

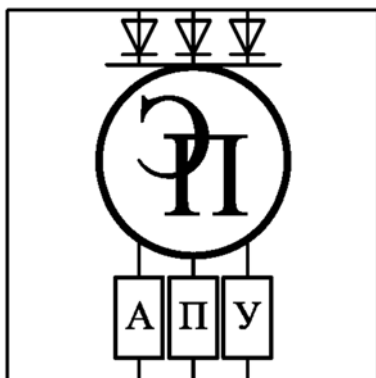
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

# ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности  
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
дневной и заочной форм обучения*

**Часть 1**



Могилев 2023

УДК 62-83  
ББК 31.291  
Т33

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «2» мая 2023 г., протокол № 7

Составители: канд. техн. наук, доц. Б. Б. Скарыно;  
ст. преподаватель А. С. Третьяков

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Методические рекомендации предназначены для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения. Даны необходимые сведения для выполнения лабораторных работ.

Учебное издание

## ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Часть 1

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 81 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2023

## Содержание

Введение.....	4
1 Организация лабораторных работ.....	5
2 Лабораторная работа № 1. Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ) .....	7
3 Лабораторная работа № 2. Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением (ДПТ с ПВ) .....	11
4 Лабораторная работа № 3. Исследование статических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) .....	15
5 Лабораторная работа № 4. Исследование статических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР) .....	20
6 Лабораторная работа № 5. Экспериментальное определение момента инерции электропривода.....	25
7 Лабораторная работа № 6. Исследование способов торможения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.....	29
8 Лабораторная работа № 7. Исследование способов торможения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором .....	33
9 Лабораторная работа № 8. Исследование системы синхронного вращения электропривода .....	40
10 Лабораторная работа № 9. Исследование динамических свойств ДПТ с НВ при питании от источника напряжения бесконечной мощности .....	44
11 Лабораторная работа № 10. Исследование динамических свойств АДКЗ при питании от источника напряжения бесконечной мощности.....	46
Список литературы .....	47

## **Введение**

Дисциплина «Теория электропривода» (ТЭП) позволит студентам закрепить полученные теоретические знания, а также приобрести практический опыт по экспериментальному исследованию электрических машин и электроприводов и опыт самостоятельной работы с современными электроприводами.

В данных методических рекомендациях рассмотрены вопросы экспериментального исследования статических и динамических режимов работы электродвигателей и электроприводов.

# 1 Организация лабораторных работ

## 1.1 Техника безопасности

При выполнении лабораторных работ имеется три основных вида опасностей по возможности нанесения существенного вреда здоровью студентов, лаборантов, преподавателей и других лиц, которые выполняют на данной установке определенные работы.

1 Напряжение переменного тока 220 В частотой 50 Гц (агрегат электромашинный, станция управления, ПЭВМ).

2 Напряжение постоянного тока 220 В (агрегат электромашинный).

3 Вращающиеся части (агрегат электромашинный).

4 Элементы лабораторного комплекса, имеющие рабочую температуру 100 °С и более.

**Запрещается** выполнение лабораторной работы без прохождения инструктажа по технике безопасности.

**Запрещается** выполнение лабораторной работы без разрешения преподавателя, проводящего лабораторную работу.

**Запрещается** подача напряжения питания на комплекс без разрешения преподавателя.

**Запрещается** коммутация органов управления комплекса при поданном напряжении питания без разрешения преподавателя.

**Категорически запрещается** изменение настроек программного обеспечения, изменение настроек операционной системы и состава персонального компьютера.

**Запрещается** во время выполнения лабораторных работ **шуметь, громко разговаривать, заниматься посторонними делами, быть одетыми в одежду с длинными рукавами, длинными полами.**

## 1.2 Порядок выполнения работ

На первом (вводном) занятии студенты получают график выполнения лабораторных работ. Работы выполняются группой в составе 3–4 человек. Студенты должны заблаговременно готовиться к занятию. Подготовка должна включать в себя:

1) изучение правил техники безопасности при выполнении лабораторной работы;

2) изучение теоретических материалов по направлению исследований лабораторной работы;

3) ознакомление с электрооборудованием лабораторной работы;

4) изучение назначения элементов и режимов работы схемы электрической принципиальной лабораторной работы;

5) изучение методик проведения экспериментальных исследований.

Лабораторную работу следует выполнять в составе подгруппы. Количество

студентов в подгруппе – не менее двух.

Допуск к выполнению лабораторной работы выдает преподаватель после проведения собеседования по данной работе, в ходе которого студент показывает знания по конструкции комплекса и программе исследований по данной лабораторной работе.

Перед началом выполнения исследований на данном комплексе необходимо выполнить следующее.

1 Проверить наличие ограждения вращающихся частей (агрегат электромашинный).

2 Проверить наличие посторонних предметов на конструктивных компонентах стенда, посторонние предметы убрать.

3 Проверить наличие и надежность заземления всех элементов стенда.

Готовность студентов к выполнению лабораторной работы проверяется преподавателем до начала работы. Студенты, явившиеся на занятия неподготовленными, а также не представившие своевременно отчет о выполнении предыдущей работы, к выполнению очередной лабораторной работы не допускаются. Студенты, нарушившие правила выполнения работ в лаборатории и правила ТБ, отстраняются от выполнения работы.

Полное содержание лабораторных работ и краткие теоретические сведения в рамках лабораторных работ представлены в электронном варианте и хранятся в лаборатории ПЭВМ а. 207/к. 2 кафедры «Электропривод и АПУ».

### ***1.3 Содержание отчета***

Отчет по лабораторным работам дисциплины «Теория электропривода» должен содержать следующее:

- титульный лист;
- цель работы;
- описание лабораторного стенда;
- основные правила техники безопасности;
- таблица с результатами экспериментов и расчетов;
- графики исследованных зависимостей;
- выводы по работе.

## 2 Лабораторная работа № 1. Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ)

**Цель работы:** изучение механических (МХ) и электромеханических (ЭМХ) характеристик двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ); освоение методики расчета МХ и ЭМХ для двигательного и тормозных режимов работы ДПТ с НВ; изучение способов получения искусственных МХ и ЭМХ.

### **Подготовка к выполнению работы**

1 Изучить правила техники безопасности при выполнении данной лабораторной работы.

2 Изучить теоретические материалы по направлению исследований лабораторной работы.

3 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки. Записать паспортные данные испытуемого асинхронного электродвигателя  $M1$ , нагрузочного электродвигателя  $M2$ , генератора  $G1$  и гонного двигателя  $M3$ .

4 Изучить назначение элементов и режимы работы схемы электрической принципиальной лабораторной установки (рисунок 1).

5 Изучить методики проведения экспериментальных исследований.

### **Методические указания по проведению исследований**

#### **Эксперимент № 1. Снятие естественных МХ и ЭМХ.**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Подать на стенд напряжение питания с помощью автоматических выключателей  $QF1$ ,  $QF2$ .

2 С помощью тумблеров  $SA1$ – $SA3$  замкнуть обмотки возбуждения электродвигателей  $M1$ ,  $M2$  и генератора  $G1$ .

3 Установить номинальный ток возбуждения машины  $M1$  и минимальные токи в обмотках возбуждения машин  $G1$  и  $M2$ .

4 Включить приводной (гонный двигатель)  $M3$  путём нажатия кнопки  $SB2$ . Постепенно увеличивая ток возбуждения генератора  $G1$  с помощью реостата  $RP3$ , разогнать исследуемый двигатель  $M1$ . Напряжение на зажимах якоря генератора  $G1$  контролировать по прибору  $PV1$ .

5 Регулируя нагрузку на валу электродвигателя  $M1$  путём изменения тока возбуждения машины  $M2$  реостатом  $RP2$ , снять 5 точек характеристики. В процессе снятия характеристики ток якоря не должен превышать значения  $1,5 \cdot I_{ном}$  (следить по прибору  $PA1$ ). Поток (ток возбуждения) исследуемого двигателя и напряжение на якоре в процессе опыта следует поддерживать неизменными. Результаты исследований занести в таблицу 1.

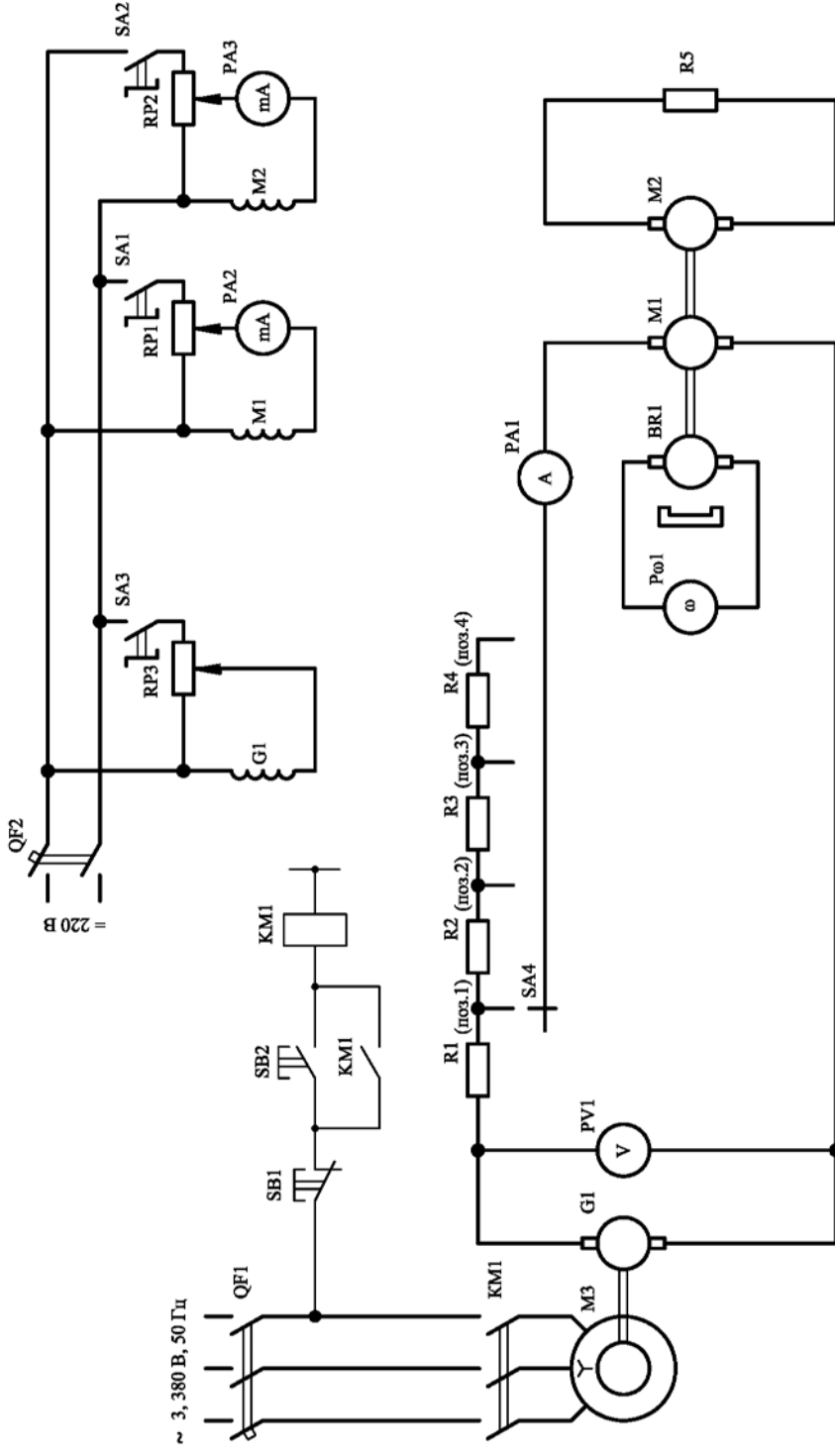


Рисунок 1 — Схема для исследования механических характеристик двигателя постоянного тока независимого возбуждения



Таблица 1 – Результаты исследований и расчетов

Наименование характеристики	Данные опыта						Данные расчета				
	$R_я$	$R_4$	$I_я$	$I_в$	$U_я$	$\omega$	$U_я I_я$	$I_я^2 R_я$	$I_я^2 R_4$	$P$	$M$
	Ом	Ом	А	А	В	рад/с	Вт	Вт	Вт	Вт	Н·м
$R_4 = 0;$ $U_я = U_{ном};$ $\Phi = \Phi_{ном}$											
$R_4$ – задано; $U_я = U_{ном};$ $\Phi = \Phi_{ном}$											
$R_4 = 0;$ $U_я$ – задано; $\Phi = \Phi_{ном}$											
$R_4 = 0;$ $U_я = U_{ном};$ $\Phi$ – задано											

**Эксперимент № 2. Снятие искусственных МХ и ЭМХ (реостатных) для заданных значений добавочного сопротивления.**

Повторить действия 1–5 эксперимента № 1. При этом выбрать требуемое сопротивление в цепи якоря с помощью пакетного выключателя SA4. Результаты исследований занести в таблицу 1.

**Эксперимент № 3. Снятие искусственных МХ и ЭМХ для заданных значений напряжения на якоре электродвигателя M1.**

Повторить действия 1–5 эксперимента № 1. При этом с помощью реостата RP3 выставить пониженное напряжение  $U_я$ . Результаты исследований занести в таблицу 1.

**Эксперимент № 4. Снятие искусственных МХ и ЭМХ при изменении потока возбуждения электродвигателя M1.**

Повторить действия 1–5 эксперимента № 1. При этом с помощью реостата  $RP1$  ослабить магнитный поток машины  $G1$ . Результаты исследований занести в таблицу 1.

