

Шарбашенкин Л.В. П.М.81-2

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ  
(для студентов всех специальностей)  
Часть II

Утверждено  
на заседании кафедры  
электротехники и  
электрооборудования.  
Протокол № 16 от 19.02.2002

Краматорск 2002

УДК 378.621.3.002.5:621.86

Методические указания к лабораторным работам по теории электропривода и электрооборудованию. Часть II (для студентов всех специальностей) \ Сост. А.И.Панкратов.– Краматорск: ДГМА, 2002.-152 с.

Содержатся основные положения теории электропривода, приводятся методические указания по выполнению лабораторных работ, принципиальные электрические схемы установок для исследования различных систем электроприводов постоянного и переменного тока.

Составитель	Анатолий Иванович Панкратов, доц.
Ответственный за выпуск	Анатолий Иванович Панкратов, доц.
Редактор	Дудченко Елена Александровна
Компьютерный набор	Анатолий Иванович Панкратов

Подл. в печ. 14.11.02 г. Формат 60x90 1/16  
 Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,5 Уч.-изд. л. 9,0  
 Тираж 100 экз. 3. № 296

ДГМА. 84313, Краматорск, ул. Шкадинова, 72.

Общие сведения.....	4
1 Лабораторная работа 9. Исследование электромеханических характеристик электропривода постоянного тока независимого возбуждения....	17
2 Лабораторная работа 10. Исследование электромеханических характеристик электропривода постоянного тока последовательного возбуждения.....	33
3 Лабораторная работа 11. Исследование механических характеристик асинхронного электропривода с фазным ротором.....	43
4 Лабораторная работа 12. Исследование электропривода системы "генератор - двигатель постоянного тока" (Г-Д).....	56
5 Лабораторная работа 13. Исследование электропривода системы "тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока" (ТП - Д)....	68
6 Лабораторная работа 14. Изучение микропроцессорного комплекта "Электроника К1-20" (МС 27-02).....	82
7 Лабораторная работа 15. Исследование электропривода системы ТП - Д с микропроцессорным управлением.....	117
8 Лабораторная работа 16. Исследование электропривода системы "тиристорный преобразователь частоты – асинхронный двигатель" (ТПЧ - Д).....	131
9 Лабораторная работа 17. Исследование электромеханических переходных процессов в электроприводе.....	141
Литература.....	152

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### Организация лабораторного практикума, его цели и задачи

Лабораторные работы являются важнейшей частью учебного процесса, в ходе которого студенты закрепляют теоретические знания на практике. Поэтому на лабораторных занятиях студенты должны:

- подробно ознакомиться с конструкциями, принципом работы и монтажом электрических аппаратов управления, их обозначениями в схемах;
- овладеть техникой чтения схем электрических устройств, ознакомиться с типовыми схемами электрооборудования производственных механизмов;
- овладеть техникой и методами проведения экспериментальных исследований электроприводов разных типов;
- изучить схемы пуска и торможения электродвигателей, способы регулирования скорости;
- получить практические навыки в управлении электроприводами.

Каждое лабораторное занятие рассчитано на 2 часа работы в лаборатории и 0,5 ...1,5 часа самостоятельной подготовки, которая включает следующее:

- ознакомление с содержанием работы;
- изучение теоретического материала по рекомендуемой литературе и методическим указаниям к соответствующей лабораторной работе;
- изучение работы схемы лабораторной установки.

Приступая к лабораторным занятиям, студент обязан ясно представлять себе цель работы, иметь подготовленную схему лабораторной уста-

новки, таблицы и бланки протоколов исследований, изучить основные теоретические сведения об объекте исследований.

Не подготовленный к занятиям студент не допускается к выполнению лабораторных работ.

### Самостоятельная подготовка к лабораторной работе

Для того, чтобы студент мог осознанно выполнить лабораторные работы и получить максимальную пользу от их проведения, необходима предварительная подготовка. В процессе самостоятельной подготовки студент должен внимательно ознакомиться с методическими указаниями к соответствующей работе. Теоретические вопросы, относящиеся к работе, изучаются по конспекту лекций, учебникам и пособиям, приведенным в списке литературы.

Перед выполнением лабораторной работы студент подготавливает бланк отчета на листах формата А4, включающий титульный лист, указание цели работы, принципиальные электрические схемы исследуемых электроприводов, таблицы, в которые будут заноситься экспериментальные данные.

### Подготовка к лабораторной работе на рабочем месте

К выполнению лабораторных работ студенты допускаются после представления преподавателю подготовленных бланков отчетов и по результатам опроса по темам работ.

Лабораторные работы выполняются бригадой из 2-4 человек по учебному графику. Перед началом лабораторной работы студенты внимательно изучают оборудование испытательного стенда, знакомятся на

рабочем месте с приборами, аппаратами, электродвигателями и записывают их технические данные по форме, приведенной в табл. 1.

Таблица 1 – Технические данные оборудования

Обозначение	Наименование	Тип	Технические данные	Количество	Примечание

### Описание унифицированного лабораторного стенда

Лабораторные работы 9...17 выполняются на унифицированных стендах.

Лабораторный стенд позволяет исследовать 9 типов электроприводов:

- асинхронный привод на базе асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором;
- асинхронный привод на базе АД с фазным ротором;
- привод постоянного тока независимого возбуждения;
- привод постоянного тока последовательного возбуждения;
- привод постоянного тока смешанного возбуждения;
- привод системы "генератор-двигатель" (Г-Д);
- автоматизированный электропривод системы "тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока" (ТП - Д) типа ЭТ- 6;
- автоматизированный электропривод системы ТП-Д с микропроцессорным управлением;
- автоматизированный электропривод системы "тиристорный преобразователь частоты – асинхронный двигатель" (ТПЧ - Д).

Стенд имеет две внешние передние панели (рис.1).



Рисунок 1 – Внешний вид лабораторного стенда

На нижней панели расположены ручки и кнопки коммутационных аппаратов, на верхней панели располагается мнемосхема с разъемными



контактами, кнопками вызова информации и цифровой мультиметр PVA.

С задней стороны стенда на фундаментной плите закреплены 4 электрические машины M1, M2, M3, M4, причем вал асинхронного двигателя M1 с фазным ротором связан с помощью муфты с валом двигателя M2 постоянного тока независимого возбуждения, а вал асинхронного двигателя M4 с короткозамкнутым ротором механически связан с валом машины M3 постоянного тока, которая может иметь различные системы возбуждения.

В верхней части стенда расположен тиристорный преобразователь UV2. Стенд получает питание от сети переменного тока с частотой 50 Гц напряжением 380, 220 В и от сети тока нулевой частоты и с напряжением 250 В.

Включение стенда осуществляется автоматическим выключателем QF.

Подключение обмоток двигателей к цепям питания осуществляется автоматическими выключателями QF1...QF7 и контакторами KM1...KM4, кнопки управления которых расположены на нижней панели стенда.

Включение автоматических выключателей осуществляется переводом их рукояток в положение "1", выключение - в положение "0". При включенном состоянии выключателя загорается сигнальная лампа в соответствующей точке мнемосхемы на верхней панели.

При сборке схем электроприводов следует иметь в виду, что *все элементы мнемосхемы имеют электрические соединения!*

Мнемосхема стенда приведена на рис.2.

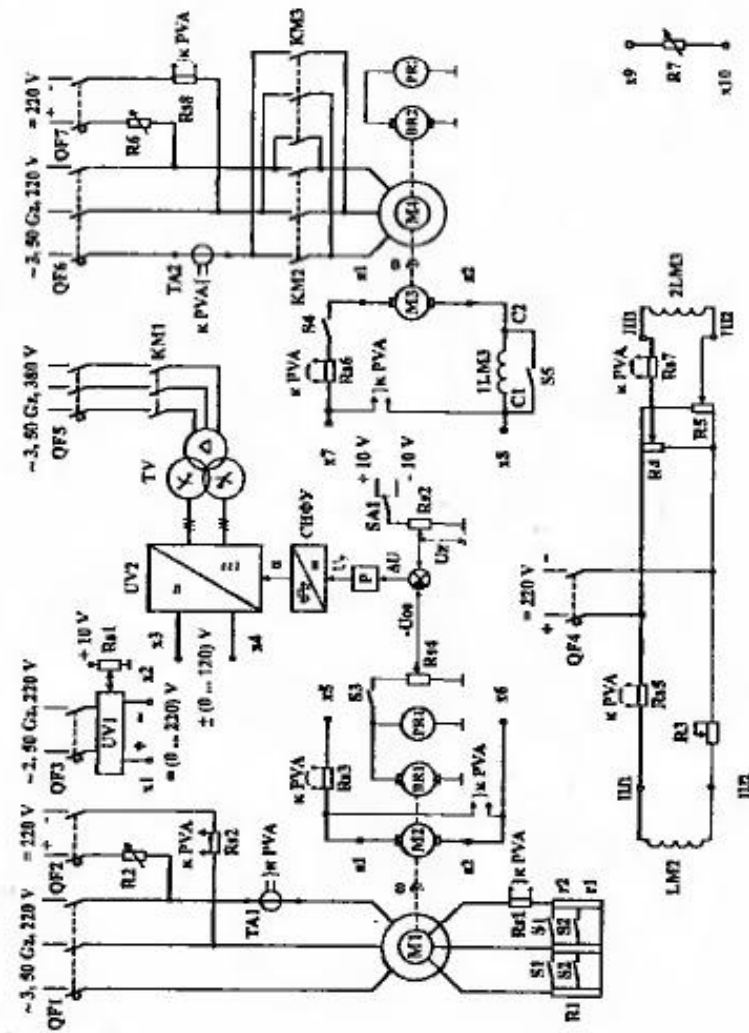


Рисунок 2 – Мнемосхема лабораторного стенда

### Информационно - измерительная система унифицированного лабораторного стенда

При исследованиях электроприводов необходимо измерять их электрические и механические параметры: электрические напряжения, токи, вращающие моменты, моменты сопротивлений, частоты вращения валов двигателей.

Студенты механических специальностей используют только три прибора, установленных на стенде: амперметр PA1, вольтметр PV1, цифровой измеритель частоты вращения PR1.

Студентам электромеханических специальностей рекомендуется использовать информационно-измерительную систему, описываемую ниже.

Частоты вращения измеряются с помощью цифровых тахометров типа ТЭ-Д, каждый из которых состоит из первичного преобразователя и показывающего цифрового прибора. Первичный преобразователь состоит из вращающегося диска с 60 радиальными прорезями, напрессованного на вал, связанный муфтой с валом электродвигателя. Внутри корпуса датчика с одной стороны диска закреплен светодиод, а с другой - фотодиод. При вращении вала двигателя через прорези диска от светодиода на фотодиод попадают импульсы света, которые преобразуются электронной схемой в следующие друг за другом электрические импульсы. Показывающий прибор считывает импульсы, поступающие от первичного преобразователя по проводам в течение 1 с. Далее электронная интегральная микросхема преобразует количество импульсов в секунду в число оборотов в минуту и передает эту информацию с периодом 1 с на цифровой индикатор, расположенный на верхней панели. Тахометр PR1 измеряет частоту вращения валов машин M1 и M2, а тахометр PR2 - частоту вращения валов машин M3 и M4. Масштабный коэффициент тахометров равен 0,5.

Для измерения токов и напряжений в цепях всех 9 электроприводов необходимо не менее 12 амперметров и вольтметров, с различными пределами измерений, что усложняло бы монтаж и эксплуатацию стенда, привело бы к увеличению его габаритов и стоимости, поэтому в стенде использована простейшая цифровая информационно-измерительная система (ИИС), состоящая из одного цифрового мультиметра PVA типа Ц 4316, измерительных шунтов  $R_{шт1} \dots R_{шт2}$ , кнопок S1...S12 вызова измерительной информации, измерительных шин тока ША и напряжения ШВ, общей шины ШО, соединительных проводов.

На рис.3 приведен фрагмент принципиальной электрической схемы ИИС стенда, иллюстрирующей измерение токов и напряжений соответственно в четырех точках схемы.

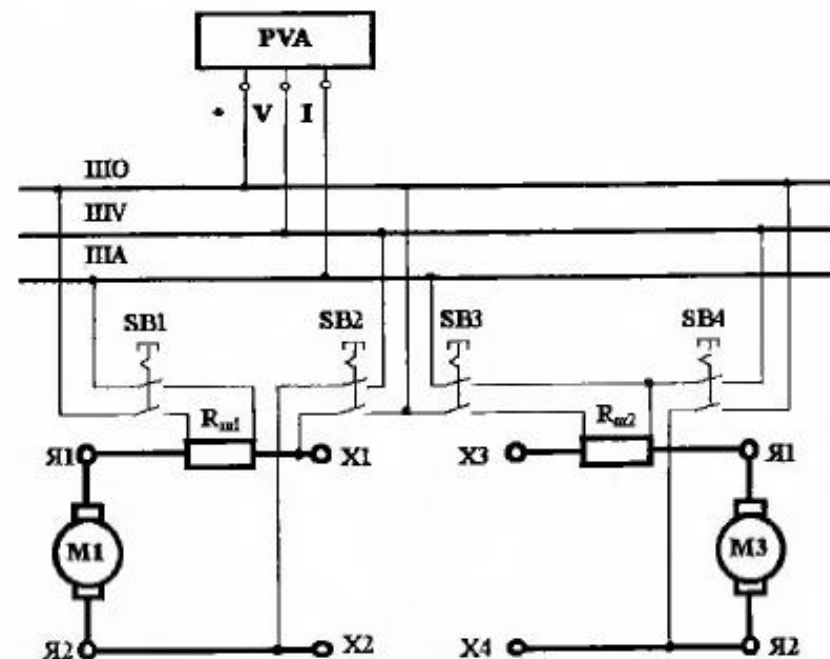


Рисунок 3 – Фрагмент принципиальной электрической схемы ИИС лабораторного стенда

ИИС позволяет последовательно измерить ток и напряжение в любой точке схемы стенда. Для этого достаточно выбрать вид измеряемого параметра (ток или напряжение) путем нажатия соответствующей кнопки на приборе PVA ("V" или "0.2 A" соответственно). После этого необходимо нажать на соответствующую кнопку вызова информации, расположенную в интересующей точке мнемосхемы.

Например, если необходимо измерить ток якоря машины M1, нужно вначале нажать на кнопку "0.2 A" прибора PVA, затем - на кнопку SB1 (см. рис. 2).

На цифровом индикаторе высветится цифра. При этом вход прибора PVA "A" - "I" через шины ШО и ША подключится к шунту  $R_{ш1}$ .

Для получения информации в амперах необходимо результат умножить на 0,01, т.е. сдвинуть запятую на 2 разряда влево.

Если необходимо измерить, например, напряжение на зажимах якорной обмотки машины постоянного тока M3, достаточно нажать кнопку "V" на приборе PRV, а после этого - на кнопку SB4. При этом вход прибора "A" - "V" через шины ШО и ШIV подключится параллельно обмотке якоря M3. Масштаб измерения напряжения равен единице.

#### **Примечания:**

**1** Во избежание перегорания измерительных цепей дорогостоящего прибора запрещается:

- одновременное включение кнопок "V" или "0.2 A" прибора и кнопок вызова информации на мнемосхеме;
- одновременное включение двух и более кнопок вызова измерительной информации на мнемосхеме.

**2** Все измерения необходимо производить последовательно во времени, т.к. измерительных точек много, а прибор - один!

## **Выполнение лабораторных работ**

Выполнение лабораторных работ начинается со сборки электрической схемы. Схему электропривода собирают при отключенном автоматическом выключателе стенда.

Установка должна включаться, как правило, самими студентами, но обязательно с разрешения преподавателя - руководителя работ. При выполнении каждой операции по включению, изменению режима работы и т.д. необходимо отчетливо представлять, что при этом получится. После выполнения очередной операции обязательно должен быть оценен ее результат и сделаны выводы о возможности перехода к следующей операции.

При проведении экспериментов количество отсчетов показаний измерительных приборов зависит от вида получаемых в результате опыта функциональных зависимостей.

Для зависимостей, близких к линейным, можно ограничиться 2-3 одновременными отсчетами показаний соответствующих приборов.

В других случаях количество отсчетов показаний приборов должно быть увеличено. Так, например, при экспериментальном определении параметров нелинейной механической характеристики асинхронного двигателя необходимое количество одновременных отсчетов частоты вращения вала двигателя и его вращающего момента возрастает до 10...12.

Результаты экспериментальных исследований заносятся в бланки протоколов, которые после проверки подписываются преподавателем.

### **Оформление отчета и обработка результатов исследования**

Графики исследуемых зависимостей следует вычерчивать в одной системе координат размером не менее 100 x 100 мм. При построении

графиков по оси абсцисс в выбранном масштабе откладывают значения независимых переменных (аргументов), а по оси ординат – значения функций.

Графики нескольких функций одной и той же независимой переменной следует чертить в общей системе координат.

При построении графиков необходимо учитывать, что результаты измерений имеют систематические (субъективные) и случайные погрешности.

Истинные значения измеряемых величин неизвестны. Поэтому вместо них принимают некоторые вероятностные значения, признаваемые как наиболее близкие к истинным значениям. Эти вероятностные значения определяют по нескольким измеренным данным, например, «методом средних квадратов».

Графики функциональных зависимостей могут быть построены по экспериментально полученным данным в среде MathCAD или MatLab методами линейной или нелинейной интерполяции.

Субъективные ошибки измерений (грубые промахи) устраняются после сравнения экспериментально полученных графиков функциональных зависимостей с соответствующими графиками теоретических зависимостей.

Все рассчитанные величины приводятся в Международной системе единиц измерений (СИ).

В конце отчета следует делать выводы по каждому пункту выполненной лабораторной работы.

Во время защиты отчетов студенты должны объяснить полученные результаты работы, ответить на контрольные вопросы, приведенные в конце методических указаний к каждой лабораторной работе.

## Основные правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

Основные правила техники безопасности распространяются на все виды работ, выполняемых студентами в лабораториях кафедры.

В лаборатории электропривода применяются напряжения переменного трехфазного тока 380 и 220 В и напряжение постоянного тока 250 В. При неумелом и неосторожном обращении такое напряжение может оказаться опасным для человека, поэтому проводить работы необходимо при строгом соблюдении следующих правил техники безопасности.

- Запрещается производить какие-либо переключения или выключения аппаратов на главном распределительном щите.
- Схемы включают под напряжение только после проверки правильности их сборки преподавателем и только после его разрешения, с предварительным предупреждением всех студентов, работающих на данном рабочем месте.
- При сборке схемы необходимо обращать особое внимание на положения ключей управления автоматических выключателей, реостатов и других аппаратов.
- В случае прекращения опыта или перерыва в работе схему лабораторной установки следует обязательно отключить от сети.
- Запрещается производить лабораторные работы, сидя у стенда.
- Запрещаются изменения соединений в рабочей схеме под напряжением.
- Вносить изменения в рабочую схему разрешается лишь после отключения схемы от сети.
- После изменения рабочей схемы лабораторную установку можно включать только с разрешения преподавателя.

- Запрещается касаться токоведущих частей электроустановок, находящихся под напряжением, трогать движущиеся и вращающиеся звенья машины и аппаратов.

- Рабочее место не должно загромождаться посторонними предметами, а проходы – стульями.

- Запрещается проникать за ограждения лабораторных установок, вскрывать корпуса электрических аппаратов, щитов управления.

- Запрещается производить лабораторные работы в верхней одежде.

- Сборку схем следует выполнять так, чтобы контактные соединения были надежными.

- Запрещается пользоваться проводниками с поврежденной изоляцией.

- Запрещается оставлять рабочее место при включенной установке.

- Запрещается производить разборку рабочей схемы под напряжением. После отключения схемы убедитесь, что ЭДС выбега электродвигателей снизились до нуля!

Во всех случаях обнаружения неисправного состояния оборудования, измерительных приборов и аппаратов необходимо немедленно отключить неисправную установку и поставить в известность преподавателя.

В случае поражения электрическим током следует немедленно отключить лабораторную установку и оказать первую медицинскую помощь в зависимости от тяжести электротравмы, вызвать скорую медицинскую помощь.

Виновные в нарушении правил безопасности и умышленном повреждении приборов и установок несут административную ответственность.

## 1 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

*Цель работы:* исследовать электро-механические свойства электро-привода постоянного тока независимого возбуждения в двигательном режиме и в режимах электро-механического торможения.

#### 1.1 Общие указания

Электроприводы постоянного тока с независимым (параллельным) возбуждением, которые позволяют регулировать скорость в широком диапазоне и отличаются жесткостью механических характеристик, применяются в качестве приводов рабочих органов прокатных станов, мощных кранов, токарных и фрезерных станков, подъемных установок, экскаваторов и т.п.

Электро-механические характеристики  $n = f(I_a)$  этих электро-приводов описываются линейным уравнением первого порядка

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - I_a \frac{(r_a + r_d)}{C_e \Phi}, \quad (1)$$

где  $n$  - частота вращения якоря, об/мин;

$U$  - напряжение питающей сети, В;

$C_e$  - коэффициент, зависящий от конструкции двигателя (числа пар полюсов  $p$ , числа активных проводников обмотки якоря  $N$ , числа параллельных ветвей обмотки якоря  $a$ ),  $C_e = pN / 60a$ ;

$\Phi$  - основной магнитный поток двигателя, создаваемый обмоткой возбуждения, Вб;



$I_a$  - ток в обмотке якоря, А;

$r_a$  - сопротивление обмотки якоря, Ом;

$r_d$  - добавочное сопротивление, включаемое последовательно с обмоткой якоря, Ом.

При работе двигателя в режиме идеального холостого хода (при отсутствии механической нагрузки и момента трения) его якорь будет вращаться с частотой идеального холостого хода, определяемой первым членом уравнения (1)

$$n_0 = \frac{U}{C_E \Phi} \quad (2)$$

При увеличении механического момента сопротивления  $M_c$  на валу двигателя частота вращения якоря уменьшается, что связано с увеличением потерь напряжения и мощности на сопротивлениях  $r_a$  и  $r_d$ .

Падение частоты вращения  $\Delta n$  при определенной нагрузке и соответствующем токе якоря определяется вторым членом уравнения (1)

$$\Delta n = \frac{I_a (r_a + r_d)}{C_E \Phi} \quad (3)$$

Изменение частоты вращения при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке определяется статизмом характеристики

$$\delta n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} \quad (4)$$

где  $n_n$  - номинальная частота вращения якоря, об/мин.

Статизмом оценивают стабильность скорости привода при колебаниях нагрузки.

Если на валу электродвигателя изменять механическую нагрузку от нулевой до максимальной при номинальных параметрах двигателя (номинальном напряжении, номинальном магнитном потоке возбуждения, а также при нулевом добавочном сопротивлении) и одновременно фикси-

ровать частоту вращения и ток якоря  $I_a$ , то получим функциональную зависимость  $n = f(I_a)$ , называемую *естественной* электромеханической характеристикой двигателя.

Функциональные зависимости  $n = f(I_a)$ , полученные при отклонении любого из параметров (напряжения  $U$  или магнитного потока  $\Phi$ ) от номинальных уровней или при  $r_d > 0$ , называются *искусственными* электромеханическими характеристиками.

Вращающий момент  $M$  двигателя постоянного тока независимого возбуждения пропорционален току якоря

$$M = k\Phi I_a \quad (5)$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от конструкции двигателя,  $k = pN / 2\pi a$ .

Подставив уравнение (5) в формулу (1), получим уравнение механической характеристики  $\omega = f(M)$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{(r_a + r_d)}{(k\Phi)^2} \quad (6)$$

где  $\omega$  - угловая частота вращения вала двигателя, рад/с,

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (7)$$

Скорость идеального холостого хода можно определить по формуле

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi} \quad (8)$$

или, с учетом формулы (7),

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} \quad (9)$$

Статизм механической характеристики

$$\delta\omega = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} \quad (10)$$

Общий вид графиков естественных и искусственных механических характеристик в двигательном режиме при работе привода «Вперед» и «Назад» приведен на рис.4.

Мощность  $P_1$ , которую двигатель потребляет из сети, определяется по формуле

$$P_1 = I_a U. \quad (11)$$

Мощность  $P_2$ , передаваемая на вал электропривода,

$$P_2 = M\omega = P_1 \eta, \quad (12)$$

где  $\eta$  - КПД двигателя.

Вращающий момент  $M$  на валу двигателя, уравновешенный в статическом режиме моментом сопротивления ( $M = M_c$ ), определяется по формуле (5) и зависит от механической мощности на валу привода:

$$M = \frac{P_2}{\omega}. \quad (13)$$

При номинальном магнитном потоке  $\Phi$  величина  $k\Phi$  может определяться по паспортным данным – номинальному моменту и скорости – по формуле

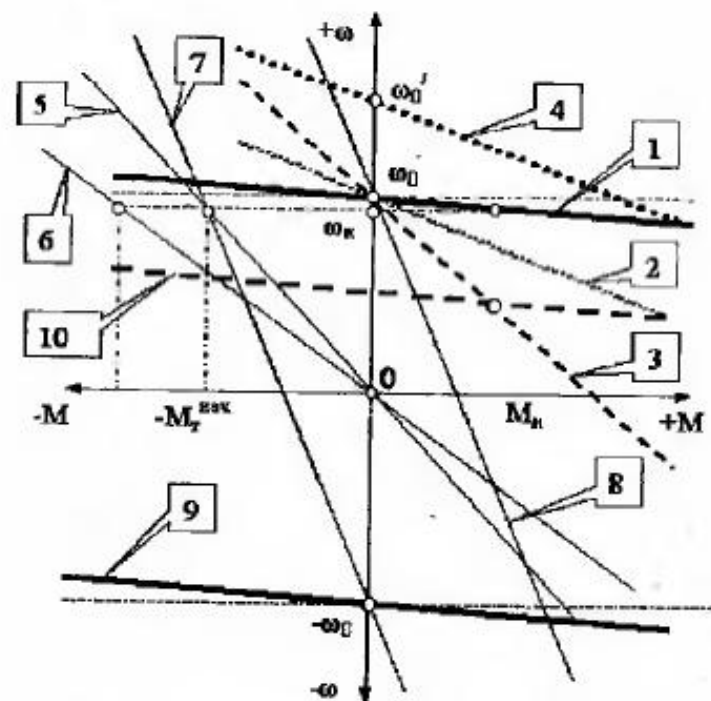
$$k\Phi = \frac{M_n}{I_a}, \quad (14)$$

где  $P_n$ ,  $\omega_n$  – номинальные мощность и скорость двигателя соответственно.

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}. \quad (15)$$

Для произвольных значений  $\Phi$  величину  $k\Phi$  необходимо определять экспериментально по фиксированным значениям противоЭДС  $E$  и скорости  $\omega$  двигателя в генераторном режиме на холостом ходу по формуле

$$k\Phi = \frac{E}{\omega}. \quad (16)$$



- 1 – естественная х-ка ( $U = U_n$ ,  $r_d = 0$ ,  $\Phi = \Phi_n$ );
- 2 – искусственная х-ка ( $U = U_n$ ,  $r_{d1} > 0$ ,  $\Phi = \Phi_n$ );
- 3 – искусственная х-ка ( $U = U_n$ ,  $r_{d2} > r_{d1}$ ,  $\Phi = \Phi_n$ );
- 4 – искусственная х-ка ( $U = U_n$ ,  $r_d = 0$ ,  $\Phi < \Phi_n$ );
- 5 – х-ка в режиме динамического торможения ( $r_{d1}$ );
- 6 – х-ка в режиме динамического торможения ( $r_{d2} > r_{d1}$ );
- 7,8 – характеристики в режиме торможения противовключением;
- 9 – естественная реверсивная характеристика;
- 10 – искусственная х-ка ( $U = 0.5U_n$ ,  $r_d = 0$ ,  $\Phi = \Phi_n$ ).

Рисунок 4 – Механические характеристики ДПТ независимого (параллельного) возбуждения



*Изменение направления вращения (реверс)* вала ДПТ производят изменением направления тока в обмотке якоря или в обмотке возбуждения.

Для принудительной остановки якоря двигателя постоянного тока используются три способа электромеханического торможения: рекуперативное, динамическое и торможение противовключением.

*Рекуперативное торможение с отдачей* электрической энергии в питающую сеть осуществляется при условии  $\omega > \omega_0$ .

*Торможение противовключением* можно осуществить быстрым изменением полярности напряжения обмотки якоря или обмотки возбуждения.

Для ограничения броска тока якоря  $I_a = I_{\text{пр}} = (-U - E) / r_a \approx 20 I_n$  в этом режиме в цепь обмотки якоря вводят сопротивление ступени противовключения  $R_{\text{пр}}$ .

