологическую остановку посылает оператор.

На принципиальных электрических схемах элементы обозначают двухбуквенным ходом. Однако при малом числе одинаковых операторов допускается однобуквенный и даже трехбуквенный код, чтобы подчеркнуть функциональное назначение элементов. На рис. 16.1 элементы, относящиеся к автоматическому пуску, обозначены третьей буквой *B* (функционально она обозначает движение, например вперед). Дополнительные реле (для размножения контактов пускателей) обозначены буквой *A*. На функцию состояния (старт, стоп, ограничение) указывает буква *Q*, поэтому она введена для выделения в схеме элементов, действующих на остановку. Принадлежность к защите обозначается буквой *F*. Цифры после точки в обозначении указывают на условный номер части внутри этого элемента. Например, контакт *KV1B.2* расшифровывается следующим образом: второй контакт первого промежуточного реле, действующий на пуск.

Функциональное назначение элементов схемы (рис. 16.1) следующее: *KM1*, *KM2*, *KM3* – электромагнитные пускатели управления электродвигателями; *SA* – переключатель режимов управления; *HA* – звонок предупредительной сигнализации; *KT1* – реле времени предупредительной сигнализации; *KV1B* – реле пуска; *KT2B*, *KT3B* –



реле времени пуска; *KV2Q* – реле остановки; *KT4Q*, *KT5Q* – реле времени остановки; *KV3F* – реле защиты; *KV4A–KV6A* – дополнительные реле; *SB4*, *SB5*, *SB6* – кнопки местного управления; *SB1*, *SB2*, *SB3* – кнопочные станции на щите управления; *SB7* – кнопка «Сигнал», «Пуск поточной линии»; *SB8* – кнопка «Стоп поточной линии»; *SB9* – кнопка аварийной остановки местного управления; *KK1*, *KK3* – контакты теплового реле; *QF* – автоматический выключатель; *SB11* – кнопка проверки исправности ламп сигнализации (используется также для деблокировки реле защиты *KV3F*); *VD1–VD4* – разделительные диоды цепи контроля ламп сигнализации; *TV* – разделительный трансформатор; *FV* – предохранитель цепей сигнализации.

Работает схема следующим образом. При наладке переключатель устанавливают в положение Н (М) и, манипулируя кнопками *SB4–SB6* возле рабочих машин, управляют электромагнитными пускателями и собственно электроприводами.

При ручном управлении пуск поточной линии возможен только после подачи предупредительного звукового сигнала (для повышения безопасности) и строго в нужной последовательности (третья, вторая и первая машины). Нажимают на кнопку *SB7* «Сигнал», «Пуск поточной линии». Включается звонок, реле *KT1*. Его блок-контакт *KT1.1* шунтирует кнопку *SB7*. После выдержки времени (не более 10 с) включается контакт *KT1.2* и реле пуска *KV1B*. Его контакт *KV1B.1* ставит катушку на самопитание, а в цепи звонка размыкается контакт *KV1B.4*. Звуковой сигнал прекращается, реле *KT1* отключается. Одновременно замыкается контакт *KV1B.2*, подготавливая цепь пуска третьей машины. Теперь можно нажать на кнопку *SB3.1* и включить *KM1*. Контакт *KM3.3* позволяет включить *KM2* (вторую машину), контакт *KM2.3* – *KM1* (первую машину).

Остановить можно любую машину. Если остановить третью (нажатием на *SB3.2*), то отключается *KM3*, его контакт *KM3.3* отключает *KM2*, посредством *KM2.3* отключается *KM1*. Таким образом, останавливаются все три машины, причем загружающие ее машины отключаются без выдержки времени. При остановке второй машины отключается *KM2*, затем *KM1*, а *KM3* остается в работе, его отключают нажатием на кнопку *SB3.2*. При остановке первой машины отключается только *KM1*, а *KM2* и *KM3* остаются в работе. Их отключают, нажимая на кнопки *SB2.2* и *SB3.2*.

При аварийной остановке в ручном режиме управления возможны следующие варианты:

- 1) аварийное отключение третьей машины при срабатывании реле *КК3*;
- 2) аварийное отключение второй машины при срабатывании реле *КК2*;
- 3) аварийное отключение первой машины при срабатывании реле *КК1*.

В первом варианте срабатывание *КК3* вызывает отключение *КМ3*. Посредством контакта *КМ3.3* отключается *КМ2*, реле *КК3* замыкает контакт *КК3.2*, и срабатывает реле *КВ3F*. Его контакт *КВ3F.1* замыкается, но не вызывает никаких действий, поскольку включен в цепь 6 автоматического управления, а эта цепь при ручном управлении отключена. Контакт *КВ3F.2* вызывает включение сигнальной лампы *HL5*.

При ручном управлении и при срабатывании *КК2* сразу отключаются *КМ2* и *КМ1*, а *КМ3* остается включенным. Его отключают, нажав на кнопку *SB3.2*.

При срабатывании *КК1* отключается *КМ1*, а *КМ2* и *КМ3* остаются включенными. Их отключают посредством нажатия на кнопки *SB2.2* и *SB3.2*.

Срабатывание любого из трех тепловых реле *КК1–КК3* вызывает включение реле защиты *КВ3F*. Его контакт *КВ3F.2* включает лампу сигнализации *HL5*, а контакт *КВ3F.1* замыкается в цепь 30, подготавливая к включению реле остановки *КВ2Q* и реле времени остановки *КТ4Q* и *КТ5Q*. Реле защиты *КВ3F* остается включенным до тех пор, пока не нажмут на кнопку возврата теплового реле в исходное положение, а также на кнопку *SB11.1*.

В режиме автоматического управления *SA* переводят в положение А. При пуске нажимают на кнопку *SB7*. Включается звонок, *КТ1* и через некоторое время реле *КВ1В*. Его контакт *КВ1В.3* включает *КМ3*. Контакт *КМ3.6* включает реле времени пуска *КТ2В*. После некоторой выдержки времени замыкаются контакты *КТ3В* и включается *КМ1*. Происходит пуск последней машины.

При автоматическом управлении для рабочей остановки поточной линии нажимают на кнопку *SB8* «Стоп поточной линии». Поскольку контакт *КМ3.5* замкнут (включена машина), то включается реле *КВ2Q* (остановка поточной линии). Его контакт *КВ2Q.1* шунтирует кнопку *SB8*, размыкающий контакт *КВ2Q.2* разрывает цепь *КМ1*, отключая первую рабочую машину. Контакт *КМ1.3* возвращается в замкнутое состояние и включает реле времени остановки *КТ4Q*. С некоторой задержкой его контакт *КТ4Q* разрывает цепь *КМ2* и отключает

вторую машину. Контакт  $KM2.5$  возвращается в замкнутое состояние и включает реле времени остановки  $KT5Q$ . После выдержки времени размыкается его контакт  $KT5Q$  и отключается реле  $KV1B$ , его контакт  $KV1B.3$  отключает  $KM3$ . Таким образом, отключение первой машины проводится без выдержки времени, а остальных рабочих машин – с выдержкой, достаточной для освобождения рабочих машин от продукта.

При аварийной остановке в режиме автоматического управления срабатывают реле  $KK1$ ,  $KK2$  или  $KK3$ . Это вызывает включение реле защиты  $KV3F$ , контакт  $KV3F.1$  включает  $KV2Q$ . Происходит отключение без выдержки времени  $KM1$ , включение  $KT4Q$ , отключение с выдержкой времени  $KM2$ , включение  $KT5Q$  и отключение с выдержкой времени  $KM3$ .

В схеме управления предусмотрена световая сигнализация.  $HL1$  сигнализирует о включении схемы управления под напряжение, лампы  $HL2-HL4$  – о включенном состоянии электромагнитных пускателей  $KM1-KM3$ ,  $HL5$  – о срабатывании тепловых реле.

Для проверки исправности ламп  $HL2-HL5$  служит кнопка  $SB11$  и диоды  $VD1-VD4$ . Диоды предотвращают влияние одной цепи на другую. Например, при замыкании контакта  $KM1.4$  загорается лампа  $HL2$ . В отрицательную половину напряжения ток мог бы пройти через  $VD4$ , но пройти через другие диоды ему нельзя.

Типовая принципиальная схема управления поточной линией, приведенная на рис. 16.1 и 16.2, может иметь изменения при реализации ее в конкретной аппаратуре, имеющейся у заказчика.

В условиях лаборатории схема несколько изменена. По рис. 16.1 и 16.2 требуются электромагнитные пускатели  $KM2$  и  $KM3$  с девятью контактами. Поскольку таких пускателей нет, требуется применить промежуточные реле или приставки ПКЛ к пускателям ПМЛ. Эти реле изображены на рис. 16.1 и 16.2 и обозначены  $KV4A-KV6A$ , где буква  $A$  показывает вспомогательный характер этих реле.

Контрольные точки для сборки схемы выведены на панель лабораторного стола, на клеммник  $XT$ .

По заданию преподавателя собирается схема с двумя или тремя электрическими двигателями. Соответственно ставятся перемычки между клеммами  $XT:1-XТ:6$ . Далее собираются цепи 26, 27 (от клеммы  $XT:7$  до  $N$ ), 28, 32, 31 в соответствии с заданием (при двух двигателях некоторые из этих цепей не собираются, их сборка считается ошибочной).

Сборка недостающей части схемы производится между контрольными точками (клеммами  $XТ$ ) и непосредственно клеммами аппаратов по схеме управления.

При проверке схемы сначала проверяют включение пускателей в наладочном режиме, затем при ручном управлении и при автоматическом пуске.

Повторяют также остановку в ручном режиме, в автоматическом режиме, в аварийных ситуациях.

Установить следующие выдержки времени: предупредительная сигнализация – 5–10 с; выдержка времени перед пуском второй машины – 2–3 с; первой машины – 3–5 с; выдержка времени перед остановкой второй машины – 5–10 с; третьей машины – 10–12 с.

Выдержки времени установить на соответствующих реле. Если возникнут трудности при настройке реле, следует обратиться за помощью к преподавателю или лаборанту.

### ***К задаче 3***

В соответствии со стендом лабораторной установки записать в спецификацию паспортные данные применяемых электрических аппаратов.

## **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема управления поточной линией с четырьмя, пятью или шестью электродвигателями (по заданию преподавателя); у студентов одной группы должно быть различное количество электродвигателей.
3. Выполненные в письменном виде задания для самоподготовки.

## **Контрольные вопросы**

1. Если в поточной линии  $N$  электродвигателей, то сколько требуется реле времени для их пуска и остановки?
2. Какие критерии используются при выборе выдержки для реле пуска и остановки?
3. Почему нельзя запускать сразу все электродвигатели поточной линии?
4. Электромагнитные пускатели типа ПМЛ могут иметь пневмоприставки типа ПВЛ. Какие реле времени (пуска или остановки) они могут заменить в схеме на рис. 16.2?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Онищенко, Г. Б. Электрический привод : учебник / Г. Б. Онищенко. – М. : Академия, 2013. – 288 с.

2. Епифанов, А. П. Электропривод в сельском хозяйстве : учебное пособие / А. П. Епифанов, А. Г. Гушинский, Л. М. Малайчук. – СПб. : Лань, 2015. – 224 с.

3. Москаленко, В. В. Электрический привод : учебник / В. В. Москаленко. – М. : Академия, 2009. – 368 с.

4. Епифанов, А. П. Основы электропривода : учебное пособие / А. П. Епифанов. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2016. – 192 с.

5. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода : учебное пособие / Н. Ф. Ильинский. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 222 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ А

#### Характеристики вентиляторов

Вентиляторы широко применяются для вентиляции помещений, в калориферах, зерносушилках, пневмотранспортерах. Для проектирования и правильной эксплуатации электроприводов вентиляторов необходимо знать их аэродинамические, механические и энергетические характеристики.