### **Обработка результатов эксперимента**

Электромагнитный момент испытуемого двигателя  $M1$ , Н·м, в общем случае определяется по формуле

$$M = \frac{P_{\text{э}}}{\omega}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – скорость вращения вала двигателя, рад/с;

$P_{\text{э}}$  – электромагнитная мощность, Вт;

$$P_{\text{э}} = U_{\text{я}} I_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 R_4 - I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{я}} I_{\text{я}}$  – мощность, отдаваемая генератором  $G1$ , Вт;

$I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$  – мощность электрических потерь в цепи обмотки якоря двигателя, Вт;

$I_{\text{я}}^2 R_4$  – мощность потерь в реостате  $R4$ , Вт.

Данные расчета занести в таблицу 1.

По данным исследований построить ЭМХ и МХ (зависимости  $\omega = f(I_{\text{я}})$  и  $\omega = f(M)$ ) и сравнить их с аналогичными расчётными.

### **Контрольные вопросы**

1 Напишите уравнение электромеханической и механической характеристик двигателя и проанализируйте их.

2 Как влияет реакция якоря двигателя с независимым возбуждением на его механическую характеристику?

3 Как построить естественную механическую характеристику двигателя с независимым возбуждением по паспортным данным машины?

4 Напишите и проанализируйте уравнения механической характеристик и поясните энергетику работы электродвигателя:

- в режиме противовключения;
- в режиме электродинамического тормоза;
- в режиме генераторного торможения.

### 3 Лабораторная работа № 2. Исследование статических характеристик двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением (ДПТ с ПВ)

**Цель работы:** изучение способов получения искусственных механических характеристик двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением; ознакомление с методикой опытного снятия механических характеристик; освоение методики экспериментального исследования МХ и ЭМХ ДПТ с ПВ.

#### *Подготовка к выполнению работы*

1 Изучить правила техники безопасности при выполнении данной лабораторной работы.

2 Изучить теоретические материалы по направлению исследований лабораторной работы.

3 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки. Записать паспортные данные испытуемого асинхронного электродвигателя  $M1$ , нагрузочного электродвигателя  $M2$ , генератора  $G1$  и гонного двигателя  $M3$ .

4 Изучить назначение элементов и режимы работы схемы электрической принципиальной лабораторной установки (рисунок 2).

5 Изучить методики проведения экспериментальных исследований.

6 Рассчитать и построить естественную МХ и ЭМХ исследуемого двигателя по его паспортным данным.

#### *Методические указания по проведению исследований*

##### **Эксперимент № 1. Снятие естественной МХ и ЭМХ.**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Подать на стенд напряжение питания с помощью автоматических выключателей  $QF1$ ,  $QF2$ .

2 Подготовить установку к проведению исследований. Подготовка установки заключается в согласовании включения якорей машин  $M2$  и  $G1$ .

Подключение к сети исследуемого двигателя  $M1$  осуществляется включением  $SA4$ , при этом в якорную цепь полностью введено добавочное сопротивление  $R1$ . По мере разгона  $M1$  сопротивление полностью выводится (шунтируется выключателем  $SA8$ ).

3 Установить номинальный ток возбуждения машины  $M2$  и минимальные токи в обмотке возбуждения  $G1$ .

4 Разомкнуть переключатель  $SA6$ , установить переключатели  $SA7$ ,  $SA8$  в пол. 1 ( $R_1 = 0$ ;  $R_2...R_3 = 0$ ;  $R_4...R_6 = 0$ ).

5 Включить приводной (гонный двигатель)  $M3$  путём нажатия кнопки  $SB2$ . Постепенно увеличивая ток в ОБ  $G1$  реостатом  $RP1$ , разгоняют  $M1$  до номинальной скорости. Затем подключают к сети  $M1$  (включают  $SA4$ ) и приступают к снятию характеристик.

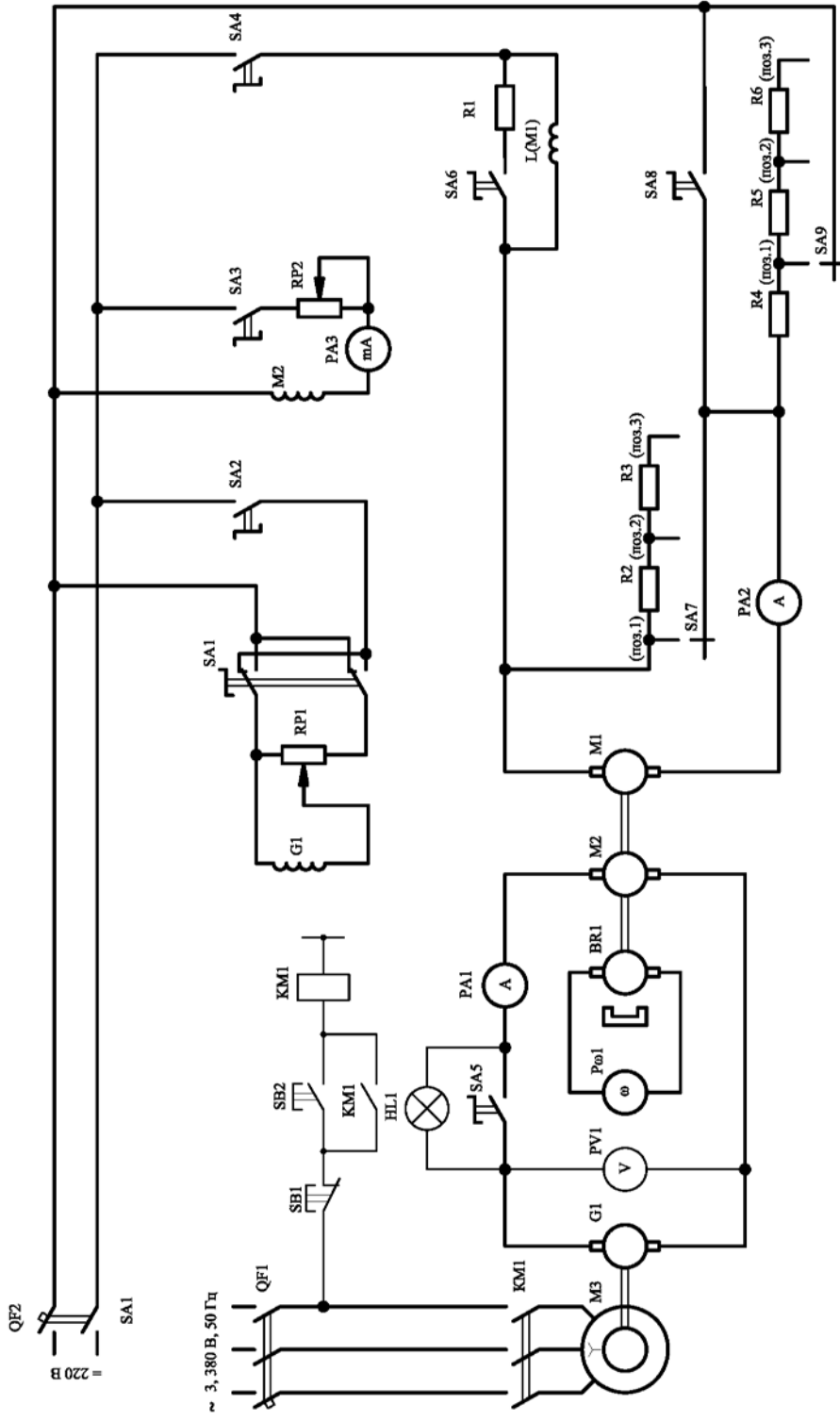


Рисунок 2 – Схема для исследования механических характеристик двигателя постоянного тока последовательного тока возбуждения

6 Регулируя нагрузку на валу электродвигателя  $M1$  путём изменения тока возбуждения машины  $M2$  реостатом  $RP2$ , снять 10 точек характеристики. В процессе снятия характеристики ток якоря не должен превышать значения  $1,5 \cdot I_{ном}$  (следить по прибору  $PA1$ ). Поток (ток возбуждения) исследуемого двигателя и напряжение на якоре в процессе опыта следует поддерживать неизменными. Результаты исследований занести в таблицу 2.

Плавное уменьшение ток в ОВ  $M3$  до 0, снимают показания приборов. Для дальнейшего увеличения нагрузки необходимо переключателем  $SA1$  изменить полярность напряжения на ОВ  $M3$ , а затем плавно увеличить ток возбуждения. Результаты опыта заносит в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты исследований и расчетов

Наименование характеристики	Данные опыта							Данные расчета				
	$R_1$	$R_4$	$R_5$	$I_1$	$I_2$	$U_1$	$\omega$	$U_{я} I_{я}$	$I_{я}^2 R_{я}$	$P$	$\Delta M$	$M$
	Ом	Ом	Ом	А	А	В	рад/с	Вт	Вт	Вт	Н·м	Н·м
$R_1 = 0;$ $R_4 = 0;$ $R_5 = 0$												
$R_1$ – задано; $R_4 = 0;$ $R_5 = 0$												
$R_1$ – задано; $R_4$ – задано; $R_5 = 0$												
$R_1 = 0;$ $R_4 = 0;$ $R_5$ – задано												

**Эксперимент № 2. Снятие искусственной МХ и ЭМХ для заданных значений добавочного сопротивления в цепи якоря.**

Повторить действия 1–6 эксперимента № 1. При этом выбрать требуемое сопротивление в цепи якоря с помощью пакетного выключателя  $SA7$ . Результаты исследований занести в таблицу 2.

**Эксперимент № 3. Снятие искусственной МХ и ЭМХ исследуемого двигателя при шунтировании якоря и введении в цепь якоря добавочного сопротивления.**

Повторить действия 1–6 эксперимента № 1. При этом выбрать требуемое сопротивление в цепи якоря с помощью пакетного выключателя SA7, шунтирующее сопротивление обмотки якоря – с помощью пакетного выключателя SA6. Результаты исследований занести в таблицу 2.

**Эксперимент № 4. Снятие искусственной МХ и ЭМХ исследуемого двигателя при шунтировании ОБ.**

Повторить действия 1–6 эксперимента № 1. При этом зашунтировать обмотку возбуждения с помощью пакетного выключателя SA5. Результаты исследований занести в таблицу 2.

### *Обработка результатов экспериментов*

Момент на валу исследуемого двигателя  $M_1$ , Н·м,

$$M = M_0 \pm \Delta M, \quad (3)$$

где  $\Delta M$  – момент потерь вращения. Зависимость  $\Delta M = f(\omega)$  приведена на рисунке 3.

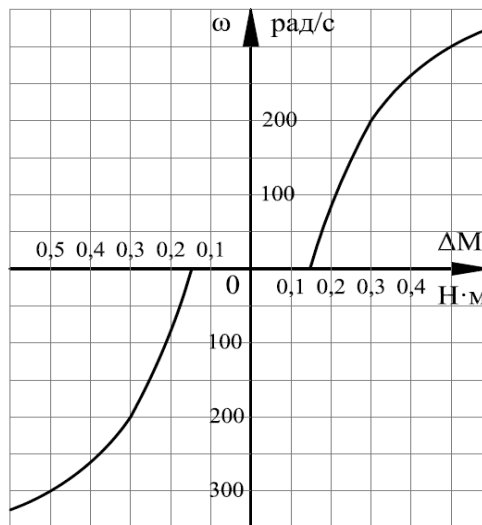


Рисунок 3 – Зависимость  $\Delta M = f(\omega)$  для двигателя M2 при номинальном токе возбуждения

Знак «+» соответствует двигательному режиму работы  $M_1$ , знак «-» – генераторному и режиму противовключения;

$M_0$  – электромагнитный момент нагрузочной машины  $M_2$ , Н·м;

$$M_0 = \frac{P}{\omega} = \frac{U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}}}{\omega}, \quad (4)$$

где  $U_{я}$  – напряжение на якоре двигателя  $M2$  (прибор  $PV1$ );

$I_{я}$  – ток якоря  $M2$  (прибор  $PA1$ );

$R_{я}$  – сопротивление якоря машины  $M2$ , Ом.

С достаточной точностью сопротивление обмотки якоря можно определить по паспортным данным  $M2$ :

$$R_{я} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{яном}}{I_{яном}} \cdot (1 - \eta_{ном}). \quad (5)$$

Результаты расчетов заносятся в таблицу 2.

По данным исследований построить ЭМХ и МХ. Все характеристики следует построить в одной системе координат  $(\omega, I)$  и  $(\omega, M)$ .

### ***Контрольные вопросы***

1 Почему для двигателя последовательного возбуждения нельзя получить точное аналитическое выражение механической характеристики?

2 Покажите по уравнению механической характеристики, изменением каких параметров можно регулировать скорость двигателя.

3 Поясните характеристики двигателя при шунтировании якоря.

4 Изобразите и поясните механические характеристики двигателя в тормозных режимах.

5 Какие основные меры безопасности нужно соблюдать при пуске ДПТ с ПВ и при проведении опытов?

## **4 Лабораторная работа № 3. Исследование статических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗ)**

***Цель работы:*** изучение статических естественных и искусственных МХ и ЭМХ асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗ); освоение методики расчёта естественных и искусственных МХ и ЭМХ, используя паспортные данные; исследование МХ и ЭМХ при симметричном питании статора АД пониженным напряжением, при изменении числа пар полюсов, при включении в цепь статора добавочных сопротивлений симметрично и несимметрично.