Уравнение механической характеристики в этом режиме имеет вид

$$\omega = \frac{-U}{k\Phi} + M \frac{R_{\text{пр}}}{(k\Phi)^2} \quad (17)$$

*Динамическое торможение* осуществляют отключением якорной обмотки от питающей сети и замыканием ее на сопротивление динамического торможения, при этом обмотку возбуждения оставляют подключенной к сети.

Уравнение механической характеристики в этом режиме имеет вид

$$\omega = -M \frac{R_{\text{дт}}}{(k\Phi)^2}, \quad (18)$$

где  $R_{\text{дт}}$  - сопротивление цепи динамического торможения, Ом.

Общий вид графиков механических характеристик привода постоянного тока независимого возбуждения в тормозных режимах приведен на рис.4.

Из уравнения (1) электромеханической характеристики двигателя

видно, что частоту вращения его вала можно регулировать тремя способами:

- изменением напряжения  $U$ ;
- изменением магнитного потока  $\Phi$ ;
- изменением добавочного сопротивления  $r_a$  в цепи якоря.

Диапазон регулирования скорости в каждом способе определяется по формуле

$$D = \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\text{min}}}, \quad (19)$$

где  $\omega_{\text{max}}$ ,  $\omega_{\text{min}}$  - максимальная и минимальная скорости соответственно.

#### *Схема установки для исследования электропривода*

Для исследования электропривода постоянного тока независимого возбуждения М2 на мнемосхеме собирается электрическая схема (рис.5).

Схема электропривода содержит следующие электрические аппараты и приборы:

- исследуемый электродвигатель постоянного тока М2;
- автоматический выключатель QF3 подачи питания постоянного тока в обмотку якоря испытуемого двигателя М2;
- выключатель QF4 подачи тока в обмотку возбуждения LM2;
- дополнительное сопротивление R7, включаемое последовательно в цепь обмотки якоря М2 и предназначенное для ограничения пускового тока двигателя и регулирования его скорости;
- асинхронный двигатель М1, предназначенный для создания регулируемой механической нагрузки на валу испытуемого двигателя М2;
- амперметр РА1 - для измерения тока якоря двигателя М2;
- вольтметр РV1 - для измерения напряжения на обмотке якоря двигателя М2;

- тахогенератор BR1 и тахоуказатель PR1 – для измерения частоты вращения валов двигателей M1 и M2.

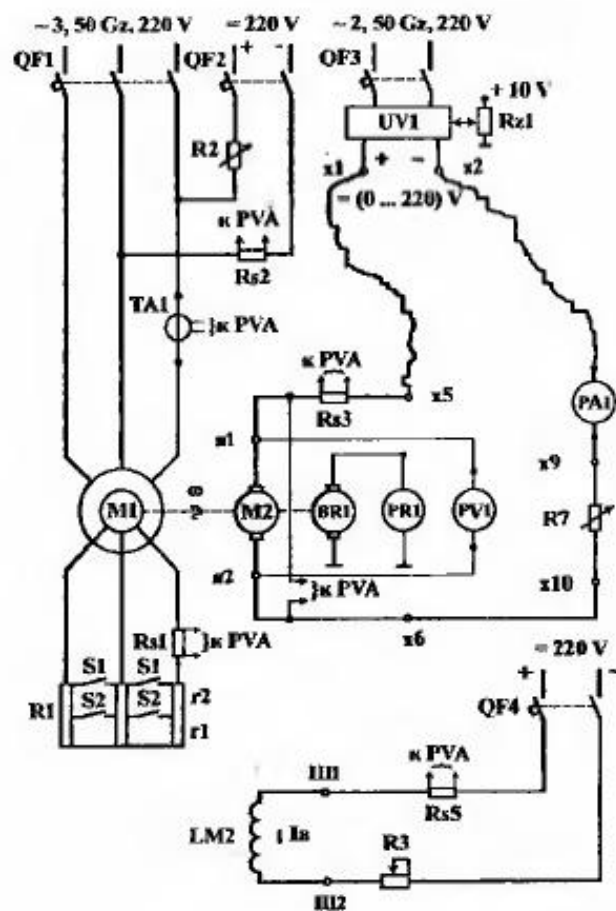


Рисунок 5 - Схема установки для исследования электропривода постоянного тока независимого возбуждения

Механическая нагрузка на валу испытуемого двигателя постоянного тока M2 создается асинхронным двигателем M1 в режиме динамического торможения.

Ток в цепи обмотки возбуждения LM2 испытуемого двигателя M2 регулируется сопротивлением R3 (см. рис.5).

Напряжение обмотки якоря регулируется симисторным регулятором напряжения UV1, воздействием на задатчик напряжения Rz1 (см. рис.5).

## 1.2 Порядок выполнения работы

1.2.1 Ознакомиться с силовым электрооборудованием и записать его технические данные. Уяснить назначение каждого элемента принципиальной схемы. Собрать схему испытания электропривода в двигательном режиме (рис. 5).

При сборке схем электроприводов следует помнить, что все элементы мнемосхемы электрически соединены.

1.2.2 Запустить электропривод для исследования его в двигательном режиме.

### Порядок запуска электропривода

- 1 В первую очередь автоматическим выключателем QF4 включается цепь обмотки возбуждения LM2, т.к. при обрыве цепи возбуждения двигатель входит в состояние "разноса" – скорость и ток якоря недопустимо возрастают (см. формулу (1) для  $\Phi = 0$ ).
- 2 Движком реостата R3 устанавливается номинальный ток возбуждения ( $R3 = 0$ ).
- 3 Для ограничения начального пускового тока движком сопротивления R7 устанавливается посередине шкалы.

- 4 Задатчик напряжения Rz1 преобразователя UV1 устанавливается в нулевое положение.
- 5 Включается автоматический выключатель QF3, подающий питание на симисторный преобразователь UV1.
- 6 Задатчиком напряжения Rz1 по показаниям вольтметра PV1 устанавливается номинальное напряжение.

*1.2.3 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при номинальных параметрах двигателя ( $U = U_n$ ,  $\Phi = \Phi_n$ ) и  $r_d = 0$ .*

Для исследования параметров естественной электромеханической характеристики  $n = f(I_a)$  привода движок сопротивления R7 устанавливается в нулевое положение, после этого задатчиком напряжения Rz1 по вольтметру PV1 устанавливается номинальное напряжение привода, а движком реостата R4 устанавливается номинальный ток возбуждения.

**Механическая нагрузка на валу испытуемого двигателя постоянного тока M2 создается асинхронным двигателем M1 в режиме динамического торможения.**

Для введения асинхронного двигателя M1 в режим динамического торможения необходимо его статорную обмотку подключить выключателем QF2 к цепи постоянного тока.

**Тормозной момент**, создаваемый двигателем M1 на валу испытуемого двигателя M2, можно регулировать в интервале от момента холостого хода  $M_0$  до номинального момента  $M_n$  изменением сопротивления R2 в цепи динамического торможения. Учитывая линейность графиков механических характеристик ДПТ (см. формулу (6) и графики на рис. 4), достаточно исследовать каждую характеристику по двум точкам, т.е. двум нагрузкам: при токе якоря, равном току холостого хода  $I_{a1} = I_0$ , и  $I_{a2} = (0.5 - 1.5)I_n$ .

Экспериментально полученные данные заносятся в табл. 2.

*1.2.4 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при  $r_d = 0.3r_{d \max}$ .*

$$U = U_n, \Phi = \Phi_n.$$

Для исследования реостатной электромеханической характеристики  $n = f(I_a)$  привода движок добавочного сопротивления R7 устанавливается примерно на трети шкалы от нуля. Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл.2.

*1.2.5 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки при  $r_d = 0$ ,  $U = U_n$ ,  $\Phi = 0.5\Phi_n$ .*

Для исследования электромеханической характеристики  $n = f(I_a)$  привода с ослабленным полем движком реостата R3 устанавливается минимальный ток возбуждения, равный половине номинального. При этом величина сопротивления R3 максимальна. Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл.2.

*1.2.6 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при  $r_d = 0$ .*

$$U = 0.5U_n, \Phi = \Phi_n.$$

Для исследования механической характеристики  $n = f(I_a)$  привода с уменьшенным напряжением задатчиком напряжения Rz1 преобразователя UV1 по показаниям вольтметра PV1 устанавливается напряжение, равное половине номинального. Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл.2.

*1.2.7 Исследовать экспериментально регулировочные характеристики  $n(R_d)$ ,  $n(I_a)$ ,  $n(U)$  электропривода*

Вначале устанавливаются номинальные параметры электропривода в соответствии с его естественной механической характеристикой.

Регулировочные характеристики исследуют в режиме холостого хода привода, чтобы выявить влияние каждого отдельного параметра – сопротивления, магнитного потока и напряжения на скорость.

Таблица 2 – Данные результатов исследования электропривода постоянного тока

Ном. опыта	Измеренные величины				Расчетные величины					Примечания
	$I_a$ , А	$I_n$ , А	U, В	n, об/мин	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\omega$ , рад/с	M, Н·м	$\delta\omega$ , %	
1	0	0	220	1066	0	0	171,5	0		Естественная характерист.
2	0	0	110	890	190	151	153	170		
3	0	0	189	915	0	0	95	0		Реостатная характерист.
4	0	0	110	87	80	69	9,100	24		
5	0	0	220	1026	0	0	144	0		Характерист.
6	0	0	110	1026	184	159	107	145		$c \Phi = 0.5\Phi_n$
7	0	0	110	584	0	0	55	0		Характерист.
8	0	0	110	440	0	0	342	46	17	$c U = 0.5U_n$
9	-0,5	-0,5	90,5	400	400	342	30			Динамическ.
10	-1	-1,00	95,6	100	100	100	1,59			торм., $R_{дт1}$
11										Динам. торм.,
12										$R_{дт2} > R_{дт1}$

Это означает, что при исследовании, например, зависимости  $n(R_d)$  изменяют сопротивление  $R_d$ , а ток возбуждения и напряжение поддерживают равными номинальным значениям ( $I_a = I_{a, ном} = const$ ,  $U = U_{ном} = const$ ).

Количество опытов при исследовании каждой характеристики принимают равным четырем, при этом регулируемые величины изменяют с равными интервалами, от 0 до соответствующих максимальных значений.

Экспериментальные данные 12 опытов заносятся в таблицы 3, 4 и 5 соответственно.

Таблица 3 – Данные экспериментальных исследований регулировочной характеристики  $n(R_d)$  электропривода

Номер опыта	$R_d$ , % от $R_{d, max}$	n, об / мин	Примечания
1			
2			
3			
4			

Таблица 4 – Данные экспериментальных исследований регулировочной характеристики  $n(I_a)$  электропривода

Номер опыта	$I_a$ , % от $I_{a, max}$	n, об / мин	Примечания
1			
2			
3			
4			

Таблица 5 – Данные экспериментальных исследований регулировочной характеристики  $n(U)$  электропривода

Номер опыта	U, В	n, об / мин	Примечания
1			
2			
3			
4			

1.2.8 Выключить стенд, выключить автоматические выключатели QF2, QF3, QF4. Собрать схему для испытания электропривода в режиме динамического торможения (рис. 6).

1.2.9 Запустить электродвигатель M1 для исследования двигателя M2 в режиме динамического торможения

В этом режиме двигатель M1 является приводом, а двигатель M2 – электромеханическим тормозом. Электрическая энергия торможения,

вырабатываемая двигателем M2 в генераторном режиме, выделяется в виде тепла на сопротивлении R7.

Двигатель M1 запускают автоматическим выключателем QF1, предварительно введя пусковое сопротивление R1 посредством ключей S1 и S2 (их отключают).

Так как момент динамического торможения линейно зависит от скорости (см. формулу (18)), зависимость  $I_d(\omega)$  двигателя M2 исследуют для двух значений скорости двигателя M1, устанавливаемых сопротивлением R1 в цепи его ротора.

Исследуют две характеристики  $I_d(\omega)$  для двух значений сопротивления динамического торможения:  $R_{dт1} = 0.1R7$  и  $R_{dт1} = 0.3R7$ . Экспериментальные данные четырех опытов заносятся в табл.2.

#### 1.2.10 Определить экспериментально коэффициент $k\Phi$ :

- 1 Отключить двигатель M1 от сети. Разобрать цепь динамического торможения, включающую сопротивление R7 и амперметр PA1.
- 2 Реостатом R3 установить номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя M2.
- 3 Запустить двигатель M1.
- 4 Зафиксировать значения ЭДС и скорость двигателя M2.
- 5 Реостатом R3 установить минимальный ток возбуждения двигателя M2.
- 6 Зафиксировать значения ЭДС и скорости двигателя M2.

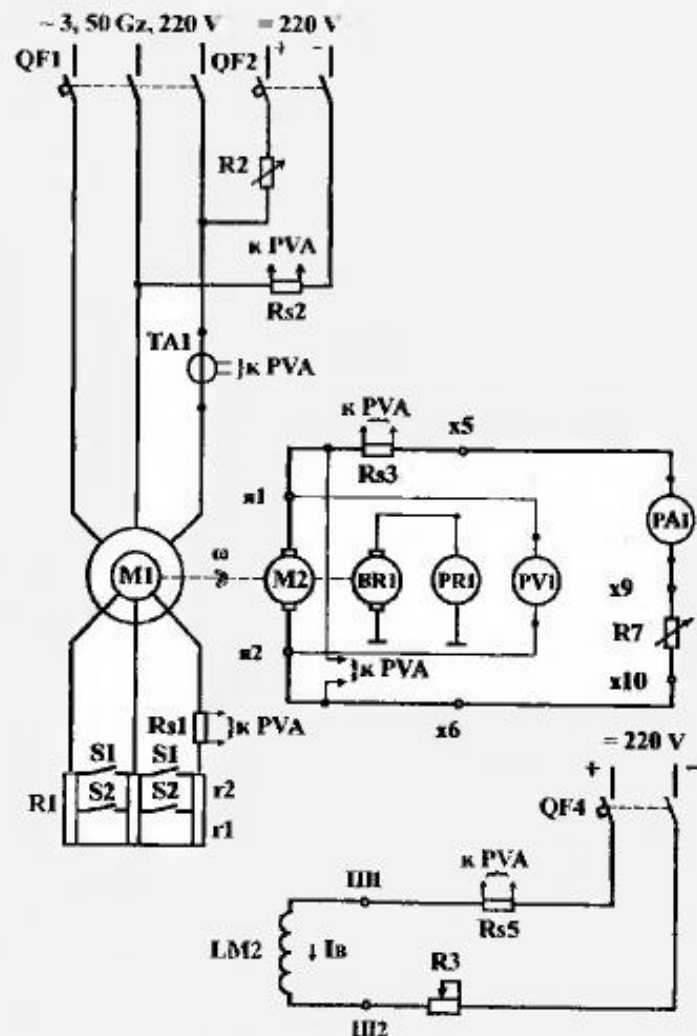


Рисунок 6 – Принципиальная электрическая схема установки для исследования электропривода постоянного тока в режиме динамического торможения



### 1.3 Обработка экспериментальных исследований

Целью исследований электропривода является экспериментальное установление функциональных зависимостей его выходных координат от внутренних и внешних возмущений.

Графики функциональных зависимостей дают наглядное представление о влиянии всех возмущений (изменения механической нагрузки, добавочного сопротивления, магнитного потока, напряжения) на выходные координаты привода – вращающий момент и скорость.

Графики механических характеристик в отчете представляют по расчетным данным табл.2, определяемым по формулам (5), (7), (11) - (16).

#### 1.4 Содержание отчета:

- принципиальные электрические схемы исследования электропривода постоянного тока в двигательном режиме и режиме динамического торможения;
- паспортные данные двигателя, аппаратов и приборов;
- таблицы с результатами исследований и расчетами;
- графики естественных и искусственных механических характеристик в двигательных и тормозных режимах по данным табл.2 в одной системе координат;
- графики регулировочных характеристик по данным табл.3,4,5;
- выводы по результатам исследований.

#### 1.5 Контрольные вопросы

1 Объясните принцип действия, назначение каждого элемента принципиальной схемы установки.

2 Какие существуют способы регулирования скорости двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения?

3 Какие существуют способы электрического торможения двигателей постоянного тока параллельного возбуждения?

4 Почему при пуске и торможении противовключением добавочное сопротивление в цепи обмотки якоря необходимо вводить полностью?

5 От чего зависит жесткость электрических характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения?

6 Что такое статизм механической характеристики?

7 Как определить диапазон регулирования скорости электропривода?

## 2 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

*Цель работы:* исследовать электромеханические свойства электропривода постоянного тока последовательного возбуждения в двигательном режиме и в режимах электромеханического торможения.

#### 2.1 Общие указания

Электропривод постоянного тока последовательного возбуждения применяется в тех машинах и механизмах, у которых необходимо создавать большие вращающие моменты (усилия) с малыми скоростями. Чаще это привод применяется в подъемно-транспортных машинах.

Особенностью электропривода постоянного тока последовательного возбуждения является то, что магнитный поток возбуждения создается

током якоря, т.к. обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря.

$$\Phi = \alpha I_a, \quad (20)$$

где  $\alpha$  - коэффициент пропорциональности.

С учетом формул (1) и (20) электромеханические характеристики  $n(I_a)$  этого двигателя описываются нелинейным уравнением первого порядка

$$n = \frac{U}{\alpha C_E I_a} - \frac{r_a + r_b + r_d}{\alpha C_E}, \quad (21)$$

где  $U$  - напряжение питающей сети, В;

$C_E$  - коэффициент, зависящий от конструкции двигателя;

$I_a$  - ток в обмотке якоря, А;

$r_a$  - сопротивление обмотки якоря, Ом;

$r_b$  - сопротивление последовательной обмотки возбуждения, Ом;

$r_d$  - добавочное сопротивление, включаемое последовательно с обмоткой якоря, Ом.

Из уравнения (21) видно, что у двигателя без нагрузки ( $I_a \approx 0$ ) частота вращения вала  $n$  стремится к бесконечности.

Поэтому запускать и эксплуатировать двигатель последовательного возбуждения без нагрузки запрещается!

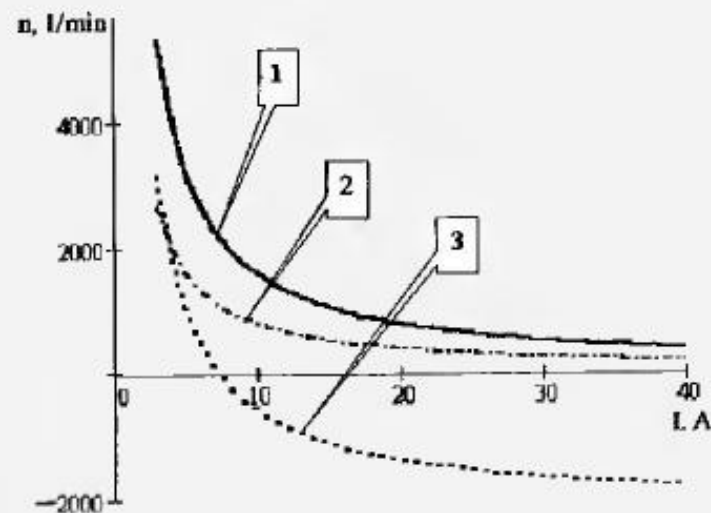
Частоту вращения якоря можно регулировать в соответствии с формулой (21) изменением напряжения  $U$  и сопротивления  $r_d$  в цепи якоря.

Для получения специальных электромеханических характеристик шунтируют (подключают параллельно) сопротивление обмотку якоря или обмотку возбуждения. Если шунтировать реостатом обмотку якоря, то частота вращения вала уменьшится, а жесткость характеристики увеличится. Если шунтировать реостатом обмотку последовательного возбуждения, то вследствие уменьшения магнитного потока возбуждения частота вращения якоря возрастет.

Для осуществления режима электрического торможения противоявлением необходимо изменить направление тока в обмотке якоря или ввести в цепь якоря такое сопротивление, при котором вращающий момент для  $n = 0$  станет меньше момента  $M_C$  нагрузки.

Динамическое торможение осуществляют отключением обмоток двигателя от сети и замыканием их на сопротивление. При этом обмотка якоря и обмотка последовательного возбуждения должны быть подключены так, чтобы ток через обмотку возбуждения протекал в ту же сторону, в которую он протекал в двигательном режиме. В противном случае двигатель будет размагничен.

Примерный вид механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведен на рис.7.



1 - естественная х.к.а., 2 - искусственная х.к.а.  $U = 0.5U_n$ ;

3 - искусственная х.к.а.  $r_d > 0$

Рисунок 7 - Графики электромеханических характеристик привода постоянного тока с реверсивным возбуждением



### Схема установки для исследования электропривода

Для исследования электропривода постоянного тока последовательного возбуждения МЗ на мнемосхеме собирается схема (рис.8).

На схеме установки приведены следующие обозначения:

- МЗ - обмотка якоря испытуемого электродвигателя постоянного тока;
- ИLMЗ - последовательная обмотка возбуждения двигателя МЗ;
- QF3 - автоматический выключатель подачи питания постоянного тока в обмотку якоря испытуемого двигателя МЗ;
- R7 - дополнительное сопротивление, включаемое последовательно в цепь обмотки якоря МЗ, предназначенное для ограничения пускового тока двигателя и регулирования его скорости;
- М4 - асинхронный двигатель, предназначенный для создания регулируемой механической нагрузки на валу испытуемого двигателя МЗ;
- КМ2, КМ3 - контакторы магнитные реверсивного магнитного пускателя, предназначенного для запуска асинхронного двигателя М4, «Вперед» и «Назад»;
- QF6 - автоматический выключатель, предназначенный для включения питания двигателя М4;
- QF7 - автоматический выключатель, предназначенный для включения цепи динамического торможения двигателя М4;
- S4 -- ключ для коммутации цепи обмотки якоря двигателя МЗ;
- S5 - ключ для коммутации цепи обмотки последовательного возбуждения ИLMЗ двигателя МЗ;
- ТА2 - трансформатор тока;
- РА1 - амперметр для измерения тока якоря двигателя МЗ;
- РV1 - вольтметр, необходимый для измерения напряжения на обмотке якоря МЗ;
- BR2 и PR2 - тахогенератор и тахоуказатель для измерения частоты вращения валов двигателей МЗ и М4.

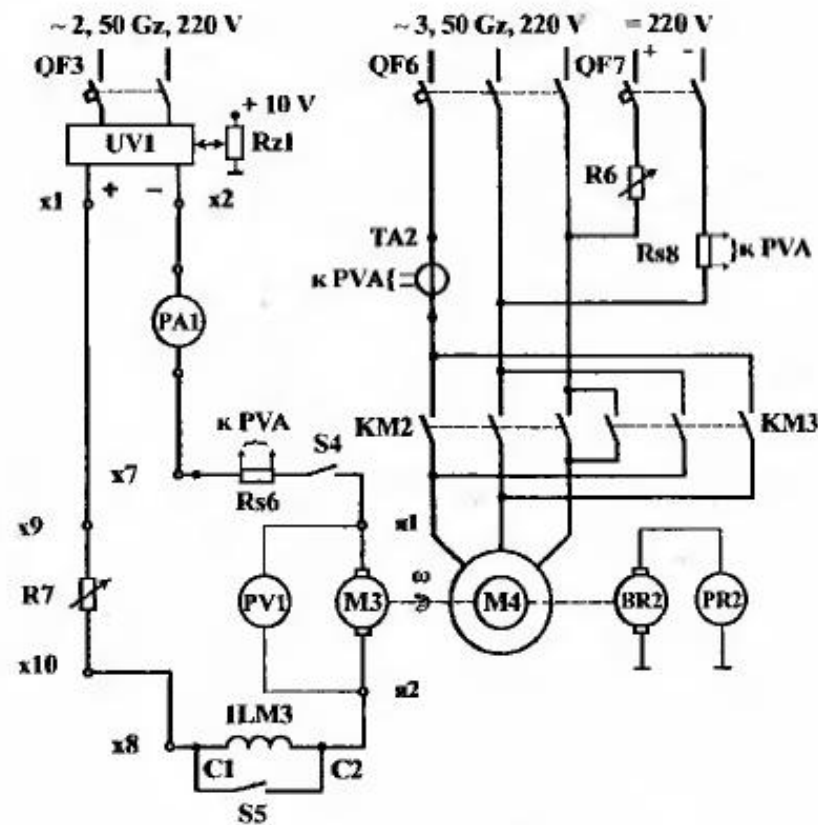


Рисунок 8 – Приведенная электрическая схема установки для исследования электропривода постоянного тока последовательного возбуждения в двигательном режиме

Механическая нагрузка на валу испытуемого двигателя постоянного тока МЗ создается асинхронным двигателем М4 в режиме динамического торможения.

Напряжение обмотки якоря двигателя МЗ регулируется симисторным регулятором напряжения UV1, воздействием на задатчик напряжения Rz1 (см. рис.8).

## 2.2 Порядок выполнения работы

2.2.1 Ознакомиться с силовым электрооборудованием и записать его технические данные. Уяснить назначение каждого элемента принципиальной схемы. Собрать схему испытания электропривода в двигательном режиме (рис. 8).

При сборке схем электроприводов следует помнить, что все элементы мнемосхемы электрически соединены.

2.2.2 Запустить электропривод для исследования его в двигательном режиме.

### Порядок запуска электропривода

- 1 В первую очередь ключом S5 включается цепь обмотки возбуждения ИМЗ (ключ S5 выключается).
- 2 Для ограничения начального пускового тока движок сопротивления R7 устанавливается посередине шкалы.
- 3 Ключом S4 замыкается цепь обмотки якоря двигателя МЗ.
- 4 Задатчик напряжения Rz1 преобразователя UV1 устанавливается в нулевое положение.
- 5 Включается автоматический выключатель QF3, подающий питание на симисторный преобразователь UV1.
- 6 Задатчиком напряжения Rz1 по показаниям вольтметра PV1 плавно устанавливают номинальное напряжение.

2.2.3 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при номинальных параметрах двигателя ( $U = U_n$ ,  $\Phi = \Phi_n$ ) и  $r_d = 0$ .

Для исследования параметров естественной электромеханической характеристики  $n = f(I_a)$  привода движок добавочного сопротивления R7 устанавливается в нулевое положение, после этого задатчиком напряжения Rz1 по вольтметру PV1 устанавливается номинальное напряжение привода.

Механическая нагрузка на валу исследуемого двигателя постоянного тока МЗ создается асинхронным двигателем М4 в режиме динамического торможения.

Для введения асинхронного двигателя М4 в режим динамического торможения необходимо его статорную обмотку подключить выключателем QF7 к цепи постоянного тока.

Тормозной момент, создаваемый двигателем М4 на валу испытуемого двигателя МЗ, можно регулировать в интервале от момента холостого хода  $M_0$  до номинального момента  $M_n$  изменением сопротивления R6 в цепи динамического торможения. Учитывая нелинейность графиков механических характеристик ДПТ (см. формулу (20) и графики на рис. 7), необходимо исследовать каждую зависимость (характеристику) минимум по пяти точкам, т.е. по пяти значениям нагрузкам в интервале от тока якоря, равного току холостого хода,  $I_{a1} = I_0$ , до  $I_{a2} = 1.5I_n$ .

Экспериментально полученные данные заносятся в табл. 6.

2.2.4 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при  $r_d = 0.5r_{dmax}$ ,  $U = U_n$ ,  $\Phi = \Phi_n$ .

Для исследования реостатной механической характеристики  $n = f(I_a)$  привода движок добавочного сопротивления R7 устанавливается примерно на половине шкалы. Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл. 6.

2.2.5 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при  $r_d = 0$ ,  $U = 0.5U_n$ ,  $\Phi = \Phi_n$ .

Для исследования электромеханической характеристики  $n = f(I_a)$  привода с уменьшенным напряжением задатчиком напряжения Rz1 преобразователя UV1 по показаниям вольтметра PV1 устанавливается напряжение, равное половине номинального. Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл. 6.

2.2.6 Исследовать экспериментально регулировочные характеристики  $n(R_d)$ ,  $n(U)$  электропривода

Вначале устанавливают номинальные параметры электропривода в соответствии с его естественной механической характеристикой.

Регулировочные характеристики исследуют так, чтобы выявить влияние каждого отдельного параметра – сопротивления и напряжения – на скорость. Это означает, что при исследовании, например, зависимости  $n(R_d)$  изменяют сопротивление  $R_d$ , а напряжение поддерживают равным номинальному значению:  $U = U_{ном} = const$ .