*При переменной частоте вращения рабочего колеса вентилятора* аэродинамические параметры изменяются следующим образом:

– подача пропорциональна угловой скорости:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad (\text{A.1})$$

– давление пропорционально квадрату угловой скорости:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2. \quad (\text{A.2})$$

*При постоянной частоте вращения рабочего колеса* подача и давление зависят от аэродинамической характеристики сети (воздуховодов). Рабочая точка вентилятора на аэродинамической характеристике соответствует точке пересечения аэродинамических характеристик вентилятора и сети (рис. А.1).

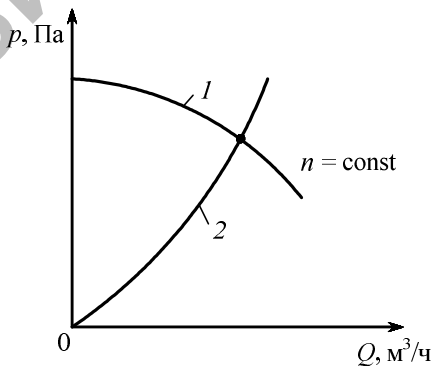


Рис. А.1. Аэродинамическая характеристика вентилятора (1) и сети (2)

**Механическая характеристика** вентилятора, как и других рабочих машин, – зависимость статического сопротивления на валу от угловой скорости этого вала. В общем виде она выражается формулой

$$M_c = M_{co} + (M_{сн} - M_{co}) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (A.3)$$

где  $M_{co}$  – начальный момент трения (сопротивления) в подшипниках и передачах, Н·м.

$$M_{co} \approx (0,05 - 0,3) M_{сн}, \quad (A.4)$$

где  $M_{сн}$  – момент на валу вентилятора при номинальной частоте вращения, Н·м;

$\omega$ ,  $\omega_n$  – текущая и номинальная угловые скорости рабочего колеса, рад/с.

Механическая характеристика  $M_c = \omega^2$  настолько типична для многих рабочих машин, что она имеет свое название – **вентиляторная механическая характеристика**.

С точки зрения электропривода важно знать не только механическую характеристику, но и зависимость мощности на валу вентилятора от подачи воздуха при  $\omega = \text{const}$ , а также мощности на валу от частоты вращения при постоянных параметрах воздухопроводной сети.

Мощность на валу вентилятора  $P_B$  – это мощность воздушного потока плюс мощность потерь в вентиляторе:

$$P_B = \frac{pQ}{\eta_B}, \quad (A.5)$$

где  $Q$  – подача, м<sup>3</sup>/с;

$p$  – давление, Па;

$\eta_B$  – КПД вентилятора.

Из формулы видно, что мощность на валу при изменении подачи и постоянной частоте вращения зависит от характера изменения давления и подачи, т. е. вида аэродинамической характеристики вентилятора.

**Центробежные вентиляторы** имеют пологие аэродинамические характеристики и требуют значительного увеличения мощности при увеличении подачи (в 2–2,5 раза при переходе от режима полностью закрытого выходного отверстия до режима полностью открытого выходного отверстия вентилятора). По этой причине для электродвигателей центробежных вентиляторов наиболее опасным является режим работы при прорыве воздуховода, когда подача воздуха увеличивается до максимальных значений. На практике, учитывая возможный разброс характеристик вентиляторов и, в связи с этим, возможность изменения режимов работы, мощность  $P_2$  электродвигателей выбирают с учетом коэффициента запаса: при  $P_B$  меньше 0,75 кВт  $K_3 = 2$ ; при  $P_B = 0,75–1,5$  кВт  $K_3 = 1,25$ ; при  $P_B = 4–7$  кВт  $K_3 = 1,2$ ; при  $P_B$  выше 7,5 кВт  $K_3 = 1,1$ .

Мощность электродвигателя привода вентилятора для продолжительного режима работы

$$P_2 = P_B K_3 = \frac{pQ}{\eta_B \eta_n} K_3, \quad (\text{A.6})$$

где  $\eta_n$  – КПД передачи, о. е.;

$K_3$  – коэффициент запаса, о. е.

**Осевые вентиляторы** имеют крутопадающие аэродинамические характеристики и, как правило, не требуют повышения мощности при увеличении подачи. Возможное изменение мощности составляет не более 10 %, поэтому коэффициент запаса для них  $K_3 \leq 1,1$ .

Мощность (Вт) определяется выражением

$$P = M\omega, \quad (\text{A.7})$$

где  $\omega$  – угловая скорость, рад/с.

Поскольку при изменении скорости  $M_c \equiv \omega^2$ , то для случая изменения скорости рабочего колеса **мощность вентилятора изменяется пропорционально кубу угловой скорости:**

$$P \equiv \omega^2 \omega \equiv \omega^3. \quad (\text{A.8})$$

Эту особенность вентиляторов нужно учитывать.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Влияние напряжения на характеристики асинхронного электродвигателя

В условиях эксплуатации возможны случаи, когда напряжение на зажимах статора асинхронного электродвигателя отличается от номинального. Например, при колебаниях напряжения во время пуска крупных короткозамкнутых электродвигателей, при переключениях схем обмоток статора и др. Асинхронные электродвигатели весьма чувствительны к изменениям напряжения, т. к. от него зависит магнитный поток в машине.

На практике искусственные характеристики при изменении напряжения используются для осуществления пуска электродвигателя с уменьшенными пусковыми токами и моментами, а также при регулировании частоты вращения малых по мощности электродвигателей. В последнем случае применяются специальные электродвигатели, имеющие большое критическое скольжение, приближающееся к единице, и различные регуляторы напряжения.

Поскольку вращающий момент электродвигателя пропорционален магнитному потоку, зависящему от напряжения на зажимах, и активной составляющей тока ротора, которая, в свою очередь, пропорциональна напряжению, то электромагнитный вращающий момент оказывается пропорционален квадрату напряжения, в то время как ток прямо пропорционален напряжению. Ток и момент, кроме того, сложно зависят от частоты вращения (скольжения) асинхронного электродвигателя.

На вид механической характеристики влияют как внешние, так и внутренние параметры электродвигателя. При неизменной частоте тока питающей сети наибольшее влияние на вид механической характеристики асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором оказывает *величина питающего напряжения*.

*Момент, развиваемый асинхронным электродвигателем, пропорционален квадрату напряжения:*

$$M \equiv kU_1^2, \quad (\text{Б.1})$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от параметров электродвигателя и от скольжения.

**Критическое скольжение  $s_{кр}$  асинхронного электродвигателя не зависит от напряжения сети, а ток для каждого значения скольжения прямо пропорционален напряжению сети:**

$$I_1 \equiv k_1 U_1, \quad (Б.2)$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от параметров электродвигателя и от скольжения.

Вид механических характеристик асинхронного электродвигателя при разных напряжениях приведен на рис. Б.1.

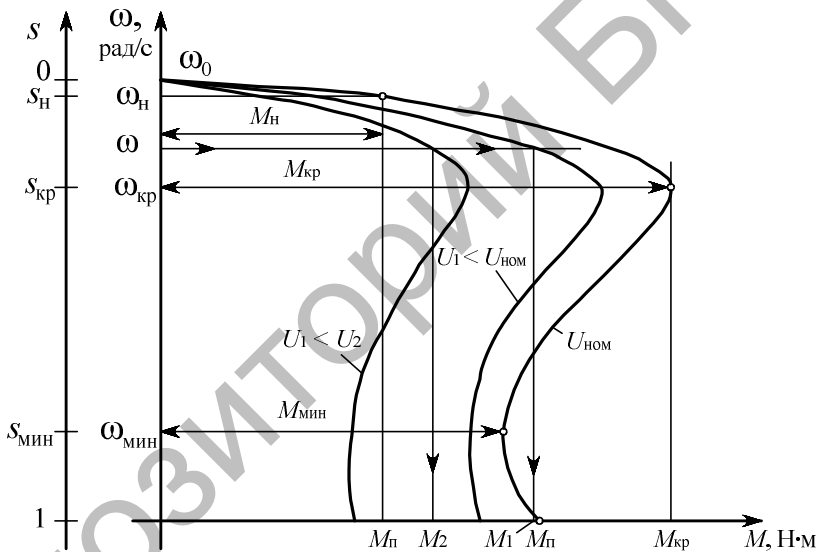


Рис. Б.1. Механические характеристики асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при различном напряжении питающей сети

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Механические и электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Естественная и искусственные механические характеристики ДПТ параллельного или независимого возбуждения изображены на рис. В.1.

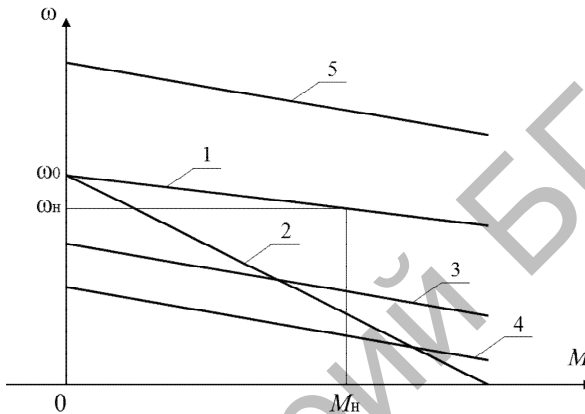


Рис. В.1. Естественная (1), и искусственные (2–5) механические характеристики ДПТ параллельного или независимого возбуждения: 2 – при включении  $R_{доб}$  в цепь якоря; 3, 4 – при различных значениях напряжения на якоре; 5 – при уменьшенном токе возбуждения

Из данных рис. В.1 следует, что при уменьшении напряжения наклон механических характеристик ДПТ не изменяется, а скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  уменьшается пропорционально напряжению.

При включении  $R_{доб}$  в цепь якоря наклон характеристик увеличивается, а  $\omega_0 = \text{const}$ .

Уменьшение возбуждения приводит к увеличению скорости ДПТ и увеличению наклона механической характеристики.

Поскольку между током и моментом у ДПТ параллельного или независимого возбуждения существует прямо-пропорциональная зависимость, то электромеханические характеристики  $\omega = f(I)$  по виду соответствуют механическим характеристикам ДПТ  $\omega = f(M)$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Определение момента инерции рабочей машины методом свободного выбега

Сущность метода свободного выбега, или самоторможения, заключается в следующем. Если отключить приводной двигатель от сети, то вращающиеся части (ротор и т. п.) будут продолжать вращаться за счет кинетической энергии, постепенно замедляясь в результате действия тормозящих сил, обусловленных потерями вращения.

Известно, что кинетическая энергия вращающихся частей системы

$$W_k = J \frac{\omega^2}{2}, \quad (\text{Г.1})$$

где  $J$  – момент инерции системы, кг·м<sup>2</sup>;

$\omega$  – угловая скорость, рад/с;  $\omega = 0,1045n$  ( $n$  – частота вращения, об/мин).

Очевидно, что кинетическая энергия, запасенная приводом, при самоторможении будет расходоваться на преодоление потерь вращения за период торможения.

Определение приведенного момента инерции системы производится при помощи касательной, проведенной в начальной точке  $A$  к кривой  $\omega = f(t)$  до пересечения ее с осью абсцисс (рис. Г.1).