### ***Подготовка к выполнению работы***

1 Изучить правила техники безопасности при выполнении данной лабораторной работы.

2 Изучить теоретические материалы по направлению исследований лабораторной работы.





## **Методические указания по проведению исследований**

### **Эксперимент № 1. Снятие естественной ЭМХ.**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Подать на стенд напряжение питания с помощью автоматических выключателей  $QF1$ ,  $QF2$ .

2 С помощью тумблеров  $SA1$ ,  $SA2$  замкнуть обмотки возбуждения электродвигателя  $M2$  и генератора  $G1$ .

3 Переключатель  $SA3$  поставить в положение «Y».

4 Установить с помощью реостата  $RP4$  номинальный ток возбуждения машины  $M2$ , с помощью реостата  $RP5$  – минимальный ток в обмотках возбуждения генератора  $G1$ .

5 Включить приводной (гонный двигатель)  $M3$  путём нажатия кнопки  $SB4$ . Постепенно увеличивая ток возбуждения генератора  $G1$ , разогнать исследуемый двигатель  $M1$ .

6 Включить исследуемый двигатель  $M1$  путём нажатия кнопки  $SB4$ . Увеличивая ток в обмотке возбуждения генератора  $G1$ , разогнать его до скорости  $(1,5...1,8) \cdot \omega_0$ . При этом исследуемый двигатель  $M1$  работает в режиме генератора и приводится в движение машиной  $M2$ , работающей в двигательном режиме. После этого начать снятие естественной характеристики. Плавно уменьшая ток в обмотке возбуждения генератора  $G1$  до нуля, снять ЭМХ исследуемого двигателя в генераторном, а затем в двигательных режимах.

Для дальнейшего увеличения нагрузки на валу исследуемого двигателя  $M1$ , а также для снятия МХ в режиме противовключения необходимо переключателем  $SA2$  изменить полярность напряжения в обмотке возбуждения генератора  $G1$ , а затем, плавно увеличивая ток возбуждения машины  $M3$ , снять несколько точек характеристики.

Для построения МХ необходимо снять не менее 10–12 показаний приборов (например, задавая шаг изменения скорости  $M1$  20 рад/с по прибору  $P\omega1$ ).

При проведении опыта следует иметь в виду, что, снимая участок характеристики после  $M_{\max}$ , замеры по приборам надо производить быстро, чтобы избежать недопустимого перегрева обмоток статора токами, в несколько раз превышающими номинальное значение. Данные испытаний записать в таблицу 3.

### **Эксперимент № 2. Снятие искусственной ЭМХ при симметричном включении в фазы статора активных сопротивлений.**

Повторить действия эксперимента № 1. При этом ввести в цепь статора симметрично нагрузку с помощью реостатов  $RP1$ – $RP3$ . Результаты исследований занести в таблицу 3.

### **Эксперимент № 3. Снятие искусственной ЭМХ при несимметричном включении в фазы статора активных сопротивлений.**

Повторить действия эксперимента № 1. При этом ввести в цепь статора несимметрично нагрузку с помощью реостатов  $RP1$ – $RP3$ . Результаты исследований занести в таблицу 3.

### Эксперимент № 4. Снятие искусственной ЭМХ при изменении числа пар полюсов двигателя М1.

Повторить действия эксперимента № 1. При этом переключить соединение обмотки статора со звезды на треугольник с помощью переключателя SA3. Результаты исследований занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты исследований и расчетов

Наименование характеристики	Номер п/п	Данные опыта						Данные расчёта				
		$U_1$	$I_1$	$P_1$	$I_я$	$U_я$	$\omega$	$U_я I_я$	$I_я^2 R_я$	$P$	$\Delta M$	$M$
		В	А	Вт	А	В	$c^{-1}$	Вт	Вт	Вт	Н·м	Н·м
$U = 127 \text{ В}; R1 = 0$ (2р = 6; Q2 в полож. «Y»)												
$U = 127 \text{ В}; R1 \neq 0$ симметрично (2р = 6; Q2 в полож. «Y»)												
$U = 127 \text{ В}; R1 \neq 0$ несимметрично (2р = 6; Q2 в полож. «Y»)												
$U = 127 \text{ В}; R1 = 0$ (2р = 4; Q2 в полож. «Δ»)												

### Обработка результатов экспериментов

Момент на валу двигателя  $M_1$ , Н·м, определяется по формуле

$$M = M_я \pm \Delta M, \quad (6)$$

где  $\Delta M$  – момент потерь вращения. Зависимость  $\Delta M = f(\omega)$  приведена на рисунке 3. Знак «+» соответствует двигательному режиму работы  $M_1$ , знак «-» – генераторному и режиму противовключения;

$M_я$  – электромагнитный момент нагрузочной машины  $M_2$ , Н·м;

$$M_я = \frac{P}{\omega} = \frac{U_я \cdot I_я - I_я^2 \cdot R_я}{\omega}, \quad (7)$$

где  $U_я$  – напряжение на якоре двигателя  $M_2$  (прибор PV1);

$I_я$  – ток якоря  $M_2$  (прибор PA1);

$R_я$  – сопротивление якоря машины  $M_2$ , Ом.

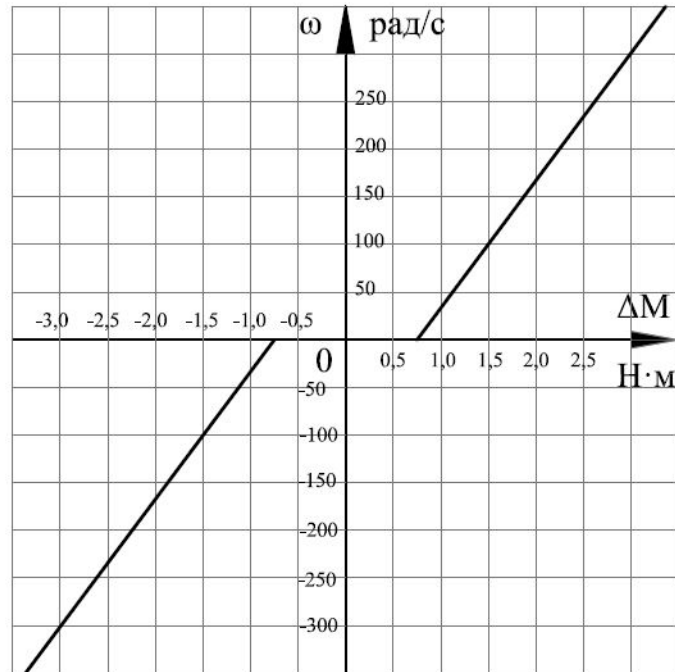


Рисунок 5 – Зависимость  $\Delta M = f(\omega)$  для двигателя  $M1$  при номинальном токе возбуждения

С достаточной точностью сопротивление обмотки якоря можно определить по паспортным данным  $M2$ :

$$R_{я} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{яном}}{I_{яном}} \cdot (1 - \eta_{ном}). \quad (8)$$

Результаты расчетов заносятся в таблицу 3.

По данным исследований построить ЭМХ и МХ. Все характеристики следует построить в одной системе координат  $(\omega, I)$  и  $(\omega, M)$ .

### **Контрольные вопросы**

1 Изобразите и проанализируйте естественные МХ и ЭМХ АД в трех квадрантах.

2 Изобразите и проанализируйте искусственные МХ и ЭМХ АД:

– при симметричном и несимметричном изменении напряжения на статоре;

– при симметричном и несимметричном введении активных сопротивлений в цепь статора и в цепь ротора;

– при симметричном и несимметричном введении индуктивных сопротивлений в цепь статора;

– при изменении числа пар полюсов.

3 Напишите формулы Клосса, покажите область их использования и поясните величины, входящие в формулы.

4 Объясните методику снятия МХ в работе и поясните причину отличия опытных характеристик от рассчитанных по формулам Клосса.

## **5 Лабораторная работа № 4. Исследование статических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР)**

**Цель работы:** изучение статических естественных и искусственных МХ и ЭМХ асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР); освоение методики расчёта естественных и искусственных МХ и ЭМХ, используя паспортные данные.

### **Подготовка к выполнению работы**

1 Изучить правила техники безопасности при выполнении данной лабораторной работы.

2 Изучить теоретические материалы по направлению исследований лабораторной работы.

3 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки (рисунок 6). Записать паспортные данные испытуемого асинхронного электродвигателя  $M1$ , нагрузочного электродвигателя  $M2$ , генератора  $M3$  и гонного двигателя  $M4$ .

4 Изучить назначение элементов и режимы работы схемы электрической принципиальной лабораторной установки (рисунок 6).

5 Изучить методики проведения экспериментальных исследований.

### **Методические указания по проведению исследований**

**Эксперименты № 1 и 2. Снятие искусственных ЭМХ  $\omega = f(I_2')$  ( $R_1...R_3 = 0$ ;  $R_4...R_6 = 0$ ;  $R_7...R_9 = 0$ ) для двух значений напряжения:  $U1 = 120$  В и  $U1 = 80$  В.**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Подать на стенд напряжение питания с помощью автоматических выключателей  $QF1$ ,  $QF2$ .

2 С помощью тумблера  $SA1$  замкнуть обмотку возбуждения электродвигателя  $M3$ .

3 С помощью тумблеров  $SA2$ – $SA5$  зашунтировать сопротивления в цепи статора и ротора исследуемого электродвигателя  $M1$ .

4 Установить с помощью реостата  $RP2$  номинальный ток возбуждения машины  $M2$ , с помощью реостата  $RP1$  – минимальный ток в обмотке возбуждения электродвигателя  $M3$ .

5 Включить приводной (гонный двигатель)  $M4$  путём нажатия кнопки  $SB4$ . Постепенно увеличивая ток возбуждения электродвигателя  $M3$ , разогнать исследуемый двигатель  $M1$ .

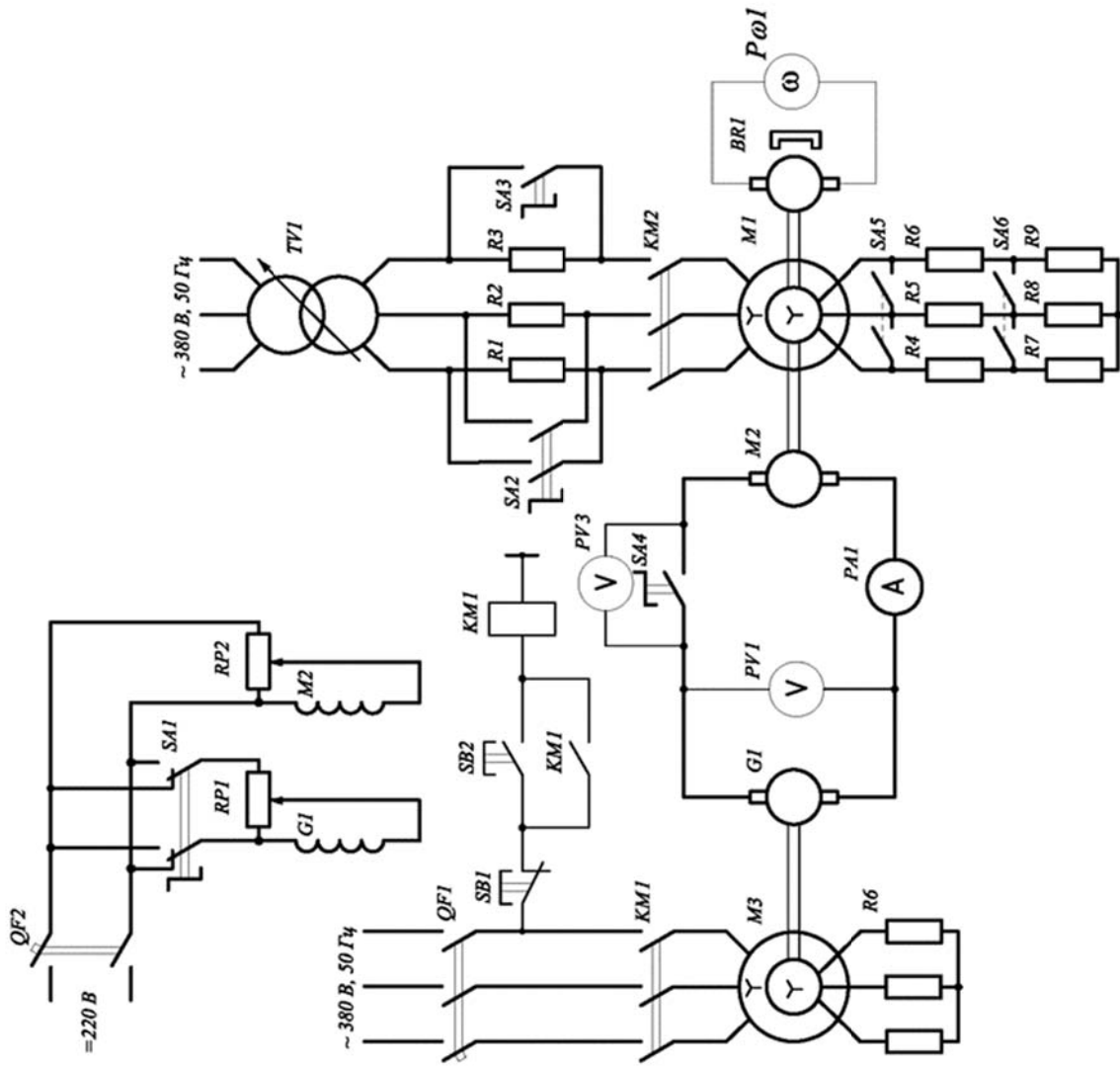


Рисунок 6 – Схема электрическая принципиальная лабораторной установки



**Эксперимент № 3. Снятие искусственных ЭМХ  $\omega = f(I_2')$  при симметричном включении в фазы статора активных сопротивлений ( $R_1...R_3 \neq 0$ ;  $U_1 = 127$  В;  $R_4...R_6 = 0$ ;  $R_7...R_9 = 0$ ).**

Повторить действия 1–5 эксперимента № 1. При ввести в цепь статора дополнительное сопротивление симметрично с помощью переключателей SA5. Результаты исследований занести в таблицу 4.