Таблица 6 – Данные исследования электропривода постоянного тока последовательного возбуждения

Ном. опыта	Измеренные величины				Расчетные величины					Примечания
	$I_a$ , А	$I_d$ , А	U, В	n, об/мин	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\omega$ , рад/с	M, Н·м	$\delta\omega$ , %	
1										Естественная характеристика
2										
3										
4										Реостатная характеристика
5										
6										
7										Характеристика с $U = 0.5U_n$
8										
9										

Количество опытов при исследовании каждой характеристики принимают равным четырем, при этом регулируемые величины изменяют с равными интервалами, от 0 до соответствующих максимальных значений.

Экспериментальные данные восьми опытов заносятся в таблицы 7 и 8 соответственно.

Таблица 7 – Данные экспериментальных исследований регулировочной характеристики  $n(R_d)$  электропривода постоянного тока последовательного возбуждения

Номер опыта	$R_d$ , % от $R_{max}$	n, об / мин	Примечания
1			
2			
3			
4			

Таблица 8 – Данные экспериментальных исследований регулировочной характеристики  $n(U)$  электропривода постоянного тока последовательного возбуждения

Номер опыта	U, В	n, об / мин	Примечания
1			
2			
3			
4			

2.3 Обработка экспериментальных исследований и содержание отчета

Целью исследований электропривода является экспериментальное установление функциональных зависимостей его выходных координат от внутренних и внешних возмущений.

Графики функциональных зависимостей дают наглядное представление о влиянии всех возмущений (изменения механической нагрузки, добавочного сопротивления, напряжения) на выходные координаты привода – вращающий момент и скорость.

Графики механических характеристик в отчете представляют по расчетным данным табл.6, определяемым по формулам (5), (7), (11) - (16).

Статизм  $\delta\omega$  механических характеристик определяется на их рабочих участках (в интервале изменения рабочих скоростей) по формуле

$$\delta\omega = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\min}} \quad (22)$$

*Содержание отчета:*

- принципиальные электрические схемы установки для исследования электропривода постоянного тока.
- паспортные данные двигателя привода, аппаратов и приборов;
- таблицы с результатами исследований и расчетами;
- графики естественных и искусственных механических характеристик в двигательном режиме по данным табл.6 в одной системе координат;
- графики регулировочных характеристик по данным табл. 7, 8;
- выводы по результатам исследований.

#### 2.4 Контрольные вопросы

- 1 Объясните принцип действия, назначение каждого элемента электрической схемы и установки.
- 2 Какие существуют способы регулирования скорости двигателей постоянного тока последовательного возбуждения?
- 3 Как можно ограничить ток обмотки якоря при пуске двигателя в ход?
- 4 Какие существуют способы торможения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения?
- 5 Как изменяется частота вращения вала двигателя при шунтировании обмотки якоря?

6 Как ослабить магнитное поле электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения?

7 Почему нельзя запускать двигатель постоянного тока последовательного возбуждения без нагрузки?

### 3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

*Цель работы:* исследовать электромеханические свойства асинхронного электропривода в двигательном режиме и в режимах электромеханического торможения.

#### 3.1 Общие указания

Асинхронный электропривод с фазным ротором широко используется в тех промышленных механизмах, где требуется регулировать скорость в широком диапазоне и ограничивать пусковые токи, например, в механизмах подъема и передвижения общепромышленных кранов, в подъемных установках, конвейерах, металлообрабатывающих станках, прокатных станах, ковочных машинах и т.п.

Электромеханические свойства электроприводов оцениваются их механическими характеристиками.

Механической характеристикой асинхронного двигателя (АД) называется функциональная зависимость частоты  $n$  вращения вала электродвигателя от вращающего момента  $M$  на его валу  $n = f(M)$  или  $\omega = f(M)$ .

Естественной механической характеристикой называют функциональную зависимость  $n = f(M)$ , полученную при номинальных электри-

ческих параметрах привода (номинальном напряжении и частоте питающей сети, а также при отсутствии дополнительных сопротивлений в цепи статора и ротора). Если не выполняется хотя бы одно из перечисленных условий, то механическая характеристика называется **искусственной**.

Механические характеристики асинхронных приводов описываются нелинейным уравнением (упрощенной формулой Клосса)

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (23)$$

где  $s$  - скольжение асинхронной машины,

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (24)$$

где  $n_0$  - синхронная частота вращения магнитного поля статора, об/мин;

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (25)$$

где  $f$  - частота тока в сети, Гц;

$p$  - число пар полюсов статора;

$n$  - частота вращения ротора двигателя, об/мин;

$M_{\text{max}}$  - максимальный (критический) вращающий момент, Н·м;

$s_k$  - критическое скольжение, соответствующее критическому моменту и зависящее от добавочного сопротивления  $r_2$  в цепи ротора:

$$s_k = \frac{r_2' + r_2}{x_k}, \quad (26)$$

$r_2'$  - приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$x_k$  - суммарное индуктивное сопротивление обмоток статора и ротора, Ом.

Частоту вращения вала асинхронного двигателя с фазным ротором можно регулировать, изменяя величину добавочного сопротивления в

цепи ротора. Увеличение этого сопротивления приводит к уменьшению частоты вращения.

Асинхронный двигатель может работать в тормозных режимах. Существуют три способа электромеханического торможения роторов асинхронных двигателей: рекуперативное, динамическое и торможение противотоком.

**Рекуперативное торможение** возникает при  $n > n_0$ , в этом случае асинхронная машина работает в режиме генератора с самовозбуждением, с рекуперацией (отдачей) электрической энергии в сеть.

**Динамическое торможение** осуществляют, отключая обмотку статора от сети переменного тока и подключая ее (две фазы) к сети постоянного тока.

Момент динамического торможения на валу асинхронного двигателя появляется в результате взаимодействия неподвижного магнитного поля статора с наведенными токами в роторе.

При этом асинхронная машина работает в режиме генератора, но с принудительным возбуждением. Вырабатываемая электрическая энергия выделяется в виде тепла на активном сопротивлении в цепи ротора.

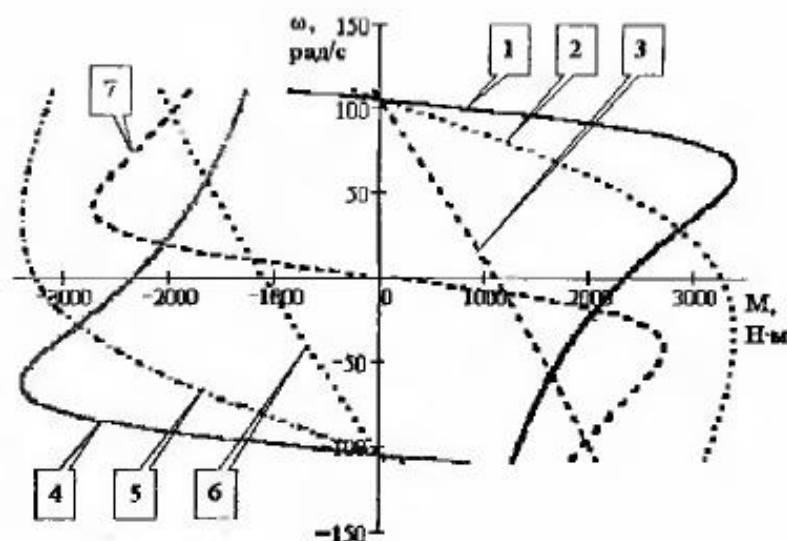
**Торможение противотоком** происходит, если магнитное поле статора вращается в одну сторону, а ротор - в другую.

Такой режим можно создать двумя способами:

- 1 Если у работающего двигателя быстро поменять в обмотке статора порядок чередования фаз, то направление вращения магнитного поля изменится и станет противоположным направлению вращения ротора.
- 2 Если постепенно повышать механическую нагрузку на валу двигателя, то частота вращения будет уменьшаться и при определенной нагрузке ротор остановится. При дальнейшем повышении нагрузочного момента на валу ротор начнет вращаться против движения магнитного поля статора.



Графики механических характеристик АД с фазным ротором мощностью  $P_n = 100 \text{ кВт}$  в двигательном и тормозных режимах приведены на рис. 9.



1, 4 – естественные х-ки ( $r_d = 0$ ); 2, 5 – реактивные х-ки ( $r_d > 0$ ); 3, 6 – х-ки торможения противоключением ( $r_d = R_{\text{эф}}$ ) в режимах движения «вперед» и «назад» соответственно; 7 – х-ка динамического торможения

Рисунок 9 – Графики механических характеристик АД с фазным ротором

#### Схема для исследования электропривода

Для исследования асинхронного электропривода М1 на мнемосхеме собирается электрическая схема (рис. 10).

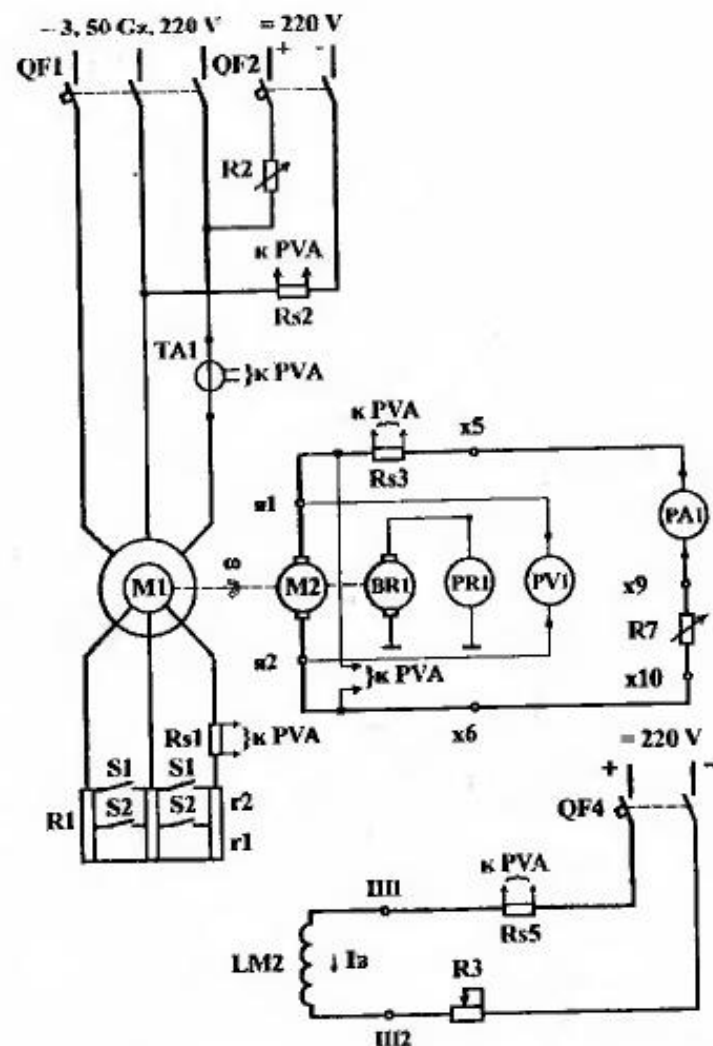


Рисунок 10 – Принципиальная электрическая схема установки для исследования асинхронного электропривода в двигательном режиме

Схема установки для исследования асинхронного электропривода содержит следующие электрические аппараты и приборы:

- M1 - исследуемый асинхронный электродвигатель привода;
- QF1 - автоматический выключатель для подключения обмотки статора исследуемого двигателя M1 к трехфазной сети переменного тока;
- QF2 - автоматический выключатель для подключения обмотки статора испытуемого двигателя M1 к сети постоянного тока;
- QF4 - автоматический выключатель подачи тока в обмотку возбуждения LM2 двигателя M2;
- R1 - пускорегулировочное сопротивление в цепи фазного ротора асинхронного двигателя M1, предназначенное для ограничения его пусковых токов и регулирования скорости;
- S1, S2 - ключи, предназначенные для изменения величины сопротивления R1, разделенного на две секции -  $r_1$  и  $r_2$ .
- R7 - дополнительное сопротивление, включаемое последовательно в цепь обмотки якоря M2, предназначенное для регулирования его тока динамического торможения;
- PA1 - амперметр для измерения тока якоря двигателя M2;
- PV1 - вольтметр для измерения напряжения на обмотке якоря двигателя M2;
- тахогенератор BR1 и тахоуказатель PR1 – для измерения частоты вращения валов двигателей M1 и M2.

### 3.2 Порядок выполнения работы

3.2.1 Ознакомиться с силовым электрооборудованием и записать его технические данные. Уяснить назначение каждого элемента принципиальной схемы. Собрать схему испытания электропривода в двигательном режиме (рис. 10).

При сборке схем электроприводов следует помнить, что все элементы мисмосхемы электрически соединены.

3.2.2 Запустить электропривод для исследования его в двигательном режиме.

#### Порядок запуска электропривода

1 Для ограничения пускового тока необходимо ввести в цепь обмотки ротора максимальное сопротивление R1 (рукоятки ключей S1 и S2 установить в положение "0").

2 Двигатель M1 запускается автоматическим выключателем QF1.

3.2.3 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки  $n = f(M)$  при номинальных параметрах двигателя ( $U = U_n$  и  $r_x = 0$ ).

Для исследования параметров естественной электромеханической характеристики  $n = f(I_r)$  ключами S1 и S2 устанавливаются нулевое сопротивление в цепи ротора (рукоятки ключей переводят в положение "1" – "Включено").

По тахоуказателю PR1 фиксируют значения частот вращения вала двигателя M1, а по амперметру PA1 – значения токов. Данные заносят в табл. 9. Несмотря на нулевое значение тока в цепи якоря двигателя M2 в первом опыте, момент сопротивления на валу двигателя M1 есть. Он равен моменту  $M_0$  от действия сил трения в подшипниках и вентиляторах двигателей M1 и M2. Поэтому момент сопротивления  $M_c$  на валу исследуемого привода равен сумме моментов от действия механической нагрузки  $M_{пр}$  и сил трения  $M_0$ . Механическая нагрузка на валу испытуемого асинхронного двигателя M1 создается двигателем постоянного тока M2 в режиме динамического торможения.

*Примечание.* Студенты электромеханических специальностей исследуют механические характеристики АД в двигательном и тормозных режимах по схеме привода Г - Д (см. рис. 11). При этом включение ключа S4 при включенных двигателях M1 и M4 производится при выполнении условий параллельной работы генераторов и под руководством преподавателя.



Таблица 9 - Данные экспериментальных исследований асинхронного электропривода

Номер опыта	Измеренные величины		Расчетные величины				Примечания
	$I_a$ А	$n$ об/мин	$\omega$ с <sup>-1</sup>	$M_0$ Н·м	$M_{дт}$ Н·м	$M = M_{св}$ Н·м	
1							Естественная характеристика, $r_d = 0$
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Для создания механической нагрузки на валу двигателя М1 автоматическим выключателем QF4 включают возбуждение двигателя М2.

О моменте динамического торможения  $M_{дт}$  на валу двигателя М1 судят по величине тока якоря тормозного двигателя М2 (по прибору РА1).

Тормозной момент на валу двигателя М1 регулируется током якоря двигателя М2 изменением величины сопротивления R7.

Графики механических характеристик АД с фазным ротором нелинейны (см. формулу (23) и графики на рис. 9), поэтому каждую характеристику исследуют по 6...8 опытам, изменяя ток якоря двигателя М2 через равные интервалы в диапазоне от 0 до  $2I_n$ .

Экспериментальные данные заносят в табл. 9.

3.2.4 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при  $r_d = 0.5R1 - r1$ .

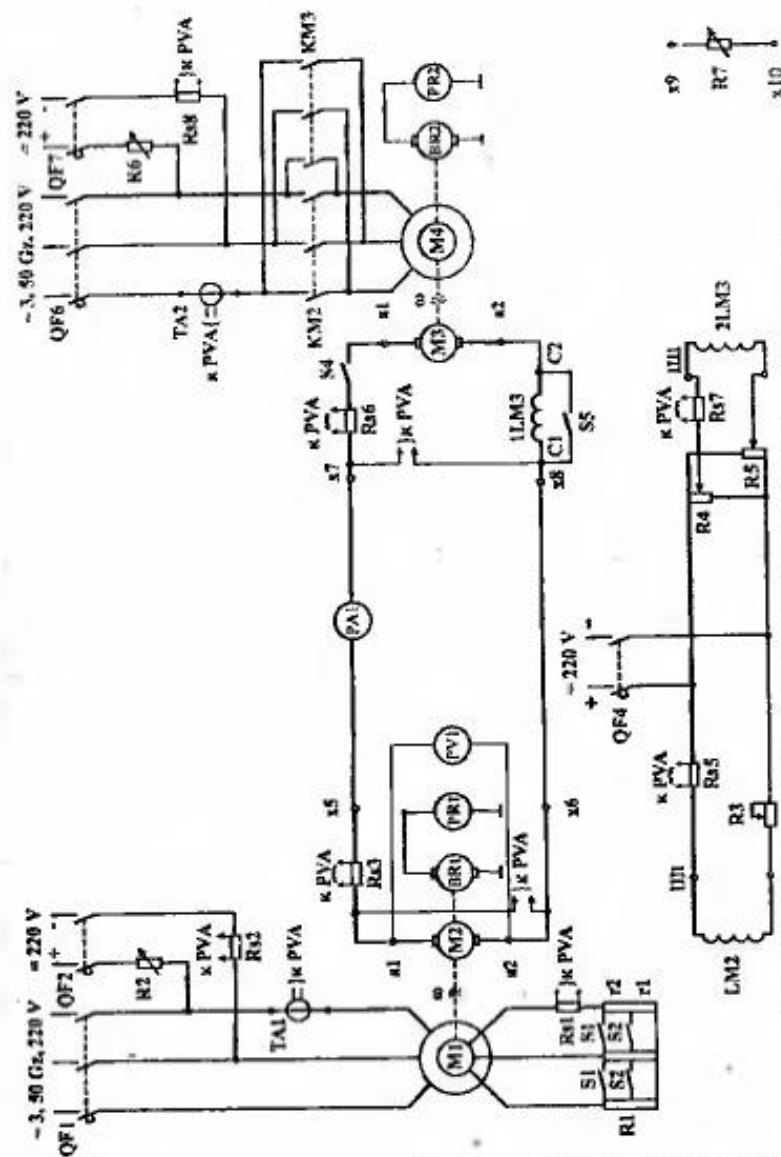


Рисунок 11 - Схема установки для испытания асинхронного привода в режиме динамического торможения

Для исследования реостатной механической  $n = f(I_a)$  характеристики привода рукоятку ключа S1 устанавливают в положение «0», а ключа S2 - в положение «1».

Тормозной момент на валу двигателя М1 регулируется током якоря двигателя М2 изменением величины сопротивления R7, начиная с положения при выключенном выключателе QF3 ! Ток якоря двигателя М2 изменяется через равные интервалы в диапазоне от 0 до 21.

Экспериментальные данные 6...8 опытов заносятся в продолжение табл. 9, с указанием в примечании вида исследуемой зависимости.

3.2.5 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения обмотки от механической нагрузки при  $r_2 = R1 + r1 + r2$ .

Для исследования реостатной механической характеристики привода при  $r_2 = R1 + r1 + r2$  ключи S1 и S2 отключают.

Тормозной момент на валу двигателя М1 регулируется током якоря двигателя М2 изменением величины сопротивления R7, начиная с положения при выключенном выключателе QF3 ! Ток якоря двигателя М2 изменяется также через равные интервалы в диапазоне от 0 до 21.

Экспериментальные данные заносят в продолжение табл. 9, с указанием в примечании вида исследуемой зависимости.

3.2.6 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала обмотки от механической нагрузки  $n = f(M)$  при токе якоря двигателя  $(I = I_n \text{ и } r_2 = 0)$ .

Для снижения напряжения трехфазную обмотку статора переключают со схемы «треугольник» на схему «звезда». При этом напряжение на фазной обмотке статора снижается в 1,73 раза.

Для исследования искусственной механической  $n = f(I_2)$  характеристики привода рукоятки ключей S1 и S2 устанавливают в положение «1». Тормозной момент на валу двигателя М1 регулируется током якоря двигателя М2 изменением величины сопротивления R7, начиная с положения при выключенном выключателе QF3 ! Ток якоря двигателя М2 изменяется через равные интервалы в диапазоне от 0 до 21.

Экспериментальные данные 6...8 опытов заносятся в продолжение табл. 9, с указанием в примечании вида исследуемой зависимости.

3.2.7 Выключить стенд, выключить автоматические выключатели QF1, QF3. Собрать схему стенда (рис. 11) и исследовать электропривод в режиме динамического торможения.

Для введения асинхронного двигателя М1 в режим динамического торможения его статорную обмотку отключают от сети переменного тока и подключают к источнику постоянного тока автоматическим выключателем QF2.

Так как момент динамического торможения нелинейно зависит от скорости, механическую характеристику  $M_{ст} = f(\omega)$  двигателя М1 в этом режиме исследуют для 7...8 значений скорости, которые устанавливают с помощью регулируемого электропривода системы «Генератор – двигатель» (Г–Д). Скорость изменяют с равными интервалами в диапазоне от 0 до  $\omega_n$ .

Исследуют четыре механические характеристики:

- 1 - при  $R1 = 0, R2 = 0$ ;
- 2 - при  $R1 = \max, R2 = 0$ ;
- 3 - при  $R1 = \max, R2 = \max$ ;
- 4 - при  $R1 = 0, R2 = \max$ .

Порядок запуска электропривода системы Г–Д

- 1 Исходное положение: все выключатели стенда находятся в отключенном состоянии.
- 2 Рукоятки шунтовых регуляторов возбуждения R4 и R5 устанавливают в нулевые положения.
- 3 Автоматическим выключателем QF6 и контактором KM2 запускают асинхронный привод машины М3, работающей в генераторном режиме.
- 4 Выключают ключ S4 в цепи якоря машины М3.

5 Плавно вращая рукоятки шунтовых регуляторов возбуждения R4 и R5, устанавливают необходимые скорости от 0 до  $\omega_n$  через каждые 100-150 об/мин.

Экспериментальные данные скорости и тока якоря 28 опытов заносятся в продолжение табл.9.

### 3.2.8 Определить экспериментально коэффициент kФ

Определение коэффициента kФ выполняют в следующем порядке.

- 1 Отключить контактором KM2 привод системы Г - Д.
- 2 Отключить все выключатели стенда.
- 3 Разобрать схему привода системы Г - Д (вольтметр PV1 не отключать!).
- 4 Запустить двигатель M1.
- 5 Зафиксировать в протоколе значения ЭДС и скорости  $\omega$  двигателя M2.

### 3.3 Обработка экспериментальных исследований и содержание отчета

Графики механических характеристик в отчете представляют по расчетным данным табл. 9, определяемым по формулам (5), (7), (14), (16) в одной системе координат (см. рис. 9).

Значение момента трения  $M_0$  определяется из условия равенства электрических и механических потерь в двигателе по его номинальному КПД  $\eta_n$  по формуле

$$M_0 = M_n(1 - \eta_n). \quad (27)$$

Значение статического момента  $M_c$  сопротивления, равного его вращающему моменту  $M$ , определяется по формуле

$$M = M_c = \pm M_0 + M_{дт}, \quad (28)$$

где  $M_{дт}$  - момент динамического торможения, Н·м;

" + " относится к двигательному режиму, знак " - " относится к генераторному режиму.

$$M_{дт} = k\Phi I_n. \quad (29)$$

### Содержание отчета:

- принципиальные электрические схемы исследования асинхронного электропривода в двигательном режиме и режиме динамического торможения;
- паспортные данные асинхронного двигателя M1, аппаратов и приборов;
- таблицы с результатами исследований и расчетами;
- графики естественных и искусственных механических характеристик в двигательном и тормозном режимах по данным табл.9 в одной системе координат;
- выводы по результатам исследований.

### 3.4 Контрольные вопросы

- 1 Объяснить принцип действия, назначение каждого элемента принципиальной электрической схемы лабораторной установки.
- 2 Какие существуют способы регулирования скорости асинхронных двигателей с фазным ротором?
- 3 Как можно ограничить пусковой ток асинхронного двигателя с фазным ротором?
- 4 В каких режимах может работать асинхронный двигатель?
- 5 Какие существуют способы электрического торможения асинхронных двигателей?

#### 4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ

### "ГЕНЕРАТОР - ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА" (Г-Д)

**Цель работы:** исследовать электромеханические свойства и способы двухзонного регулирования скорости электропривода системы Г-Д.

#### 4.1 Общие указания

Электропривод системы Г-Д позволяет с плавностью  $\varphi_{пл} = 1$  регулировать скорость в диапазоне  $D = 20 : 1$  и выше, получать за счет обратной связи по току и скорости специальные механические, например "экскаваторные", характеристики.

Этот электропривод используется на мощных порталных и козловых кранах, прокатных станах, драглайнах, экскаваторах с мехлопатов, роторных экскаваторах.

Электропривод системы Г-Д состоит из трех электрических машин:

- двигателя постоянного тока (ДПТ);
- генератора постоянного тока (ГПТ);
- привода генератора.

Двигатель постоянного тока приводит в движение рабочий орган механизма.

Генератор постоянного тока обеспечивает питание двигателя постоянного тока.

Привод генератора, как правило, синхронный, вращает якорь ГПТ.

Для питания обмоток возбуждения ГПТ и ДПТ применяются тиристорные возбудители.

Система автоматического регулирования (САР) привода обеспечивает

регулирование специальных механических характеристик и требуемых условий технологии законов регулирования скорости.

Электромеханическая характеристика электропривода системы Г-Д описывается линейным уравнением первого порядка

$$p = \frac{E_G}{C_E \Phi_M} - I_A \frac{r_M + r_G}{C_E \Phi_M}, \quad (30)$$

где  $p$  - частота вращения вала ДПТ, об / мин;

$E_G$  - ЭДС генератора, В;

$I_A$  - ток в обмотке якоря ДПТ, равный току якоря ГПТ, А;

$r_M, r_G$  - сопротивления обмоток якоря двигателя и генератора соответственно, Ом;

$\Phi$  - магнитный поток возбуждения двигателя, Вб;

$C_E$  - конструктивная постоянная двигателя.

Статизы электромеханических характеристик привода зависят от значений сопротивлений обмоток якорей генератора  $r_G$  и двигателя  $r_M$ , а также от магнитного потока ДПТ:

$$\Delta p = \frac{\Delta p}{p_0}, \quad (31)$$

где  $\Delta p$  - статическое падение частоты вращения вала ДПТ,

$$\Delta p = I_A \frac{r_M + r_G}{C_E \Phi_M}; \quad (32)$$

$p_0$  - частота вращения вала ДПТ при идеальном холостом ходе;

$$p_0 = \frac{E_G}{C_E \Phi_M}. \quad (33)$$

Как видно из уравнений (30) и (33), в электроприводе системы Г-Д существуют два способа регулирования скорости:

- изменением ЭДС  $E_G$  генератора, воздействием на его магнитный поток  $\Phi_G$ ;
- изменением магнитного потока возбуждения  $\Phi_M$  двигателя.

При постоянной скорости вращения ротора привода ГПТ ( $\omega_0 = \text{const}$ ) ЭДС генератора зависит только от магнитного потока возбуждения  $\Phi_G$ :

$$E_G = k\Phi_G \omega_0, \quad (34)$$

где  $k$  – конструктивная постоянная ГПТ.

Магнитный поток  $\Phi_M$  ДПТ регулируется его током возбуждения  $I_{\text{вм}}$ :

$$\Phi_M = \alpha_M I_{\text{вм}}, \quad (35)$$

где  $\alpha_M$  – коэффициент пропорциональности между током возбуждения и магнитным потоком ДПТ.

Магнитный поток  $\Phi_G$  ГПТ регулируется его током возбуждения  $I_{\text{вг}}$ :

$$\Phi_G = \alpha_G I_{\text{вг}}, \quad (36)$$

где  $\alpha_G$  – коэффициент пропорциональности между током возбуждения и магнитным потоком ГПТ.

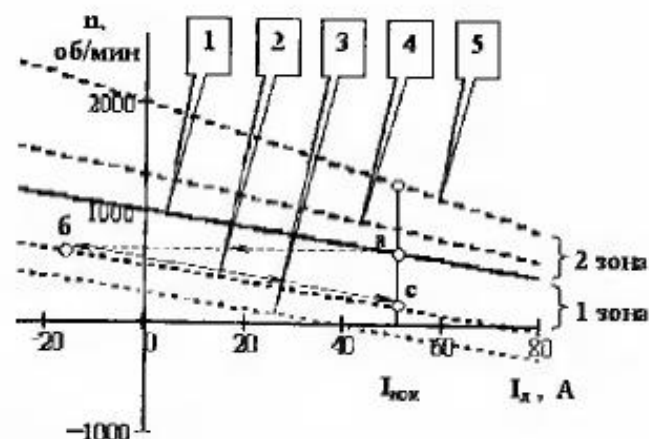
Если током возбуждения генератора  $I_{\text{вг}}$  установить номинальное значение  $\Phi_{G_{\text{ном}}}$ , а током возбуждения  $I_{\text{вм}}$  установить номинальный магнитный поток двигателя  $\Phi_{M_{\text{ном}}}$ , то скорость электропривода будет изменяться в соответствии с естественной электромеханической характеристикой (см. график 1 на рис. 12).