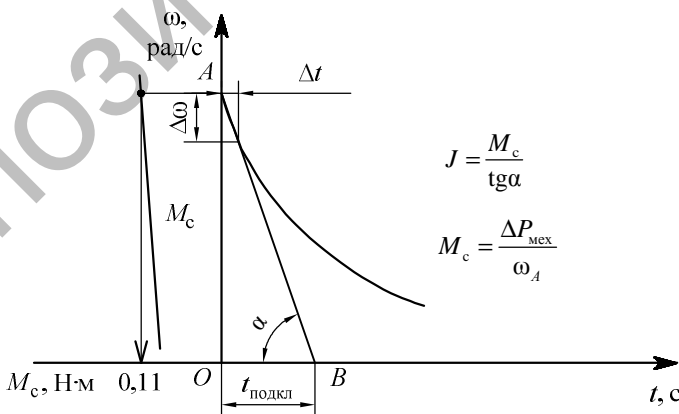


Рис. Г.1. Определение момента инерции по кривой свободного выбега

Так как основное уравнение движения электропривода имеет вид:

$$M_d = M_c + J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt}, \quad (\text{Г.2})$$

то в случае самоторможения, когда  $M_d = 0$ , момент сопротивления  $M_c$  является общим моментом сопротивления механизма и момента потерь вращения привода. Тогда момент инерции

$$J_{\text{пр}} = \frac{M_c}{\frac{d\omega}{dt}}, \quad (\text{Г.3})$$

где  $\frac{d\omega}{dt} = \text{tg}\alpha = \frac{AO}{OB}$ .

Значение момента сопротивления  $M_c$  можно определить из выражения

$$M_c = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\omega}, \quad (\text{Г.4})$$

где  $\Delta P_{\text{мех}}$  – механические потери вращения привода, соответствующие скорости  $\omega$ , Вт.

Механические потери вращения  $\Delta P_{\text{мех}}$  находятся из потерь холостого хода  $\Delta P_o$ , которые, в свою очередь, состоят из потерь в стали статора  $\Delta P_{\text{ст}}$ , механических потерь вращения  $\Delta P_{\text{мех}}$ , потерь в меди статора  $\Delta P_m$  и добавочных потерь  $\Delta P_{\text{доб}} \approx 0,005\Delta P_o$ :

$$\Delta P_o = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_m + \Delta P_{\text{доб}}. \quad (\text{Г.5})$$

Потери в меди определяются по формуле

$$\Delta P_m = 3I_1 \cdot 2r_1, \quad (\text{Г.6})$$

где  $I_1$  – фазный ток обмотки статора, А;

$r_1$  – сопротивление обмотки одной фазы статора, Ом.

Суммарные потери в стали статора и механические потери вращения находятся следующим образом:

$$\Delta P_{\text{ст. мех}} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_0 - \Delta P_{\text{м}} - \Delta P_{\text{доб}}. \quad (\Gamma.7)$$

Для того чтобы найти  $\Delta P_{\text{мех}}$ , необходимо отделить от  $\Delta P_{\text{ст. мех}}$  потери в стали статора  $\Delta P_{\text{ст}}$ . Это достигается построением зависимости  $\Delta P_0 = f(U^2)$  (рис. Г.2). Предварительно снимается опытным путем зависимость  $\Delta P_0 = f(U)$ . Для этого с помощью регулятора напряжения изменяют напряжение  $U_1$  на двигателе и записывают значения  $I_1$  и  $\Delta P_0$ . По формулам (Г.6) и (Г.7) вычисляют  $\Delta P_{\text{ст. мех}} = f(U_1^2)$ . Для получения более точного результата снимают около 10 точек при уменьшении напряжения до 100 В. Затем, экстраполируя экспериментальную кривую до оси ординат (т. е. до значения  $U^2 = 0$ ), получают значение  $\Delta P_{\text{мех}}$ , т. к. потери в стали статора  $\Delta P_{\text{ст}}$  при  $U = 0$  равны нулю. Следовательно, остаются одни механические потери вращения.

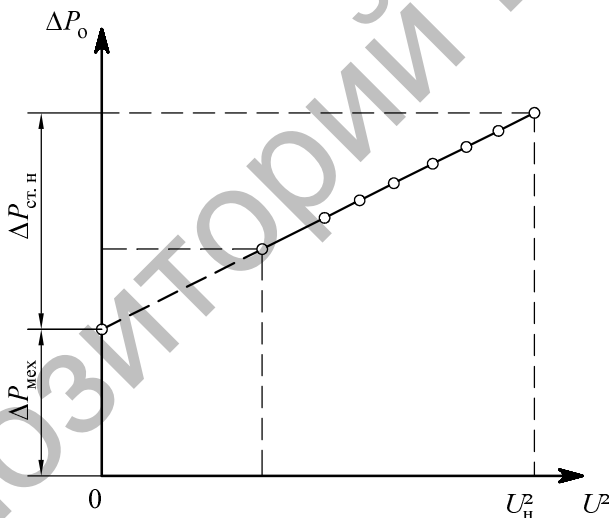


Рис. Г.2. Определение механических потерь вращения асинхронного привода

Для лабораторной работы № 4  $M_c$  определен опытным путем (из опыта холостого хода методом разделения потерь) и составляет  $M_c = 0,11$  Н·м.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Характеристики двухскоростных электродвигателей

В единых сериях асинхронных электродвигателей изготавливаются двух-, трех-, четырехскоростные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Они отличаются от обычных тем, что на статоре имеются несколько самостоятельных обмоток или несколько обмоток, состоящих из двух частей (полуобмоток). В обоих случаях получают разные угловые скорости магнитного поля в машине, а следовательно, и разные номинальные угловые скорости, за счет чего обеспечивается ступенчатое регулирование скорости рабочих органов.

Если полуобмотки соединяются последовательно, получается больше полюсов и меньшая угловая скорость. Когда полуобмотки соединяются параллельно, причем направление тока в одной из них изменяется на противоположное, число полюсов уменьшается в два раза, а угловая скорость магнитного поля, соответственно, в два раза увеличивается. Трех- и четырехскоростные двигатели имеют две отдельные обмотки, одна или две из которых состоят из двух частей.

В трехфазных электродвигателях для переключения числа пар полюсов реализуют две схемы переключения обмоток:

- а) с последовательной звезды на двойную звезду:  $Y/Y\bar{Y}$ ;
- б) с треугольника, в котором полуобмотки соединены последовательно, на двойную звезду, в которой полуобмотки соединены параллельно:  $\Delta/Y\bar{Y}$ .

При любом переключении номинальная мощность при меньшей скорости получается меньше. Но в *первом случае* ( $Y/Y\bar{Y}$ ) номинальные моменты одинаковые, а мощность на высшей скорости в два раза больше, потому что частота вращения на высшей скорости в два раза больше.

Во *втором случае* ( $\Delta/Y\bar{Y}$ ) различие в мощности небольшое, а в моменте различие примерно в два раза (рис. Д.1, б).

Следовательно, двигатель с переключением обмоток  $\Delta/Y\bar{Y}$  целесообразно применять *при регулировании*, когда необходима неизменная (постоянная) мощность (рис. Д.1, б), а с переключением  $Y/Y\bar{Y}$  – *при постоянном моменте* (рис. Д.1, а).

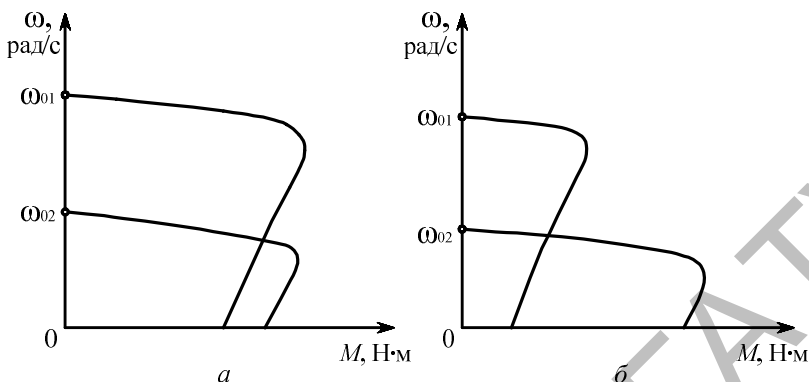


Рис. Д.1. Механические характеристики:  
*a* – для схем  $Y/Y$ ; *б* – для схем  $\Delta/Y$

Начала трех фаз обмоток односкоростных асинхронных электродвигателей обозначают  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$ . Обмотка с началом  $C1$  имеет конец  $C4$ . Если начало обмотки –  $C2$ , то конец –  $C5$ ; если начало –  $C3$ , то конец –  $C6$ .

Многоскоростные обмотки имеют перед буквами  $C1$ – $C3$  цифры, означающие число полюсов:  $2C1$ ,  $2C2$ ,  $2C3$  – двухполюсная обмотка;  $4C1$ ,  $4C2$ ,  $4C3$  – четырехполюсная обмотка;  $6C1$ ,  $6C2$ ,  $6C3$  – шести-полюсная и т. д. Концы обмоток многоскоростных электродвигателей не выводятся в клеммную коробку, а соединяются в «треугольник» или «звезду» внутри обмотки. В клеммную коробку выводятся только начала обмоток.

В многоскоростных электродвигателях, в зависимости от соотношения чисел полюсов и мощностей, используются статорные обмотки с переключением полюсов:

- 1) по схемам Даландера;
- 2) по схемам Харитоновы;
- 3) с тремя нулевыми точками;
- 4) по принципу амплитудно-фазовой модуляции.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Общие сведения о современных преобразователях частоты

Преобразователи частоты – современные высокотехнологичные устройства, обладающие большим диапазоном регулирования и имеющие обширный набор функций для управления асинхронными двигателями. Высочайшее качество и надежность дают возможность применять преобразователи частоты в различных отраслях, в т. ч. в сельскохозяйственном производстве для управления приводами насосов, вентиляторов, транспортеров и т. д.

Принцип частотного метода регулирования скорости АД заключается в том, что, изменяя частоту  $f_1$  питающего напряжения, можно в соответствии с выражением

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (\text{E.1})$$

при неизменном числе пар полюсов  $p$  изменять угловую скорость магнитного поля статора.

Современные преобразователи частоты имеют два вида управления:

- 1) скалярное;
- 2) векторное.

**Скалярное управление** – это управление амплитудой напряжения переменной частоты  $U$  по определенной зависимости от частоты тока  $f$ , т. е.  $U = f(f)$ . Эти законы управления  $U = f(f)$  выбираются (программируются) в зависимости от вида механической характеристики рабочей машины  $M_c = f(\omega)$ .

Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки  $M_c$ .

При постоянном моменте статической нагрузки ( $M_c = \text{const}$ ) напряжение должно регулироваться пропорционально его частоте:

$$\frac{U}{f_1} = \text{const.} \quad (\text{E.2})$$

Для вентиляторного характера нагрузки соотношение принимает вид:

$$\frac{U}{f_1} = \text{const.} \quad (\text{E.3})$$

При моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости:

$$\frac{U}{\sqrt{f_1}} = \text{const.} \quad (\text{E.4})$$

На рис. Е.1 представлены упрощенная схема подключения и механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании угловой скорости.