**Эксперимент № 4. Снятие искусственных ЭМХ  $\omega = f(I_2')$  при несимметричном включении в фазы статора активных сопротивлений ( $R_1...R_3 \neq 0$ ;  $U_1 = 127$  В;  $R_4...R_6 = 0$ ;  $R_7...R_9 = 0$ ).**

Повторить действия 1–5 эксперимента № 1. При ввести в цепь статора дополнительное сопротивление несимметрично с помощью одного из переключателей SA2 и SA3. Результаты исследований занести в таблицу 4.

**Эксперимент № 5. Снятие искусственных ЭМХ  $\omega = f(I_2')$  при симметричном включении в цепь ротора активных сопротивлений ( $R_1...R_3 = 0$ ;  $U_1 = 127$  В;  $R_4...R_6 \neq 0$ ;  $R_7...R_9 = 0$ ).**

Повторить действия 1–5 эксперимента № 1. При ввести в цепь ротора дополнительное сопротивление с помощью переключателя SA5. Результаты исследований занести в таблицу 4.

**Эксперимент № 6. Снятие искусственных ЭМХ  $\omega = f(I_2')$  при симметричном включении в цепь ротора активных сопротивлений ( $R_1...R_3 = 0$ ;  $U_1 = 127$  В;  $R_4...R_6 \neq 0$ ;  $R_7...R_9 \neq 0$ ).**

Повторить действия 1–5 эксперимента № 1. При ввести в цепь ротора дополнительное сопротивление с помощью переключателя SA6. Данные испытаний записать в таблицу 4.

### **Обработка результатов экспериментов**

Момент на валу исследуемого двигателя  $M_1$ , Н·м, определяется по формуле

$$M = M_g \pm \Delta M, \quad (9)$$

где  $\Delta M$  – момент потерь вращения. Зависимость  $\Delta M = f(\omega)$  приведена на рисунке 7. Знак «+» соответствует двигательному режиму работы  $M_1$ , знак «-» – генераторному и режиму противовключения;

$M_g$  – электромагнитный момент нагрузочной машины  $M_2$ , Н·м, определяемый из выражения

$$M_g = \frac{P}{\omega} = \frac{U_y \cdot I_y - I_y^2 \cdot R_y}{\omega}, \quad (10)$$

где  $U_y$  – напряжение на якоре двигателя  $M_2$  (прибор PV3);

$I_{я}$  – ток якоря  $M2$  (прибор  $PA3$ );

$R_{я}$  – сопротивление якоря машины  $M2$ , Ом.

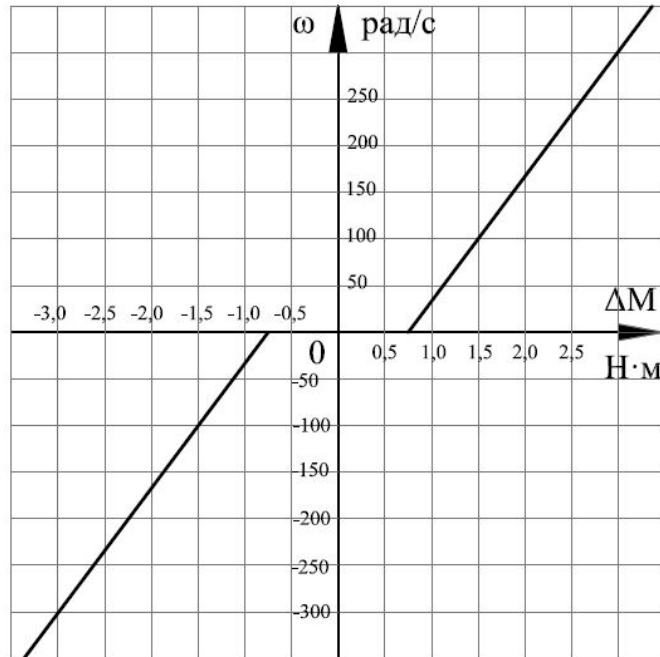


Рисунок 7 – Зависимость  $\Delta M = f(\omega)$  для двигателя  $M1$  при номинальном токе возбуждения

С достаточной точностью сопротивление обмотки якоря можно определить по паспортным данным  $M2$ :

$$R_{я} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{яном}}{I_{яном}} \cdot (1 - \eta_{ном}). \quad (11)$$

Результаты расчетов заносятся в таблицу 4.

По данным исследований построить ЭМХ и МХ. Все характеристики следует построить в одной системе координат  $(\omega, I)$  и  $(\omega, M)$ .

### Контрольные вопросы

1 Изобразите и проанализируйте естественные МХ и ЭМХ АДФ в трёх квадрантах.

2 Изобразите и проанализируйте искусственные МХ и ЭМХ АД:

– при симметричном и несимметричном изменении напряжения на статоре;

– при симметричном и несимметричном введении активных сопротивлений в цепь статора и в цепь ротора;

– при симметричном и несимметричном введении индуктивных сопротивлений в цепь статора.



3 Напишите формулы Клосса, покажите область их использования и поясните величины, входящие в формулы.

## 6 Лабораторная работа № 5. Экспериментальное определение момента инерции электропривода

**Цель работы:** изучение методов экспериментального определения момента инерции электропривода.

### Подготовка к выполнению работы

1 Изучить правила техники безопасности при выполнении данной лабораторной работы.

2 Изучить теоретические материалы по направлению исследований лабораторной работы.

3 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки. Записать паспортные данные испытуемого асинхронного электродвигателя  $M1$  (рисунок 8).

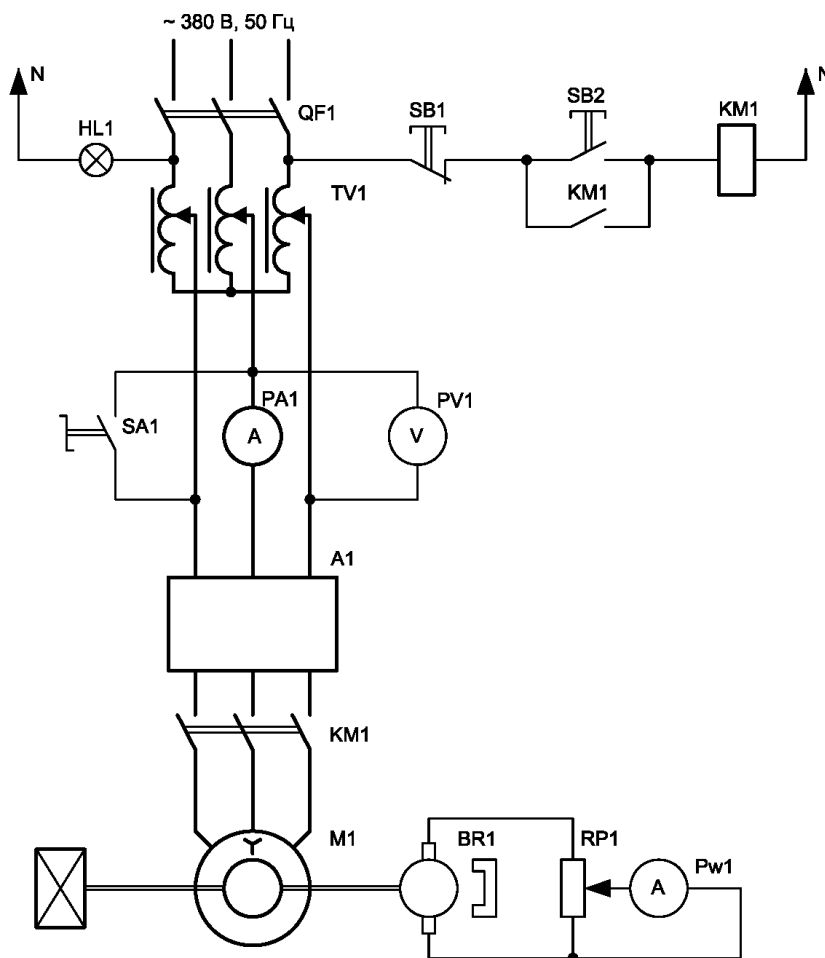


Рисунок 8 – Схема электрическая принципиальная лабораторной установки

4 Изучить назначение элементов и режимы работы схемы электрической принципиальной лабораторной установки.

5 Изучить методики проведения экспериментальных исследований.

6 Рассчитать и построить естественные механическую и электромеханическую характеристики электродвигателя  $M1$ .

### **Методические указания по проведению исследований**

**Эксперимент № 1. Определение момента инерции привода с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором методом свободного выбега.**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Снимается кривая выбега  $\omega = f(t)$ . Для этого с помощью автотрансформатора  $TV1$  по вольтметру  $PV1$  (см. рисунок 8) устанавливают напряжение, равное номинальному напряжению двигателя  $M1$ , а затем магнитным пускателем  $KM1$  пускается двигатель (амперметр  $PA1$  зашунтирован выключателем  $SA1$ ).

После того как двигатель достигнет установившейся скорости, его отключают от сети и снимают кривую выбега. Измерение скорости производится с помощью тахометра. Результаты наблюдений заносят в таблицу 5.

Таблица 5 – Экспериментальные данные кривой свободного выбега

Номер п/п	$t, c$	$\omega, \text{рад/с}$

2 Определяются потери вращения. Для этого запускают двигатель  $M1$  и  $SA1$  ставят в положение «выключено». С помощью автотрансформатора  $TV1$  измеряют напряжение  $U_l$ , записывают величины  $U_l$  и  $\cos \varphi$ . Для получения более точного результата от наибольшего напряжения снимают 8–10 точек. Результаты наблюдений заносят в таблицу 6.

Таблица 6 – Экспериментальные и расчетные данные для метода свободного выбега

Номер п/п	Измерено			Вычислено							
	$U_l$	$I_l$	$\cos \varphi$	$P_0$	$\Delta P_{\text{мед}}$	$\Delta P_{\text{ст. мех}}$	$U_l^2$	$\Delta P_{\text{мех}}$	$M_c$	$t_{\text{подк}}$	$J$
	В	А	град	Вт	Вт	Вт	В <sup>2</sup>	Вт	Н·м	с	кг·м <sup>2</sup>

**Эксперимент № 2. Определение момента инерции привода с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором методом падающего груза.**

Для этого необходимо намотать на шкив несколько витков шнура с грузом на конце и дать возможность грузу свободно падать. При этом измерить вес груза  $Q$ , время падения груза  $t$ , высоту  $h$ , диаметр шкива  $d$ .

Опыт проделать по три раза в обе стороны вращения вала. Измеренные величины занести в таблицу 7.

Таблица 7 – Экспериментальные и расчетные данные для метода падающего груза

Номер п/п	$Q$	$h$	$d$	$t$	$J$	$J_{cp}$
	Н	м	м	с	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>
1						
...						
5						

### Эксперимент № 3. Определение момента инерции привода с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором методом маятниковых колебаний.

Закрепить на шкив на расстоянии  $r$  от оси вращения груз весом  $Q$ . Вывести ротор из положения равновесия. После этого определить время  $t$ , в течение которого он придет в состояние покоя, а также число колебаний  $n$  за этот отрезок времени. Результаты измерений занести в таблицу 8.

Таблица 8 – Экспериментальные и расчетные данные для метода маятниковых колебаний

Номер п/п	$t$	$n$	$T = t/n$	$Q$	$r$	$J$	$J_{cp}$
	с	-	с	Н	м	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>
1							
...							
5							

### Обработка результатов экспериментов

Мощность холостого хода определяется по формуле

$$P_0 = \sqrt{3} \cdot I_l \cdot U_l \cdot \cos \varphi. \quad (12)$$

Потери в меди статора при соединении обмоток треугольником определяются по формуле

$$\Delta P_{мед} = 3 \cdot I_l^2 \cdot R_1. \quad (13)$$

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

$$\Delta P_{ст.мех} = P_0 - P_{мед}. \quad (14)$$

Для того чтобы найти механические потери вращения  $\Delta P_{мех}$ , необходимо от-

нять от  $\Delta P_{ст.мех}$  потери в стали статора. Это достигается построением зависимости  $\Delta P_{ст.мех} = f(U_l^2)$  (рисунок 9) по нескольким точкам. Экстраполируя кривую до оси ординат, получают значение  $\Delta P_{мех}$ , т. к. при  $U_l = 0$  потери в стали статора равны 0 и, следовательно, остаются одни механические потери вращения.