Жесткость (статизм) механической характеристики определяется величинами параметров правой части уравнения (30).

Скорость в I зоне регулирования (ниже естественной электромеханической характеристики) регулируют изменением магнитного потока  $\Phi_G$  генератора ( $0 < \Phi_G < \Phi_{G_{\text{ном}}}$ ), а во II зоне регулирования (выше естественной электромеханической характеристики) – изменением магнитного потока  $\Phi_M$  двигателя ( $\Phi_{M_{\text{мин}}} < \Phi_M < \Phi_{M_{\text{ном}}}$ ).

Следует отметить, что при регулировании скорости в первой зоне изменяется скорость холостого хода  $\omega_0 = E_G / C\Phi_M$  привода, а жесткость (статизм) механических характеристик не меняется.

При регулировании скорости во второй зоне изменяются и скорость холостого хода и жесткость характеристик (см. формулы (30)...(33) и графики на рис. 12).



1 – естественная характеристика,  $E_G = E_H$ ,  $\Phi_M = \Phi_H$ .  
 2 – искусственная х-ка в первой зоне,  $E_G = 0.5E_H$ ,  $\Phi_M = \Phi_H$ .  
 3 – искусственная х-ка в первой зоне,  $E_G = 0.25E_H$ ,  $\Phi_M = \Phi_H$ .  
 4 – искусственная х-ка во второй зоне,  $E_G = E_H$ ,  $\Phi_M = 0.75\Phi_H$ .  
 5 – искусственная х-ка во второй зоне,  $E_G = E_H$ ,  $\Phi_M = 0.5\Phi_H$ .  
 Рисунок 12 – Графики электромеханических характеристик электропривода системы Г – Д

Изменение направления вращения вала двигателя (реверс) осуществляется двумя способами:  
 а) изменением направления тока в обмотке возбуждения генератора, называемым «реверсом по полю»;  
 б) изменением направления тока в обмотке якоря двигателя, называемым «реверсом по якорю».

Как в первом, так и во втором способе изменяется направление вращающего момента  $M$ , т.к. его знак определяется знаком тока и магнитного потока ДПТ:

$$M = k\Phi_M I_A, \quad (36)$$



В электроприводе системы Г-Д применяются два способа электрического торможения:

- рекуперативное торможение с отдачей (рекуперацией) электрической энергии в сеть переменного тока;
- торможение противовключением.

Привод переводят в режимы торможения, изменяя токи возбуждения генератора и двигателя. Например, для перевода привода в режим рекуперативного торможения, работающего в соответствии с естественной характеристикой в точке "а" при  $\omega = \omega_n$  и  $M = M_n$ , необходимо скачком уменьшить ток возбуждения генератора. Выходные координаты привода автоматически переместятся в точку "б" по траектории, включающей режим рекуперативного торможения во втором квадранте (рис. 12). Далее под действием тормозного момента скорость снизится до значения, соответствующего координате скорости в точке "с", где  $M = M_c$ .

#### Схема для исследования электропривода

Для исследования электропривода системы Г-Д на мнемосхеме собирается электрическая схема (рис.13). Схема электропривода содержит следующие электрические машины, аппараты и приборы:

- исполнительный электродвигатель постоянного тока М2;
- генератор постоянного тока G3;
- привод М4 генератора М3;
- асинхронный двигатель М1, предназначенный для создания регулируемой механической нагрузки на валу испытуемого двигателя М2;
- выключатель QF4 подачи тока в обмотку возбуждения LM2 двигателя М2 и тока в обмотку возбуждения (2LG3) генератора;
- амперметр РА1 – для измерения тока якоря двигателя М2;
- вольтметр PV1 – для измерения напряжения на обмотке якоря двигателя М2;

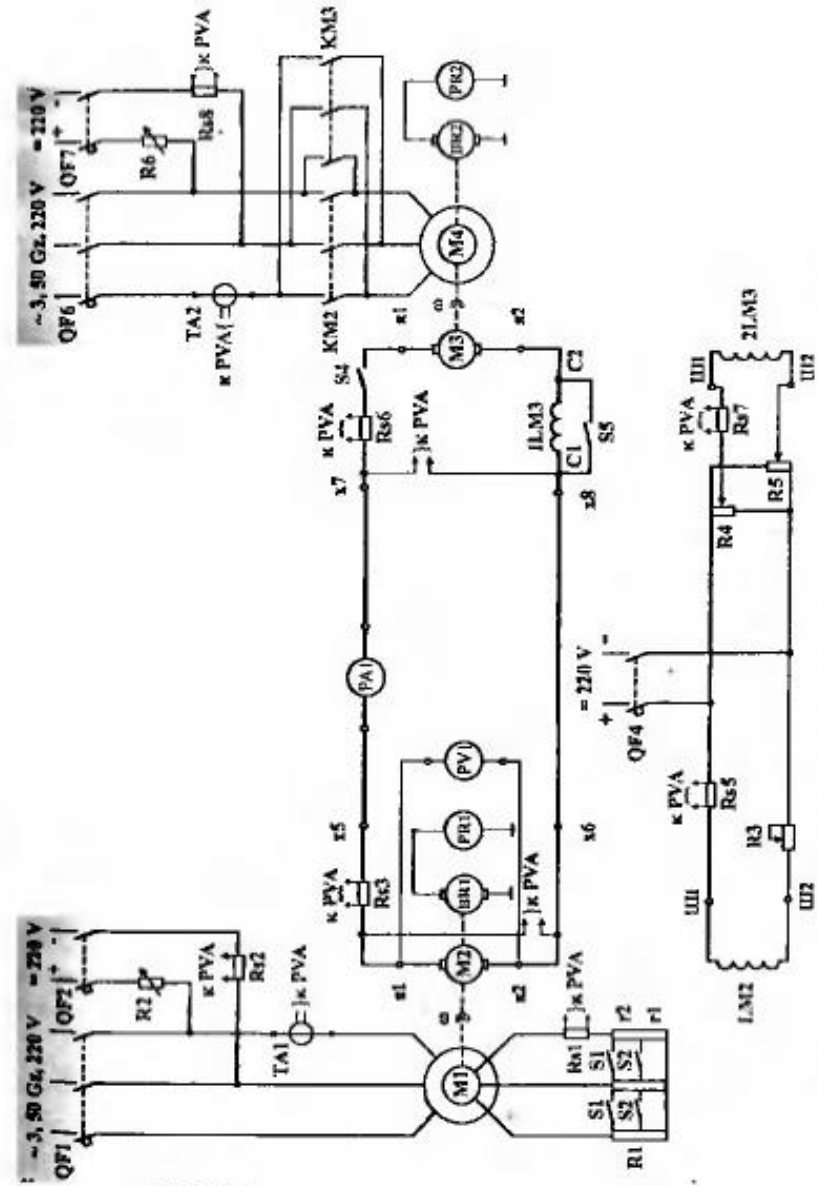


Рисунок 13 – Схема установки для исследования электропривода системы Г-Д

- тахогенератор BR1 и тахоуказатель PR1 – для измерения частоты вращения валов двигателей M1 и M2;
- автоматический выключатель QF1 для подключения обмотки статора нагрузочного двигателя M1 к трехфазной сети переменного тока;
- автоматический выключатель QF2 для подключения обмотки статора нагрузочного двигателя M1 к сети постоянного тока;
- автоматический выключатель QF6 для включения привода M4 генератора;
- пускорегулировочное сопротивление R1 в цепи обмотки ротора асинхронного двигателя M1, предназначенное для ограничения его пусковых токов и регулирования скорости;
- ключи S1, S2, предназначенные для изменения величины сопротивления R1, разделенного на две секции:  $r_1$  и  $r_2$ ;
- регулятор R3 тока возбуждения двигателя M2;
- шунтовые регуляторы R4, R5 тока возбуждения генератора G3.

#### 4.2 Порядок выполнения работы

4.2.1 Ознакомиться с силовым электрооборудованием и записать его технические данные. Уяснить назначение каждого элемента принципиальной схемы. Собрать схему испытания электропривода в двигательном режиме (рис. 13).

При сборке схемы электропривода следует помнить, что все элементы мнемосхемы электрически соединены.

4.2.2 Запустить электропривод системы Г–Д.

**Порядок запуска электропривода системы Г–Д**

1 В исходном положении – все выключатели стенда находятся в отключенном состоянии.

2 Рукоятки шунтовых регуляторов возбуждения R4 и R5 устанавливаются в нулевые положения.

3 Автоматическим выключателем QF6 и контактором KM2 запускают асинхронный двигатель M4.

1 Включают ключ S4 в цепи якоря генератора G3.

2 Регулятором R3 устанавливают номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя M2.

5 Плавным вращением рукояток шунтовых регуляторов возбуждения R4 и R5 устанавливают номинальное напряжение двигателя M2.

4.2.3 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода системы Г–Д от механической нагрузки  $n = f(I_M)$  при номинальных параметрах двигателя и генератора ( $E_G = U_n$ ,  $\Phi_M = \Phi_{ном}$ ).

Для исследования параметров естественной электромеханической характеристики  $n = f(I_M)$  привода регулятором R3 устанавливают номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя, а регуляторами возбуждения R4 и R5 по вольтметру PV1 устанавливают номинальное напряжение генератора G3, равное напряжению двигателя M2.

Механическая нагрузка на валу двигателя постоянного тока M2 создается асинхронным двигателем M1 в режиме динамического торможения.

Для введения асинхронного двигателя M1 в режим динамического торможения необходимо его статорную обмотку подключить выключателем QF2 к цепи постоянного тока.

Тормозной момент, создаваемый двигателем M1 на валу испытуемого двигателя M2, можно регулировать в интервале от момента холостого хода  $M_0$  до номинального момента  $M_n$  изменением сопротивления R2 в цепи динамического торможения. Учитывая линейность графиков механических характеристик привода (см. формулу (30) и графики на рис. 12), достаточно исследовать каждую характеристику по двум опы-



там, т.е. при двух значениях нагрузок: при токе якоря, равном току холостого хода ( $I_a = I_0$ ) и любому значению тока в интервале  $(1 \dots 1.5)I_n$ .

Экспериментально полученные данные заносятся в табл. 10.

Таблица 10 – Данные исследования электропривода системы Г – Д

Ном. опыта	Измеренные величины				Расчетные величины			Примечания
	$I_a$ А	$I_n$ А	$E_G$ В	$n$ об/мин	$\omega$ рад/с	$M$ Н·м	$\delta\omega$ %	
1								Естественная характеристика
2								
3								1 зона, $E_G = 0.5U_n$ , $\Phi_M = \Phi_{ном}$
4								
5								1 зона, $E_G = 0.2U_n$ , $\Phi_M = \Phi_{ном}$
6								
7								2 зона, $E_G = U_n$ , $\Phi_M = 0.75\Phi_{ном}$
8								
9								2 зона, $E_G = U_n$ , $\Phi_M = 0.5\Phi_{ном}$
10								

4.2.4 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при  $E_G = 0.5U_n$ ,  $\Phi = \Phi_n$ .

Для исследования электромеханической характеристики  $n = f(I_a)$  привода в первой зоне регулирования скорости регуляторами возбуждения R4 и R5 по вольтметру PV1 устанавливают напряжение генератора G3, равное половине номинального. Механическую нагрузку изменяют нагрузочным двигателем M1 также в режиме динамического торможения регулятором R2.

Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл. 10.

4.2.5 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки при  $E_G = 0.2U_n$ ,  $\Phi = \Phi_n$ .

Для исследования электромеханической характеристики  $n = f(I_a)$  привода в первой зоне регулирования скорости регуляторами возбуждения R4 и R5 по вольтметру PV1 устанавливают напряжение генератора G3, равное 0.2 от номинального.

Механическую нагрузку изменяют нагрузочным двигателем M1, также в режиме динамического торможения регулятором R2.

Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл. 10.

4.2.6 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при  $E_G = U_n$ ,  $\Phi = 0.5\Phi_n$ .

Для исследования электромеханической характеристики

$n = f(I_a)$  привода во второй зоне регулирования скорости движком реостата R3 устанавливается минимальный ток возбуждения, равный половине номинального. При этом величина сопротивления R3 – максимальна.

Механическую нагрузку изменяют нагрузочным двигателем M1 также в режиме динамического торможения регулятором R2.

Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл. 10.

4.2.7 Исследовать экспериментально регулировочные характеристики  $n(E_G)$  и  $n(\Phi_M)$  электропривода системы Г – Д.

Вначале устанавливают номинальные параметры электропривода в соответствии с его естественной механической характеристикой.

Регулировочные характеристики исследуют в режиме холостого хода привода, чтобы выявить влияние каждого отдельного параметра – магнитного потока двигателя или напряжения генератора на скорость.

Это означает, что при исследовании, например, зависимости  $n(E_G)$  изменяют напряжение  $E_G$ , а ток возбуждения двигателя M2 поддерживают равным номинальному значению.

Количество опытов при исследовании каждой характеристики принимают равным четырем, при этом регулируемые величины изменяют с равными интервалами от 0 до соответствующих максимальных значений.

Экспериментальные данные восьми опытов заносятся в таблицы 11 и 12 соответственно.

Таблица 11 – Данные экспериментальных исследований регулировочной характеристики  $n(E_G)$  электропривода системы Г – Д

Номер опыта	$E_G, В$	$n, об / мин$	Примечания
1			
2			
3			
4			

Таблица 12 – Данные экспериментальных исследований регулировочной характеристики  $n(\Phi_M)$  электропривода системы Г – Д

Номер опыта	$\Phi_M, \% от \Phi_{max}$	$n, об / мин$	Примечания
1			
2			
3			
4			

#### 4.2.8 Определить экспериментально коэффициент $k\Phi$ .

Коэффициент  $k\Phi$  определяют в следующем порядке:

- 1 Отключить двигатель М1 от сети. Разобрать схему электропривода системы Г – Д (вольтметр PV1 не отключать!).
- 2 Реостатом R3 установить номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя М2.
- 3 Запустить двигатель М1.
- 4 Зафиксировать в протоколе значения ЭДС и скорости двигателя М2.

- 5 Реостатом R3 установить минимальный ток возбуждения двигателя М2.
- 6 Зафиксировать в протоколе значения ЭДС и скорости двигателя М2.

#### 4.3 Обработка экспериментальных исследований и содержание отчета

Целью исследований электропривода является экспериментальное установление функциональных зависимостей его выходных координат от внутренних и внешних возмущений.

Графики функциональных зависимостей дают наглядное представление о влиянии всех возмущений (изменения механической нагрузки, магнитного потока двигателя, напряжения генератора) на выходные координаты привода – вращающий момент и скорость.

Графики механических и регулировочных характеристик в отчете представляют по расчетным данным табл.10 - 12, определяемым по формулам (5), (7), (11) - (16).

##### Содержание отчета:

- принципиальная электрическая схема стенда для исследования электропривода;
- паспортные данные генератора и двигателя, аппаратов и приборов;
- таблицы с результатами исследований и расчетами;
- графики естественных и искусственных механических характеристик по данным табл.10 в одной системе координат;
- графики регулировочных характеристик по данным табл.11 и 12;
- выводы по результатам исследований.

#### 4.4 Контрольные вопросы

- 1 Объясните принцип действия, назначение каждого элемента принципиальной электрической схемы лабораторной установки.

2. Какие преимущества электропривода системы Г-Д постоянного тока по сравнению с однодвигательным асинхронным приводом с фазным ротором?
3. Какие способы регулирования скорости используются в электроприводе системы Г-Д?
4. Как регулировать скорость вращения вала привода системы Г-Д в первой зоне?
5. Как регулировать скорость вращения вала привода системы Г-Д во второй зоне?
6. При каких условиях двигатель постоянного тока системы Г-Д переходит в режим генераторного торможения?
7. Определить показания приборов в схеме электропривода системы Г-Д при токах возбуждения -30% и +80% от его номинального значения.
8. Как произвести реверс в приводе системы Г-Д?

## 5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ "ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА" (ТП - Д)

*Цель работы:* исследовать электромеханические характеристики электропривода системы ТП-Д.

#### 5.1 Общие указания

Регулировать скорость (частоту) вращения вала двигателя постоянного тока можно изменением напряжения на зажимах обмотки якоря (см. формулу (1)).

В качестве регуляторов напряжения в последнее время используют тиристорные преобразователи, которые преобразуют напряжение переменного тока в регулируемое напряжение выпрямленного тока.

Малые габариты, отсутствие вращающихся частей, постоянная готовность к эксплуатации, бесконтактное управление, малая мощность, и, как следствие, - большой коэффициент усиления, отсутствие инерционности, высокая надежность и ряд других положительных свойств обуславливают широкое использование электроприводов постоянного тока с тиристорными преобразователями во всех отраслях промышленности.

Этот привод применяется на подъемно-транспортных машинах (экскаваторах, подъемниках, кранах), прокатных станах, станках с компьютерным управлением, в сталеплавильном и литейном производстве.

Основным элементом тиристорного преобразователя является управляемый полупроводниковый диод – тиристор.

Особенностью тиристора является то, что он проводит электрический ток в одном направлении и только тогда, когда на его управляющий электрод подается открывающий импульс тока.

Первое свойство используется для выпрямления переменного тока, второе - для регулирования напряжения выпрямленного тока.

Если интервал времени между началом положительного полупериода преобразуемого напряжения  $u = U_m \sin(\omega t)$  и моментом подачи открывающего импульса равен

$$\Delta t = \frac{\alpha}{\omega}, \quad (36)$$

где  $\alpha$  - угол запаздывания (управления), то среднее значение напряжения  $U_d$  на сопротивлении  $R_n$  нагрузки (рис. 14) за период  $T = 2\pi$  определится по формуле

$$U_d = \frac{U_m}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin(\omega t) dt = U_m \frac{1 + \cos\alpha}{2\pi}, \quad (37)$$

где  $U_m$  амплитудное (максимальное) напряжение переменного тока.

Изменяя угол управления  $\alpha$ , можно регулировать выпрямленное напряжение с высоким КПД (0.95...0.99).

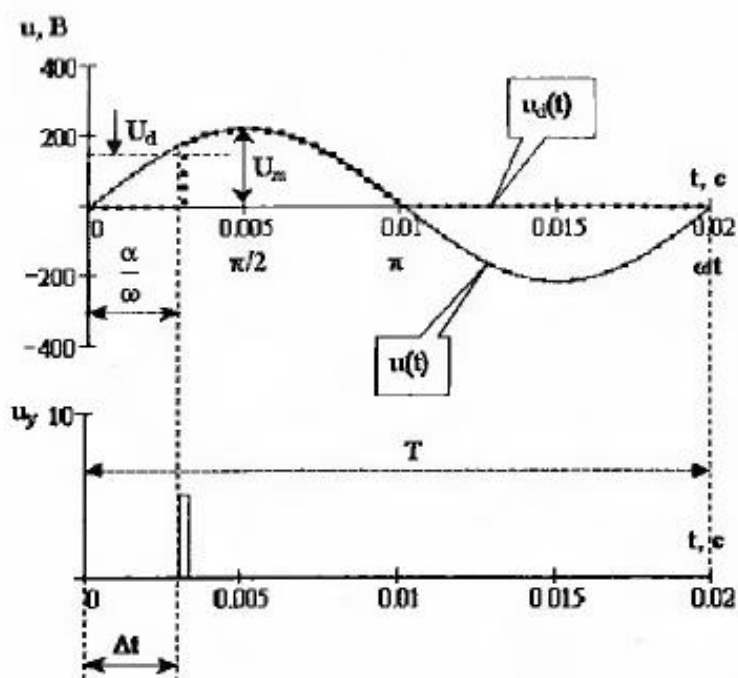


Рисунок 14 - Графики, поясняющие принцип регулирования напряжения тиристорным преобразователем

Открывающие импульсы формируются в специальном электронном генераторе импульсов - системе импульсно-фазного управления (СИФУ).

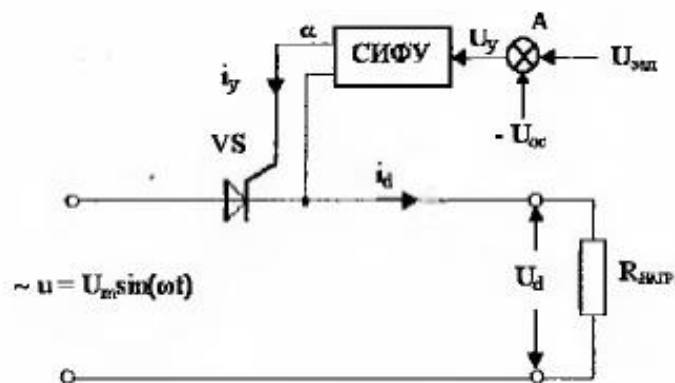


Рисунок 15 – Однополупериодная схема тиристорного преобразователя

При изменении напряжения управления  $U_y$ , подаваемого на вход СИФУ в однополупериодной схеме тиристорного преобразователя, угол управления  $\alpha$  изменяется от  $0$  до  $180^\circ$ .

Преобразование напряжения  $U_y$  в угол  $\alpha$  производится в специальном электронном блоке СИФУ. С помощью тиристорного преобразователя можно плавно регулировать напряжение  $U_d$  от нуля до максимального уровня  $U_{d0}$ , зависящего от схемы выпрямления.

В двухполупериодной схеме выпрямления при активной нагрузке угол управления  $\alpha$  теоретически изменяется от  $0$  до  $90^\circ$ , а выходное напряжение определяется по формуле

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha. \quad (38)$$

Уравнение электрохимической характеристики двигателя постоянного тока при питании его от тиристорного преобразователя имеет вид

$$n = \frac{k_{тп} U_y}{C_e \Phi} - I_a \frac{r_a}{C_e \Phi}, \quad (39)$$

где  $n$  – частота вращения вала двигателя, об/мин;

$k_{тп}$  – коэффициент усиления тиристорного преобразователя,

$$k_{тп} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y}; \quad (40)$$

$\Delta U_d$ ,  $\Delta U_y$  – изменение выходного и входного сигналов ТП соответственно, В;

$I_a$  – ток в обмотке якоря, А;

$r_a$  – сопротивление якорной цепи, Ом;

$C_E$  – коэффициент, зависящий от конструкции двигателя;

$\Phi$  – магнитный поток возбуждения двигателя, Вб.

Из уравнения (39) видно, что при неизменном напряжении управления  $U_y$  увеличение тока якоря приводит к уменьшению частоты вращения  $n$ .

Для некоторых технологических процессов требуются такие электроприводы, у которых при колебаниях нагрузки на валу скорость должна быть стабильной ( $\Delta\omega = 0$ ).

Это достигается введением в цепь управления сигнала отрицательной обратной связи по скорости.

Напряжение управления в этом случае зависит от разности сигнала задания скорости  $U_{зд}$  и сигнала обратной связи по скорости  $U_{ос}$ , пропорционального скорости  $\omega$  (снимается с выхода тахогенератора):

$$U_y = k_A (U_{зд} - U_{ос}), \quad (41)$$

где  $k_A$  – коэффициент усиления суммирующего усилителя А (рис. 15):

$$U_{ос} = \gamma\omega, \quad (42)$$

$\gamma$  – коэффициент передачи обратной связи по скорости.

Уравнение электромеханической характеристики  $\omega = f(I_a)$  с введением отрицательной обратной связи по скорости с учетом формул (39) и (42) запишется в виде

$$\omega = \frac{k_{п} U_{зд}}{1 + \gamma k_{п}} - I_a \frac{r_a}{C_E \Phi (1 + \gamma k_{п})}, \quad (43)$$

где  $k_{п} = k_A k_{тп} / C_E \Phi$  – коэффициент передачи разомкнутой (без обратной связи) системы управления;

$$U_d = k_{п} U_{зд}. \quad (44)$$

Действие отрицательной обратной связи по скорости основано на том, что при снижении скорости уменьшается сигнал  $U_{ос}$ , в результате чего при неизменном напряжении задания скорости  $U_{зд}$  увеличивается  $U_y$  и, соответственно,  $U_d$ . Увеличение же напряжения  $U_d$  на выходе тиристорного преобразователя и на обмотке якоря двигателя приводит к восстановлению заданной скорости.

Подробное описание электропривода системы ТП-Д с обратными связями приведено в работе [ 6 ].

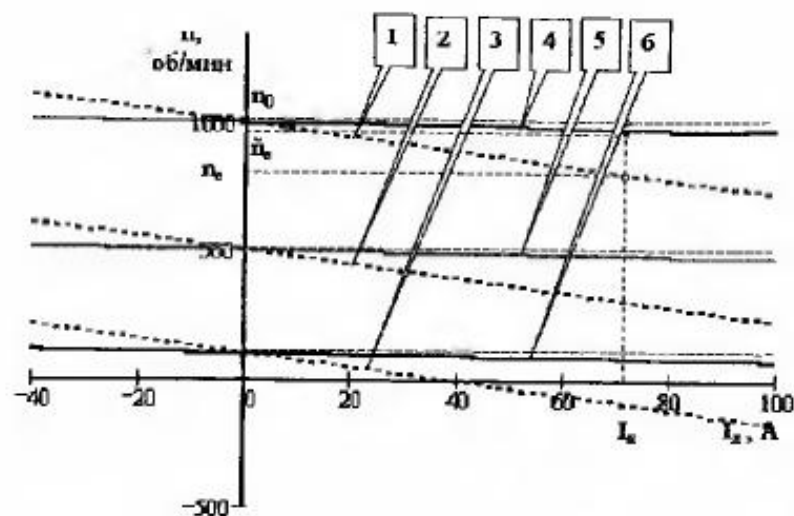
На рис. 16 в качестве примера приведены графики электромеханических характеристик привода системы ТП – Д с отрицательными обратными связями по скорости и без них.

На графиках видно, что введение обратной связи по скорости в несколько раз уменьшает статизм характеристик, за счет этого в несколько раз увеличивается диапазон регулирования скорости.

#### *Схема установки для исследования электропривода*

Для исследования электропривода системы ТП-Д на мнемосхеме собирается электрическая схема (рис. 17), включающая схему электропривода типа ЭТ – 6 и схему электромеханического тормоза.