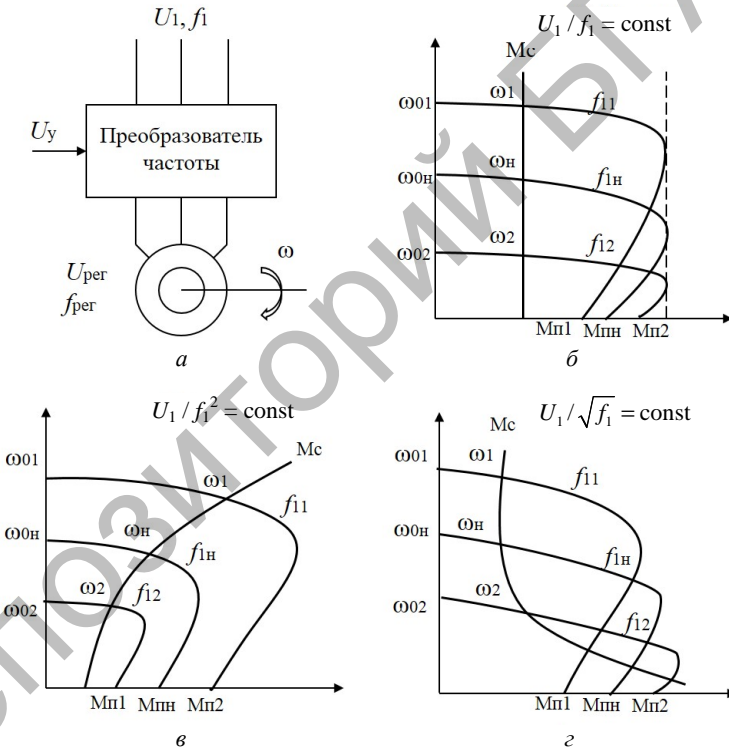


Рис. Е.1. Механические характеристики асинхронного электродвигателя при частотном регулировании скорости: а – схема подключения; б – характеристики для нагрузки с постоянным статическим моментом сопротивления; в – характеристики для нагрузки вентиляторного характера; г – характеристики при статическом моменте нагрузки, обратно пропорциональном угловой скорости вращения

**Векторное управление** – это управление не только амплитудой, но и фазой тока статора. Представление об амплитуде и фазе дает вектор, чем обусловлен термин «векторное управление». Синонимами данного термина, отражающими некоторые различия используемых методов измерения параметров и управление их фазой, являются: «управление полем», «ориентация поля», «прямое управление моментом» и т. п.

При векторном управлении система управления обеспечивает требуемую взаимную ориентацию векторов тока и магнитного потока (ориентация по полю) асинхронного электродвигателя в процессе регулирования. Используется математическая модель электродвигателя. Контролируется величина и фазовый угол моментобразующей (активной) и потокообразующей (реактивной) составляющих тока статора.

По технологии векторного прямого управления моментом, величина потокосцепления статора и момента корректируется с помощью математической модели высокоскоростным цифровым сигнальным процессором (DSP) 40 000 раз в секунду, что позволяет при внешне разомкнутой по скорости системе регулирования без датчика магнитного потока обеспечивать время обработки заданного момента менее 5 мс по сравнению с более чем 100 мс в других технологиях векторного управления. Точное регулирование позволяет довести погрешность управления скоростью до 0,1–0,5 % от номинальной скорости. Эти значения отвечают самым жестким требованиям к электроприводу в машиностроении.

Преимущества применения преобразователей частоты:

- плавное регулирование скорости вращения электродвигателя позволяет отказаться от использования редукторов, вариаторов, дросселей и другой регулирующей аппаратуры, что значительно упрощает управляемую механическую (технологическую) систему, повышает ее надежность и снижает эксплуатационные расходы;

- частотный пуск управляемого двигателя обеспечивает его плавный, без повышенных пусковых токов и механических ударов разгон, что снижает нагрузку на двигатель и связанные с ним передаточные механизмы, увеличивает срок их эксплуатации;

- встроенный микропроцессорный ПИД-регулятор позволяет реализовать системы регулирования скорости управляемых двигателей и связанных с ними технологических процессов;

- применение обратной связи системы с частотным преобразователем обеспечивает качественное поддержание скорости двигателя или регулируемого технологического параметра при переменных нагрузках и других возмущающих воздействиях;
- преобразователь частоты в комплекте с асинхронным электродвигателем может применяться для замены приводов постоянного тока;
- преобразователь частоты в комплекте с программируемым микропроцессорным контроллером может применяться для создания многофункциональных систем управления электроприводами, в т. ч. с резервированием механических агрегатов;
- применение регулируемого частотного электропривода позволяет избежать неоправданных затрат электроэнергии, которые имеют место при альтернативных методах регулирования с технологических потоков дросселированием, с помощью гидромуфт и других механических регулирующих устройств.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### Принцип работы преобразователя частоты

Большинство современных преобразователей частоты построены 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.

Преобразователь частоты (ПЧ) состоит из неуправляемого диодного силового выпрямителя (В), автономного инвертора (АИН), системы управления (СУИ ШИМ), системы автоматического регулирования (САР), дросселя  $L_v$  и конденсатора фильтра  $C_v$  (рис. Ж.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, в течение 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.

Таким образом, форма кривой выходного напряжения представляет собой высокочастотную двухполярную последовательность

прямоугольных импульсов (рис. Ж.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.

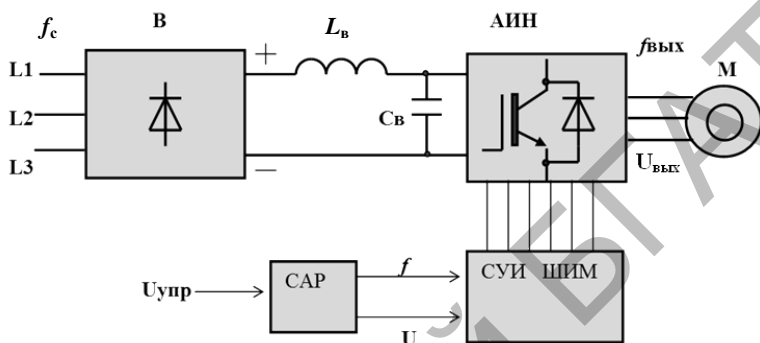


Рис. Ж.1. Упрощенная схема автономного инвертора с ШИМ

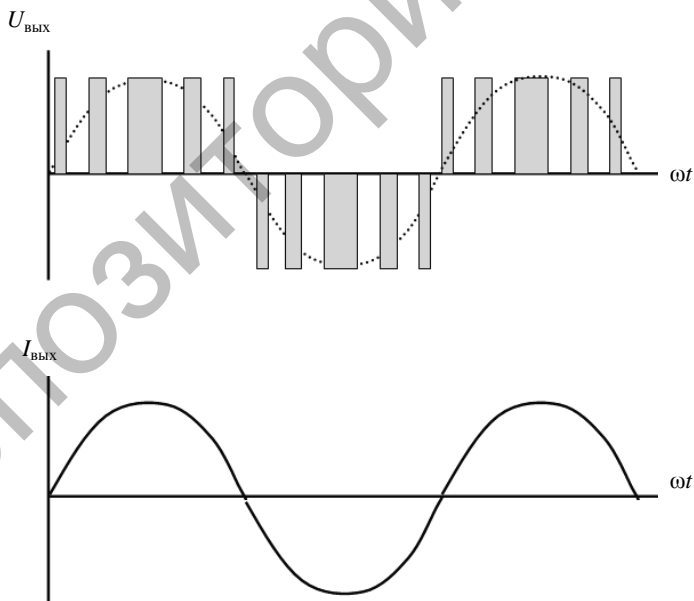


Рис. Ж.2. Форма кривых напряжения и тока на выходе инвертора с ШИМ

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. Оно эквивалентно аналоговому управлению с помощью частоты и амплитуды напряжения.

Современные инверторы выполняются на основе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов, запираемых GTO-тиристоров либо биполярных IGBT-транзисторов с изолированным затвором. На рис. Ж.3 представлена трехфазная мостовая схема автономного инвертора на IGBT-транзисторах. Она состоит из входного емкостного фильтра  $C_\phi$  и шести IGBT-транзисторов  $V1-V6$ , включенных встречно-параллельно диодами обратного тока  $D1-D6$ . За счет поочередного переключения вентилях  $V1-V6$  по алгоритму, заданному системой управления, постоянное входное напряжение  $U_B$  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.

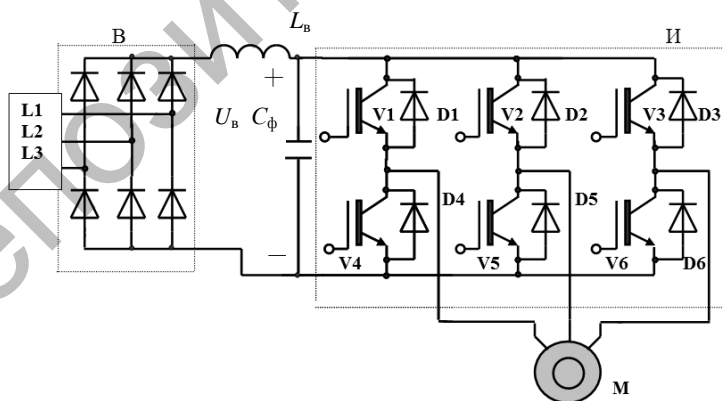


Рис. Ж.3. Схема инвертора: И – трехфазный мостовой инвертор; В – трехфазный мостовой выпрямитель;  $C_\phi$  – конденсатор фильтра

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

### Нагрев и охлаждение электродвигателя.

#### Определение постоянных времени нагрева и охлаждения

Допустимая мощность электродвигателя определяется его температурным режимом. Температурный режим является одним из решающих факторов при выборе электродвигателей по мощности.

Нагревание электродвигателя в электроприводе обусловлено потерями, возникающими в нем при преобразовании электрической энергии в механическую. При работе электродвигателя его температура постоянно повышается и превышает температуру окружающей среды. В качестве стандартной температуры окружающей среды принимается температура  $\theta_0$ , равная 40 °С.

Условия нагревания отдельных частей работающего электродвигателя различны; сильнее нагреваются обычно те части обмотки, которые находятся во внутренних областях машины. Предельно допустимая температура нагревания двигателя ограничивается качеством материала изоляции обмоток. Незначительное превышение рабочей температуры изоляции над предельно допустимой  $\theta_{\text{доп}}$  резко сокращает срок ее службы. Например, перегрев на 8–10 °С сокращает срок службы обмоток в два раза. Поэтому двигателю данной мощности должна соответствовать (при прочих равных условиях) вполне определенная теплоотдача, а следовательно – габариты и конструкция электродвигателя.

Чем больше мощность, тем больше выделяется тепла и тем больше габаритные размеры двигателя.

Таблица И.1

Предельно допустимые значения температуры нагрева применяемых материалов

Параметры	Для класса изоляции			
	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
Предельно допустимое превышение температуры (максимальное значение) $\tau_{\text{доп}}$ , °С	80	90	115	140
Нормированное превышение температуры $\tau_n$ , °С	75	80	100	125
Высота оси вращения электродвигателя, мм	–	45–93	71–335	–



Установившееся превышение температуры двигателя зависит только от мощности  $\Delta P$  потерь АД и теплоотдачи  $A$  электродвигателя:

$$\tau_n = \frac{\Delta P}{A}.$$

Установившееся значение температуры превышения можно найти опытным путем.

Если опыт проводят в течение 25–35 мин, то получить установившуюся температуру двигателя не удастся, т. к. температура машины считается установившейся, если ее изменение в течение часа не превышает одного градуса. Но, имея часть кривой нагрева, можно графическим построением найти установившуюся температуру двигателя (рис. И.1).

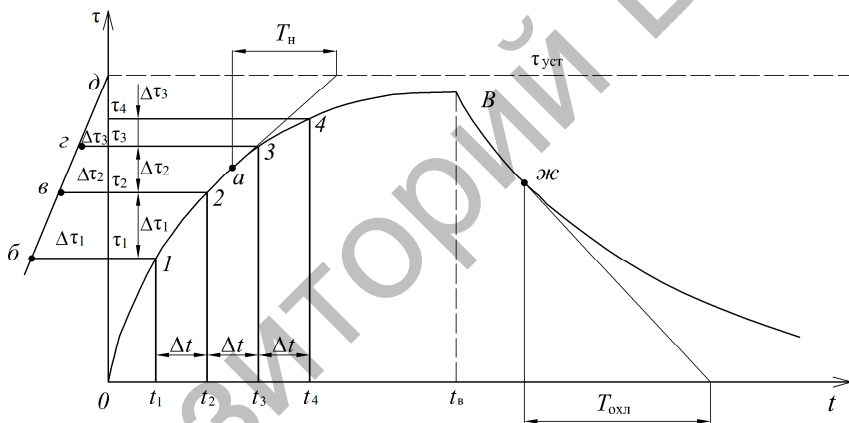


Рис. И.1. Кривые нагрева и охлаждения электродвигателя

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, на них влево от оси ординат откладывают или истинные величины  $\tau_n$ , или пропорциональные им. Получают точки б, в, з, 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.