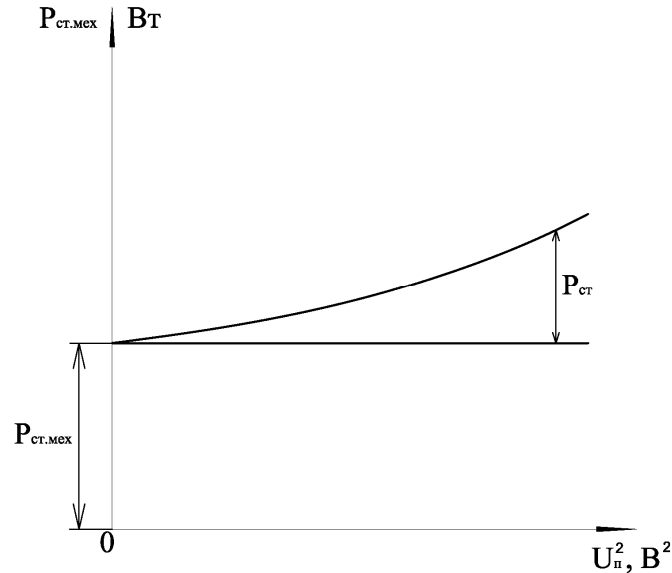


Рисунок 9 – Зависимость  $\Delta P_{ст.мех} = f(U_l^2)$

Величина момента сопротивления  $M_c$  определяется по формуле

$$M_c = \frac{\Delta P_{мех}}{\omega}, \quad (15)$$

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

Тогда момент инерции методом свободного выбега можно определить по формуле

$$J = -M_c \cdot \frac{t_{подк}}{\omega}. \quad (16)$$

Данные расчетов занести в таблицу 6.

Момент инерции методом падающего груза можно рассчитать по формуле

$$J = r^2 \cdot Q \cdot \left( \frac{1 - \frac{Q_0}{Q}}{2 \cdot h} \cdot t^2 - \frac{1}{g} \right). \quad (17)$$

Данные расчетов занести в таблицу 7.

Момент инерции методом маятниковых колебаний можно рассчитать по формуле

$$J = Q \cdot r \cdot \left( \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} - \frac{r}{g} \right). \quad (18)$$

Данные расчетов занести в таблицу 8.

### ***Контрольные вопросы***

1 Поясните влияние момента инерции на динамику работы привода.

2 Поясните экспериментальные методы определения момента инерции привода (двигателя):

- метод свободного выбега;
- метод маятниковых колебаний;
- метод крутильный колебаний;
- метод падающего груза.

3 Дайте оценку точности определения момента инерции известными методами.

4 Поясните методику определения работы, затраченной приводом на преодоление потерь вращения за время самоторможения.

## **7 Лабораторная работа № 6. Исследование способов торможения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением**

***Цель работы:*** изучение методики расчета переходных процессов без учета электромагнитной инерции в электроприводе с неизменными моментами инерции и динамическим моментом, линейно зависящим от скорости; ознакомление с экспериментальным определением времени пуска, торможения и потерь энергии в пуско-тормозных режимах двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

### ***Подготовка к выполнению работы***

1 Изучить правила техники безопасности при выполнении данной лабораторной работы.

2 Изучить теоретические материалы по направлению исследований лабораторной работы.

3 Рассчитать и построить естественные механическую и электромеханическую характеристики испытуемого электродвигателя.

4 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки (рисунок 10). Записать паспортные данные электрической машины М1.

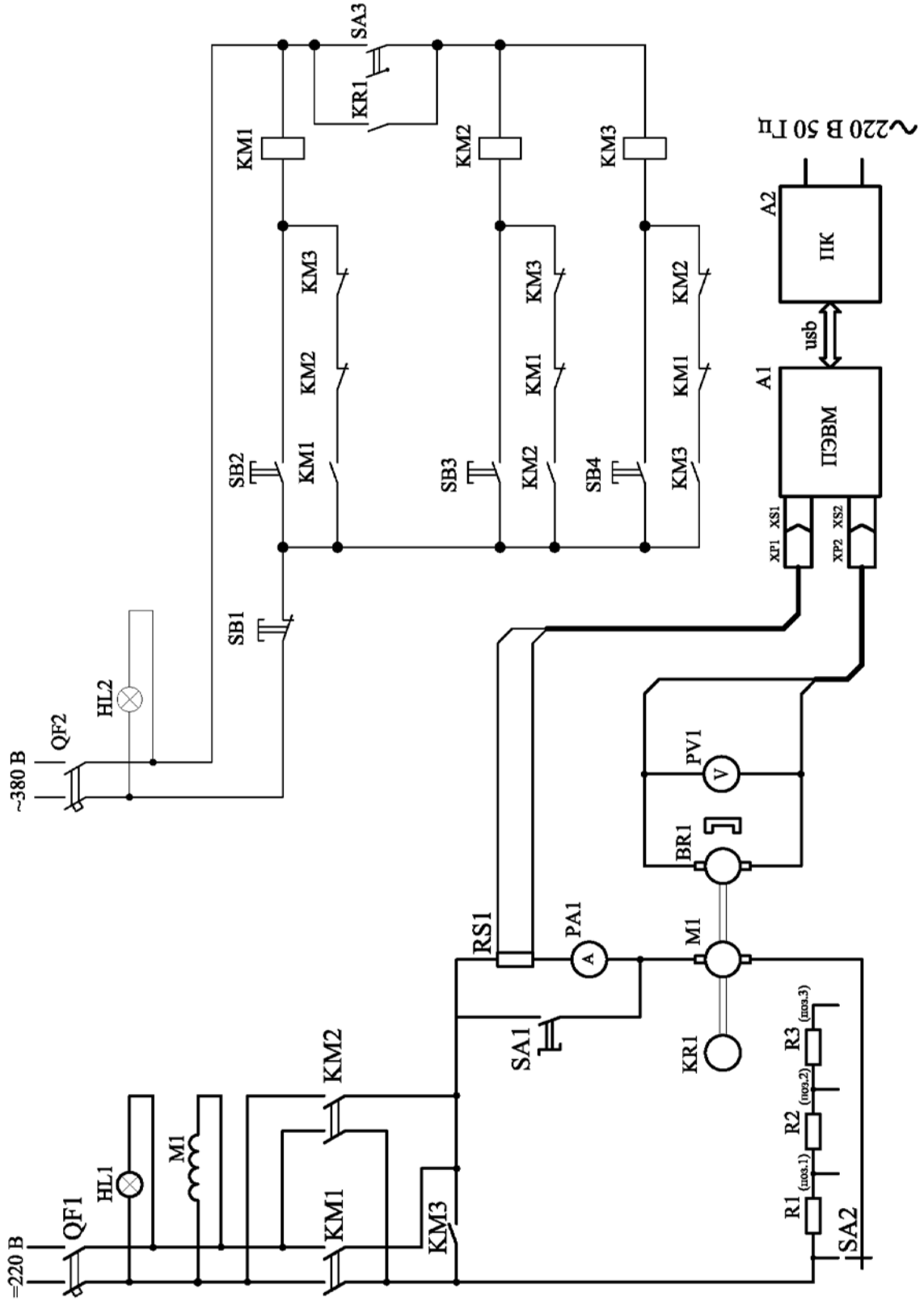


Рисунок 10 – Схема электрическая принципиальная стенда

## **Методические указания по проведению исследований**

### **Эксперимент № 1. Пуск исследуемого двигателя М1.**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Подать на стенд напряжение питания.

2 Поставить переключатели  $SA1$ – $SA3$  в положение 1.

3 Включить кнопку управления  $SB2$ . В момент нажатия кнопки  $SB2$  начинается пуск электродвигателя  $M1$ , о чем свидетельствуют показания тахометра  $PV1$ . В этот момент переключатель  $SA1$  надо поставить в положение 2, чтобы переключить диапазон измерения амперметра  $PA1$ . Далее, используя программу «Осциллограф», снять осциллограммы тока и скорости.

4 По окончании эксперимента нажать на кнопку  $SB1$ .

5 На основе экспериментальных данных рассчитать общие потери при пуске двигателя  $M1$ .

### **Эксперимент № 2. Динамическое торможение исследуемого двигателя М1.**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Подать на стенд напряжение питания.

2 Поставить переключатели  $SA1$ – $SA3$  в положение 1.

3 Включить кнопку управления  $SB2$ .

4 Включить кнопку управления.

5 В момент нажатия кнопки  $SB2$  начинается пуск электродвигателя  $M1$ , о чем свидетельствуют показания тахометра  $PV1$ . В этот момент переключатель  $SA1$  надо поставить в положение 2, чтобы переключить диапазон измерения амперметра  $PA1$ . Далее, в момент нажатия кнопки  $SB4$  происходит отключение якоря электродвигателя  $M1$  от сети и его замыкание на активное сопротивление – начинается динамическое торможение. Используя программу «Осциллограф», снять осциллограммы тока и скорости.

6 По окончании эксперимента нажать на кнопку  $SB1$ .

7 На основе экспериментальных данных рассчитать общие потери при динамическом торможении исследуемого двигателя  $M1$ .

### **Эксперимент № 3. Реверсирование исследуемого двигателя М1.**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Подать на стенд напряжение питания.

2 Поставить переключатели  $SA1$  –  $SA3$  в положение 1.

3 Включить кнопку управления  $SB2$ .

4 В момент нажатия кнопки  $SB2$  начинается пуск электродвигателя  $M1$ , о чем свидетельствуют показания тахометра  $PV1$ . В этот момент переключатель  $SA1$  надо поставить в положение 2, чтобы переключить диапазон измерения амперметра  $PA1$ .

5 Для реверсирования электродвигателя  $M1$  необходимо выполнить следующие действия:

– нажать на кнопку  $SB3$ ;

– нажать на кнопку  $SB5$ .

6 По окончании эксперимента нажать на кнопку  $SB1$ .

7 На основе экспериментальных данных рассчитать общие потери при реверсировании исследуемого двигателя  $M1$ .

#### **Эксперимент № 4. Противовключение исследуемого двигателя $M1$ .**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Подать на стенд напряжение питания.

2 Поставить переключатели  $SA1$ ,  $SA2$  в положение 1,  $SA3$  – в положение 2.

3 Включить кнопку управления  $SB2$ .

4 В момент нажатия кнопки  $SB2$  начинается пуск электродвигателя  $M1$ , о чем свидетельствуют показания тахометра  $PV1$ . В этот момент переключатель  $SA1$  надо поставить в положение 2, чтобы переключить диапазон измерения амперметра  $PA1$ .

5 Для противовключения электродвигателя  $M1$  необходимо выполнить следующие действия:

– нажать на кнопку  $SB3$ ;

– нажать на кнопку  $SB5$ .

6 По окончании эксперимента нажать на кнопку  $SB1$ .

7 На основе экспериментальных данных рассчитать общие потери при противовключении исследуемого двигателя  $M1$ .

#### **Обработка экспериментальных данных**

1 Для сохранения массива точек для последующей их обработки в табличном редакторе в меню «Файл» программы «Осциллограф» выбрать пункт «Сохранить». В открывшемся окне ввести имя файла, выбрать тип файла «ИВАНОВ.txt» (имя файла приведено для примера) и для облегчения построения экспериментальных кривых на любом персональном компьютере выбрать число пропускаемых точек.

2 Открыть полученный «ИВАНОВ.txt» – файл в программе MS Excel (указав в качестве открываемого типа файла текстовый). Далее построить диаграмму зависимости снятого сигнала от времени.

3 По вышеприведенной методике построить тренды  $I = f(t)$  и  $\omega = f(t)$ .

#### **Контрольные вопросы**

1 Выведите и проанализируйте выражение для определения:

– времени пуска;

– электродинамического торможения;

– торможения противовключением;

– реверса при потенциальном и реактивном статических моментах на валу двигателя.

2 Изобразите и поясните механические характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением для известных пуско-тормозных режимов при активном и реактивном статических моментах на валу.

3 Запишите и проанализируйте выражение для определения потерь энергии в якорной цепи:



- при пуске вхолостую и  $M_c = \text{const}$  ;
- то же при электродинамическом торможении противовключением до полной остановки;
- при реверсе.

4 Запишите и поясните исходные уравнения, описывающие переходный режим в приводе постоянного тока с двигателем без учета электромагнитной инерции.

5 Поясните цели и задачи при решении переходных режимов и влияние последних на работу рабочих машин.

## **8 Лабораторная работа № 7. Исследование способов торможения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором**

**Цель работы:** изучение способов торможения асинхронного электродвигателя; освоение методики экспериментального снятия МХ АД в тормозных режимах; изучение методики расчёта тормозных режимов АД.

### ***Подготовка к выполнению работы***

- 1 Изучить правила техники безопасности при выполнении данной лабораторной работы.
- 2 Изучить теоретические материалы по направлению исследований лабораторной работы.
- 3 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки. Записать паспортные данные испытуемого электродвигателя М1.
- 4 Изучить назначение элементов и режимы работы схемы электрической принципиальной лабораторной установки.
- 5 Изучить методики проведения экспериментальных исследований.

### ***Методические указания по проведению исследований***

**Эксперимент № 1. Пуск двигателя М1 до малой скорости с переходом на большую.**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

- 1 Собрать силовую часть согласно рисунку 11.
- 2 Подать на стенд напряжение питания.
- 3 Нажать кнопку управления SB2. Испытуемой двигатель начнет разгоняться до малой скорости, о чем свидетельствует тахометр Рw1. Для перехода на большую скорость после установившейся малой необходимо нажать кнопку управления SB3. Далее, используя программу «Осциллограф», снять осциллограммы тока и скорости. По окончании эксперимента нажать на кнопку SB1.