- 1 – естественная х-ха без обратной связи,  $U_d = U_H$ ,  $\Phi = \Phi_H$ ;
- 2 – искусственная х-ха без обратной связи,  $U_d = 0.5U_H$ ,  $\Phi = \Phi_H$ ;
- 3 – искусственная х-ха без обратной связи,  $U_d = 0.1U_H$ ,  $\Phi = \Phi_H$ ;
- 4 – искусственная х-ха с обр. связью по скорости,  $U_d = U_H$ ,  $\Phi = \Phi_H$ ;
- 5 – искусственная х-ха с обр. связью по скорости,  $U_d = 0.5U_H$ ,  $\Phi = \Phi_H$ ;
- 6 – искусственная х-ха с обр. связью по скорости,  $U_d = 0.1U_H$ ,  $\Phi = \Phi_H$ ;

Рисунок 16 – Графики электромеханических характеристик электропривода системы ТП – Д

Схема установки для исследования электропривода содержит следующие электрические аппараты и приборы:

- M2 - электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения;
- QF4 – автоматический выключатель для подачи тока в обмотку возбуждения LM2 двигателя M2;
- асинхронный двигатель M1, предназначенный для создания регулируемой механической нагрузки на валу двигателя M2;

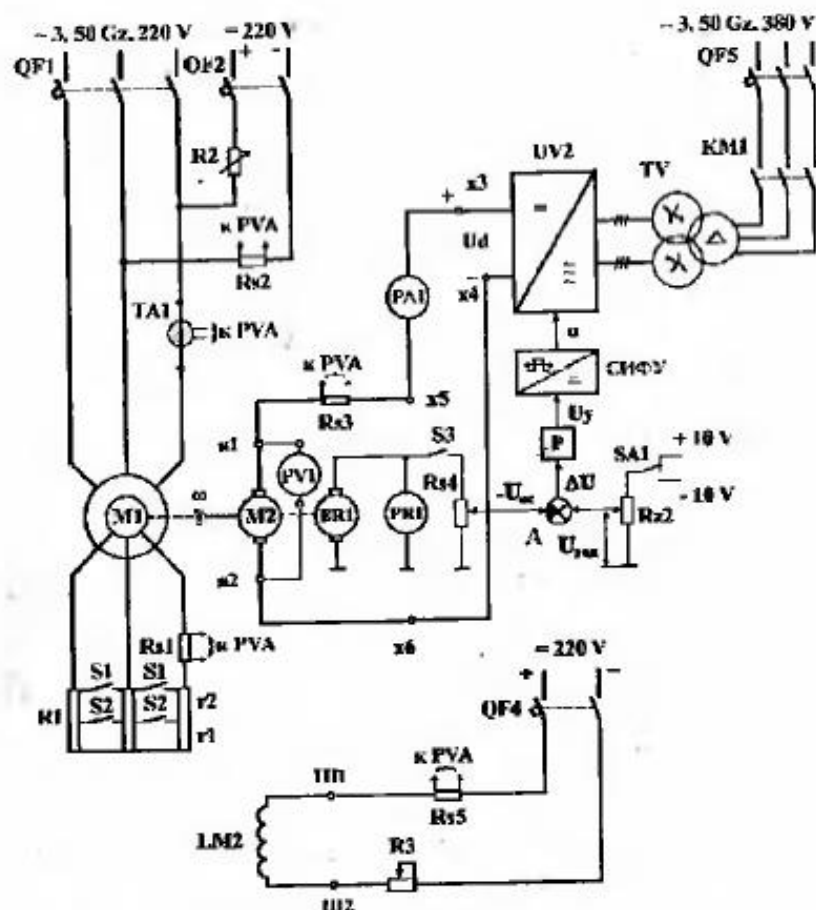


Рисунок 17 – Принципиальная электрическая схема установки для исследования электропривода системы ТП - Д

- QF2 - автоматический выключатель для включения цепи динамического торможения двигателя M1;
- QF5 - автоматический выключатель для включения согласующего трансформатора TV, питающего тиристорный преобразователь UV2;
- KM1 – магнитный контактор для включения согласующего трансформатора TV, питающего тиристорный преобразователь UV2;

- UV2 – силовой блок тиристорного преобразователя типа ЭТ-6 для преобразования силового переменного тока в выпрямленный ток;
- СИФУ – система импульсно-фазового управления для формирования управляющих импульсов 12 тиристоров, собранных по реверсивной схеме Ларионова в силовом блоке UV2;
- Р – пропорционально - интегральный регулятор для формирования оптимального закона регулирования скорости;
- А – суммирующий усилитель, выполняющий функции суммирования сигнала задания  $U_{зад}$  с сигналом отрицательной обратной связи по скорости  $U_{ср}$  в соответствии с уравнением (41);
- SA1 – переключатель знака сигнала задания для выбора направления вращения двигателя M2;
- Rz2 – переменный резистор, выполняющий функции ручного задания сигнала  $U_{зад}$ , (задатчик скорости);
- амперметр PA1 – для измерения тока якоря двигателя M2;
- вольтметр PV1 – для измерения напряжения на обмотке якоря двигателя M2;
- тахогенератор BR1 и тахоуказатель PR1 – для измерения частоты вращения валов двигателей M1 и M2.

## 5.2 Порядок выполнения работы

5.2.1 Ознакомиться с силовым электрооборудованием и записать его технические данные. Уяснить назначение каждого элемента принципиальной схемы. Собрать схему испытания электропривода в двигательном режиме (рис. 17).

При сборке схемы следует помнить, что все элементы мнемосхемы электрически соединены.

5.2.2 Запустить электропривод системы ТП – Д.

## Порядок запуска электропривода системы ТП – Д

- 1 В исходном положении все выключатели стенда находятся в отключенном состоянии.
- 2 Автоматическим выключателем QF4 включают цепь питания обмотки возбуждения LM2.
- 3 Регулятором R3 устанавливают номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя M2.

**Примечание.** Помните, что ДПТ без возбуждения входит в состояние «разноса», т.е. его скорость недопустимо возрастает!

- 4 Включают автоматический выключатель QF4.
- 5 Задатчик скорости Rz1 устанавливают в нулевое положение.
- 6 Кнопкой управления SB(KM1) на нижней панели стенда включают магнитный контактор KM1.
- 7 Кнопкой управления SB(UV2) на нижней панели стенда включают тиристорный преобразователь UV2.
- 8 Переключателем знака сигнала задания SA1 выбирают направление вращения двигателя M2.
- 9 Задатчиком скорости Rz2 по показаниям вольтметра PV1 устанавливают необходимое по условиям эксперимента напряжение ТП.

5.2.3 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода системы ТП – Д от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при номинальных параметрах двигателя ( $U_d = U_n$ ,  $\Phi = \Phi_{ном}$ ) с отрицательной обратной связью по скорости и без обратной связи.

Для исследования параметров естественной электромеханической характеристики  $n = f(I_a)$  привода задатчиком скорости Rz2 по показаниям вольтметра PV1 устанавливают номинальное напряжение ТП, а регулятором R3 – номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя M2.

Механическая нагрузка на валу двигателя постоянного тока M2 создается асинхронным двигателем M1 в режиме динамического торможения.

Для введения асинхронного двигателя М1 в режим динамического торможения необходимо его статорную обмотку подключить выключателем QF2 к цепи постоянного тока.

**Тормозной момент**, создаваемый двигателем М1 на валу испытуемого двигателя М2, можно регулировать в интервале от момента холостого хода  $M_0$  до номинального момента  $M_n$  изменением сопротивления R2 в цепи динамического торможения. Учитывая линейность графиков механических характеристик привода (см. формулу (43) и графики рис. 16), достаточно исследовать каждую характеристику по двум опытам, т.е. при двух нагрузках: при токе якоря, равном току холостого хода ( $I_a = I_0$ ), и при токе, равном любому значению в интервале  $(0.5 \dots 1.5)I_n$ . Цель обратной связи по скорости выключается ключом S3.

Экспериментально полученные данные заносятся в табл. 13.

*5.2.4 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при  $U_d = 0.5U_n$ ,  $\Phi = \Phi_n$  с отрицательной обратной связью по скорости и без нее.*

Для исследования этой электромеханической характеристики привода задатчиком скорости Rz2 по показаниям вольтметра PV1 устанавливают напряжение ТП, равное половине номинального, а регулятором R3 – номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя М2.

Механическую нагрузку создают также нагрузочным двигателем М1 в режиме динамического торможения и изменяют ее регулятором R2.

Обратная связь по скорости выключается ключом S3.

Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл. 13.

Таблица 13 – Данные исследования электропривода системы ТП – Д

Ном. опыта	Измеренные величины				Расчетные величины			Примечания
	$I_a$ А	$I_n$ А	$U_d$ В	$n$ , об/мин	$\omega$ , рад/с	$M$ , Н·м	$\delta\omega$ , %	
1								Естественная характеристика
2								
3								$U_d = 0.5U_n$ , $\Phi_M = \Phi_{ном}$
4								
5								$U_d = 0.2U_n$ , $\Phi_M = \Phi_{ном}$
6								
7								$U_d = U_n$ , $\Phi_M = 0.5\Phi_{ном}$
8								

*5.2.5 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала двигателя от механической нагрузки при  $U_d = 0.2U_n$ ,  $\Phi = \Phi_n$  с отрицательной обратной связью по скорости и без нее.*

Для исследования этой электромеханической характеристики  $n = f(I_a)$  привода задатчиком скорости Rz2 по показаниям вольтметра PV1 устанавливают напряжение ТП, равное 20% от номинального, а регулятором R3 – номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя М2.

Механическую нагрузку создают также нагрузочным двигателем М1 в режиме динамического торможения и изменяют ее регулятором R2.

Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл. 13.

*5.2.6 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода от механической нагрузки  $n = f(I_a)$  при  $U_d = U_n$ ,  $\Phi = 0.5\Phi_n$  с отрицательной обратной связью по скорости и без нее.*

Для исследования этой электромеханической характеристики привода задатчиком скорости Rz2 по показаниям вольтметра PV1 устанавливают

номинальное напряжение ТП, а регулятором R3 – ток возбуждения двигателя M2, равный половине номинального (максимального).

Механическую нагрузку создают также нагрузочным двигателем M1 в режиме динамического торможения и изменяют ее регулятором R2.

Экспериментальные данные двух опытов заносятся в табл. 13.

5.2.7 Исследовать экспериментально регулировочные характеристики  $U_d(u_{\text{вд}})$ ,  $n(U_d)$  и  $n(u_{\text{вд}})$  электропривода системы ТП - Д.

Регулировочные характеристики  $U_d(u_{\text{вд}})$ ,  $n(U_d)$  и  $n(u_{\text{вд}})$  исследуют одновременно, под нагрузкой  $M \approx 0,2M_n$ , т.е. с обеспечением работы ТП за зоной прерывистых токов.

Задатчиком скорости R22 плавно по показаниям вольтметра PV1 изменяют напряжение ТП от нуля до номинального значения с интервалами, равными 20 В.

Экспериментальные данные семи опытов заносятся в таблицу 14. Таблица 14 – Данные экспериментальных исследований регулировочных характеристик электропривода системы ТП - Д

Номер опыта	$U_d, В$	$u_{\text{вд}}, В$	$\alpha, \dots^0$	$n, \text{ об / мин}$	Примечания
1	0	0		0	
2					
3					
4					
5					
6					
7					

5.2.8 Определить экспериментально коэффициент кФ.

Значение коэффициента кФ определяется в следующем порядке.

1 Отключить электропривод ТП - Д. Разобрать схему электропривода (вольтметр PV1 не отключать!).

2 Реостатом R3 установить номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя M2.

3 Запустить двигатель M1.

4 Зафиксировать в протоколе значения ЭДС и скорости двигателя M2.

### 5.3 Обработка экспериментальных исследований и содержание отчета

Целью исследования электропривода является экспериментальное установление функциональных зависимостей его выходных координат от внутренних и внешних возмущений.

Графики функциональных зависимостей дают наглядное представление о влиянии всех возмущений (изменения механической нагрузки, магнитного потока двигателя, напряжения генератора) на выходные координаты привода – вращающий момент и скорость.

Графики механических и регулировочных характеристик в отчете представляют по расчетным данным табл. 13, 14, определяемым по формулам (5), (7), (10), (38).

#### Содержание отчета:

- принципиальная электрическая схема установки для исследования электропривода;
- паспортные данные тиристорного преобразователя и двигателя, аппаратов и приборов;
- таблицы с результатами исследований и расчетами;
- графики естественных и искусственных механических характеристик по данным табл. 13 в одной системе координат;
- графики регулировочных характеристик по данным табл. 14;
- выводы по результатам исследований.

#### 5.4 Контрольные вопросы

- 1 Какие преимущества электропривода системы ТП-Д по сравнению с электроприводом системы Г-Д?
- 2 Объясните принцип действия, назначение каждого элемента принципиальной схемы установки
- 3 Какой способ регулирования скорости вращения вала двигателя используется в электроприводе системы ТП-Д?
- 4 Для чего в систему управления электроприводом вводится отрицательная обратная связь по скорости?
- 5 Объясните, за счет чего в электроприводе с замкнутой обратной связью уменьшается статизм механических характеристик?
- 6 Чему равны углы управления  $\alpha$  при  $u_{\text{зад}1} = -3 \text{ В}$  и  $u_{\text{зад}2} = +7 \text{ В}$  при активной нагрузке ТП?
- 7 Чему будут равны показания всех приборов в схеме электропривода при  $u_{\text{зад}1} = -6 \text{ В}$  и  $u_{\text{зад}2} = +4 \text{ В}$  и нагрузке привода  $P_{\text{мех}} = 1.5P_{\text{ном}}$ ?

#### 6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14

##### ИЗУЧЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО КОМПЛЕКТА "ЭЛЕКТРОНИКА К1-20" (МС 27-02)

**Цель работы:** изучить структуру и принцип работы микропроцессорной системы как элемента управления электроприводом и получить представление об основах программирования микропроцессорных систем в машинных кодах и на языке Ассемблер.

#### 6.1 Общие указания

Микропроцессор (МП) - это устройство, состоящее из одной или нескольких полупроводниковых интегральных микросхем, обрабатывающее

информацию в цифровом виде по предварительно разработанной программе.

Программа для микропроцессора - это записанные в строгой последовательности адреса (или порядковые номера), команды и данные в виде слов, кодов или чисел в зависимости от конкретного языка программирования.

Для большинства микропроцессоров программы составляются в машинных кодах или на языке Ассемблер.

Микропроцессорную систему, используемую для управления технологией, иногда называют контроллером.

Программа в МП вводится с помощью устройства ввода и записывается в устройстве памяти.

Посредством устройства управления из памяти последовательно выбираются команды и данные; они обрабатываются в арифметическо-логическом устройстве (АЛУ), результаты обработки передаются в соответствующие блоки или через устройство вывода - к объекту управления.

Информация в МП в цифровом виде (физически - в кодированной последовательности импульсов) от блока к блоку передается по 16-разрядной шине адреса и 8-разрядной шине данных.

Все операции в МП выполняются последовательно и синхронизируются во времени с помощью специального генератора синхроимпульсов (СИ), входящего в состав устройства управления.

Всегда следует помнить, что в МП отдельные операции и команды начинают выполняться только по совпадению с очередным синхроимпульсом, следовательно частота выполнения даже простейших логических операций не превышает частоты генератора синхроимпульсов.



Микропроцессорные системы отличаются скоростями выполнения операций, зависящими от разрядностей МП и частот генераторов СИ, емкостями оперативной и постоянной памяти, интерфейсами.

Более подробно сведения о логическом и аппаратном обеспечении, структуре и работе блоков МП приведены в литературе [7-10]

Ниже приводятся краткие сведения об аппаратном и программном обеспечении простейшей микропроцессорной системы (МПС) типа "Электроника К1-20 (МС2702)" по данным источников [9-10].

### 6.2 Назначение и структура контроллера программируемого универсального "Электроника К1-20"

Контроллер программируемый универсальный "Электроника К1-20" (ЭК1-20) относится к микропроцессорным средствам общего назначения и может быть использован как отладочное средство при разработке программного и аппаратного обеспечения микропроцессорных систем, а также в составе систем управления технологическими процессами, в контрольно-измерительном и другом оборудовании.

Упрощенная структурная схема ЭК1-20 показана на рис. 18.

ЭК1-20 выполнен на основе микропроцессорных комплектов и интегральных схем серий КР580, К589, К565, К155 и др.

Центральным процессорным блоком в ЭК1-20 является однокристалльный восьмиразрядный микропроцессор КР580ИК80А.

Это определяет структурные особенности, интерфейс и систему команд.

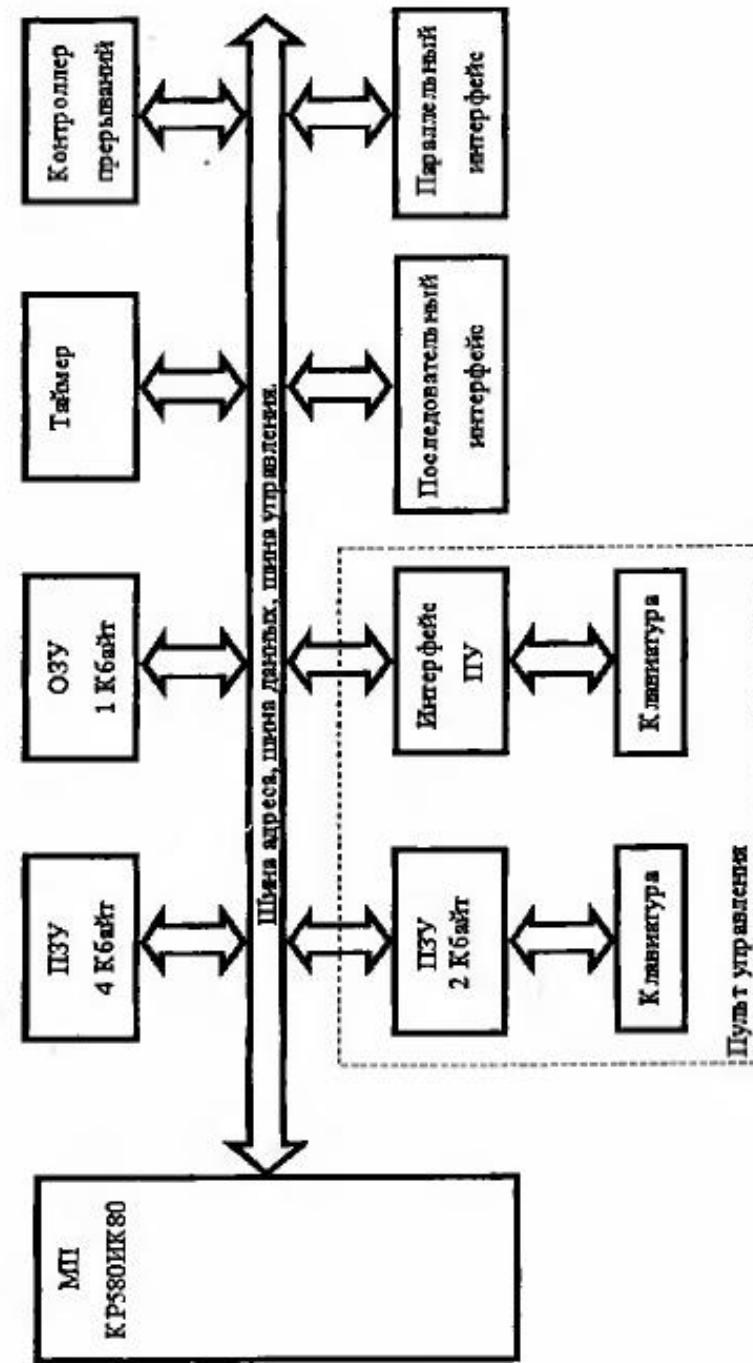


Рисунок 18 – Упрощенная структурная схема ЭК1 – 20 и гудь та угравления

В минимальный состав оборудования ЭК1-20 входят: оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) емкостью 1 Кбайт, постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) емкостью 6 Кбайт, из них в пульте управления расположено ПЗУ емкостью 2 Кбайта.

На рис. 19 представлена адресация полей памяти ЭК1-20. Из рис.18 следует, что отлаживаемые программы пользователя могут размещаться в ОЗУ с адреса 2100<sub>16</sub> по адрес 23FF<sub>16</sub> (индекс 16 указывает на шестнадцатиричную систему счисления).

Конструкции ЭК1-20 позволяют увеличивать емкость ПЗУ до 12 Кбайт и подключать через разъемы различные периферийные устройства.

В ЭК1-20 предусмотрены:

- один программируемый последовательный канал ввода и один канал вывода;
- 48 программируемых параллельных шин ввода-вывода (из них 4 шины ввода и 4 шины вывода имеют гальваническую развязку);
- три 16-разрядных интервальных счетчика с программной установкой режимов в составе БИС таймера;
- один контроллер прерываний, обрабатывающий восемь сигналов прерываний (возможно увеличение числа сигналов прерываний до 24).

Программа, управляющая работой ЭК1-20, называется "Монитор". Она находится в ПЗУ, предоставляет пользователю возможность контроля и отладки программ в кодах МП К580ИК80.

Пользователь имеет возможность записать программу в ОЗУ ЭК1-20 и выполнить ее либо в режиме отладки (в пошаговом режиме или с остановом по заданным значениям адресов - контрольным точкам), либо без использования отладочных средств ЭК1-20 - в непрерывном режиме.

Адрес	Тип памяти	Назначение областей памяти
0000	ПЗУ 4 Кбайта	Программы новой реализации, тесты контроля ЭК1-20, библиотека стандартных подпрограмм
0FFF		
2000	ОЗУ	Служебная часть ОЗУ, используемая монитором
2100		
23FF	1 Кбайт	Память для записи программ пользователя
3000	ПЗУ	Программа - монитор, управляющая работой ЭК1-20
3FFF 4000		
FFFF	ПЗУ	Возможно с расширением памяти

Рисунок 19 - Поля памяти ЭК1 - 20

В программное обеспечение входят также тесты контроля работоспособности ЭК1-20 и библиотека подпрограмм обработки чисел с плавающей запятой.

### 6.2.1 Пульт управления

Для осуществления диалога пользователя с ЭК1-20 к нему через разъем подключается пульт управления.

На пульте управления (рис. 20) расположены:

- индикатор, состоящий из девяти разрядов для отображения шестнадцатиричных цифр, знаков и букв латинского алфавита (нумерация разрядов-слева направо);
- клавиатура, состоящая из 4 командных клавиш и 16 клавиш данных.

### 6.2.2 Клавиатура пульта управления

16 клавиш данных служат для ввода в ЭК1-20 шестнадцатиричных цифр (от 0 до F). Назначение командных клавиш приведено в табл. 45. Особенности использования командных клавиш рассмотрены в разд.

### 6.2.3

13 клавиш данных (от 4 до F) могут быть использованы для ввода директив монитора после нажатия клавиши #.

Использование директив монитора при вводе и выполнении программ приведено в разд. 6.3...6.7.

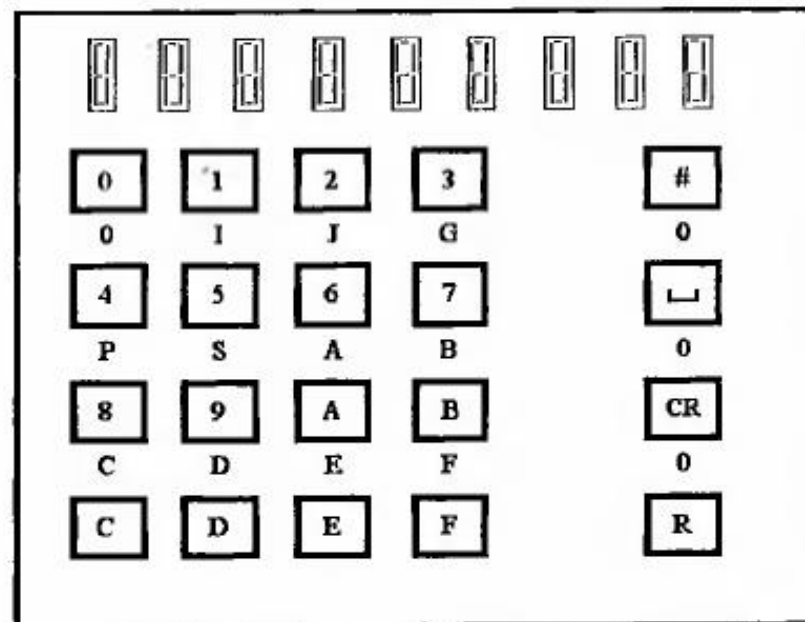


Рисунок 20 – Пульт управления ЭК1 – 20

### 6.2.3 Индикатор

Индикатор, расположенный в верхней части пульта управления, выполнен на девяти светодиодах семисегментных элементах (см. вверху на рис. 20). Для отображения алфавитно-цифровой информации, т.е. цифр 0-9 и букв A - F, недостаточно семи сегментов, поэтому для букв B и D используют стилизованное обозначение:

B – b; D – d.

Информация, высвечиваемая в разных разрядах индикатора, зависит от выполняемой директивы монитора.

Таблица 15 – Назначение клавиш пульта управления

Номер пункта	Название клавиши	Обозначение	Назначение клавиши
1	Сброс	R	Формирует сигнал начальной установки (сброса) для ЭК1-20
2	Переход к монитору	#	Вызывает программу "Монитор"
3	Следующий	□	Осуществляет переход: - при индикации регистра микропроцессора к следующему регистру; - при индикации ячейки памяти к следующей ячейке; - при вводе директив монитора к следующему параметру директивы
4	Выполнение директивы	CR	Передаёт управление на выполнение ранее введенной директивы монитора

### 6.3 Порядок работы на ЭК1-20

1 Включить питание.

#### Внимание!

Напряжения питания на ЭК1-20 должны подаваться одновременно или в последовательности -5В, +5В, +12В. В противном случае устройство будет испорчено.

2 Запустить программу "Монитор":

а) нажать клавишу R (сброс). В разряде I индикатора появится символ " 8 " ;

б) нажать клавишу #.

В разряде I индикатора появится символ " - ", что свидетельствует о готовности системы к работе.

3 Выполнить тесты проверки ЭК1-20 (см. разд. 6.7.3).

4 Записать отлаживаемую программу в ОЗУ (см. разд. 6.4).

5 Отладить программу (см. разд. 6.5 – 6.7).

6 Выключить питание в конце работы.

#### Внимание!

Выключение напряжений питания ЭК1-20 производится одновременно или в последовательности +12В, +5В, -5В.

### 6.4 Действия на пульте управления ЭК-20 при вводе программ в память

#### 6.4.1 Порядок набора командных клавиш

Диалог "ЭК1-20 - пользователь" осуществляется при помощи директив монитора, вводимых посредством командных клавиш с пульта управления. Последовательность набора командных клавиш представлена ниже:

1 Нажать клавишу #. При этом в разряде I индикатора появится символ "-".

2 Нажать клавишу, над которой записано выбранное имя директивы. При этом символ " - " индикатора заменяется на набранный символ директивы.

3 Ввести, если потребуется, одно- или двухбайтные параметры через разделитель-клавишу □. При этом в разряде 9 индикатора высвечивается номер вводимого параметра директивы.

4 Нажать клавишу CR. При этом передается управление монитору на исполнение заданной директивы.

5 Нажатие клавиши # прекращает выполнение монитором заданной директивы.

Основные команды ЭК1-20 приведены в табл.15.

#### 6.4.2 Ошибки пользователей

1 При неверных действиях пользователей на пульте ЭК1-20 во всех разрядах индикатора появляется символ " 7 ", свидетельствующий об ошибке. Для исправления ошибки надо:

- повторно вызвать монитор, нажав клавишу # ;
- заново набрать нужную директиву.

2 При вводе значений параметра директивы каждая новая цифра вводится в младший (самый правый разряд поля, отведенного под индикацию параметра), а предыдущая информация – на одну позицию влево.

Цифры, выходящие слева за формат параметра, теряются, следовательно, если в процессе ввода параметра допущена ошибка, можно не нажимать клавишу # , а продолжать ввод до тех пор, пока на индикаторе не окажется нужное значение.

#### 6.4.3 Чтение содержимого ячеек памяти

Для чтения содержимого ячейки памяти с адресом NNNN необходимо нажать следующие клавиши: # S NNNN  $\square$ .

**Примечание.** Здесь и далее буквой " N " обозначается код, соответствующий нажатой клавише данных. Знаком " ? " обозначается какая-то ранее записанная или случайная информация. При этом адрес ячейки высвечивается в разрядах 2-5 индикатора, содержимое ячейки - в разрядах 7-8.

##### Пример 1

Прочитать содержимое ячейки памяти с адресом 209F<sub>16</sub>. Последовательность действий приведена в табл. 16

Таблица 16 – Последовательность действий при чтении содержимого ячейки памяти с адресом 209F<sub>16</sub>

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
#	-										Ввод адреса ячейки памяти 209F <sub>16</sub>
S	S										
2	S				2						
0	S			2	0						
9	S		2	0	9						
F	S	2	0	9	F						
	S	2	0	9	F		?	?			Содержимое ячейки 206F <sub>16</sub> в разр. 7-8

Нажатие клавиши  $\square$  выведет на индикатор содержимое следующей ячейки памяти (табл. 17).

Таблица 17 - Чтение содержимого ячейки по следующему адресу

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\square$	S	2	0	9	F		?	?		Исходный адрес
	S	2	0	A	0		?	?		Следующий адрес

#### 6.4.4 Чтение содержимого регистров МП

Для чтения содержимого регистров МП необходимо нажать следующие клавиши: # E  $\square$ .

При этом в разряде 3 индикатора появится символ регистра А, а в разрядах 5-6 - его содержимое (А - аккумулятор).



При повторном нажатии клавиш  $\square$  последовательно индицируется содержимое следующих регистров:

A - аккумулятор;

B, C, D, E, H, L - регистры общего назначения - РОНЫ;

F - регистр флажков;

P - счетчик команд (PC);

S - указатель стека (SP):

После индикации регистра S при нажатии клавиши  $\square$  вновь индицируется регистр A.

### Пример 2

Прочитать содержимое регистров МП.

Порядок действий по чтению содержимого регистров A, B, C приведен в табл. 18.

Таблица 18 - Порядок действий по чтению содержимого регистров A, B, C

Клавиши	Информация на индикаторе.									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
#	-									Последовательный просмотр регистров МП A,B,C...
E	E									
$\square$	E		A		?	?				
$\square$	E		B		?	?				
$\square$	E		C		?	?				
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	

### 6.4.5 Запись программы в память

Для набора адреса NNNN выбранной ячейки памяти необходимо нажать следующие клавиши: # S NNNN  $\square$ .