*Переходные процессы нагрева и охлаждения* описываются уравнением

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (\text{И.1})$$

где  $T_n$  – постоянная времени нагрева, мин;  
 $T_0$  – постоянная времени охлаждения, мин;  
 $\tau_{\text{уст}}$  – установившаяся температура превышения, °С;  
 $\tau_{\text{нач}}$  – начальная температура превышения, °С.

Постоянную времени нагрева  $T_n$  можно определить путем расчета (см. лабораторную работу № 8) или с помощью специальных методов, описанных ниже.

**Метод определения постоянной  $T_n$  по кривой нагрева и значению  $\tau = 0,632\tau_{\text{уст}}$**

Из уравнения (И.1) следует, что при  $t = T_n$  и  $\tau_{\text{нач}} = 0$  температура превышения  $\tau = 0,632\tau_{\text{уст}}$ . Если это значение отложить на кривой графика нагрева, полученного опытным путем, и спроецировать эту точку на ось абсцисс, то отрезок на этой оси в масштабе времени определит постоянную  $T_n$  (рис. И.2, а).

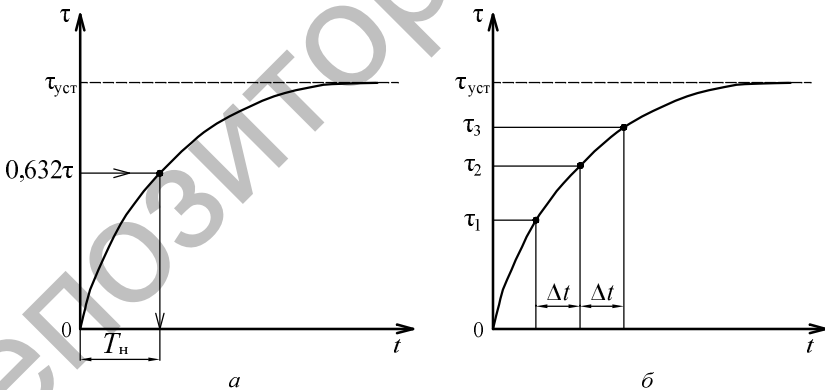


Рис. И.2. Определение  $T_n$  по точке  $\tau = 0,632\tau_{\text{уст}}$  (а) и по методу трех температур (б)

**Метод трех температур**

Опытным путем через равные промежутки времени  $\Delta t$  находят на кривой нагрева температуры  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  (рис. И.2, б).  $T_n$  определяют по формуле

$$T_n = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}}. \quad (\text{И.2})$$

Преимущество этого метода перед другими состоит в том, что им можно пользоваться даже в случае, если неизвестна установившаяся температура.

**Определение  $T_n$  интегральным методом**

На кривой нагрева (ближе к концу) выбирается точка  $A$ . Находится температура  $\tau_A$  и площадь  $S$  (заштрихована на рис. И.3).  $T_n$  определяется по формуле

$$T_n = \frac{S}{\tau_A}. \quad (\text{И.3})$$

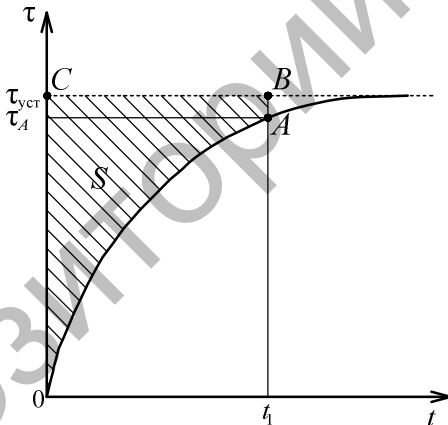


Рис. И.3. Определение  $T_n$  интегральным методом

**Метод касательных для определения  $T_n$  и  $T_o$**

Метод применяется, если известна температура  $\tau_{уст}$ . Проводят касательную к любой точке кривой нагрева. Например, на рис. И.4 касательную проводят к началу кривой, к середине и к концу (точки  $0, a, b$ ). Этот метод применяется и для определения постоянной времени охлаждения  $T_o$ .

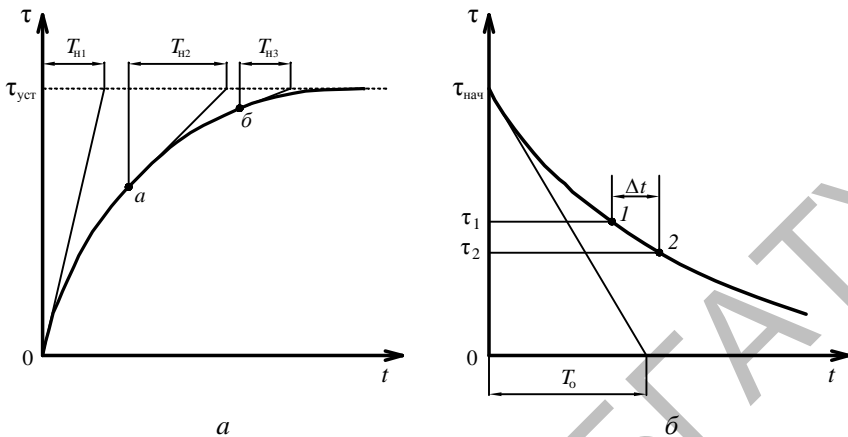


Рис. И.4. Определение постоянной времени нагрева  $T_{н}$  и охлаждения  $T_о$  по методу касательной (а) и по методу двух температур (б)

**Метод двух температур для определения  $T_о$**

Расчет производится по формуле (см. рис. И.4, б):

$$T_о = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (И.4)$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

### Об управлении двухскоростными асинхронными электродвигателями

Регулирование оборотов вращения асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов выполняется только с использованием специальных электрических машин, получивших название многоскоростных.

Электродвигатели имеют две одинаковые секции (катушки) статорной обмотки, приходящиеся на одну пару полюсов. В трехфазных двигателях одной паре полюсов соответствуют три катушки обмотки статора, двум парам полюсов – шесть катушек и т. д.

Варьирование числа пар полюсов обычно осуществляется в результате последовательно-параллельного переключения катушек каждой фазы, при этом изменяется скорость вращения магнитного поля  $\omega_0$  и обороты вращения ротора АД.

Процесс регулирования угловой скорости вращения следует из выражения

$$\omega = \omega_0(1 - s) = 2\pi f_1(1 - s) / p, \quad (\text{К.1})$$

где  $p$  – число пар полюсов.

Число пар полюсов может принимать только дискретные значения, например  $p = 1, 2, \dots, n$ , что приводит к ступенчатому регулированию скорости электродвигателя.

Наиболее распространенными в промышленности и сельскохозяйственном производстве являются двигатели с двумя ступенями скорости: 1500 и 750 об/мин. Электрические машины с четырьмя и более ступенями угловых скоростей в агропромышленном комплексе встречаются очень редко, поскольку они дороги и обладают ухудшенными массогабаритными показателями из-за наличия на статоре двух независимых обмоток.

Чаще всего переключение полюсов осуществляется изменением направления тока в отдельных половинах фазной обмотки (рис. К.1).

Статорная обмотка (рис. К.1, а) состоит из двух одинаковых секций 1н–1к, 2н–2к. Каждая катушка содержит проводники, соединенные последовательно и согласно. Ток, протекающий по полуобмоткам,

направлен в одну сторону. По правилу буравчика определяются направления магнитных силовых линий, которые показаны стрелками на соответствующем рисунке. Магнитное поле статора образовано четырьмя полюсами ( $p = 2$ ).

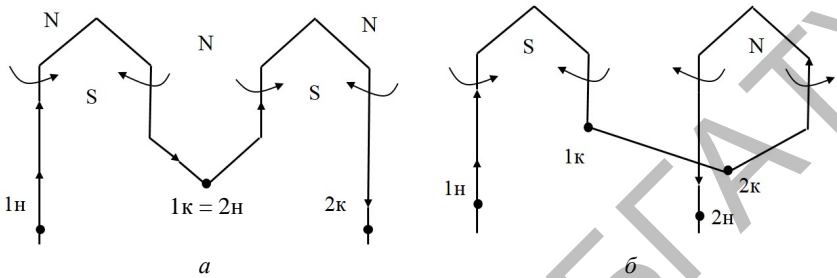


Рис. К.1. Схемы соединения секций одной фазы статорной обмотки АД:  
*a* – последовательность соединения начал и концов при  $p = 2$ ;  
*б* – последовательность соединения начал и концов при  $p = 1$

Снижение числа пар полюсов достигается за счет изменения схемы соединения катушечных групп. Включая катушки последовательно и встречно, как показано на рис. К.1, *б*, и сохраняя при этом прежнее направление подводимого к обмотке тока, добиваются образования магнитного поля статора с вдвое меньшим числом пар полюсов ( $p = 1$ ).

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

### Замкнутые и разомкнутые системы управления

*Разомкнутые системы управления* характеризуются тем, что в них задается необходимое значение регулируемой величины, но в процессе работы это значение не контролируется и система не реагирует на его отклонение от заданного значения. Другими словами, в разомкнутых системах управления выходную величину не сравнивают с входным сигналом, т. е. система не имеет обратной связи.

В *замкнутых системах* производится непрерывный контроль выходной величины и система управления при помощи цепи обратной связи реагирует на отклонение выходного сигнала от заданной величины.

Способы регулирования координат в разомкнутых системах достаточно простые, но точность их регулирования ограничена. Поэтому там, где необходимо обеспечить требуемую точность поддержания регулируемой величины, применяют замкнутые системы регулирования.

Задачей замкнутых систем автоматического регулирования является поддержание регулируемой (выходной) величины в заданном отношении к входному сигналу. Это соотношение нарушается во время переходного режима, возникающего под действием возмущающих сил.

**Пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор** – устройство в управляющем контуре с обратной связью. Используется в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса. ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трех слагаемых, первое из которых пропорционально *разности входного сигнала и сигнала обратной связи* (сигнала рассогласования), второе – интеграл сигнала рассогласования, третье – производная сигнала рассогласования.

Если какие-то из составляющих не используются, то регулятор называют пропорционально-интегрирующим, пропорционально-дифференцирующим, пропорциональным и т. д.

**Пропорциональная составляющая** вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени. Он тем больше, чем больше это отклонение. Если входной сигнал равен заданному значению, то выходной равен нулю.

Однако при использовании только пропорционального регулятора значение регулируемой величины никогда не стабилизируется на заданном значении. Существует так называемая статическая ошибка, которая равна такому отклонению регулируемой величины, которое обеспечивает выходной сигнал, стабилизирующий выходную величину именно на этом значении.

Чем больше коэффициент пропорциональности между входным и выходным сигналом (коэффициент усиления), тем меньше статическая ошибка, однако при слишком большом коэффициенте усиления при наличии задержек (запаздываний) в системе могут начаться автоколебания, а при дальнейшем увеличении коэффициента система может потерять устойчивость.

**Интегрирующая составляющая** пропорциональна интегралу по времени от отклонения регулируемой величины. Она позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку.

Если система не испытывает внешних возмущений, то через некоторое время регулируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей равен нулю, а выходной сигнал полностью обеспечивается интегрирующей составляющей. Тем не менее интегрирующая составляющая также может приводить к автоколебаниям при неправильном выборе ее коэффициента.

**Дифференцирующая составляющая** составляющая пропорциональна темпу изменения отклонения регулируемой величины и предназначена для противодействия отклонениям от целевого значения, которые прогнозируются в будущем. Отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему.