**Эксперимент № 2. Снятие кривой свободного выбега  $\omega = f(t)$ .**

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

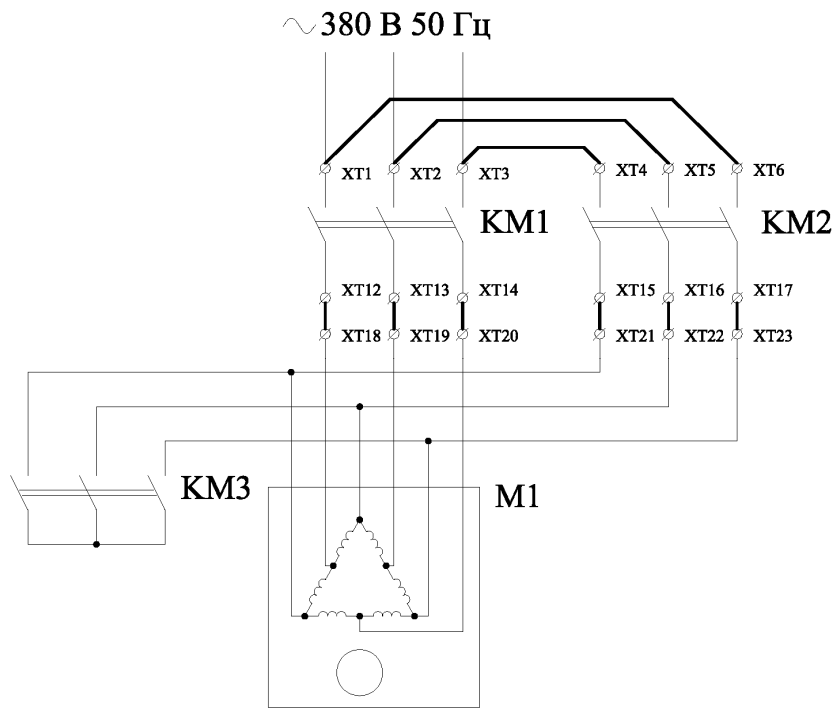


Рисунок 11 – Схема для пуска двигателя *M1* до малой скорости с переходом на большую

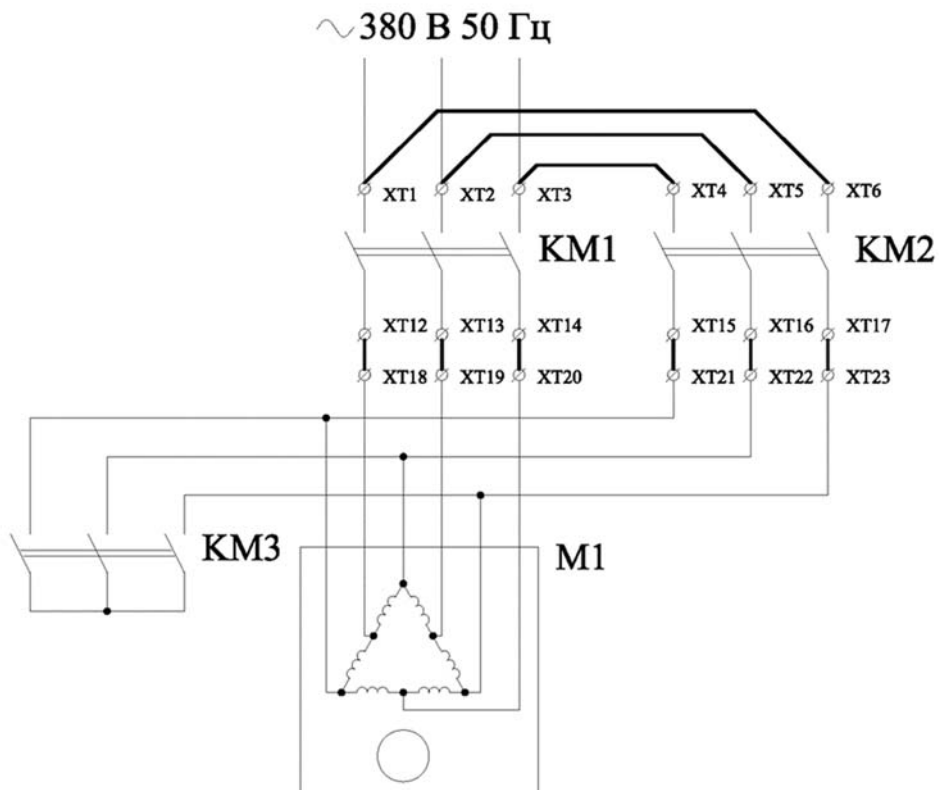


Рисунок 12 – Схема для исследования генераторного торможения

- 1 Собрать силовую часть согласно рисунку 12.
- 2 Подать на стенд напряжение питания.

3 Нажать кнопку управления *SB3*. Испытуемой двигатель начнет разгоняться до большой скорости, о чем свидетельствует тахометр *Pω1*. Для режима свободного выбега после установившейся большой скорости необходимо нажать кнопку управления. Далее, используя программу «Осциллограф», снять осциллограмму тока и скорости.

4 По окончании эксперимента нажать на кнопку *SB1*.

### Эксперимент № 3. Исследование генераторного торможения электродвигателя при переходе с высокой скорости на низкую.

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

1 Собрать силовую часть согласно рисунку 13.

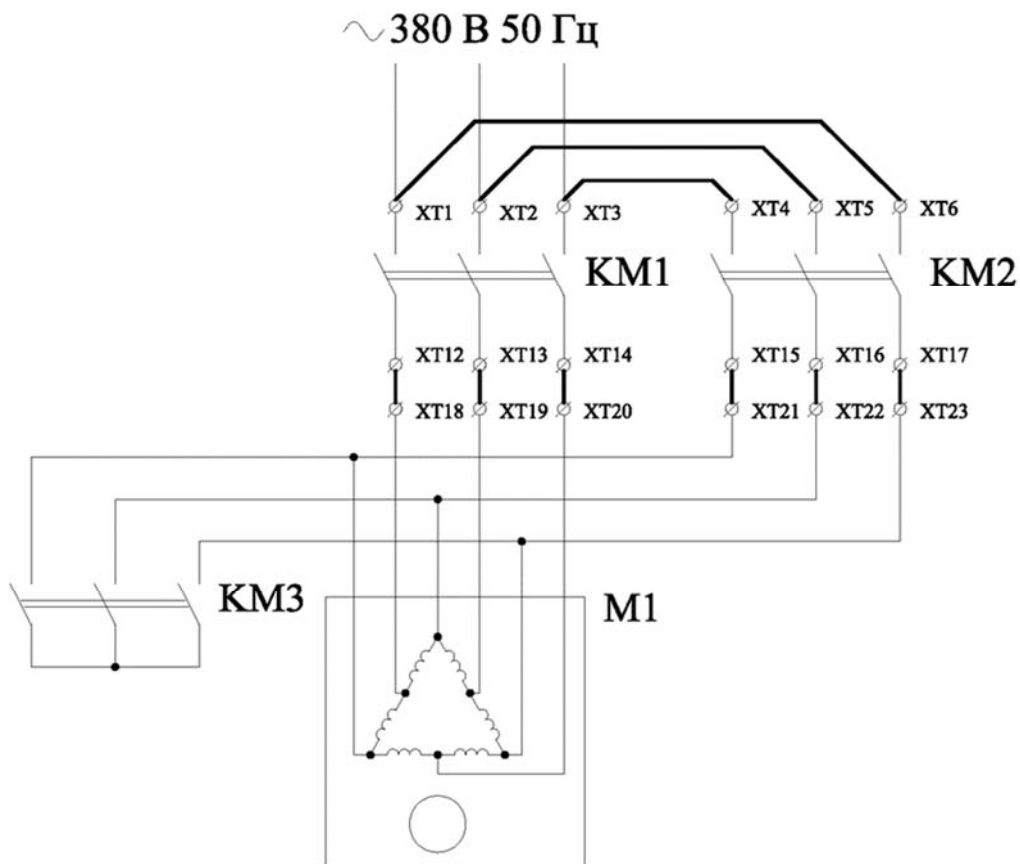


Рисунок 13 – Схема для исследования генераторного торможения

2 Подать на стенд напряжение питания.

3 Переключить выключатель *SA2* в положение «вкл».

4 Нажать кнопку управления *SB3*. Испытуемой двигатель начнет разгоняться до большой скорости, о чем свидетельствует тахометр *Pω1*. Для перехода на пониженную скорость после установившейся большой скорости необходимо нажать кнопку управления *SB2*. Далее, используя программу «Осциллограф», снять осциллограммы тока и скорости.

5 По окончании эксперимента нажать на кнопку *SB1*.

#### Эксперимент № 4. Исследование торможения двигателя противовключением.

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

- 1 Собрать силовую часть согласно рисунку 14.
- 3 Подать на стенд напряжение питания;
- 4 Нажать кнопку управления *SB3*. Испытуемой двигатель начнет разгоняться до большой скорости, о чем свидетельствует тахометр  $P\omega 1$ . Далее, используя программу «Осциллограф», снять осциллограммы тока и скорости.
- 5 По окончании эксперимента нажать на кнопку *SB1*.

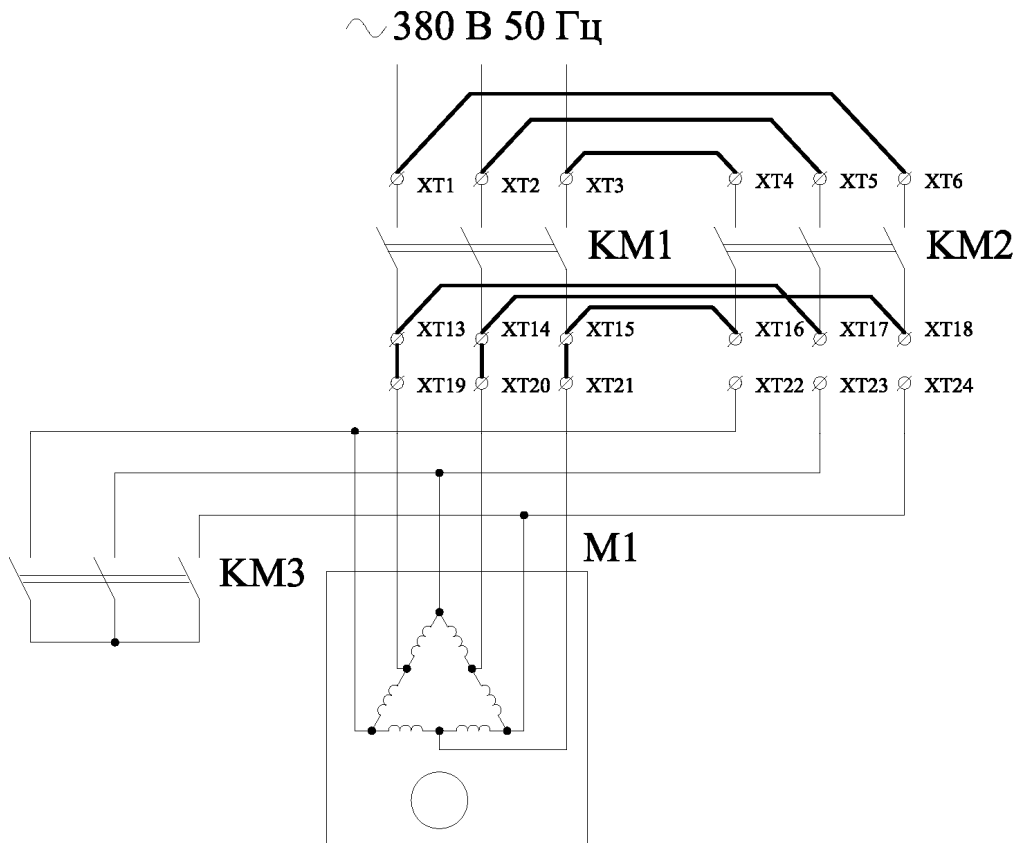


Рисунок 14 – Схема для исследования торможения противовключением

#### Эксперимент № 5. Исследование электродинамического торможения с возбуждением статора постоянным током.

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

- 1 Собрать силовую часть согласно рисунку 15.
- 2 Переключить выключатель *SA2* в положение «откл».
- 3 Подать на стенд напряжение питания.
- 4 Нажать кнопку управления *SB2*. Испытуемой двигатель начнет разгоняться до малой скорости, о чем свидетельствует тахометр  $P\omega 1$ . Для исследования электродинамического торможения с возбуждением статора постоянным током испытуемого электродвигателя *M1* необходимо нажать кнопку управления *SB3*. Далее, используя программу «Осциллограф», снять осциллограммы тока и скорости.

5 По окончании эксперимента нажать на кнопку  $SB1$ . По вышеприведенному алгоритму снять зависимости  $\omega = f(t)$  для двух заданных значений тока, устанавливаемых по амперметру  $PA1$  при помощи реостата  $RP1$ .