После этого на индикаторе появятся: в разряде 1 - символ S, в разрядах 2-5 - адрес ячейки памяти, в разрядах 7-8 - ее содержимое.

#### Пример 3

Установить адрес ячейки памяти № 2100<sub>16</sub>.

Порядок установки адреса ячейки памяти № 2100<sub>16</sub> приведен в табл. 19.

Таблица 19 - Порядок установки адреса ячейки памяти № 2100<sub>16</sub>

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечание
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
#	-									При вводе цифры адреса на индикаторе сдвигаются влево
S	S									
2	S				2					
1	S			2	1					
0	S		2	1	0					
0	S	2	1	0	0					
—	S	2	1	0	0		?	?		

Для ввода данных в ячейку памяти необходимо нажать две клавиши данных.

#### Пример 4

В ячейку 2100<sub>16</sub> записать код 36<sub>16</sub>.

Порядок записи данных в ячейку памяти № 2100<sub>16</sub> приведен в табл.20.

Таблица 20 - Порядок записи данных в ячейку памяти № 2100<sub>16</sub>

Клавиши	Информация на индикаторе.									Примечание
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
# S 2100	S	2	1	0	0		?	?		Код 36 записан в ячейку 2100 <sub>16</sub>
3	S	2	1	0	0		?	3		
6	S	2	1	0	0		3	6		

Для перехода к адресу следующей ячейки памяти следует нажать клавишу  $\square$  (табл. 21).

Таблица 21 - Порядок перехода к адресу следующей ячейки памяти

Клавиши	Информация на индикаторе.									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	S	2	1	0	0		3	6		Исходный адрес 2100 <sub>16</sub>
$\square$	S	2	1	0	1		?	?		Следующий адрес 2101 <sub>16</sub>
$\square$	S	2	1	0	2		?	?		Следующий адрес 2102 <sub>16</sub>
...										Следующий адрес 2103 <sub>16</sub>

#### 6.4.6 Запись информации в регистры МП К580

Для записи информации в регистр МП необходимо нажать по порядку следующие клавиши:

- 1 # E ;
- 2 Последовательно нажатием клавиши  $\square$  вывести на индикацию необходимый регистр МП.
- 3 Для ввода информации в регистр нажать две шестнадцатиричные клавиши данных.

#### Пример 5

В регистр С записать код 78<sub>16</sub>.

Порядок действий на пульте при записи кода 78<sub>16</sub> в регистр С приведен в табл. 22.

Таблица 22 - Порядок действий при записи кода 78<sub>16</sub> в регистр С

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
#	-									Всегда первым индицируется регистр А
E	E									
$\square$	E		A		?	?				
$\square$	E		B		?	?				
$\square$	E		C		?	?				В регистр С записан код 78 <sub>16</sub>
7	E		C		?	7				
8	E		C		8	7				

#### 6.5 Выполнение программы в пошаговом режиме

При выполнении программы в пошаговом режиме происходит останов после каждой команды.

Для выполнения программы в пошаговом режиме необходимо:

- 1 Задать пошаговый режим, нажав следующие клавиши: # J CR
- 2 Задать начальный адрес программы NNNN, нажав клавиши: # G NNNN CR
- 3 Нажать клавишу  $\square$ .

После выполнения очередной команды программы пользователя произойдет останов. На индикаторе отобразится новое значение счетчика команд в разрядах 3 - 6 и символ "≡" в разряде 9, свидетельствующий о выполнении программы в пошаговом режиме.

4 Повторить пункт 3 для всех команд программы, прослеживая порядок выполнения команд.

5 После выполнения программы посмотреть содержимое ячеек памяти или регистров, где содержится результат.

**Пример 6**

Сложить два числа:  $08_{16}$  и  $10_{16}$ .

Программа сложения двух чисел  $08_{16}$  и  $10_{16}$  приведена в табл. 23.

Таблица 23 – Программа сложения двух чисел  $08_{16}$  и  $10_{16}$

Адрес	Код	Мнемоника	Примечания
2100H	3E	MVI A	Запись в A кода $08_{16}$
2101H	08	08	
2102H	06	MVI B	Запись в B кода $10_{16}$
2103H	10	10	
2104H	80	ADD B	Сложение (A) и (B)
2105H	00	NOP	Пустая операция

Процесс записи программы в память показан в табл. 24.

Таблица 24 – Порядок записи программы примера 6 в ОЗУ

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
R	8										Сброс ЭК1-20
#	-										Готовность к работе
S	S										Установка начального адреса программы $2100_{16}$
2	S				2						
1	S			2	1						
0	S		2	1	0						
0	S	2	1	0	0						

Продолжение таблицы 24

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
□	S	2	1	0	0		?	?		Ввод кода первой команды 3E
3	S	2	1	0	0		?	3		
E	S	2	1	0	0		3	E		
□	S	2	1	0	1		?	?		Переход к сл. ячейке
0	S	2	1	0	1		?	0		Ввод кода второй команды 08
8	S	2	1	0	1		0	8		
□	S	2	1	0	2		?	?		Переход к сл. ячейке
0	S	2	1	0	2		?	0		Ввод кода второй команды 06
6	S	2	1	0	2		0	6		
□	S	2	1	0	3		?	?		Переход к сл. ячейке
...	...	...	...	...	...		...	...		И так далее ...

Выполнение программы в пошаговом режиме приведено в табл. 25.

Таблица 25 – Выполнение программы в пошаговом режиме

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
#	-									Установка пошагового режима
J	J									
CR	J								≡	
#	-								1	Установка начального адреса программы
G	G								1	
2	G					2			1	
1	G				2	1			1	
0	G			2	1	0			1	
0	G		2	1	0	0			1	

Продолжение таблицы 25

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
CR	G	2	1	0	1					=	Выполнена 1 команда
□	G	2	1	0	2					=	Выполнена 2 команда
□	G	2	1	0	3					=	Выполнена 3 команда
□	G	2	1	0	...					=	...

Таблица 26 – Порядок чтения содержимого регистра с результатами

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
#	-										Установка режима просмотра регистров
E	E										Результат
□	E		A		1	8					Одно из слагаемых
□	E		B		1	0					

### 6.6 Выполнение программы в непрерывном режиме

В ЭК1-20 имеется возможность выполнения программ в непрерывном режиме, т.е. в реальном масштабе времени без замедления из-за подключения монитора.

Для того чтобы после окончания программы произошло прерывание и обращение к программе «Монитор», необходимо в качестве последней команды программы использовать не команду останова HLT, а команду RSTO (ее код C7<sub>16</sub>).

### Внимание!

Организация программы «Монитор» не позволяет сохранять результаты выполнения программы в непрерывном режиме в ячейках памяти РОН из-за того, что значения всех регистров при вызове монитора обнуляются.

Прочитать содержимое ячеек памяти, где хранятся результаты, можно с помощью директивы монитора S.

Для выполнения программы в непрерывном режиме необходимо нажать следующие клавиши: # G NNNN CR, где NNNN - начальный адрес программы.

### 6.7 Дополнительные возможности системы программного обеспечения ЭК1-20

Программа-монитор предоставляет пользователю ряд дополнительных возможностей при выполнении и отладке программы.

#### 6.7.1 Индикация содержимого ячейки памяти в процессе выполнения отлаживаемых программ

Для индикации содержимого интересующей пользователя ячейки памяти с адресом NNNN необходимо установить соответствующий режим работы монитора, нажав следующие клавиши:

# D NNNN CR.

При этом происходит индикация содержимого ячейки памяти, высвечиваемая информация меняется при каждом изменении содержимого данной ячейки. Можно использовать этот режим для визуального наблюдения изменения любого параметра в процессе выполнения программы.

### Пример 7

Вывести на индикацию содержимое ячейки памяти с адресом  $2100_{16}$ .

Команды для исполнения этого режима приведены в табл. 27.

Таблица 27 – Порядок установки режима индикации содержимого ячейки с адресом  $2100_{16}$

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
# D	D									В разрядах 7-8 индицируется содержимое ячейки $2100_{16}$ , изменяющееся в ходе выполнения программы
2100	D	2	1	0						
CR	D	2	1	0		A	6			
	D	2	1	0		A	5			

### 6.7.2 Заполнение области памяти постоянными значениями (константами)

Для записи некоторого числа в несколько ячеек памяти необходимо нажать следующие клавиши:

# F  $N_1N_1N_1N_1$   $\square$   $N_2N_2N_2N_2$   $\square$   $N_3N_3CR$ ,

где  $N_1N_1N_1N_1$  - начальный адрес области памяти;

$N_2N_2N_2N_2$  - конечный адрес области памяти;

$N_3N_3$  - константа.

После записи константы можно просмотреть содержимое памяти, нажав клавиши # S  $N_1N_1N_1N_1$ .

### Пример 8

Записать в область памяти, начиная с адреса  $2120_{16}$ , семь чисел  $OF_{16}$ .

Порядок организации записи семи чисел  $OF_{16}$  в ячейки памяти, начиная с адреса  $2120_{16}$ , приведен в табл. 28.

Таблица 28 – Порядок организации записи семи чисел  $OF_{16}$  в ячейки памяти, начиная с адреса  $2120_{16}$

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
# F	F								1	Ввод начального адреса области
2120	F		2	1	2	0			1	
$\square$	F								2	Ввод конечного адреса области
2127	F		2	1	2	7			2	
$\square$	F								3	Ввод константы для занесения в область
OF	F				0	F			3	
CR	F									Операция записи константы выполн.
#S2120	S	2	1	2	0		0			
$\square$	S	2	1	2	1		0	F		Просмотр области памяти

### 6.7.3 Проверка работоспособности ЭК1-20

Для вызова программы контроля работоспособности ЭК1-20 надо нажать следующие клавиши: # P CR.

При прохождении тест-программы ЦП, ОЗУ, и ПЗУ ЭК1-20 на индикаторе последовательно выводится значение "1" во 2-4 разрядах индикатора соответственно. Если при этом одновременно индицируется "0" в 6-м, 7-м или 9-м разряде индикатора, то это указывает на неисправность или сбой в ЦП, ОЗУ или ПЗУ соответственно. Если устройство исправно, то в разрядах 6, 7, 8 будут пробелы.



### Пример 9

Выполнить тест ЭК1-20. Команды и результаты тестирования МП приведены в табл. 29.

Таблица 29 – Команды и результаты тестирования МП

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
# PCR	P	1								Тесты прошли успешно
	P		1							
	P			1						
или										Сбой теста ЦП
	P	1				0				

### 6.7.4 Выполнение тестов проверки пульта ЭК1 - 20

Для вызова программ тестов клавиатуры и индикатора пульта управления следует нажать клавиши:

# B CR NN...,

где N - любая клавиша клавиатуры.

При этом происходит индикация набранного символа во всех разрядах индикатора.

### Пример 10

Выполнить тест пульта управления.

Порядок установки режима тестирования пульта управления и результаты тестирования показаны в таблице 30.

Таблица 30 – Установка режима и результаты тестирования пульта управления

Клавиши	Информация на индикаторе									Примечания
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
# B CR	B									Режим теста пульта
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Проверка клавиши 1
A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	Проверка клавиши A
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Соответственно, для проверки работоспособности всего пульта необходимо 20 раз повторить тест, заменяя N соответствующей клавишей.

### 6.7.5 Ввод - вывод информации

Если к ЭК1-20 через один из разъемов подключено внешнее устройство, то имеется возможность ввода-вывода информации в регистр, адрес которого задается с пульта управления.

1 Для ввода информации из регистра NN внешнего устройства на индикатор необходимо нажать клавиши: # I NN CR.

2 Для вывода байта данных  $N_1N_1$  на регистр NN внешнего устройства необходимо нажать клавиши: # 0 NN  $\square$   $N_1N$  CR.

## 6.8 Система команд микропроцессора KS80HK80

### 6.8.1 Группа команд пересылки данных

Команды пересылки не формируют признаков F (S, Z, P, C, C').

Команда MOV - пересылка из регистра в регистр, из регистра в память, из памяти в регистр.

Список команд пересылки данных из регистра в регистр, из регистра в память, из памяти в регистр в 16-ом коде (H – коде) приведен в табл. 31. В ней обозначено: R<sub>2</sub> – регистр – источник данных, R<sub>1</sub> – регистр – приемник данных.

Таблица 31 – Команды пересылки данных из регистра в регистр, из регистра в память, из памяти в регистр

Команда	Регистр – источник операнда								Примечания
	A	B	C	D	E	H	L	M	
MOV R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub>									
MOV A, R <sub>2</sub>	7F	78	79	7A	7B	7C	7D	7E	Межрегистровая:
MOV B, R <sub>2</sub>	47	40	41	42	43	44	45	46	R <sub>1</sub> ← R <sub>2</sub> , для R <sub>2</sub> –
MOV C, R <sub>2</sub>	4F	48	49	4A	4B	4C	4D	4E	A, B, C, D, E, H или L
MOV D, R <sub>2</sub>	57	50	51	52	53	54	55	56	Передача из памяти:
MOV E, R <sub>2</sub>	5F	58	59	5A	5B	5C	5D	5E	R <sub>1</sub> ← MEM(HL),
MOV H, R <sub>2</sub>	67	60	61	62	63	64	65	66	для R <sub>2</sub> = M
MOV L, R <sub>2</sub>	6F	68	69	6A	6B	6C	6D	6E	Передача в память:
MOV M, R <sub>2</sub>	77	70	71	72	73	74	75	-	MEM(HL) ← R <sub>2</sub>

Команда MVI – пересылка непосредственного операнда в регистр (R) или память (M).

Второй байт команды – операнд (data). Формат команды MVI приведен в табл. 32

Таблица 32 – Команды пересылки непосредственного операнда в регистр (R) или память (M)

Команда	Регистр – приёмник операнда								Примечания
	A	B	C	D	E	H	L	M	
MVI R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub>									
MVI, data	3E	06	0E	16	1E	26	2E	36	R ← data; для R ≠ M MEM(HL) ← data; R = M

Команда LXI – загрузить непосредственно операнд в регистровую пару (rp).

Второй и третий байты команды – операнд (data 16 – двухбайтовый операнд). Формат команды LXI приведен в табл. 33.

Таблица 33 – Команды загрузки непосредственно операнда в регистровую пару (rp)

Команда	Адресуемая регистровая пара				Примечание
	BC	DE	HL	SP	
LXI rp, data	01	11	21	31	rp ← data <sub>16</sub>

Команды загрузки регистровых пар

Формат команд приведен в табл. 34. В ней обозначено: addr – 16-разрядный адрес, находящийся во втором и третьем байтах команды (rp – регистровая пара).

Таблица 34 – Команды загрузки регистровых пар

Команда	Адресуемая регистровая пара				Примечания
	A	BC	DE	HL	
LDA rp, data		0A	1A		A ← MEM(rp)
LHLD addr				2A	L ← EM(addr)
LDA addr	3A				A ← MEM(addr)
STAX rp		02	12		MEM(rp) ← A
SHLD addr				22	MEM(addr) ← L
XCHG	32				MEM(addr) ← A
STA addr				EB	H ↔ D; L ↔ E

## 6.8.2 Группа арифметических и логических команд

*Команды операций над содержимым аккумулятора А и регистра R*

Для  $R = M$  все команды выполняют действия с содержимым ячейки памяти, адрес которой указан в регистровой паре HL.

$$(A \leftarrow A \text{ op MEM}(HL)).$$

Эти команды вырабатывают все признаки F, за исключением команд INR и DCR, не вырабатывающих признак переноса CF.

Формат арифметических команд для выполнения операций над содержимым аккумулятора А и регистра R приведен в табл. 35.

Таблица 35 - Арифметические и логические команды для выполнения операций над содержимым аккумулятора А и регистра R

Команда	Регистр - источник операнда								Примечания
	A	B	C	D	E	H	L	M	
ADD R	87	80	81	82	83	84	85	86	$A \leftarrow A + R$
ADC R	8F	88	89	8A	8B	9C	8	8E	$A \leftarrow A + CF$
SUB R	97	90	91	92	93	94	95	96	$A \leftarrow A - R$
SBB R	9F	98	99	9A	9B	9C	9D	9E	$A \leftarrow A - CF$
ANA R	A7	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	$A \leftarrow A \wedge R$
XRA R	AF	A8	A9	AA	AB	AC	AD	AE	$A \leftarrow A \oplus R$
ORA R	B7	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	$A \leftarrow A \vee R$
CMP R	BF	B8	B9	BA	BB	DC	BD	BE	$A \leftarrow A > R$
INR R	3C	04	0C	14	1C	24	2C	34	$R \leftarrow R + 1$
DCR R	3D	05	0D	15	1D	25	2D	35	$R \leftarrow R - 1$

*Команды операций с регистровыми парами*

Эти команды используют операнды двойной длины (2 байта). Из них только команда двойного сложения DAD формирует признак CF. Остальные команды признаков не формируют. Мнемоника и H-коды команд операций с регистровыми парами приведены в табл.36.

Таблица 36 - Мнемоника и H-коды команд операций с регистровыми парами

Команда	Адресуемая регистровая пара				Примечания
	BC	DE	HL	SP	
DAD rp	09	19	29	39	$HL \leftarrow HL + rp$
INX rp	03	13	23	33	$rp \leftarrow rp + 1$
DCX rp	0B	1B	2B	3B	$rp \leftarrow rp - 1$

*Команды операций, выполняемых с непосредственными однобайтовыми операндами (data)*

Эти команды формируют все признаки CF.

Мнемоника и H-коды команд операций, выполняемых с непосредственными однобайтовыми операндами, приведены в табл. 37.

Таблица 37 - Мнемоника и H-коды команд операций, выполняемых с непосредственными однобайтовыми операндами

Команда	Код	Примечания
ADI, data	C6	$A \leftarrow A + data;$
ACI, data	CE	$A \leftarrow A + data + CF;$
SVI, data	D6	$A \leftarrow A - data;$
SBI, data	DE	$A \leftarrow A - data - CF;$
ANI, data	E6	$A \leftarrow A \text{ data};$ (логическое И)
XRI, data	EE	$A \leftarrow A + data;$ (искл. ИЛИ)
ORI, data	F6	$A \leftarrow A + data;$
CPI, data	FE	(сравнение)

*Специальные команды и команды сдвига разрядов в аккумуляторе А*

Мнемоника и Н-коды специальных команд и команд сдвига разрядов в аккумуляторе А приведены в табл. 38.

Таблица 38 – Мнемоника и Н-коды специальных команд и команд сдвига разрядов в аккумуляторе А

Команда	Код	Примечания	
<b>DAA</b>	27	Десятичная коррекция – формируются все признаки F	
<b>CMA</b>	2F	Инвертирование А – признаки не формируются	
<b>STC</b>	37	Установка признака CF	Формируется только признак CF
<b>CMC</b>	3F	Инвертирование признака	
<b>RLC</b>	07	Циклический сдвиг А влево	
<b>RRC</b>	0F	Циклический сдвиг А вправо	
<b>RAL</b>	17	Сдвиг разряда в А влево	
<b>RAR</b>	1F	Сдвиг разряда в А вправо	

### 6.8.3 Команды передачи управления

*Команды перехода (JMP) и вызова подпрограмм (CALL), возврата из подпрограмм (RET) и безусловного повторного пуска (RST)*

Формирование признаков F не происходит.

При выполнении условия (cond) передача управления осуществляется по адресу, содержащемуся во 2-м и 3-м байтах команд (addr), иначе - выполнение следующей команды. Команда безусловного перехода по косвенному адресу: **PCHL**, код E9. Мнемоника и Н-коды команд передачи управления приведены в табл. 39.

Таблица 39 - Мнемоника и Н-коды команд передачи управления

Условия (cond)	Команда			
	JMP adr	CALL adr	RET	RST
Безусловная	C3	CD	C9	C7
NZ (по ненулю Z = 0)	C2	C4	C0	0 CF
Z (по нулю Z = 1)	CA	CC	C8	1 D7
NC (по непереносу CF = 0)	D2	D4	D0	2 DF
C (по переносу CF = 1)	DA	DC	D8	3 E7
PO (по нечетности P = 0)	E2	E4	E0	4 EF
PE (по четности P = 1)	EA	EC	E8	5 E7
P (по знаку плюс S = 0)	F2	F4	F0	6 F7
M (по знаку минус S = 1)	FA	FC	F8	7 FF

### 6.8.4 Группа команд управления стеком, вводом – выводом и состоянием МП

*Команды управления стеком*

Мнемоника и Н-коды команд управления стеком приведены в табл.

40. Признаки формируют только команды **POP**, **PSW**.

Таблица 40 - Мнемоника и Н-коды команд управления стеком

Команда	Адресуемая регистра- вая пара				Примечания
	BC	DE	HL	PSW	
<b>PUSH</b> гр	C5	D5	E5	F5	MEM(sp-1) ← rh; MEM(sp-2) ← rh;
<b>POP</b> гр	C1	D1	E1	F1	rh ← MEM(sp); rh ← MEM(sp+1);
<b>XTHL</b>			E3		L ↔ MEM(sp); H ↔ MEM(sp+1);
<b>SPHL</b>			F9		sp ← HL

**Примечание.** Старший байт ( r<sub>h</sub> ) регистровой пары первым помещается в стек. Младший байт ( r<sub>l</sub> ) регистровой пары первым извлекается из стека.

*Команды ввода ( IN ), вывода ( OUT ), прерывания ( DI, EI ) и останова ( HLT ) port*

Команду **HLT (останов)** в контроллере рекомендуется заменить командой **RST4**. Мнемоника и H-коды команд ввода ( IN port ), вывода ( OUT port ), прерывания ( DI, EI ) и останова ( HLT ) приведены в табл. 41. Здесь port – адрес порта.

Таблица 41 - Мнемоника и H-коды команд ввода ( IN port ), вывода ( OUT port ), прерывания ( DI, EI ) и останова ( HLT )

Команда	Код	Примечания
<b>OUT, port</b>	D3	Вывод из порта 00 – FF ( 0 – 225 )
<b>IN, port</b>	DB	Ввод в порт 00 – FF ( 0 – 225 )
<b>DI</b>	F3	Запрет прерывания
<b>EI</b>	FB	Разрешение прерывания
<b>NOP</b>	00	Пустая операция
<b>HLT</b>	76	Останов

### 6.9 Основные режимы работы контроллера ЭК1-20

42. Основные режимы работы контроллера ЭК1-20 приведены в табл.

Таблица 42 - Режимы работы контроллера ЭК1-20

Номер позиции	Режим работы	Порядок набора клавиш	Информация на индикаторе
1	Вызов монитора	#	В разряде 1 символ “ – ”
2	Выполнение теста ЭК1-20	# P CR	В разрядах 2-4 последовательно индицируется 1 “0” в разряде 6,7 или 8 означает отказ ЦП, ОЗУ или ПЗУ соответственно
3	Чтение содержимого ячейки памяти с адресом NNNN	# S NNNN □	В разрядах 2-5 – адрес ячейки памяти в разрядах 7-8 - ее содержимое
4	Запись кода XX в ячейку памяти с адресом NNNN	# S NNNN □ XX □	
5	Чтение содержимого регистра	# E □ □ ... □	Последовательная индикация регистров А, В, С, D ...
6	Запись кода XX в регистр МП	# E □ XX □	В разряде 3 - символ регистра, в разрядах 5 - 6 его содержимое



Продолжение таблицы 42

Номер позиции	Режим работы	Порядок набора клавиш	Информация на индикаторе
7	Исправление ошибки при нажатии командных клавиш	Повторить вызов монитора: #	В разряде 1-9 символ "# " свидетельствует об ошибке
8	Исправление ошибки при нажатии клавиш данных	Продолжить ввод данных до получения нужного значения	При вводе информации на индикаторе сдвигается влево, старшие разряды пропадают
9	Выполнение программы в пошаговом режиме с адреса	1 # A CR 2 # G NNNN CR 3 <input type="checkbox"/> 4 Повторить п.3	В разрядах 3-6 – адрес следующей команды. В разряде 9 – символ "≡" пошагового режима
10	Выполнение программы в режиме с остановом по контрольным точкам N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> или N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> начального адреса NNNN	1 # A CR 2 # G NNNN 3 <input type="checkbox"/> N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> CR	В разрядах 3-6 – адрес контрольной точки, на которой произошел останов. В разряде 9 – символ режима останова по контрольным точкам

Продолжение таблицы 42

Номер позиции	Режим работы	Порядок набора клавиш	Информация на индикаторе
11	Сравнение двух областей памяти	# C N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> N <sub>3</sub> N <sub>3</sub> N <sub>3</sub> N <sub>3</sub> CR	В разрядах 2...8 – пробелы при сравнении по всем адресам иначе в разрядах 2...6 – адрес, по которому произошло несовпадение
12	Заполнение константой N <sub>3</sub> N <sub>3</sub> области памяти	# F N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> N <sub>1</sub> <input type="checkbox"/> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> N <sub>2</sub> <input type="checkbox"/> N <sub>3</sub> N <sub>3</sub> CR	В разрядах 2 - 8 пробелы
13	Выполнение программы контроля пульта управления	# B CR любая клавиша данных	Во всех разделах символ набранной клавиши данных
14	Индикация содержимого ячейки памяти с адресом NNNN	# D NNNN CR	В разделах 2 - 5 – адрес ячейки памяти, в разрядах 7-8 – содержимое ячейки

**Примечания:**

- 1 Знаками N, N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>, X обозначена одна из клавиш данных.
- 2 Во всех режимах в разряде 1 индикатора отображается имя введенной директивы монитора.

**6.10 Порядок выполнения работы и содержание отчета**

- 1 Изучить конструкцию микропроцессорной системы ЭК1-20. Включить питание МПС. Проверить ее работоспособность с помощью тестов.

2 Записать и отладить программу в ОЗУ по индивидуальному заданию преподавателя.

Для выполнения работы по изучению МПС ЭК1-20 необходимо изучить литературу по основам вычислительной техники, микропроцессорам [7,11], обратить внимание на физические основы функционирования ЭВМ, десятичную, двоичную, восьмиричную и шестнадцатиричную системы счисления, способы перевода данных из одной системы в другую и наоборот, составление алгоритмов для ЭВМ. Необходимо внимательно изучить все разделы методических указаний по лабораторной работе.

*Содержание отчета:*

- структурная схема МПС ЭК1-20;
- технические данные (основные) МПС ЭК1-20;
- алгоритм программы и программа по индивидуальному заданию.

#### **6.11 Контрольные вопросы**

- 1 Объясните назначение каждого элемента структурной схемы МПС ЭК1-20.
- 2 Для чего предназначена программа «Монитор»?
- 3 Как проверить работоспособность МПС?
- 4 Что такое директива МПС?
- 5 С какого номера ячейки ОЗУ начинается область памяти пользователя?
- 6 Назовите область памяти, где записана программа «Монитор».
- 7 Назовите максимальное число объектов, которые могут управляться с помощью МПС ЭК1-20.
- 8 Какова максимальная емкость памяти ПЗУ ЭК1-20?
- 9 Что является признаком ошибки пользователя при работе его с МПС ЭК1-20?
- 10 Где выполняются арифметические операции в МПС?
- 11 Сколько регистров общего назначения в МПС ЭК1-20?
- 12 Объясните назначение и принцип организации стековой памяти.

## **7 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ ТП – Д С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

*Цель работы:* исследовать электромеханические свойства электропривода с микропроцессорным управлением.

#### **7.1 Общие указания**

Электропривод системы ТП-Д изучается в лабораторной работе 13.

Для обеспечения возможности согласованной работы нескольких механизмов, приводимых в движение электроприводом системы ТП-Д в едином технологическом процессе, например, в станках с ЧПУ, штабелерах, конвейерах в системе гибких автоматизированных систем (ГАП), роботах, манипуляторах и др., применяют программные устройства. В последнее время в качестве таких устройств все шире используются микропроцессоры, которые позволяют управлять работой машин и механизмов по любой, легко перестраиваемой программе.

Алгоритмы управления электроприводами, как правило, связаны с формированием определенных законов регулирования скоростей, обеспечивающих выполнение технологических операций в заданной логической последовательности.

В промышленности, особенно там, где имеются ГАП, часто встречаются задачи программного управления объектом (фрезерным или токарным станком, роторным или шагающим экскаватором, конвейером или манипулятором) в функции времени. Для объекта, приводимого в движение электроприводом, программное управление часто описывается функцией

$$n_i = f(T_i), \quad (45)$$

где  $n_i$  - частота вращения вала электродвигателя (об/мин) на заданном интервале времени  $T_i$ , с;

$i$  - номер интервала времени с начала отсчета,  $i = 0, 1, 2, \dots, m$ .

В данной лабораторной работе исследуется тиристорный электропривод, управление которым осуществляется программно по закону (45) с помощью микропроцессора КР580ВМ80, входящего в состав контроллера программируемого универсального (КПУ) "Электроника К1-20" (МС27-02).