Назначение ПИД-регулятора – поддержание заданного значения  $x_0$  некоторой величины  $x$  с помощью изменения другой величины  $u$ . Значение  $x_0$  называется *заданным значением* (или *уставкой*), а разность  $e = (x_0 - x)$  – *невязкой* (или *ошибкой регулирования*), рассогласованием или отклонением величины от заданной. Приведенная



ниже формула справедлива в случае линейности и стационарности системы, что редко выполняется на практике.

Выходной сигнал регулятора  $u$  определяется тремя слагаемыми:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d(\tau) + K_d \frac{de}{dt}, \quad (\text{Л.1})$$

где  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора соответственно.

Теоретические методы анализа системы с ПИД-регулятором редко применяются на практике. Основная сложность практического применения – незнание характеристик объекта управления. Кроме того, существенную проблему представляют нелинейность и нестационарность системы.

Практические регуляторы работают в ограниченном сверху и снизу диапазоне, поэтому в принципе нелинейны. В связи с этим получили распространение методы экспериментальной настройки регулятора, подключенного к объекту управления. Прямое использование формируемой алгоритмом управляющей величины также имеет свою специфику. Например, при регулировке температуры часто управляют не одним, а двумя устройствами: одно из них отвечает за подачу горячего теплоносителя для нагрева, а другое – за подачу хладагента для охлаждения.

Часто рассматриваются три варианта практических регуляторов. В первом варианте, наиболее близком к теоретическому описанию, выход регулятора – непрерывная аналоговая ограниченная величина. Во втором случае выход представляет собой поток импульсов, который может управлять шаговым двигателем. В третьем случае выходной управляющий сигнал регулятора используется для широтно-импульсной модуляции.

В современных системах автоматизации ПИД-регуляторы реализуются либо как специализированные аппаратные модули, включаемые в состав управляющего контроллера, либо программными методами. Производители контроллеров часто разрабатывают специализированное ПО (тюнеры) для настройки коэффициентов регулятора.

## ПРИЛОЖЕНИЕ М

### Выбор насосного агрегата для сельскохозяйственной водоснабжающей установки

Для водоснабжения сельскохозяйственных потребителей применяют башенные и безбашенные насосные установки, состоящие из насосного агрегата, водонапорной башни или воздушно-водяного котла, водопроводной сети и системы управления электронасосом.

Водонапорная башня позволяет создать требуемый напор и обеспечивает необходимый запас воды. В безбашенных (гидропневматических) установках для обеспечения напора служат герметичные воздушно-водяные котлы.

Для выбора насоса и определения его мощности по водопотреблению определяют требуемую подачу и напор.

Суточное потребление воды в сутки ( $\text{м}^3$ ):

$$Q_c = q_1 n_1 + q_2 n_2 + \dots + q_m n_m, \quad (\text{М.1})$$

где  $q_1, q_2, \dots, q_m$  – суточная норма расхода воды отдельными видами потребителей,  $\text{м}^3$  в сутки;

$n_1, n_2, \dots, n_m$  – число потребителей соответствующего вида.

Требуемая подача насоса ( $\text{м}^3/\text{с}$ ):

$$Q_{\text{т}} = \frac{Q_c k_c k_{\text{ч}}}{24 \cdot 3600}, \quad (\text{М.2})$$

где  $k_c$  – коэффициент суточной неравномерности расхода воды ( $k_c = 1,3$ );

$k_{\text{ч}}$  – коэффициент часовой неравномерности расхода воды ( $k_{\text{ч}} = 2,5$  для ферм с автопоением;  $k_{\text{ч}} = 4,5$  для ферм без автопоения;  $k_{\text{ч}} = 2,0$  для коммунального сектора).

Напор (м):

$$H = H_{\text{г}} + H_{\text{п}}, \quad (\text{М.3})$$

где  $H_{\text{г}}$  – геодезический напор (высота подъема воды от нижнего до верхнего уровня), м;

$H_{\text{п}}$  – потери напора во всасывающем и напорном трубопроводах, м.

По подаче и напору насосной установки выбирают в каталоге тип насоса. Далее определяют мощность электродвигателя насоса.

Для поднятия жидкости объемом  $V$  ( $\text{м}^3$ ) и плотностью  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) на высоту  $H$  (м) необходимо приложить силу  $F$ , равную и противоположную по направлению весу этой жидкости  $G$  (Н). При этом полезная мощность (Вт):

$$P_{\text{пол}} = \frac{FH}{t}. \quad (\text{М.4})$$

Так как  $G = mg = V\rho g$  ( $m$  – масса воды, кг;  $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$  – ускорение свободного падения), то

$$P_{\text{пол}} = \frac{V\rho gH}{t} = Q\rho gH = Qp, \quad (\text{М.5})$$

где  $Q$  – подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$t$  – время работы, с;

$p$  – давление воды, Па (1 м воды создает давление  $p = 9810$  Па).

Необходимая мощность насоса (кВт):

$$P = \frac{Q\rho gH}{1000\eta_n\eta_{\text{п}}} = \frac{Qp}{1000\eta_n\eta_{\text{п}}}, \quad (\text{М.6})$$

где  $\eta_n$  – КПД насоса;

$\eta_{\text{п}}$  – КПД передачи.

По универсальной характеристике выбранного насоса для  $H$  определяют соответствующее значение  $Q$ .

Для центробежных насосов  $\eta_n = 0,4-0,8$ , для вихревых –  $0,25-0,5$ . Для прямой и клиноременной передач –  $0,98$ , для зубчатой –  $0,97$ , для плоскоремной –  $0,95$ .

В реальных условиях работы насосов могут возникать утечки воды из напорного трубопровода (неплотности соединений, разрывы трубопровода и пр.) В этих условиях в соответствии с характеристикой насоса  $Q-H$  увеличивается мощность. Поэтому электродвигатели для насосов выбирают с некоторым запасом мощности. Расчетная мощность, по которой надо выбрать электродвигатель для насоса:

$$P_p = k_3 P, \quad (M.7)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса, зависящий от  $P$ :

$P, \text{ кВт}$	$\leq 1$	2	3	4	5	8	$\geq 10$
$k_3$	2	1,7–1,5	1,33	1,25	1,2	1,12	1,1–1,05

С учетом условий окружающей среды, особенностей монтажа, необходимой мощности и частоты вращения насоса в справочных таблицах выбирают соответствующий тип электродвигателя. В этом случае важно соответствие угловой скорости насоса и электродвигателя, т. к. подача, напор, момент и мощность находятся в следующей зависимости от угловой скорости:  $Q \propto \omega$ ;  $H \propto \omega^2$ ;  $M \propto \omega^2$ ;  $P \propto \omega^3$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ Н

### Электропривод крановых механизмов

Улучшение условий труда возможно при использовании большого многообразия грузоподъемных агрегатов, выполняющих перемещение грузов в самых разнообразных сельскохозяйственных отраслях. Автоматизированные механизмы для подъема выполняют погрузочно-разгрузочные работы, передвижение материалов на территории производства, строительства, складских помещений и ремонтных мастерских.

Электрические подъемные краны по особенностям конструкции, назначению и условиям работы разделяются на мостовые, порталные, козловые, башенные, кран-балки, тали и др.

С помощью подъемных механизмов выполняются вертикальные и горизонтальные перемещения различных грузов. Главным элементом электрического крана является подвижная металлическая конструкция, оснащенная подъемной лебедкой, приводимая в движение электроприводом на основе постоянного или переменного тока.

Подъемный механизм является машиной циклической работы, предназначенной для подъема и перемещения грузов и разнообразных материалов. Груз удерживается с помощью грузозахватного механизма, называемого крюком, или грейфером. Такой тип грузоподъемного механизма получил очень широкое распространение и в зависимости от технических условий выполняется в самых разнообразных конструктивных исполнениях.

Для кранов характерно, что все их механизмы работают в повторно-кратковременном режиме, когда относительно непродолжительные периоды работы, связанные с перемещением грузов, чередуются с паузами, возникающими из-за процессов загрузки и разгрузки грейферов. Нагрузка элементов подъема изменяется от 0,12 до 1,0, а устройств передвижения – от 0,5 до 1,0 номинальных значений.

Для качественного подъема, спуска и перемещения грузов электропривод крановых механизмов должен удовлетворять следующим основным требованиям:

– угловая скорость электропривода регулируется в сравнительно широких диапазонах в связи с тем, что тяжелые грузы необходимо перемещать с меньшей скоростью, а пустой крюк – с высокой;

- обеспечивается необходимая жесткость механических характеристик привода, чтобы работа на низких скоростях не зависела от груза;
- ускорения ограничиваются допустимыми пределами при минимальной длительности переходных процессов;
- электропривод реверсируется, работа ведется как в двигательном, так и в тормозных режимах.

Для привода крановых механизмов возможно применение различных двигателей и систем электропривода. Привод выбирается в соответствии с грузоподъемностью, номинальной скоростью движения, требуемым диапазоном регулирования угловой скорости вращения, жесткостью механических характеристик, числом включений в час и т. д.

Наибольшее распространение на кранах получил электропривод с асинхронными двигателями с короткозамкнутым и фазным ротором.

Перегрузочная способность крановых электродвигателей с контактными кольцами при продолжительности включения ПВ = 25 % изменяется от 2,5 до 3,4.

Привод с фазным ротором позволяет регулировать угловую скорость за счет изменения сопротивления, вводимого в электрические цепи обмотки ротора. Однако при всем многообразии достоинств рассматриваемого вида электропривода он не обеспечивает необходимую жесткость регулировочных характеристик и устойчивую работу на пониженных скоростях вращения.

Если требуется обеспечить повышенный диапазон регулирования скорости вращения всех элементов электропривода, ограничение стопорного момента и плавное протекание переходных процессов, то применяют электропривод системы Г–Д.

Когда возникает необходимость обеспечить низкие устойчивые угловые скорости вращения в различных режимах работы крановых устройств, то применяются электродвигатели постоянного тока, несмотря на их сложное устройство, ограниченный срок службы и отсутствие широко разветвленных сетей с источником постоянного тока.

С интенсивным развитием полупроводниковой техники в последнее время для регулирования оборотов вращения ротора используют асинхронные электроприводы с частотными или тиристорными преобразователями электрической энергии.

## ПРИЛОЖЕНИЕ П

### Пуск асинхронных электродвигателей с переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник»

Пуск электродвигателей серии АИР, рассчитанных на номинальное напряжение 660/380 В, можно осуществлять с переключением схем соединения обмоток при линейном напряжении трехфазной сети 380 В. Вначале включение под напряжение осуществляется при соединении обмоток статора в «звезду», затем, когда ротор электродвигателя достигает скорости, близкой к номинальной, быстро переключаются на «треугольник» с помощью специальных переключателей или дополнительных электромагнитных пускателей. При таком пуске пусковой момент электродвигателя и ток, потребляемый двигателем во время его разгона, в три раза меньше значений тока и момента при пуске двигателя, обмотки которого постоянно соединены в «треугольник».

В лабораторных условиях, когда имеется напряжение источника питания 220 В, можно осуществлять такой пуск и при наличии двигателя с номинальным напряжением 380/220 В.

Пуск с изменением схемы соединения обмоток осуществляется обычно автоматически, с использованием электромагнитных, пневматических, моторных реле времени. Известно несколько типовых схем, отличающихся количеством электромагнитных пускателей, типом реле.

На рис. П.1 изображена схема пуска АД в функции времени типа РП-256-44 и с тремя пускателями. На рис. П.2 изображена схема пуска АД, в которой использовано пневматическое реле времени, промежуточное реле *KV* и два электромагнитных пускателя. Последняя схема особенно эффективна, если используется двигатель большой мощности, когда необходимы контакторы на большой ток. В этом случае контакторы выбираются по фазному току двигателя.