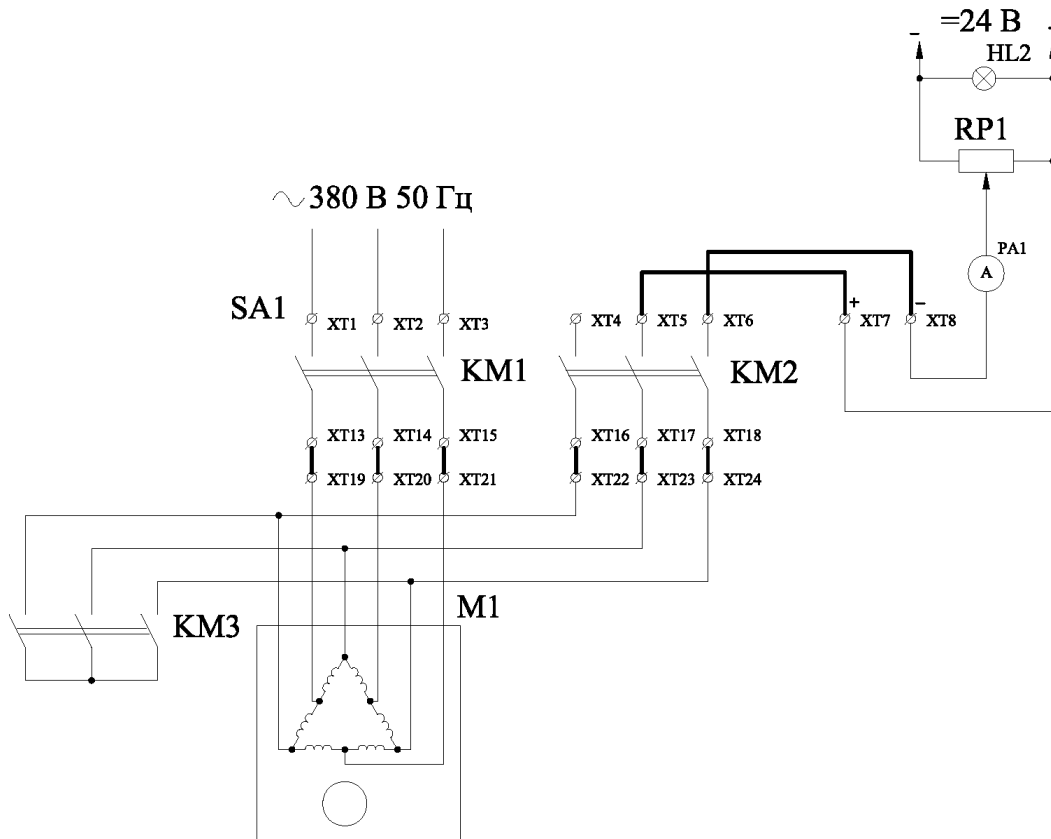


Рисунок 15 – Схема для исследования динамического торможения

### Эксперимент № 6. Исследование конденсаторного торможения.

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

- 1 Собрать силовую часть согласно рисунку 16.
- 2 Переключить выключатель  $SA1$  в положение «60 мкФ».
- 3 Переключить выключатель  $SA2$  в положение «откл».
- 4 Подать на стенд напряжение питания.

5 Нажать кнопку управления  $SB2$ . Испытуемой двигателем начнет разгоняться до малой скорости, о чем свидетельствует тахометр  $P\omega 1$ . Для исследования электродинамического торможения с возбуждением статора постоянным током испытуемого электродвигателя  $M1$  необходимо нажать кнопку управления  $SB3$ . Далее, используя программу «Осциллограф», снять осциллограммы тока и скорости.

6 По окончании эксперимента нажать на кнопку  $SB1$ . По вышеприведенному алгоритму снять зависимости  $\omega = f(t)$  для переключателя  $SA1$  в положении «40 мкФ».

### Эксперимент № 7. Исследование комбинированного торможения.

Данный эксперимент проводится в следующей последовательности.

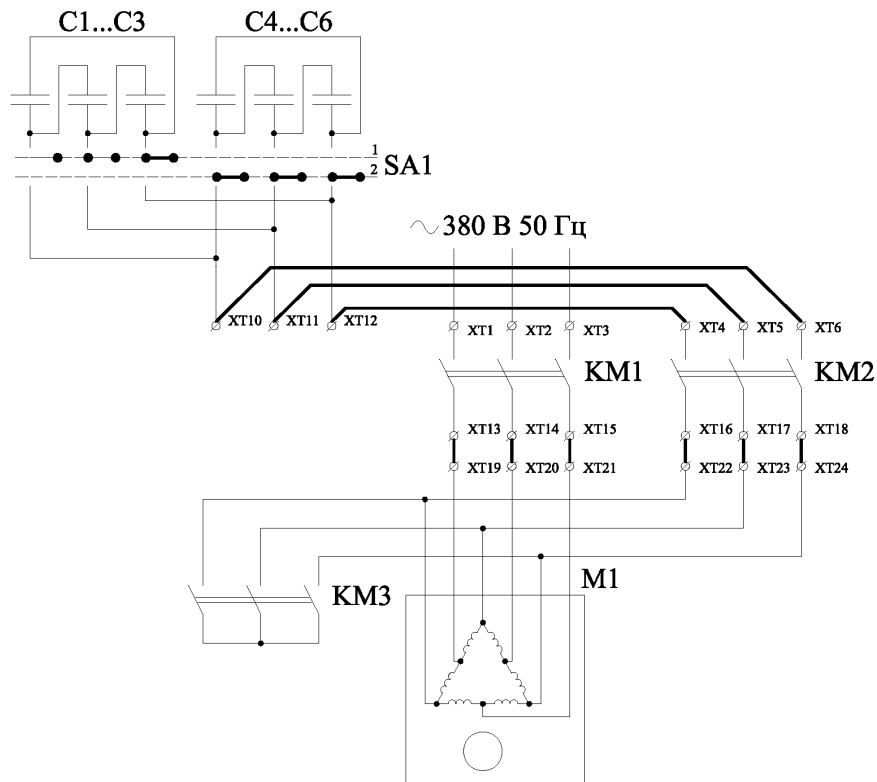


Рисунок 16 – Схема для исследования конденсаторного торможения

1 Собрать силовую часть согласно рисунку 17.

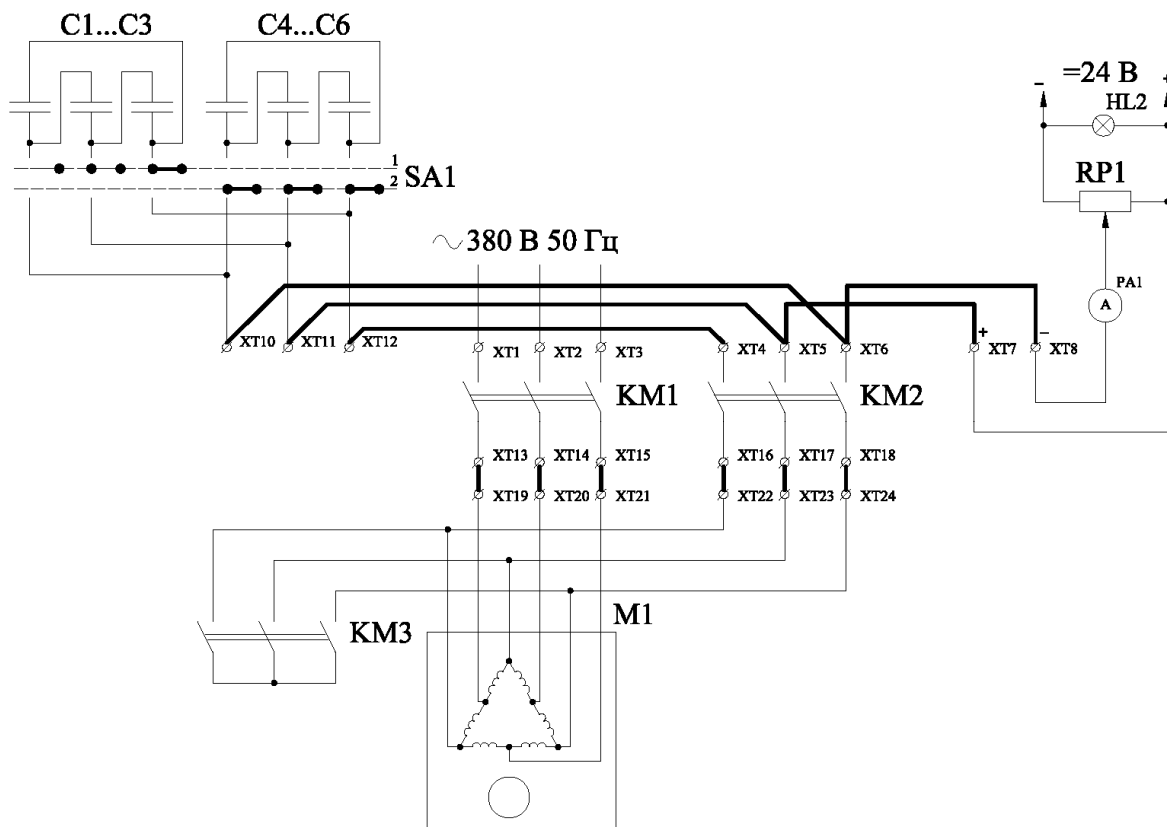


Рисунок 17 – Схема для исследования комбинированного торможения

2 Переключить выключатель  $SA1$  в положение «60 мкФ».

3 Переключить выключатель  $SA2$  в положение «откл».

4 Подать на стенд напряжение питания.

5 Нажать кнопку управления  $SB2$ . Испытуемой двигатель начнет разгоняться до малой скорости, о чем свидетельствует тахометр  $P\omega 1$ . Для исследования комбинированного торможения испытуемого электродвигателя  $M1$  необходимо нажать кнопку управления  $SB3$ . Далее, используя программу «Осциллограф», снять осциллограммы тока и скорости.

6 По окончании эксперимента нажать на кнопку. По вышеприведенному алгоритму снять зависимости  $\omega = f(t)$  для заданного значения постоянного тока и двух значений ёмкости.

### **Обработка экспериментальных данных**

По данным опытов необходимо выполнить следующее.

1 Построить механическую характеристику испытуемого асинхронного электродвигателя для двух скоростей.

2 Построить механическую характеристику испытуемого асинхронного электродвигателя в исследуемых тормозных режимах.

3 Сделать краткий анализ исследуемых способов торможения АДКЗ.

Для сохранения массива точек для последующей их обработки в табличном редакторе в меню «Файл» программы «Осциллограф» выбрать пункт «Сохранить». В открывшемся окне ввести имя файла, выбрать тип файла «ИВАНОВ.txt» (имя файла приведено для примера) и для облегчения построения экспериментальных кривых на любом персональном компьютере выбрать число пропускаемых точек.

4 Открыть полученный «ИВАНОВ.txt» – файл в программе MS Excel или любой аналогичной (указав в качестве открываемого типа файла текстовый). Далее в диалоговом окне указать разделение данных табуляцией.

При правильно выполненной операции откроется рабочий лист с введенными значениями времени и снятого сигнала (тока или скорости). Далее используя мастер построения диаграмм, построить диаграмму зависимости снятого сигнала от времени.

5 По вышеприведенной методике построить тренды  $I = f(t)$  и  $\omega = f(t)$ .

### **Контрольные вопросы**

- 1 Изобразите МХ и проанализируйте работу двигателя в режиме торможения:
  - генераторного (рекуперативного);
  - динамического с внешним возбуждением;
  - конденсаторного торможения;
  - противовключением;
  - однофазного;
  - комбинированного.

2 Запишите уравнение МХ АД для режима динамического торможения с внешним возбуждением и поясните входящие в него величины.

## 9 Лабораторная работа № 8. Исследование системы синхронного вращения электропривода

**Цель работы:** изучение принципов работы системы синхронного вращения электродвигателей на основе электрического вала с рабочими уравнительными машинами; изучение особенностей пуска системы с рабочим электрическим валом; проведение исследования системы электрического вала с общим реостатом в роторной цепи двигателей; выполнение расчётов и построений энергетической диаграммы системы электрического вала.

### *Подготовка к выполнению работы*

1 Изучить правила техники безопасности при выполнении данной лабораторной работы.

2 Изучить теоретические материалы по направлению исследований лабораторной работы.

3 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки. Записать паспортные данные электрических машин.

4 Изучить назначение элементов и режимы работы схемы электрической принципиальной лабораторной установки (рисунок 18).

### *Методические указания по проведению исследований*

#### **Эксперимент № 1. Синхронизация двигателей M1 и M2.**

Данный этап проводится в следующей последовательности.

1 Выключить выключатели QS3, QS4, QS5.

2 Включить автоматический выключатель QF1.

3 Нажать на кнопку SB2. После чего подается напряжение питания на две фазы обмоток статора электродвигателей M1 и M2. После некоторого качания их роторы придут в синфазное положение.

Снять со стрелочных приборов следующие показания:

– мощности  $P_{10}$  по ваттметрам PW1 и PW2;

– токи  $I_{10}$  по амперметрам PA1 и PA2;

– напряжение в фазе ротора  $E_2$  машин M1 и M2 по вольтметру PV3.

Данные опыта занести в таблицы 9 и 10.

**Внимание!** После нажатия кнопки «Пуск» все дальнейшие действия выполнять как можно быстрее.

По окончании синхронизации необходимо выполнить следующее.

1 Включить QS1, QS2, QS3.

2 Выполнить измерения в цепи статоров машин M1 и M2.