Закон управления (45), формируемый в МП управляющей программой U1.ASM, записанной в ячейках ППЗУ по адресам 5000H ... 5037H, иллюстрируется графиком  $n = f(t)$  (рис.21) и алгоритмом управления (рис. 22).

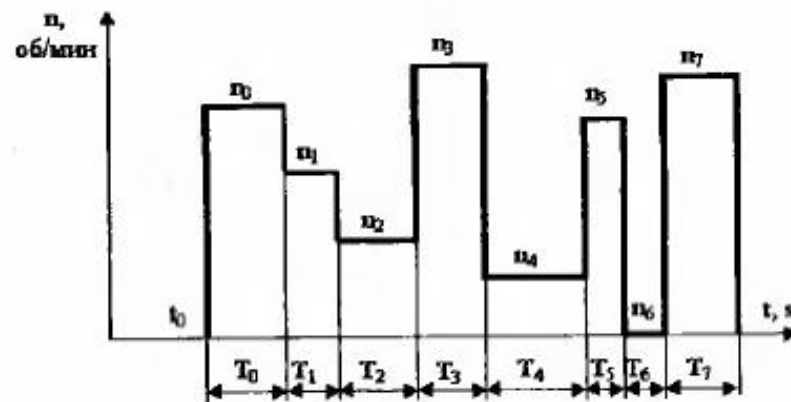


Рисунок 21 - Диаграмма изменения частоты вращения вала электропривода

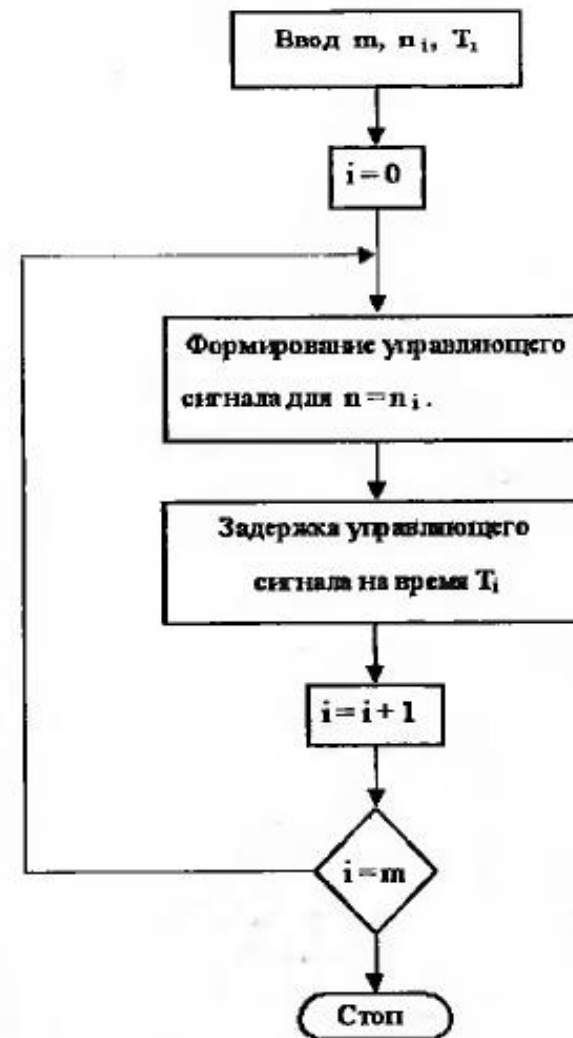


Рисунок 22 - Структурная схема алгоритма управления

Структурная схема алгоритма управляющей программы U1.ASM приведена на рис. 23.

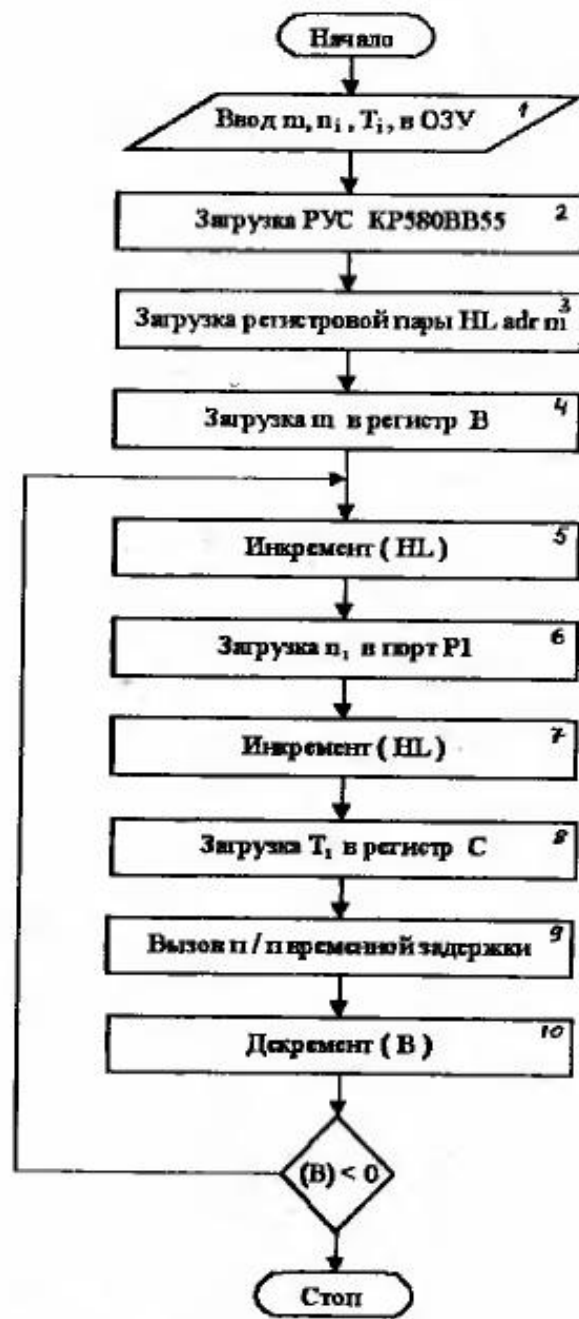


Рисунок 23 – Алгоритм управляющей программы ULASM

### Схема установки для исследования электропривода

Установка для исследования электропривода состоит из тиристорного электропривода (лаб. работа 13) и блока микропроцессорного управления (рис 24).

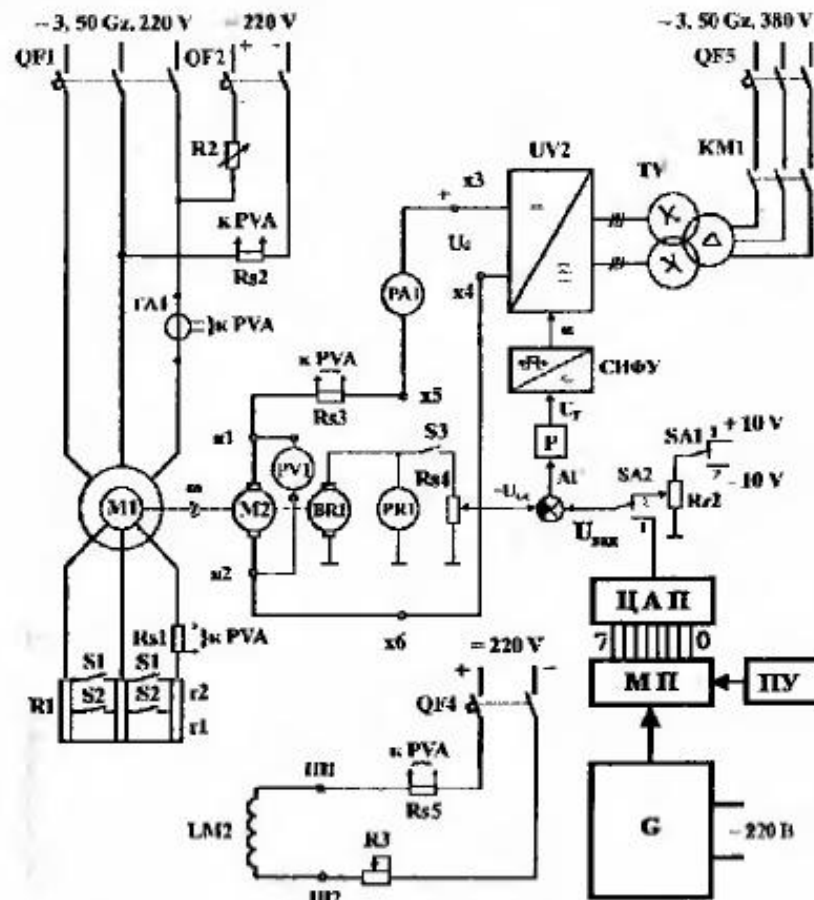


Рисунок 24 – Схема установки для исследования тиристорного электропривода с микропроцессорным управлением

Схема установки для исследования электропривода содержит следующие электрические аппараты и приборы:

- M2 - электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения;
- QF4 – автоматический выключатель для подачи тока в обмотку возбуждения LM2 двигателя M2;
- асинхронный двигатель M1, предназначенный для создания регулируемой механической нагрузки на валу двигателя M2;
- QF2 - автоматический выключатель для включения цепи динамического торможения двигателя M1;
- QF5 - автоматический выключатель для включения согласующего трансформатора TV, питающего тиристорный преобразователь UV2;
- KM1 – магнитный контактор для включения согласующего трансформатора TV, питающего тиристорный преобразователь UV2;
- UV2 – силовой блок тиристорного преобразователя типа ЭТ-6 для преобразования силового переменного тока в выпрямленный ток;
- СИФУ – система импульсно-фазового управления для формирования управляющих импульсов 12 тиристоров, собранных по реверсивной схеме Ларионова в силовом блоке UV2;
- P – пропорционально - интегральный регулятор для формирования оптимального закона регулирования скорости;
- А – суммирующий усилитель, выполняющий функции суммирования сигнала задания  $U_{\text{зад}}$  с сигналом отрицательной обратной связи по скорости  $U_{\text{ок}}$  в соответствии с уравнением (41);
- S3 – выключатель цепи отрицательной обратной связи по скорости;
- SA1 – переключатель знака сигнала задания для выбора направления вращения двигателя M2;
- Rz2 – переменный резистор, выполняющий функции ручного задания сигнала  $U_{\text{зад}}$ , (задатчик скорости);

- амперметр PA1 – для измерения тока якоря двигателя M2;
- вольтметр PV1 – для измерения напряжения на обмотке якоря двигателя M2;
- тахогенератор BR1 и тахоуказатель PR1 – для измерения частоты вращения валов двигателей M1 и M2;
- SA2 – переключатель режима управления;
- ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
- МП – блок микропроцессорного управления;
- G – блок питания МП;
- ПУ – пульт управления.

Двигатель постоянного тока M1 получает питание от трехфазной сети переменного тока через тиристорный преобразователь UV2, который подключается к сети автоматическим выключателем QF5 и выпрямляет переменный ток.

Механическая нагрузка на валу двигателя M2 создается асинхронным двигателем M1 в режиме динамического торможения (при включенном QF2) и регулируется сопротивлением R5.

Обмотка возбуждения LM2 подключается к сети постоянного тока автоматическим выключателем QF4.

Скорость вращения вала двигателя M1 контролируется тахогенератором BR1 и тахометром PR1, а также самописцем PS (подключается параллельно выходу тахогенератора BR1).

Открывающие импульсы, подаваемые на управляющие электроды тиристоров преобразователя UV, формируются в блоке СИФУ.

В установке предусмотрены три способа регулирования скорости вращения вала двигателя M1 посредством изменения напряжения преобразователя UV:



1 Регулирование вручную без обратной связи по скорости, изменением сопротивления  $R_{z2}$  (переключатель SA1 находится в положении "1"; SA2 - в положении "2", S3 - в отключенном положении);

2 Регулирование вручную с отрицательной обратной связью по скорости за счет изменения напряжения задания  $U_{зад}$  сопротивлением  $R_{z2}$  (переключатель SA1 находится в положении "1" или "2", SA2 находится в положении "2", S3 - в отключенном положении);

3 Автоматическое регулирование по программе, записанной в МП (переключатель SA1 находится в любом положении, ключ SA2 - в положении "1", ключ S3 - выключен).

МПС ЭК1-20 получает питание от стабилизированного источника G напряжений постоянного тока -5В, +5В, +12 В, который подключается к сети переменного тока 220 В посредством сетевого разъема.

Диалог пользователя с МП осуществляется с помощью пульта управления (ПУ) и управляющей программы "Монитор".

Входными данными для Монитора являются его директивы (команды), вводимые с ПУ.

Обращение к управляющей программе U1.ASM производится с помощью директив Монитора, вводимых с ПУ.

Связь блока управления тиристорного электропривода (усилитель А, СИФУ) с микропроцессором осуществляется с помощью интерфейсного устройства сопряжения).

В КПУ ЭК1-20 в качестве интерфейсных устройств используются 2 программируемых параллельных устройства сопряжения (БИС) КР580ВВ55, каждое из которых содержит по три 8-разрядных порта ввода-вывода А, В и С.

В лабораторной установке используется только порт А первого интерфейса.

Электропривод управляется аналоговым сигналом  $U_{зад} = \pm 10В$ .

Для преобразования цифровых 8-разрядных управляющих сигналов, поступающих в порт А, используется цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), включенный между портом А КПУ и усилителем А электропривода (рис. 24).

## 7.2 Порядок выполнения работы

7.2.1 Ознакомиться с оборудованием лабораторной установки по методическим указаниям и на рабочем месте.

7.2.2 Подготовить данные для ввода в ОЗУ МП.

Подготовка данных для ввода в ОЗУ МП производится в процессе самостоятельной работы перед выполнением лабораторных исследований.

Варианты данных для управления электроприводом приведены в табл. 43.

Вариант задания принимается в соответствии с номером бригады по списку группы.

В табл. 43 данные  $n$  и  $T_i$  представлены в привычной десятичной системе счисления.

Организация вычислительных и других процессов МП КР580ВМ80 такова, что все данные в ОЗУ, номера регистров, номера ячеек ПЗУ должны заноситься в Н-коде.

Для перевода чисел из десятичной (10) в шестнадцатиричную (16) - Н-форму представления используют известные из курса "Вычислительная техника" правила [8, 10, 11].

Например, для задания частоты  $n = 200$  об/мин в ОЗУ по соответствующему адресу необходимо занести число  $C8H = 200_{(10)}$

Иначе обстоит дело с заданием задержек, которые реализуются в МП программно.

Таблица 43 Варианты данных для управления электроприводом

№	$i \rightarrow$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	$n, м^{-1}$	200	255	0	180	30	10	5	100	200	40	10
	$T, с$	10	20	30	40	50	50	50	40	30	20	10
1	$n, м^{-1}$	60	70	56	250	0	40	100	200	50	200	10
	$T, с$	10	1	5	0.8	2	10	10	10	5	10	3
2	$n, м^{-1}$	255	105	50	255	18	50	255	105	50	225	15
	$T, с$	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20
3	$n, м^{-1}$	25	50	75	100	12	15	125	100	75	50	25
	$T, с$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
4	$n, м^{-1}$	25	50	75	100	12	15	125	100	75	50	50
	$T, с$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
5	$n, м^{-1}$	10	20	30	40	50	60	70	60	50	40	40
	$T, с$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

В систему команд МП входит команда **NOP** (на языке Ассемблер), которая "ничего не делает", но выполняется за 4 такта. При тактовой частоте 2 МГц время выполнения команды 2 мкс.

Если нужна задержка большей длительности, то в программу (место, где нужна задержка) включается цепочка команд **NOP** так, чтобы они выполнялись циклически, т.е. повторялись.

В разработанной управляющей программе U1.ASM использованы две подпрограммы временной задержки. Одна - T2-обеспечивает задержку на 0.2 с; другая - T3, в которую вложена T2, обеспечивает задержку на время от 0.2 до 51 с - в зависимости от заданного числа циклов.

Если число циклов в подпрограмме T3 равно 1, то задержка равна 0.2 с; если 2, то задержка равна 0.4 с, если 3, то равна 0.6 с и т.д.

Подпрограмма T3 (совместно с T2) обеспечивает максимальную задержку по времени:  $255_{(10)} \cdot 0.2 = 51 с$  ( $255_{(10)} = FFH$ ).

Таким образом, чтобы задать МП временную задержку, например 10 с, необходимо вначале определить количество циклов в подпрограмме T3:  $10/0.2 = 50_{(10)}$ , затем перевести это число в шестнадцатиричную форму:  $50_{(10)} = 32H$ , а число 32H занести в соответствующую ячейку ОЗУ.

Подготовленные данные необходимо распределить по ячейкам памяти в ОЗУ.

Управляющая программа U1.ASM составлена так, что порядок записи данных в ячейки строго регламентирован.

**Примечание.** В табл. 43 для  $i > 10$  данные  $n$ , и  $T_i$  необходимо принять произвольно в интервалах  $n, с \in \{0...250 м^{-1}\}$ ;  $T_i \in \{0.2...51с\}$ .

В ячейку с адресом 2100H записывается число  $m$ .

В ячейку с адресом 2101H записывается  $n_0$ , в ячейку с адресом 2102H записывается  $T_0$ , далее по адресу 2103H записывается  $n_1$ , по адресу 2104H записывается  $T_1$  и так далее до конца. Количество заполненных ячеек в ОЗУ должно быть равно  $N = 2m + 1$ .

Пример заполнения ячеек ОЗУ приведен в табл. 44.

Таблица 44 - Пример заполнения ячеек ОЗУ данными

Адреса ячеек	Содержание ячеек
2100H	$m$
2101H	$n_0$
2102H	$T_0$
2103H	$n_1$
2104H	$T_1$
2105H	$n_2$
2106H	$T_2$
...	...
...	$n_{m-1}$
...	$T_{m-1}$
...	$n_m$
...	$T_m$

### 7.2.3 Подготовить КПУ ЭК1-20 к работе.

Для подготовки КПУ к работе необходимо :

- включить вилку шнура блока питания G в розетку "220 В";
- привести МП в исходное состояние, нажав на ПУ клавишу R, при этом индикация цифры «8» в первой позиции индикатора ПУ свидетельствует о готовности МП к работе;
- проверить работоспособность клавиатуры директивой В, нажимая последовательно клавиши # , В и любую из проверяемых клавиш 0...F, при этом происходит индикация набранного символа во всех разрядах индикатора;
- проверить работоспособность микропроцессора, ОЗУ, ПЗУ нажатием последовательно на ПУ клавиш # , R , C R .

При правильном прохождении тест - программы на индикаторе ПУ индицируется «1» во 2-м, 3-м, и 4-м разрядах, начиная слева соответственно. Если при этом одновременно индицируется "0" в 6-м, 7-м или 8-м разряде индикатора, то это указывает на неисправность или сбой в ЦП, ОЗУ или ПЗУ соответственно. Если устройство исправно, то в разрядах 6-8 будут пробелы.

7.2.4 Подготовить электропривод для работы в режиме ручного управления с обратной связью по скорости.

Для подготовки электропривода для работы в режиме ручного управления обратной связью по скорости необходимо:

- подать в обмотку возбуждения LM2 ток, включив выключатель QF4;
- установить номинальный ток возбуждения M2;
- подать сигнал отрицательной обратной связи по скорости, включив S3;
- переключатель SA2 перевести в положение 2 «Ручное управление»;
- включить тиристорный преобразователь UV2 выключателем QF5,

контактором KM1 и кнопкой SB(UV2) на нижней панели управления стенда;

- воздействуя на рукоятку регулятора скорости Rz2, установить начальную частоту вращения  $n_0$  по табл. 43 для своего варианта.

7.2.5 Записать диаграмму изменения частоты  $n = f(t)$  в режиме ручного управления с обратной связью по скорости.

Для записи диаграммы изменения частоты  $n = f(t)$  в режиме ручного управления необходимо включить самописец PS и, отмечая заданные в табл. 43 интервалы времени  $T_i$ , устанавливать регулятором Rz2 соответствующие частоты  $n_i$ . По окончании программы самописец PS необходимо выключить.

7.2.6 Ввести данные в ОЗУ МПК.

Запись данных в ячейки ОЗУ производится в строгом соответствии с подготовленным протоколом организации памяти в ОЗУ для своего варианта (табл. 44).

Запись данных в ОЗУ производится по правилам, рассмотренным в работе 14.

7.2.7 Записать диаграмму изменения частоты  $n = f(t)$  в режиме автоматического управления с обратной связью по скорости.

Для записи диаграммы изменения частоты  $n = f(t)$  в режиме автоматического управления посредством микропроцессора необходимо:

- переключатель SA1 установить в положение " I ";
- переключатель SA2 установить в положение " I ";
- переключатель S3 должен находиться во включенном положении;
- электропривод должен быть в рабочем состоянии ( QF5 и QF4 - включены).

В этом состоянии запуск электродвигателя происходит с момента начала выполнения управляющей программы. Перед запуском необходимо включить самописец PS.

Для запуска управляющей программы U1.ASM в непрерывном режиме необходимо нажать следующие клавиши: # G NNNN CR, где NNNN - начальный адрес программы.

При окончании программы в разряде I индикатора появляется символ "8", а привод останавливается. Самописец PS необходимо отключить.

#### *Содержание отчета:*

- схема установки для исследования электропривода;
- технические данные оборудования;
- протокол записи данных в память ОЗУ;
- диаграммы изменения частоты  $n = f(t)$ , снятые в режимах ручного и автоматического управления;
- выводы о точности двух способов управления, о времени переходных процессов в электроприводе, анализ графиков  $n = f(t)$ .

### **7.3 Контрольные вопросы**

- 1 Перечислите достоинства и недостатки тиристорного электропривода с микропроцессорным управлением.
- 2 Объясните принцип действия и назначение каждого элемента схемы лабораторной установки.
- 3 Для чего предназначены программы "Монитор" и U1.ASM?
- 4 Как проверить работоспособность блоков микропроцессора?
- 5 От чего зависит время переходного процесса в электроприводе?
- 6 На каком алгоритмическом языке могут быть написаны программы для микропроцессора?
- 7 Для чего предназначены последовательные и параллельные интерфейсы?
- 8 Как можно обеспечить задержку по времени в микропроцессорной системе управления привода?

## **8 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 16**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ "ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ" (ТПЧ - Д)**

*Цель работы:* исследовать электромеханические свойства электропривода системы ТПЧ-Д в различных режимах работы.

#### **8.1 Общие указания**

В настоящее время в большинстве регулируемых электроприводов в качестве приводного двигателя используется машина постоянного тока, несмотря на то, что она сложнее по конструкции, менее надежна, чем асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым (КЗ) ротором.

Простота конструкции, высокая надежность, низкая стоимость АД с КЗ ротором обусловили широкое использование его в различных отраслях промышленности.

АД имеют значительно лучшие массогабаритные показатели, чем соответствующие им по мощности и частоте вращения электродвигатели постоянного тока.

Применению машин переменного тока в регулируемом электроприводе препятствовало до определенного времени отсутствие простого, экономичного и надежного преобразователя частоты.

С появлением мощных тиристоров и силовых транзисторов создание статических преобразователей частоты стало технической реальностью.

В настоящее время промышленность освоила выпуск тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) для регулируемых электроприводов мощностью до 2 МВА и более.

Принцип регулирования скорости  $\omega$  вала АД основан на зависимости ее от частоты тока в сети:

$$\omega = \omega_0(1-s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1-s), \quad (46)$$

где  $\omega_0$  - синхронная угловая скорость, или угловая скорость вращения поля статора,  $\text{с}^{-1}$ ;

$s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$  - скольжение АД;

$f_1$  - частота тока питающей сети, Гц;

$p$  - число пар полюсов статорной обмотки двигателя.

Из формулы (46) видно, что угловая скорость АД пропорциональна частоте питающего тока.

Но при изменении частоты  $f_1$  изменяются индуктивные сопротивления обмоток статора

$$x_1 = 2\pi f_1 L_1 \quad (47)$$

и ротора

$$x_2 = 2\pi f_2 L_2, \quad (48)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  - индуктивности обмоток статора и ротора соответственно,

Гн;

$f_1, f_2$  - частоты токов в обмотках статора и ротора соответственно,

$$f_2 = f_1 s. \quad (49)$$

Изменение этих сопротивлений приводит к недопустимым изменениям токов статора и ротора, магнитного потока  $\Phi$ , перегреву обмоток и магнитопровода машины, снижению ее перегрузочной способности.

Поэтому при регулировании частоты необходимо стремиться к тому, чтобы механические характеристики двигателя во всем диапазоне отличались высокой жесткостью, а двигатель обладал достаточной перегрузочной способностью.

Этого можно добиться, сохраняя постоянным магнитный поток  $\Phi$  двигателя. Для асинхронного двигателя можно принять  $U = k f_1 \Phi$ . Поэтому для сохранения неизменной перегрузочной способности ( $M_s = \text{const}$ )

при любой частоте закон изменения напряжения для идеализированного АД (сопротивление обмотки статора  $r_1 = 0$ ) примет вид:

$$U/f = k\Phi = \text{const}. \quad (50)$$

Для реального двигателя  $r_1 \neq 0$ , поэтому регулирование напряжения по закону (50) не обеспечивает сохранения неизменной перегрузочной способности из-за падения напряжения на активном сопротивлении  $r_1$ , что вызывает уменьшение магнитного потока и максимального момента.

Разомкнутые системы частотного управления могут быть использованы для регулирования скорости промышленных механизмов в диапазоне не более 1.5:1 - 3:1, если момент сопротивления  $M_c = \text{const}$ .

Для более глубокого частотного регулирования необходимо применить замкнутые системы автоматического регулирования (САР), в которых напряжение, приложенное к статору двигателя, автоматически регулируется в функции нагрузки так, что бы поток двигателя поддерживался с учетом формулы (50). Это позволяет сохранить требуемую перегрузочную способность и повысить жесткость механической характеристики привода.

#### *Схема установки для исследования электропривода*

Лабораторная установка состоит из серийного тиристорного преобразователя частоты ТПЧ-15 и асинхронного двигателя М с короткозамкнутым ротором, тормозного устройства УВ.

Структурная функциональная схема электропривода системы ТПЧ - Д, включающая преобразователь UV переменного тока в постоянный, фильтр Z, инвертор UZ постоянного тока в 3-фазный переменный, выключатель QF, блок БУВ управления выпрямителем UV1, блок БУИ управления инвертором UZ, блок БЭС задания скорости, блок БП питания, приведена на рис.25.



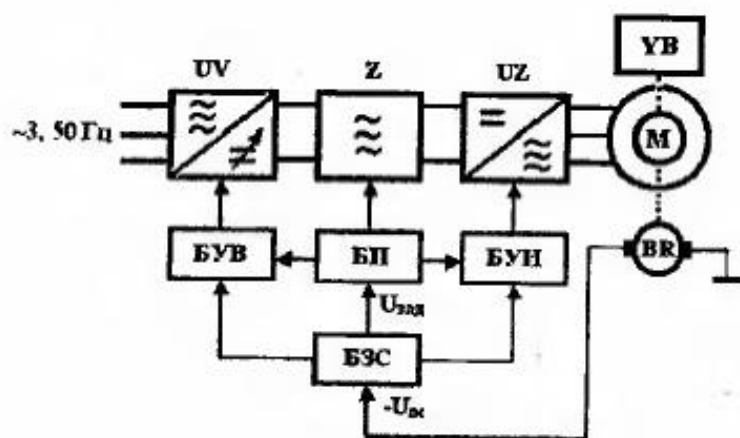


Рисунок 25 - Структурная функциональная схема электропривода системы ТПЧ - Д

Наибольшее применение в промышленных электроприводах получили статические ТПЧ с промежуточным звеном постоянного тока.

Преобразователь частоты состоит из двух силовых блоков: управляемого выпрямителя UV и инвертора UZ. На вход UV подается нерегулируемое трехфазное напряжение переменного тока промышленной частоты  $f_1 = 50$  Гц. С выхода UV постоянный ток регулируемого напряжения подается на инвертор UZ, который преобразует постоянный ток в переменный ток регулируемой частоты  $f_v$ .

Кроме силовых блоков, в ТПЧ входят блок системы управления выпрямителем БУВ и блок системы управления инвертором БУИ. Выходная частота  $f_v$  регулируется в широких пределах и определяется частотой коммутации тиристоров, которая задается БУИ.

В приведенной схеме производится раздельное регулирование напряжения и частоты. Это позволяет достичь при помощи блока задания скорости БЗС требуемого соотношения между напряжением и частотой на

закжимах асинхронного двигателя М. Если в БЗС сравнить задающий сигнал  $U_{зад}$  (рис. 25) с сигналом обратной связи по скорости  $U_{обс}$  (например, от тахогенератора), то можно осуществить стабилизацию частоты вращения двигателя.