На рис. П.3 изображена принципиальная электрическая схема аналогичного назначения, в которой используются три пускателя и пневматическое реле времени. В этой схеме, как и в схеме на рис. П.1, после переключения под током оказываются два аппарата управления (*KM2* и *KM3*), а в другой схеме – три аппарата (рис. П.2).

Работа схемы (рис. П.1) начинается с нажатия на кнопку *SB2*.

Включается реле времени *KT*. Его контакт замыкается, и включается электромагнитный пускатель *KM1*. Его силовые контакты

включают обмотки электродвигателя в «звезду». Первый блокировочный контакт  $KM1$  размыкается в цепи катушки  $KM3$ , а второй включает электромагнитный пускатель  $KM2$ . Силовые контакты  $KM2$  включают электродвигатель в сеть. Первый блок-контакт  $KM2$  шунтирует кнопку  $SB2$ , второй замыкается в цепи катушки  $KM3$ , а третий размыкается в цепи катушки  $KT$ . Реле времени  $KT$  отключается, и его контакт с выдержкой времени разрывает цепь катушки  $KM1$ . Силовые контакты  $KM1$  размыкают схему обмотки «звезда». Второй контакт  $KM1$  замыкается в цепи катушки  $KM3$ , отчего  $KM3$  включается. Его силовые контакты включают обмотку электродвигателя в «треугольник».

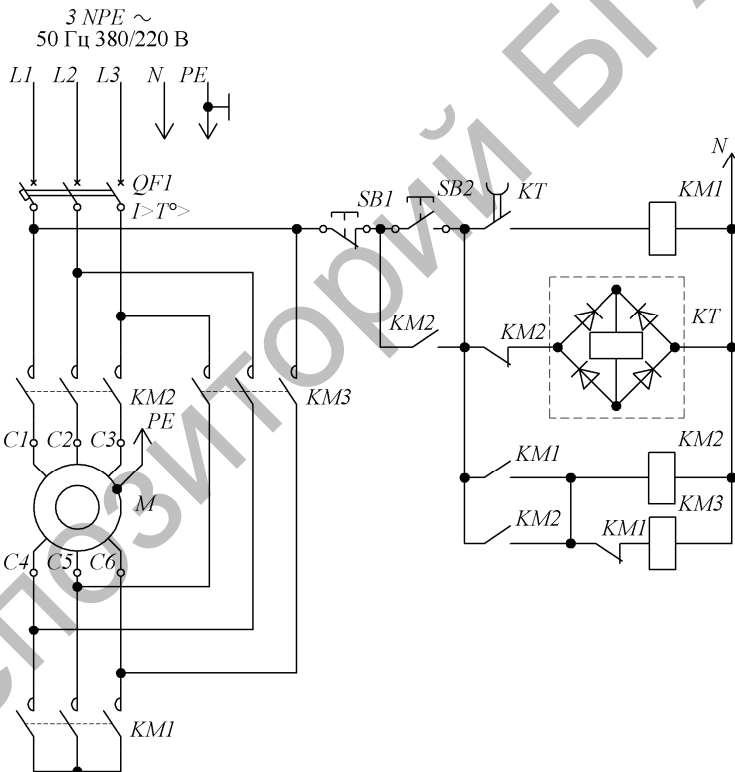


Рис. П.1. Принципиальная электрическая схема пуска АД с переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник» с помощью электромагнитного реле времени типа РП-25



Таким образом, после всех переключений в работе остаются электромагнитные пускатели *KM2* и *KM3*. Обратите внимание, что в этой схеме контакт реле времени должен сначала замкнуться без выдержки времени, а после отключения катушки реле *KT* – разомкнуться с выдержкой времени.

Работа схемы (рис. П.2) начинается после нажатия на кнопку *SB2*.

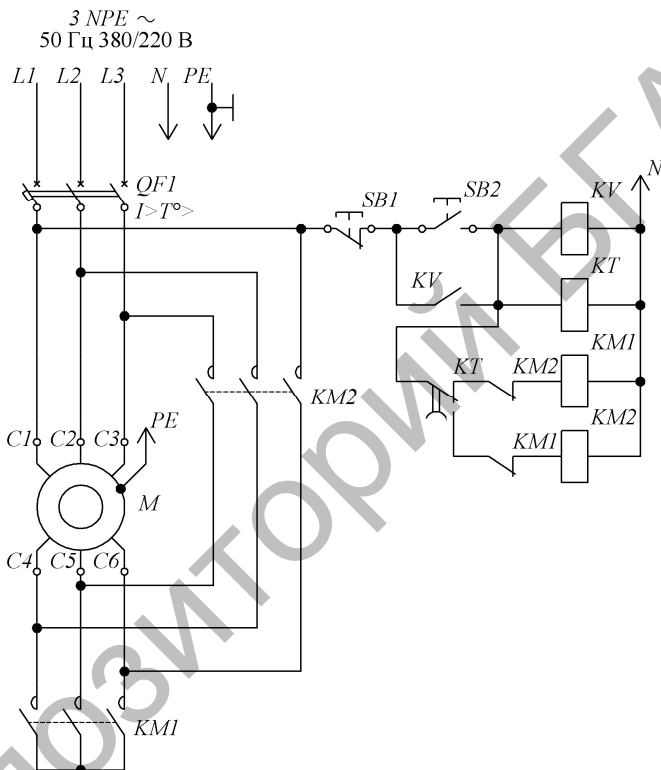


Рис. П.2. Принципиальная электрическая схема пуска АД с переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник» с помощью двух электромагнитных пускателей и реле с переключающим контактом

Включается промежуточное реле *KV*, реле времени *KT* и электромагнитный пускатель *KM1*. Обмотки электродвигателя соединяются в схему «звезда». Двигатель начинает разгоняться. Контакт *KV* шунтирует кнопку *SB2* «Пуск», а блок-контакт *KM1* размыкается в цепи катушки *KM2*. Через некоторое время контакт *KT* переключается.

чается (вниз по схеме). Катушка электромагнитного пускателя  $KM1$  обесточивается. Его силовые контакты разрывают схему «звезда», а блок-контакт  $KM1$  замыкается в цепи катушки  $KM2$ , отчего электромагнитный пускатель  $KM2$  включается. Его силовые контакты соединяют обмотки двигателя в «треугольник», а блок-контакт  $KM2$  разрывает цепь катушки  $KM1$ . В работе остаются три аппарата управления ( $KV, KT, KM2$ ).

В этой схеме обмотка статора оказывается под напряжением сразу после включения автоматического выключателя  $QF$ . После отключения  $KM2$  и двигателя  $M$  необходимо отключить  $QF$ .

Работа схемы (рис. П.3) начинается с нажатия на кнопку  $SB2$ .

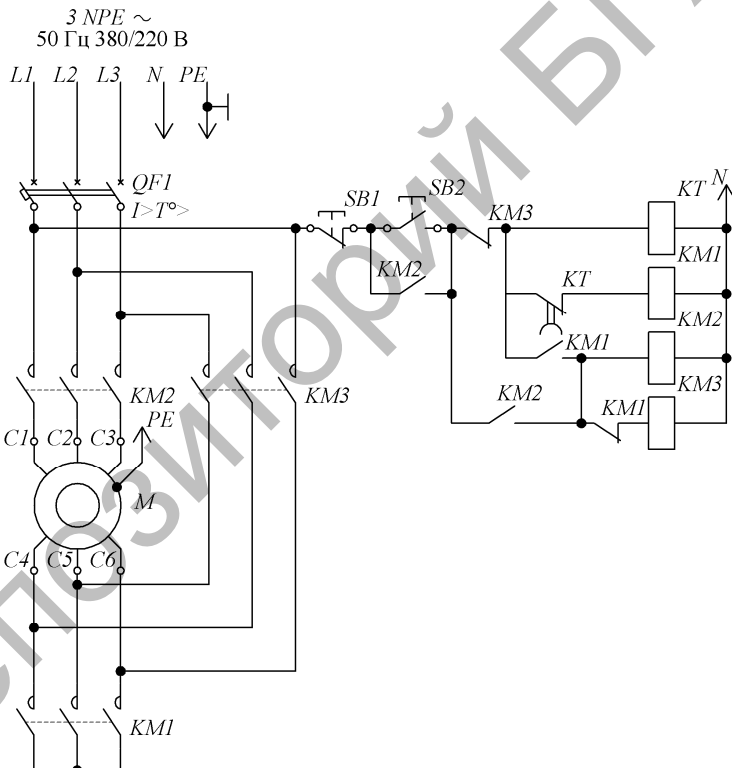


Рис. П.3. Принципиальная электрическая схема пуска АД с переключением обмоток со схемы «звезда» на схему «треугольник» с помощью реле времени с размыкающим контактом

Включается реле времени *KT* и электромагнитный пускатель *KM1*. Силовые контакты *KM1* соединяют обмотки двигателя в «звезду». Один блок-контакт *KM1* размыкается в цепи катушки *KM3*, а другой замыкается в цепи катушки *KM2*, отчего электромагнитный контактор *KM2* включается и подключает обмотку двигателя в сеть. Электродвигатель разгоняется при схеме соединения обмоток «звезда». Один блок-контакт *KM2* шунтирует кнопку *SB2* «Пуск», и ее можно отпускать, а другой контакт замыкается в цепи катушки *KM3*.

Через некоторое время контакт *KT* разрывает цепь катушки *KM1*, отчего электромагнитный пускатель *KM1* отключается от сети. «Звезда» обмоток двигателя разрывается. При возвращении блок-контакта *KM1* в исходное положение замыкается цепь катушки *KM3*, включается электромагнитный пускатель *KM3*. Обмотки двигателя включаются в «треугольник». Блок-контакт *KM3* разрывает цепь катушек *KT* и *KM1*. Питание катушек *KM2* и *KM3* осуществляется через контакт *KM2*.

Таким образом, в этой схеме остаются в работе только катушки электромагнитных пускателей *KM2* и *KM3*. Реле времени *KT* может быть пневматическим или электронным.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Р

### Динамическое торможение асинхронной машины

Для осуществления динамического торможения обмотка статора машины отключается от сети и подключается к источнику постоянного тока. Основные схемы включения обмотки статора приведены в табл. Р.1.

Постоянный ток, протекая по обмотке статора, создает постоянное поле с синусоидальным распределением индукции.

В табл. Р.1 приведены векторные диаграммы пространственного сложения намагничивающих сил фаз статора. Предполагается, что число последовательно соединенных витков в фазе составляет  $\omega_1$ .

В целях упрощения анализа работы машины целесообразно заменить несимметричную систему возбуждения машины постоянным током на эквивалентную, с точки зрения амплитуды намагничивающей силы, симметричную систему трехфазного тока.

Амплитуда намагничивающей силы трехфазной обмотки, обтекаемой трехфазным током, определяется выражением

$$F_{\text{пер}} = \frac{3}{2} I_{\text{м}} \omega_1, \quad (\text{Р.1})$$

где  $I_{\text{м}}$  – амплитуда фазного тока.

Приравняв  $F_{\text{пер}}$  к амплитуде намагничивающей силы постоянного тока  $F_{\text{п}}$ , можно получить значение амплитуды трехфазного переменного тока  $I_{\text{м. экв}}$ , эквивалентного по величине намагничивающей силы обмотки постоянному току:

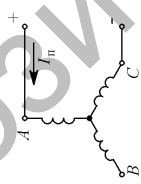
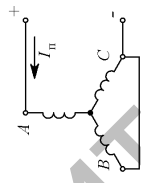
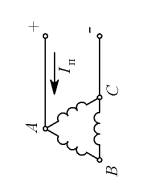
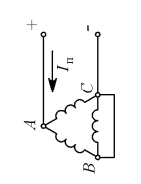
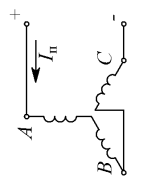
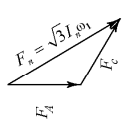
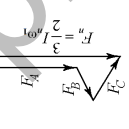
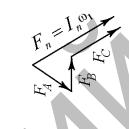
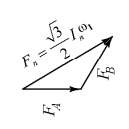
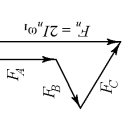
$$F_{\text{п}} = F_{\text{пер}} = \frac{3I_{\text{м. экв}} \omega_1}{2}; \quad (\text{Р.2})$$

$$I_{\text{м. экв}} = \frac{2F_{\text{п}}}{3\omega_1}. \quad (\text{Р.3})$$

Действующее значение этого тока  $I_{\text{экв}}$  (далее – эквивалентный ток), как известно, получается путем деления амплитудного значения на  $\sqrt{2}$ .