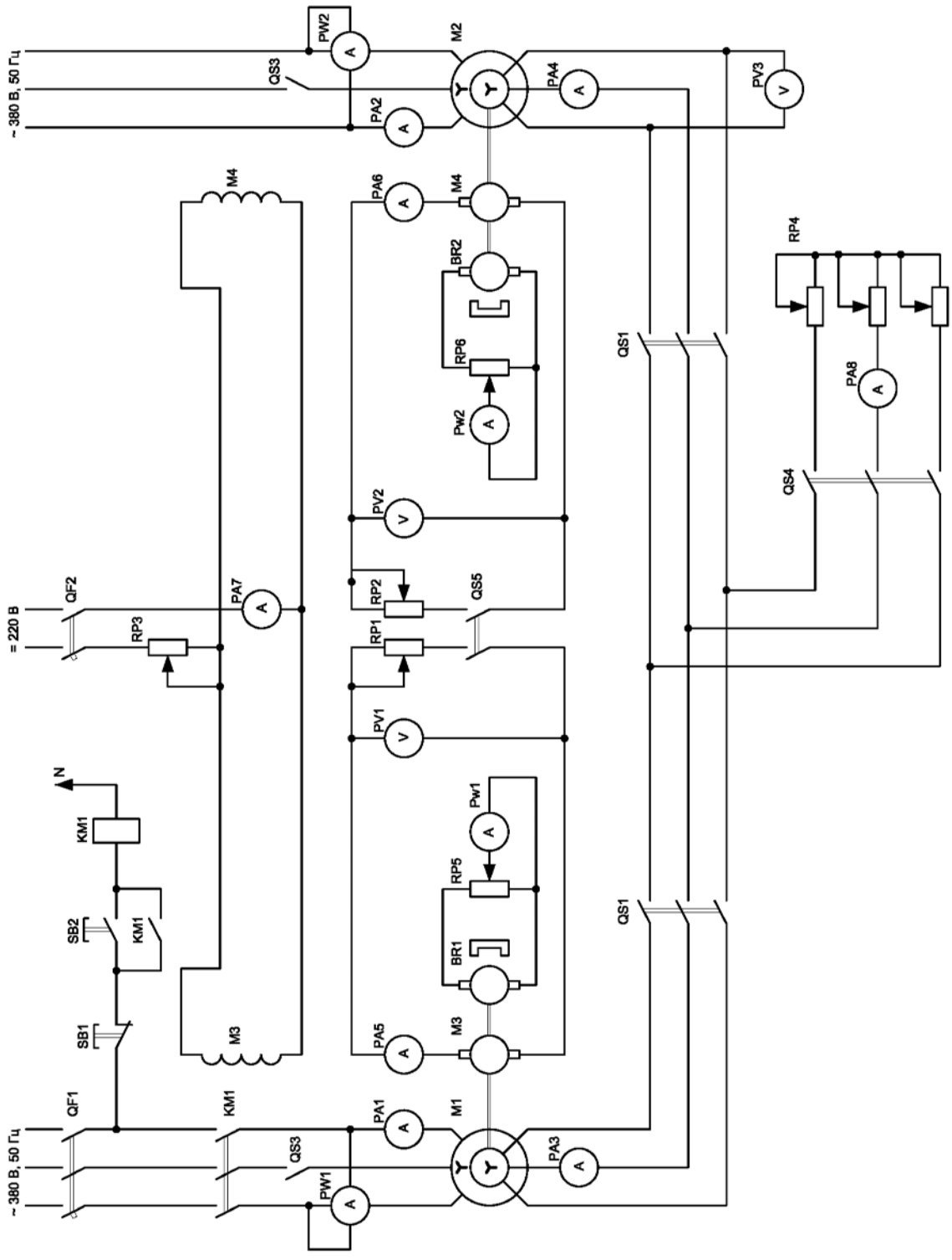


Рисунок 18 – Схема электрическая принципиальная стенда



Таблица 10 – Результаты исследований

Агрегат М1-НМ1-ТГ1 № 1								
$\Theta$	$P_1$	$P_{10}$	$I_{1\phi}$	$\omega_1$	$I_{10}$	$I_{2\phi}$	$I_1$	$U_1$
град	Вт	Вт	А	$\text{с}^{-1}$	А	А	А	В

Продолжение таблицы 10

Агрегат М1-НМ1-ТГ1 № 2								
$\Theta$	$P_1$	$P_{10}$	$I_{1\phi}$	$\omega_1$	$I_{10}$	$I_{2\phi}$	$I_1$	$U_1$
град	Вт	Вт	А	$\text{с}^{-1}$	А	А	А	В

### **Обработка экспериментальных данных**

Момент на валу исследуемого двигателя М1, Н·м, определяется по формуле

$$M = M_j \pm \Delta M, \quad (19)$$

где  $\Delta M$  – момент потерь вращения машины М3(М4), найденный из опытной зависимости  $\omega = f(M)$ , снятой при номинальном токе возбуждения М3(М4) (рисунок 19);

$M_j$  – электромагнитный момент нагрузочной машины М3(М4), Н·м, определяемый из выражения

$$M_j = k\Phi\omega. \quad (20)$$

С достаточной точностью сопротивление обмотки якоря можно определить по паспортным данным М2:

$$R_y = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{яном}}{I_{яном}} \cdot (1 - \eta_{ном}). \quad (21)$$

Результаты расчетов заносятся в таблицу 10.

### **Контрольные вопросы**

1 Как обеспечивается синхронное вращение электродвигателей в системе с общим реостатом в роторной цепи?

2 Поясните способы синхронизации системы по схеме лабораторной установки.

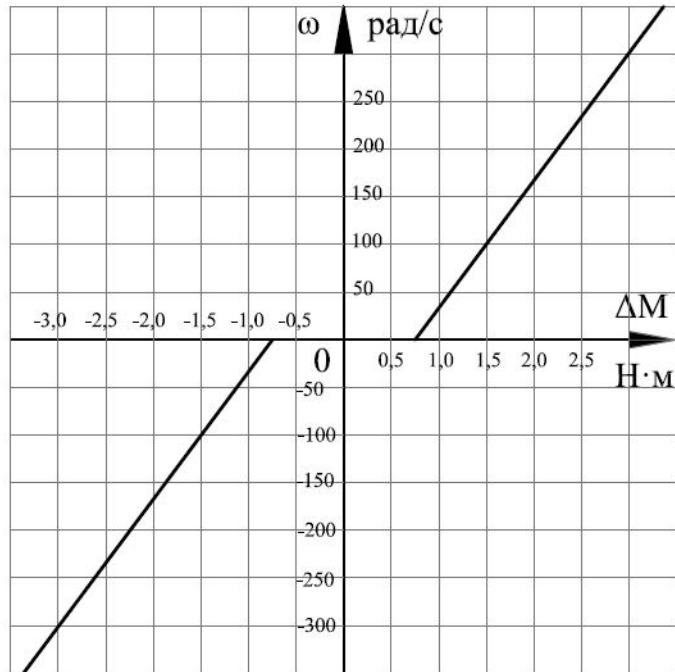


Рисунок 19 – Зависимость  $\Delta M = f(\omega)$  для двигателя  $M1$  при номинальном токе возбуждения

3 Поясните методику расчёта и построение энергетических диаграмм систем синхронного вращения электроприводов.

4 Поясните методику опытного снятия характеристик на лабораторной установке.

5 Изобразите и поясните векторные диаграммы системы с общим реостатом.

6 Сравните системы синхронного вращения электроприводов, применяемых в различных производственных механизмах.

## 10 Лабораторная работа № 9. Исследование динамических свойств ДПТ с НВ при питании от источника напряжения бесконечной мощности

**Цель работы:** освоение методики составления модели ДПТ с НВ в среде Matlab; исследование переходных процессов пуска ДПТ с НВ при одновременном подключении якоря и обмотки возбуждения к источнику бесконечной мощности (момент нагрузки равен 0); исследование переходных процессов пуска ДПТ с НВ при заблаговременном подключении обмотки возбуждения к источнику (момент нагрузки равен  $0,5M_{ном}$ ); исследование переходных процессов в ДПТ с НВ при динамическом торможении (момент нагрузки равен  $0,5M_{ном}$ ); составление модели реостатного пуска ДПТ с НВ (пуск в три ступени); исследование переходных процессов при реостатном пуске ДПТ с НВ (момент нагрузки равен  $0,5M_{ном}$ ).

### ***Состав отчета***

- 1 Титульный лист (установленной формы для отчетов по лабораторным работам).
- 2 Цель работы.
- 3 Исходные данные, в соответствии с вариантом задания.
- 4 Схема модели ДПТ с НВ.
- 5 Схема модели ДПТ с НВ при динамическом торможении.
- 6 Схема модели ДПТ с НВ при реостатном пуске.
- 7 Расчеты пускового реостата и сопротивления динамического торможения.
- 8 Результаты расчета (требуемые графики функций).
- 9 Выводы по работе.

### ***Методические указания по проведению исследований***

Необходимо сделать следующее.

- 1 Составить схему модели ДПТ с НВ.
- 2 Рассчитать переходные процессы пуска ДПТ с НВ при одновременном подключении якоря и обмотки возбуждения к источнику бесконечной мощности.
- 3 Рассчитать переходные процессы пуска ДПТ с НВ при заблаговременном подключении обмотки возбуждения к источнику.
- 4 Рассчитать сопротивление динамического торможения, обеспечивающее двукратное ограничение тока якоря.
- 5 Составить схему модели динамического торможения ДПТ с НВ.
- 6 Рассчитать пусковой реостат для нормального пуска в три ступени.
- 7 Составить модель реостатного пуска ДПТ с НВ.
- 8 Рассчитать переходные процессы при ступенчатом пуске ДПТ с НВ.
- 9 Сделать выводы по работе.

Все математическое описание и варианты исходных заданий представлены в электронном варианте и хранятся в классе ПЭВМ а. 207/к. 2 кафедры «Электропривод и АПУ»

### ***Обработка экспериментальных данных***

Результаты моделирования должны быть представлены в виде графиков функций  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I_a = f(t)$ ,  $I_e = f(t)$  и фазового портрета  $\omega = f(M)$ , а также в виде таблицы результатов расчета этих величин.

В отчете должны быть приведены также расчеты пускового реостата и сопротивления динамического торможения. Графические зависимости и результаты расчета должны быть представлены в интервале времени, достаточном для завершения переходного процесса.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Напишите уравнение электромеханической и механической характеристик двигателя и проанализируйте их.
- 2 Как влияет реакция якоря двигателя с независимым возбуждением на его механическую характеристику?
- 3 Как построить естественную механическую характеристику двигателя с независимым возбуждением по паспортным данным машины?
- 4 Напишите и проанализируйте уравнения механической характеристик и поясните энергетику работы электродвигателя:
  - в режиме противовключения;
  - в режиме электродинамического тормоза;
  - в режиме генераторного торможения.

## **11 Лабораторная работа № 10. Исследование динамических свойств АДКЗ при питании от источника напряжения бесконечной мощности**

***Цель работы:*** освоение методики составления модели АДКЗ в среде Matlab; исследование переходных процессов пуска АДКЗ при подключении обмотки статора к источнику бесконечной мощности (момент нагрузки равен 0); исследование переходных процессов пуска АДКЗ при подключении обмотки статора к источнику бесконечной мощности (момент нагрузки равен  $0,5M_{ном}$ ); исследование переходных процессов в ДПТ с НВ при динамическом торможении (момент нагрузки равен  $0,5M_{ном}$ ).

### ***Состав отчета***

- 1 Титульный лист (установленной формы для отчетов по лабораторным работам).
- 2 Цель работы.
- 3 Исходные данные в соответствии с вариантом задания.
- 4 Схема модели АДКЗ.
- 5 Схема модели АДКЗ при динамическом торможении.
- 6 Результаты расчета (требуемые графики функций).
- 7 Выводы по работе.

### ***Методические указания по проведению исследований***

Необходимо сделать следующее.

- 1 Составить схему модели АДКЗ.
- 2 Рассчитать переходные процессы пуска АДКЗ при подключении обмотки статора к источнику бесконечной мощности (момент нагрузки равен 0).

3 Рассчитать переходные процессы пуска АДКЗ при подключении обмотки статора к источнику бесконечной мощности (момент нагрузки равен  $0,5M_{ном}$ ).

4 Составить схему модели динамического торможения АДКЗ.

5 Сделать выводы по работе.

Все математическое описание и варианты исходных заданий представлены в электронном варианте и хранятся в классе ПЭВМ а. 207/к. 2 кафедры «Электропривод и АПУ».

### ***Обработка экспериментальных данных***

Результаты моделирования должны быть представлены в виде графиков функций  $\omega = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $I_a = f(t)$ ,  $I_g = f(t)$  и фазового портрета  $\omega = f(M)$ , а также в виде таблицы результатов расчета этих величин.

В отчете должны быть приведены также расчеты пускового реостата и сопротивления динамического торможения. Графические зависимости и результаты расчета должны быть представлены в интервале времени, достаточном для завершения переходного процесса.

### ***Контрольные вопросы***

1 Изобразите и проанализируйте естественные МХ и ЭМХ АДФ в трёх квадрантах.

2 Изобразите и проанализируйте искусственные МХ и ЭМХ АД:

– при симметричном и несимметричном изменении напряжения на статоре;

– при симметричном и несимметричном введении активных сопротивлений в цепь статора и в цепь ротора;

– при симметричном и несимметричном введении индуктивных сопротивлений в цепь статора.

3 Напишите формулы Клосса, покажите область их использования и поясните величины, входящие в формулы.

## **Список литературы**

1 **Онищенко, Г. Б.** Электрический привод: учебник / Г. Б. Онищенко. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Академия, 2013. – 288 с.

2 **Шичков, Л. П.** Электрический привод: учебник и практикум для академического бакалавриата / Л. П. Шичков. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2018. – 330 с.

3 **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

4 **Ключев, В. И.** Теория электропривода: учебник для вузов / В. И. Ключев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

5 **Ильинский, Н. Ф.** Общий курс электропривода / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва: Энергоатомиздат, 1992. – 543 с.

6 **Москаленко, В. В.** Электрический привод : учебник / В. В. Москаленко. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 364 с.

7 **Москаленко, В. В.** Электрический привод : учебное пособие / В. В. Москаленко. – Москва: Мастерство; Высшая школа, 2000. – 368 с.

8 **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 158 с.: ил.

9 **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учебное пособие для вузов по специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639 с.