Конструктивно ТПЧ-15 выполнен в виде металлического шкафа, в котором компактно установлено оборудование. На лицевой панели шкафа размещены измерительные приборы и органы управления.

Принципиальная схема ТПЧ с промежуточным звеном постоянного тока приведена на рис. 26.

Управляемый выпрямитель UV состоит из шести тиристоров, составляющих трехфазную управляемую мостовую схему для получения выпрямленного напряжения, среднее значение которого можно регулировать изменением угла управления тиристоров с помощью блока БУВ.

Силовой фильтр Z, состоящий из конденсатора C1 и дросселей L1.1 и L1.2, предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Кроме того, конденсатор C1 является приемником реактивной энергии нагрузки.

Обратный мост VD1-VD6 включен встречно-параллельно тиристорам VS7-VS12 инвертора UZ, что создает цепь для конденаторной коммутации тиристоров инвертора и для периодического обмена энергией между индуктивностями асинхронного двигателя и конденсатором C1, обладающим достаточно большой емкостью.

Автономный инвертор UZ, собранный на тиристорах VS7...VS12 по трехфазной мостовой схеме, предназначен для преобразования постоянного напряжения в переменное за счет поочередной работы его тиристоров. Последовательно с тиристорами включены отсекающие дюды VD1...VD6, которые служат для исключения шунтирования контуров коммутации.

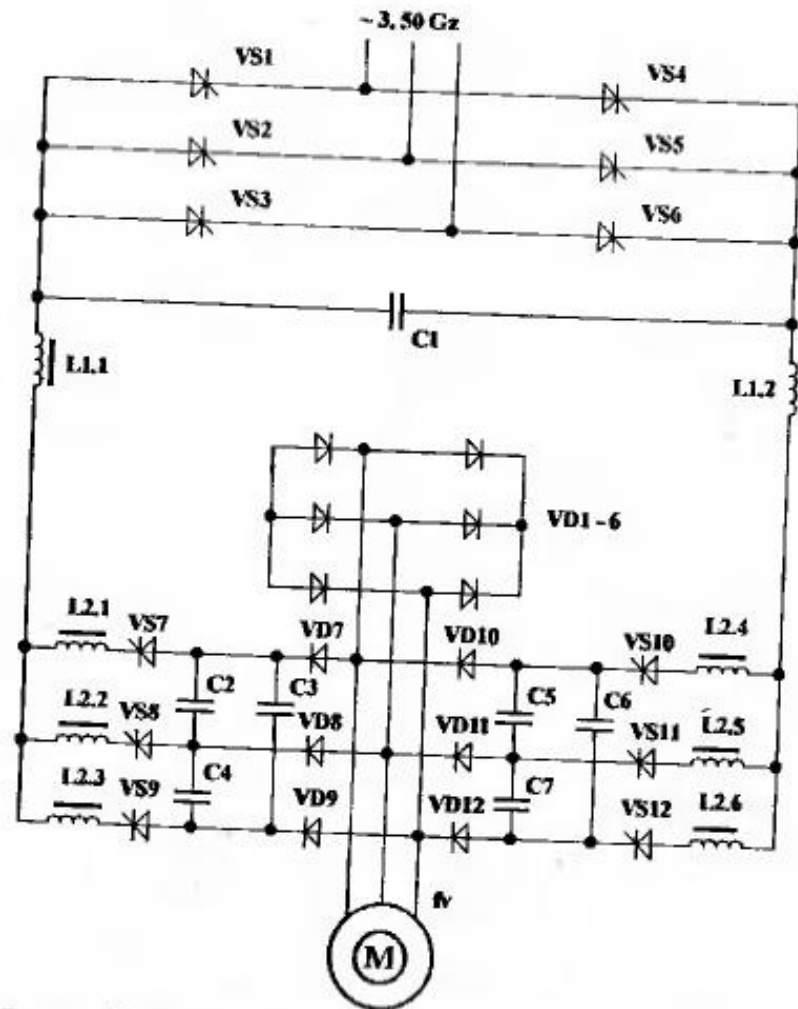


Рисунок 26 – Принципиальная электрическая схема электропривода системы ТПЧ – Д (силовая)

Запирание работающих тиристоров в инверторе осуществляется параллельно включенными конденсаторами C2...C7.

ТПЧ с промежуточным звеном постоянного тока позволяет регулировать частоту как вверх, так и вниз от частоты питающей сети.

К достоинствам ТПЧ относятся: высокий КПД, быстродействие, малые габариты, сравнительно высокая надежность.

Недостатки ТПЧ: относительная сложность системы управления инвертором и выпрямителем, необходимость в наличии высококвалифицированного персонала при ремонтах и наладке.

В рассмотренном ТПЧ для формирования выходного напряжения изменяющейся частоты используется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что позволяет получить достаточно широкий диапазон регулирования частоты тока, форма которого близка к синусоидальной.

## 8.2 Порядок выполнения работы

8.2.1 В протокол исследования записать технические данные ТПЧ, асинхронного двигателя и измерительных приборов.

8.2.2 Проверить исходное состояние пульта установки.

В исходном состоянии автоматические выключатели QF<sub>1</sub>, SF на панели управления должны находиться в отключенном состоянии, тумблер S - в положении "Откл.", тумблер РС - в положении "min", ни одна из сигнальных ламп панели не должна гореть.

8.2.3 Внимательно ознакомиться с устройством и назначением всех элементов лабораторной установки.

Для этого необходимо взять ключ у преподавателя, открыть переднюю и заднюю двери ТПЧ.

8.2.4 Включить ТПЧ.

Порядок включения установки для проведения исследований:

- закрыть двери ТПЧ и ключ сдать преподавателю;

- включить автоматические выключатели QF<sub>1</sub> и SF (на задней части стенке ТПЧ). При этом загораются сигнальные лампы "Напряжение подано" и "Цепи управления включены";
- нажать на кнопку "Пуск". При этом включается сигнальная лампа "Сеть". После этого можно считать, что установка готова к проведению исследований.

8.2.5 Вращением рукоятки "Регулятор" по часовой стрелке определить диапазон регулирования скорости двигателя.

Для нескольких частот вращения двигателя через каждые 50...100 об/мин, в пределах диапазона регулирования, зафиксировать значения выходного напряжения  $U$  и частоты  $f$ . Данные записать в табл. 45.

Таблица 45 – Данные для определения диапазона регулирования скорости привода системы ТПЧ-Д

Номер опыта	$n$ , об/мин	$U$ , В	$f$ , Гц	$U/f$	$D = n_{max}/n_{min}$
1					
2					
3					
4					
5					

8.2.6 Экспериментально исследовать механические характеристики привода системы ТПЧ-Д с разомкнутой САР.

Для этого необходимо тумблер S установить в положение "Откл.", а регулятором РС установить номинальную частоту вращения привода при  $f = 50$  Гц, а затем плавно увеличивать нагрузку с помощью нагрузочного устройства с шагом  $0.2I_{ном}$  в интервале  $0 \dots I_{ном}$ . Показания приборов PA1, PA2, BR3 на панели управления ТПЧ записать в табл. 46.

Таблица 46 – Данные экспериментальных исследований механических характеристик электропривода системы ТПЧ-Д

Номер опыта	$I_1$ , А	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$I_2$ , А	Примечание
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

8.2.7 Экспериментально исследовать механические характеристики привода системы ТПЧ-Д с замкнутой САР.

Для этого необходимо тумблер S установить в положение "Вкл.", а регулятором РС установить номинальную частоту вращения привода при  $f = 50$  Гц, а затем плавно увеличивать нагрузку с помощью нагрузочного устройства с шагом  $0.2I_{ном}$  в интервале  $0 \dots I_{ном}$ . Показания приборов PA1, PA2, BR3 на панели управления ТПЧ записать в табл. 46.

Содержание отчета:

- технические данные ТПЧ, АД и приборов;
- силовая и структурная схемы ТПЧ;
- таблицы с опытными данными;

- графики регулировочных характеристик  $p(f_c)$ ,  $U(f_c)$ ;
- графики механических характеристик  $p(M)$  привода с разомкнутой и замкнутой САР в одной системе координат;
- выводы по работе.

### 8.3 Контрольные вопросы

- 1 Объясните устройство и принцип действия ТПЧ.
- 2 Какие существуют основные способы регулирования скорости АД?
- 3 Как вы понимаете выражение "Преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока"?
- 4 Каково назначение основных элементов силовой схемы привода системы ТПЧ-Д?
- 5 Почему при регулировании скорости электропривода системы ТПЧ-Д необходимо регулировать напряжение обмотки статора?
- 6 Чему равен диапазон регулирования скорости электропривода?
- 7 Перечислите достоинства и недостатки ТПЧ.

## 9 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 17

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

*Цель работы:* исследовать электромеханические переходные процессы в электроприводе системы ТП-Д при ударном набросе и сбросе нагрузки.

#### 9.1 Общие указания

При проектировании и эксплуатации электроприводов необходимо оценивать их поведение во время переходных процессов (при разгонах, торможениях, регулировании скоростей, сбросах или набросах нагрузки, т.е. при внешних и внутренних возмущениях). Так как во время переходных процессов выходные координаты электроприводов - скорость  $\omega(t)$ , момент  $M(t)$ , путь  $\varphi(t)$  - не соответствуют технологически заданным, общее производительное время работы механизмов снижается на величину суммы времени переходных процессов.

Для конструкторов представляет интерес процесс изменения динамического момента электромеханической системы с учетом ее демпфирующих свойств, от которого в значительной степени зависит оценка запаса прочности механических конструкций, влияющая в конечном итоге на массогабаритные показатели машин.

Без расчетов переходных процессов невозможно решать задачи позиционирования рабочих механизмов.

Механические переходные процессы описываются основным уравнением движения электропривода

$$M - M_c = J_z \frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad (51)$$

где  $J_2$  - суммарный приведенный момент инерции механизма, кг·м<sup>2</sup>;

$M$  и  $M_c$  - вращающий момент и момент сопротивления на валу двигателя соответственно, Н·м.

В соответствии с этим уравнением производится упрощенная оценка переходных процессов, необходимая при выборе электропривода по мощности.

Электрохимические переходные процессы электроприводов постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения описываются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M - M_c &= J_2 \frac{\partial \omega}{\partial t} \\ U &= k\Phi\omega + i_a R \end{aligned} \right\}, \quad (52)$$

где  $R$  - суммарное сопротивление в цепи обмотки якоря, Ом;

$\Phi$  - основной магнитный поток двигателя постоянного тока, Вб;

$i_a$  - ток в обмотке якоря, А.

Эта система уравнений учитывает изменение электрических параметров в электроприводе (тока якоря, магнитного потока, сопротивления в цепи якоря), следовательно, оценивает переходные процессы точнее, чем уравнение (51).

При допущении линейности связей в объекте и неизменности магнитного потока машины ( $\Phi = \text{const}$ ), решение системы (52) относительно  $\omega$  представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{1}{T_m} (\omega - \omega_c) = 0, \quad (53)$$

где  $T_m$  - электрохимическая постоянная времени, с;

$\omega_c$  - установившееся значение скорости, соответствующее  $M = M_c$ .

$$T_m = \frac{J_2 R}{(k\Phi)^2}. \quad (54)$$

Для  $t = 0$  начальное значение скорости  $\omega = \omega_{\text{нач}}$ , решение уравнения (53) в общем имеет вид

$$\omega = \omega_c + (\omega_{\text{нач}} - \omega_c) e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (55)$$

Решение системы (52) при тех же условиях относительно  $i_a$  представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{\partial i_a}{\partial t} + \frac{1}{T_a} (i_a - i_c) = 0, \quad (56)$$

где  $i_c$  - ток якоря в статическом режиме при  $M = M_c$ ,

$$i_c = \frac{M_c}{k\Phi}. \quad (57)$$

Для  $t = 0$  начальное значение тока  $i_a = i_{\text{нач}}$ , решение уравнения (54) в общем имеет вид

$$i_a = i_c + (i_{\text{нач}} - i_c) e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (58)$$

С учетом линейной связи между током якоря  $i_a$  и вращающим моментом  $M$  переходный процесс  $M(t)$  описывается также линейным дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{T_m} (M - M_c) = 0. \quad (59)$$

Для  $t = 0$  начальное значение момента  $M = M_{\text{нач}}$ , решение уравнения (56) в общем имеет вид

$$M = M_c + (M_{\text{нач}} - M_c) e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (60)$$

Время полного окончания переходного процесса  $t_{\text{п1}}$  с погрешностью, не превышающей 5%, [6], определяется соответствующей постоянной времени  $T_m$ ,

$$t_{\text{п1}} = 3T_m. \quad (61)$$

Электрохимические переходные процессы с учетом электромагнитной инерционности электропривода постоянного тока описываются системой уравнений [3], учитывающей реактивные элементы не только в механических кинематических цепях (инерционные массы), но и в электрической цепи обмотки якоря (индуктивность в цепи обмотки якоря  $L_a$ ):



$$\left. \begin{aligned} M - M_c &= J_r \frac{\partial \omega}{\partial t}, \\ U &= k\Phi\omega + i_s + L_s \frac{\partial i_s}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

При допущении линейности объекта ( $\Phi = \text{const}$ ), решения системы (63) относительно  $\omega$ ,  $i_s$ ,  $M$  представляют собой дифференциальные уравнения второго порядка:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} + \frac{1}{T_s} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{1}{T_s T_m} (\omega - \omega_c) = 0, \quad (64)$$

$$\frac{\partial^2 i_s}{\partial t^2} + \frac{1}{T_s} \frac{\partial i_s}{\partial t} + \frac{1}{T_s T_m} (i_s - i_c) = 0, \quad (65)$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial t^2} + \frac{1}{T_s} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{T_s T_m} (M - M_c) = 0, \quad (66)$$

где  $T_s$  - электромагнитная постоянная времени,

$$T_s = \frac{L_s}{R}. \quad (67)$$

Переходный процесс характеризуется переходной характеристикой, т.е. зависимостью выходной координаты электропривода от времени, например  $\omega = f(t)$  при скачкообразном возмущении (например, ударном набросе нагрузки).

Реакция системы авторегулирования (САР) привода на это возмущение может быть различной.

В зависимости от вида графиков переходных процессов и их аналитического описания различают три характера протекания переходных процессов:

- аperiodический первого рода;
- аperiodический второго рода;
- колебательный.

Параметры электромеханических переходных процессов определяют в обязательном порядке экспериментально при наладке электроприводов.

При этом по экспериментально записанному графику переходного процесса при единичном возмущении определяют следующие показатели качества САР:

- а) характер переходного процесса;
- б)  $t_n$  - длительность переходного процесса, с;
- в)  $\delta_{ст}$  - статическая ошибка регулирования, %;
- г)  $\delta_{дин}$  - динамическая ошибка регулирования (перерегулирование), %;
- д)  $d$  - логарифмический декремент затухания колебаний выходной координаты во времени, о.е.

Длительность переходного процесса определяют как интервал между временем подачи ступенчатого возмущения и временем окончания переходного процесса. Обычно считают, что переходный процесс закончился, если значение выходной величины отличается от установившегося или заданного значения не более, чем на 5%.

На рис. 27 приведен пример графика переходного процесса  $n = f(t)$  электропривода постоянного тока при ударном набросе механической нагрузки, из которого видно, что переходный процесс закончился в момент времени, когда график  $n = f(t)$  пересек 5-процентную зону без выхода из нее.

Статическая ошибка регулирования по графику (рис. 27) определится по относительной разности между заданным и установившимся значениями скоростей

$$\delta_{ст} = \frac{n_{зад} - n_{уст}}{n_{зад}} 100\% = \frac{\Delta n_{ст}}{n_{зад}} 100\%. \quad (68)$$

Динамическая ошибка (перерегулирование) САР определится как относительная разность между максимальным отклонением частоты вращения  $\Delta n_{дин}$  от заданной  $n_{зад}$

$$\delta_{дин} = \frac{\Delta n_{дин} - n_{зад}}{n_{зад}} 100\%. \quad (68)$$

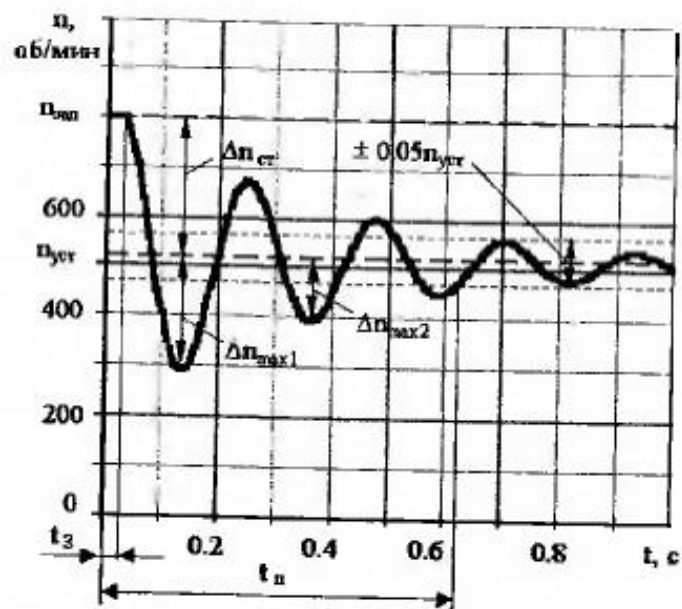


Рисунок 27 – График переходного процесса  $n(t)$ , поясняющий определение показателей качества процесса регулирования

Колебательность переходного процесса оценивается натуральным логарифмом отношения двух соседних амплитуд абсолютных отклонений выходной величины одного знака ( см. рис.27):

$$d = \ln \frac{\Delta \omega_{\max 1}}{\Delta \omega_{\max 2}} \quad (69)$$

Электромеханическая постоянная времени определяется с учетом электромагнитной инерционности привода по формуле

$$T_n = \frac{t_n - t_z}{3} \quad (70)$$

где  $t_z$  – время запаздывания, связанное с электромагнитной инерционностью электропривода, с.

Электромагнитная постоянная времени может определяться с учетом каталожных данных двигателя по формуле (67) или с учетом данных графика переходного процесса по формуле

$$T_n \approx \frac{t_n}{3} \quad (71)$$

#### Схема установки для исследования электропривода

Для исследования электропривода системы ТП-Д на мнемосхеме собирается электрическая схема (рис. 28).

Схема установки для исследования электропривода содержит следующие электрические аппараты и приборы:

- M2 – электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения;
- QF4 – автоматический выключатель для подачи тока в обмотку возбуждения LM2 двигателя M2;
- асинхронный двигатель M1, предназначенный для создания регулируемой механической нагрузки на валу двигателя M2;
- QF2 – автоматический выключатель для включения цепи динамического торможения двигателя M1;
- QF5 – автоматический выключатель для включения согласующего трансформатора TV, питающего тиристорный преобразователь UV2;
- KM1 – магнитный контактор для включения согласующего трансформатора TV, питающего тиристорный преобразователь UV2;
- UV2 – силовой блок тиристорного преобразователя типа ЭТ-6 для преобразования силового переменного тока в выпрямленный ток;
- СИФУ – система импульсно-фазового управления для формирования управляющих импульсов 12 тиристоров, собранных по реверсивной схеме Ларионова в силовом блоке UV2;
- Р – пропорционально - интегральный регулятор для формирования оптимального закона регулирования скорости;

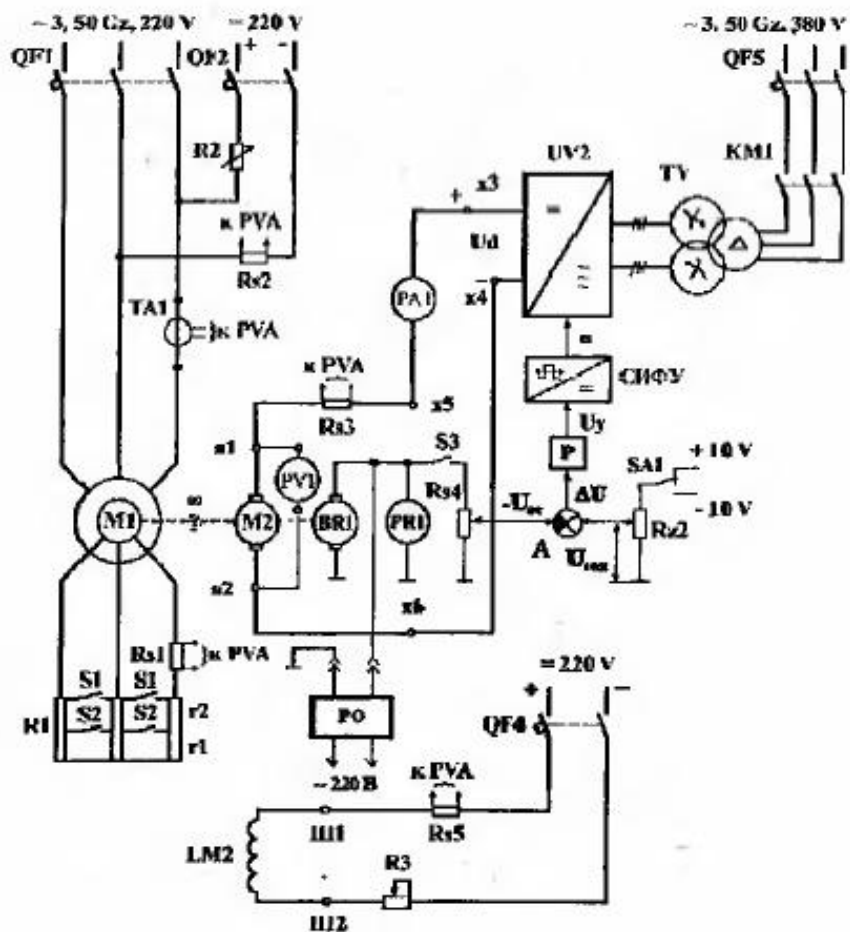


Рисунок 28 - Электрическая схема установки для исследования электромеханических переходных процессов электропривода

- А – суммирующий усилитель, выполняющий функции суммирования сигнала задания  $U_{зад}$  с сигналом отрицательной обратной связи по скорости  $U_{oc}$  в соответствии с уравнением (41);
- SA1 – переключатель знака сигнала задания для выбора направления вращения двигателя M2;

- R2 – переменный резистор, выполняющий функции ручного задания сигнала  $U_{зад}$ , (задатчик скорости);
- амперметр PA1 – для измерения тока якоря двигателя M2;
- вольтметр PV1 – для измерения напряжения на обмотке якоря двигателя M2;
- тахогенератор BR1 и тахоуказатель PR1 – для измерения частоты вращения валов двигателей M1 и M2;
- PO – осциллограф с памятью типа С8-9а.

## 9.2 Порядок выполнения работы

9.2.1 Ознакомиться с силовым электрооборудованием и записать его технические данные. Уяснить назначение каждого элемента принципиальной схемы. Собрать схему испытания электропривода в двигательном режиме (рис. 28).

При сборке схемы следует помнить, что все элементы мнемосхемы электрически соединены.

### 9.2.2 Запустить электропривод системы ТП – Д

#### Порядок запуска электропривода системы ТП – Д

- 1 В исходном положении все выключатели стенда находятся в отключенном состоянии.
- 2 Автоматическим выключателем QF4 включают цепь питания обмотки возбуждения LM2.
- 3 Регулятором R3 устанавливают номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя M2.

**Примечание.** Помните, что ДПТ без возбуждения входит в состояние «разноса», т.е. его скорость недопустимо возрастает!

- 4 Включают автоматический выключатель QF4.
- 5 Задатчик скорости R2 устанавливают в нулевое положение.
- 6 Кнопкой управления SB(KM1) на нижней панели стенда включают магнитный контактор KM1.
- 7 Кнопкой управления SB(UV2) на нижней панели стенда включают тиристорный преобразователь UV2.

8 Переключателем знака сигнала задания SA1 выбирают направление вращения двигателя M2.

9 Задатчиком скорости Rz2 по показаниям вольтметра PV1 устанавливают необходимое по условиям эксперимента напряжение ТП.

*9.2.3 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода системы ТП – Д от времени  $n = f(t)$  при набросе механической нагрузки и при номинальных параметрах двигателя ( $U_d = U_n$ ,  $\Phi = \Phi_{ном}$ ) без обратной связи по скорости.*

Для исследования электромеханических переходных процессов  $n = f(t)$  привода задатчиком скорости Rz2 по показаниям вольтметра PV1 устанавливают номинальное напряжение ТП, а регулятором R3 – номинальный (максимальный) ток возбуждения двигателя M2. Ключ S3 включают.

**Механическая нагрузка на валу двигателя постоянного тока M2 создается асинхронным двигателем M1 в режиме динамического торможения.**

Для введения асинхронного двигателя M1 в режим динамического торможения необходимо его статорную обмотку подключить выключателем QF2 к цепи постоянного тока. Для записи графика  $n = f(t)$  включают питание напряжением 220 В осциллографа РО. Далее одновременно с включением выключателя QF2 запускают развертку луча осциллографа РО.

Полученный на экране осциллографа график переносят на бумагу, а выключатель QF2 выключают.

*9.2.4 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода системы ТП – Д от времени  $n = f(t)$  при набросе механической нагрузки и при номинальных параметрах двигателя ( $U_d = U_n$ ,  $\Phi = \Phi_{ном}$ ) с отрицательной обратной связью по скорости.*

Включают ключ S3 и одновременно с включением выключателя QF2 запускают развертку луча осциллографа РО.

Полученный на экране осциллографа график переносят на бумагу.

*9.2.5 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода системы ТП – Д от времени  $n = f(t)$  при сбросе ме-*

*ханической нагрузки и при номинальных параметрах двигателя ( $U_d = U_n$ ,  $\Phi = \Phi_{ном}$ ) без обратной связи по скорости.*

Ключ S3 выключают и одновременно с выключением выключателя QF2 запускают развертку луча осциллографа РО.

Полученный на экране осциллографа график переносят на бумагу.

*9.2.6 Исследовать экспериментально зависимость частоты вращения вала привода системы ТП – Д от времени  $n = f(t)$  при сбросе механической нагрузки и при номинальных параметрах двигателя ( $U_d = U_n$ ,  $\Phi = \Phi_{ном}$ ) с отрицательной обратной связью по скорости.*

Включают ключ S3 и одновременно с выключением выключателя QF2 запускают развертку луча осциллографа РО.

Полученный на экране осциллографа график переносят на бумагу.

#### *Содержание отчета:*

- принципиальная электрическая схема установки для исследования электропривода;
- паспортные данные тиристорного преобразователя и двигателя, аппаратов и приборов;
- графики переходных процессов  $n(t)$  электропривода;
- таблица с результатами расчетов параметров переходных процессов;
- выводы по результатам исследований.

#### *9.3 Контрольные вопросы*

- 1 Как определить статическую ошибку САР?
- 2 Что такое «перерегулирование» и в каких пределах оно допускается?
- 3 Перечислите способы снижения динамической ошибки САР.
- 4 Как экспериментально определить время переходного процесса?
- 5 Как экспериментально определить электромагнитную постоянную времени?
- 6 Как экспериментально определить электромеханическую постоянную времени?
- 7 Перечислите способы уменьшения времени переходного процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Фотиев М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических и литейных цехов: Учебн. для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1983. - 288 с.
- 2 Типовой электропривод промышленных установок / С.А. Волотовский, В.И. Емец, В.К. Козлов и др. - Киев: Высп. школа, 1983. - 312 с.
- 3 Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. - М.: Энергия, 1979. - 616 с.
- 4 Богословский А.П., Певзнер Е.М., Семерня Н.Ф. Электрооборудование кранов. - М.: Машиностроение, 1993. - 310 с.
- 5 Панкратов А.И. Выбор электроприводов подъемно-транспортных машин: Учеб. пособие по дисциплинам «Теория электропривода», «Электрооборудование подъемно-транспортных машин»: Для студентов электромеханических специальностей. - Краматорск: ДГМА, 2001. - 212 с.
- 6 Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. - 6-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с.
- 7 Вуд А. Микропроцессоры в вопросах и ответах/ Пер. с англ.; Под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 184 с.
- 8 Вершин О.Е. Применение микропроцессоров для автоматизации технологических процессов. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. - 208 с.
- 9 Контроллер программируемый универсальный "Электроника МС2702". Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
- 10 Методические указания к лабораторным работам по курсу "Микропроцессоры и микроЭВМ". - М.: МЭИ, 1986. - 40 с.
- 11 Токхайм Р. Микропроцессоры. Курс и упражнения. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 336 с.