Таблица Р.1

Расчетные соотношения для разных схем соединения обмоток АД в режиме динамического торможения

Вариант	1	2	3	4	5
Схема соединения обмоток					
Векторная диаграмма МДС	 $F_n = \sqrt{3}I_n \sin \varphi_{01}$ $F_A = F_C = I_n \sin \varphi_{01}$	 $F_n = I_n \sin \varphi_{01}$ $F_A = F_C = \frac{1}{2}I_n \sin \varphi_{01}$ $F_B = F_C = \frac{1}{2}I_n \sin \varphi_{01}$	 $F_n = \frac{2}{3}I_n \sin \varphi_{01}$ $F_A = F_C = \frac{1}{3}I_n \sin \varphi_{01}$ $F_B = F_C = \frac{2}{3}I_n \sin \varphi_{01}$	 $F_n = \frac{1}{2}I_n \sin \varphi_{01}$ $F_A = F_C = \frac{1}{2}I_n \sin \varphi_{01}$	 $F_n = I_n \sin \varphi_{01}$ $F_A = F_B = F_C = I_n \sin \varphi_{01}$
$I'_{\text{экв}}$	$2r$	$\frac{3}{2}r_1$	$\frac{2}{3}r_1$	$\frac{r_1}{2}$	$3r_1$
$I_{\text{экв}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}I_n$	$\frac{1}{\sqrt{2}}I_n$	$\frac{\sqrt{2}}{3}I_n$	$\frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}}I_n$	$\frac{2\sqrt{2}}{3}I_n$

Отсюда:

$$I_{\text{экв}} = \frac{\sqrt{2}F_n}{3\omega_1}. \quad (\text{P.4})$$

При вращении ротора в нем индуцируется ЭДС, частота которой определяется следующим образом:

$$f_2 = \frac{pn}{60}, \quad (\text{P.5})$$

где  $n$  – скорость вращения ротора, об/мин;  
 $p$  – число пар полюсов обмотки.

Скорость поля при нормальном питании электродвигателя трехфазным током (так называемая синхронная скорость):

$$n_c = \frac{60f_1}{p}; \quad (\text{P.6})$$

$$f_2 = f_1 \frac{n}{n_c}. \quad (\text{P.7})$$

Скорость вращения ротора, вследствие неподвижности поля, представляет собой ту скорость, с которой линии силы магнитного поля пересекаются проводниками ротора.

Отношение этой величины к синхронной скорости – это характерное для асинхронных машин **скольжение при торможении**

$$\frac{n}{n_c} = s. \quad (\text{P.8})$$

Отсюда для частоты тока ротора получается такое же выражение, как и для случая нормальной схемы питания машины трехфазным током:

$$f_2 = f_1 s. \quad (\text{P.9})$$

В результате взаимодействия поля статора с током ротора образуется **тормозящий момент**.

Поле ротора вращается относительно ротора в направлении, противоположном по отношению к его движению, со скоростью

$$n_2 = n_1 s, \quad (P.10)$$

т. е. со скоростью, равной скорости самого ротора.

Таким образом, это поле будет неподвижным по отношению к статору.

Примерная механическая характеристика асинхронной машины в режиме динамического торможения имеет вид кривой 1 (рис. P.1). В том случае, когда машина не насыщена и можно полагать, что при всех значениях скольжения реактивное сопротивление намагничивания  $x_p = x_{\mu 0}$ , для механической характеристики получается уравнение

$$M = \frac{2M_M}{\frac{s}{s_M} + \frac{s_M}{s}}. \quad (P.11)$$

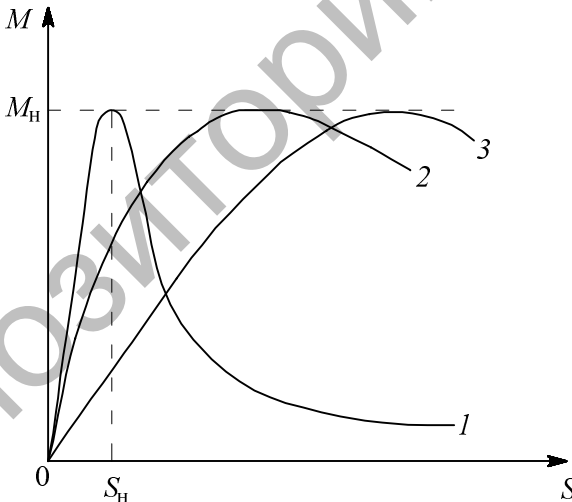


Рис. P.1. Механические характеристики асинхронной машины при динамическом торможении для различных значений вторичного сопротивления

Здесь  $M_M$  и  $s_M$  – максимальный момент и соответствующее скольжение, выражающиеся следующим образом:

$$M_m = \frac{1,46I_{\text{экв}}^2 x_{\mu 0}^2}{n_c (x_{\mu 0} + x'_2)}, \quad (\text{P.12})$$

где  $n_c$  – синхронная скорость вращения, об/мин;

$$s_m = \frac{r'_2}{x_{\mu 0} + x'_2}. \quad (\text{P.13})$$

Механическая характеристика асинхронной машины в режиме динамического торможения имеет такое же аналитическое выражение, как и характеристика для нормальной схемы включения машины. Однако они значительно отличаются друг от друга величиной идентичных параметров  $s_m$  и  $s_k$ . При одинаковых значениях  $r'_2$  и  $x'_2$  значение  $s_m$  будет значительно меньше, чем  $s_k$ .

Например, для короткозамкнутого двигателя при величине эквивалентного тока, близкой к номинальному первичному току,  $s_m = 0,02-0,06$ , тогда как  $s_k = 0,14-0,20$ .

Максимальный момент  $M_m$  в зависимости от величины постоянного тока может быть больше или меньше критического момента в нормальной схеме.

Изменение механической характеристики динамического торможения практически осуществляется за счет либо вторичного сопротивления, либо величины намагничивающего тока  $I_{\text{н}}$ , вызывающего пропорциональное изменение эквивалентного тока  $I_{\text{экв}}$ .

Значения  $I_{\text{ц}}$ ,  $x_{\text{ц}}$ ,  $I'_2$  и  $M$  сохраняются, если при увеличении вторичного сопротивления в той же пропорции увеличивается скольжение. Это значит, что *скольжение  $s_m$  будет меняться пропорционально изменению вторичного сопротивления, а максимальный момент останется неизменным.*

Последнее видно также из выражений (P.12) и (P.13), относящихся к случаю ненасыщенной магнитной цепи.

Таким образом, *изменение вторичного сопротивления оказывает такое же влияние на характеристику динамического торможения, как и на характеристику нормальной схемы включения.*

Влияние вторичного сопротивления на механическую характеристику динамического торможения иллюстрируется на рис. P.1. На нем показаны три характеристики одной и той же машины,



имеющей одинаковый намагничивающий ток, и три различных значения вторичного сопротивления. Характеристика 1 отвечает меньшему значению сопротивления, а характеристика 3 – большему значению этого сопротивления.

Кривая 2 представляет характеристику для промежуточного значения сопротивления.

При изменении величины постоянного тока в статоре, а значит, и пропорциональном изменении эквивалентного тока  $I_{\text{экв}}$  момент в случае ненасыщенной цепи машины ( $x_{\mu} = x_{\mu 0} = \text{const}$ ) меняется в квадратичной зависимости от тока, увеличиваясь с его увеличением. При насыщенной цепи те же изменения тока вызывают меньшее изменение момента.

Так как в реальных условиях машина при работе в режиме динамического торможения с малыми скольжениями насыщена, а при больших – не насыщена, то изменение постоянного тока влечет за собой сильные изменения момента в области больших скольжений и относительно небольшие изменения в области малых скольжений. Механические характеристики АД при динамическом торможении и различных токах возбуждения имеют вид рис. 15.2 (см. лабораторную работу № 15).

## ПРИЛОЖЕНИЕ С

### Электропривод типовой поточной линии

Поточной технологической линией называют группу рабочих машин и механизмов, выполняющих один законченный технологический цикл. Этот цикл характеризуется поточностью, непрерывностью и ритмичностью.

Схемы управления электроприводами рабочих машин поточной линии должны отвечать семи основным требованиям:

1. Перед пуском поточной линии должен быть подан звуковой или световой сигнал.

2. Электродвигатели рабочих машин и механизмов поточной линии включаются в работу в последовательности, обратной направлению движения продукта.

3. Для обеспечения устойчивости работы электродвигателей, а также во избежание «лавинного» пуска и снижения напряжения задержка на включение очередного электродвигателя поточной линии должна быть не меньше времени разбега предыдущего электродвигателя.

4. Для технологической (рабочей) остановки электроприводов всей поточной линии необходимо без выдержки времени останавливать сначала электропривод первой (в потоке) рабочей машины, обеспечивающей подачу продукта на поточную линию, а затем, с выдержкой времени, достаточной для освобождения рабочих машин от продукта, поочередно все остальные электроприводы машин и механизмов.

5. При аварийном отключении электродвигателя одной из машин должны без выдержки времени останавливаться все машины, работающие на ее загрузку, и с выдержкой времени, необходимой для освобождения их от продукта, – все машины, работающие на отгрузку.

6. Для аварийного отключения всей поточной линии должна предусматриваться кнопка аварийного отключения на щите управления и у мест нахождения рабочих при значительном их удалении от щита управления.

7. Для наладочных и ремонтных работ в схеме необходимо предусматривать блокировочные цепи, предоставляющие возможность включения отдельных электроприводов. Кроме ручного управления следует предусмотреть автоматическое (полуавтоматическое).

Для наладочных работ более приемлемо местное управление, при котором аппараты включения и выключения электропривода рабочей машины располагаются непосредственно на ней. Такими аппаратами могут быть, например, пакетные выключатели, переключатели в силовой цепи, шунтирующие силовые контакты электромагнитных пускателей или кнопки управления электромагнитным пускателем, поскольку требуют монтажа более тонких проводов управления.

При выполнении п. 7 требований желательно без отключения электроприводов рабочих машин поточной линии обеспечить переход с ручного на автоматическое управление и наоборот. Указанные выше основные требования к управлению электроприводами поточной линии не исключают общих требований к схемам управления. Такими требованиями являются достаточная гибкость и удобство управления, простота и надежность, защита электроприводов от аварийных состояний и от холостого хода машин, контроль исправности системы управления, упрощение процесса нахождения повреждений и т. д. В учебнике [1] указано 17 общих требований и рекомендаций по управлению электроприводами рабочих машин и механизмов поточной линии. В конкретных случаях они учитываются в полном или сокращенном объеме.

Учебное издание

**Прищепов** Михаил Александрович,  
**Прищепова** Елена Михайловна,  
**Крупеня** Валентина Игнатьевна

**ЭЛЕКТРОПРИВОД,  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *В. А. Дайнеко*  
Редактор *Д. А. Значёнок*  
Корректор *Д. А. Значёнок*  
Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 25.04.2019. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 7,81. Тираж 100 экз. Заказ 187.

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, 99–2, 220023, Минск.