



Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

Энергетический факультет

Кафедра Электроэнергетики

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным работам

по дисциплине «Электрические машины»

для студентов специальности 050718 – Электроэнергетика



**УТВЕРЖДАЮ**  
Декан энергетического  
факультета

 Кислов А.П.  
« 03 » 09 2008 г.

Составитель: старший преподаватель  Исенов С.С.

Кафедра «Электроэнергетика»

**Методические указания  
к лабораторным работам**

дисциплина Электрические машины

для специальности 050718 – Электроэнергетика

Программа разработана на основании рабочей учебной программы,  
утвержденной и введенной в действие протоколом РУМС от «22» июня 2006 г.

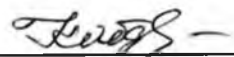
Рекомендована на заседании кафедры от « 29 » 08 2008 г.

Протокол № 1.

Заведующий кафедрой  Захаров И.В.

Одобрено методическим советом энергетического факультета

« 3 » 09 2008 г. Протокол № 2.

Председатель МС  М.М. Кабдуалиева

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Лабораторные занятия при изучении дисциплины «Электрические машины» являются одной из основных форм закрепления теоретических знаний, позволяющей студентам практически проверить справедливость теоретических положений при экспериментальном исследовании.

Методические указания разработаны в соответствии с программой курса «Электрические машины» на основе плана учебного процесса в лаборатории и включают краткие теоретические сведения, указания по выполнению работы, рекомендуемую литературу, контрольные задания и вопросы.

Учебный процесс в лаборатории можно разделить на три этапа: 1) подготовка к лабораторной работе, изучение теоретического материала соответствующего данной теме; 2) проведение эксперимента, получение опытных данных; 3) анализ результатов эксперимента, выполнение расчетов и подготовка отчета по лабораторной работе.

### **Лабораторная работа № 2. Трансформаторы.**

Цель работы: Целью настоящей работы является изучение схем соединения измерительных трансформаторов тока, применяемых в устройствах релейной защиты и автоматики, и методов проверки их основных характеристик.

### **Краткие теоретические сведения**

Назначение, принцип действия и область применения. Трансформаторы тока питают цепи защиты токами, пропорциональными токам сети.

Такое питание цепей осуществляется по типовым схемам соединений трансформаторов тока и обмоток реле. Поведение и работа реле в каждой из этих схем зависят от характера распределения токов во вторичных цепях в нормальных и аварийных режимах.

Коэффициент схемы равен отношению тока в катушке реле к току во вторичных обмотках ТТ  $K_{СХ} = I_P / I_2$ . Коэффициент схемы учитывается при расчете уставок и оценки чувствительности защиты.

а) Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в полную звезду.

Трансформаторы тока устанавливаются во всех фазах. Вторичные обмотки трансформаторов тока и обмотки реле соединяются в звезду и их нулевые точки связываются одним проводом; называемым нулевым (рисунок 1).

В нулевую точку объединяются одноименные зажимы обмоток трансформаторов тока.

При нормальном режиме и трехфазном КЗ, как показано на рисунке 1, в реле *I*, *II* и *III* проходят токи фаз

$$I_a = \frac{I_A}{n_T}, I_b = \frac{I_B}{n_T}, I_c = \frac{I_C}{n_T}$$

а в нулевом проводе – их геометрическая сумма

$$I_{н.н} = (I_a + I_b + I_c),$$

которая при симметричных режимах (при наличии и отсутствии заземления в точках *H* и *K*) равна нулю (рисунок 2, а).

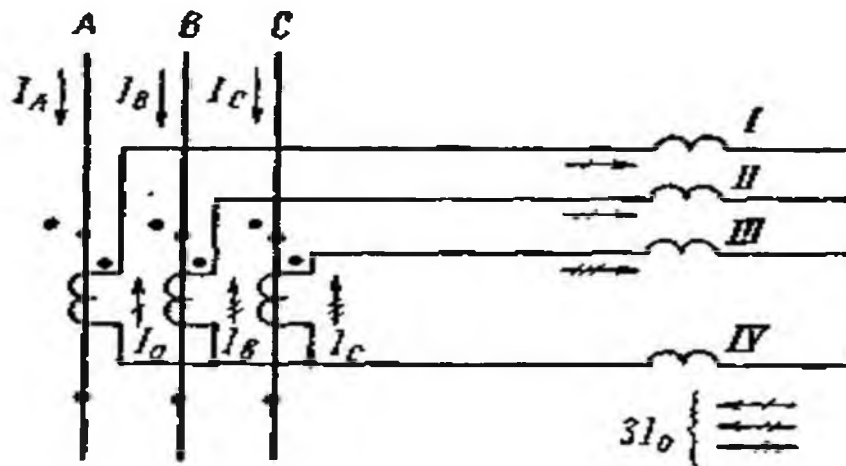


Рисунок 1 – Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в звезду.

При двухфазных КЗ ток КЗ проходит только в двух поврежденных фазах и соответственно в реле, подключенных к трансформаторам тока поврежденных фаз (рисунок 2, б), ток в неповрежденной фазе отсутствует. Согласно закону Кирхгофа сумма токов в узле равна нулю, следовательно,  $I_b + I_c = 0$ , отсюда

$$I_c = -I_b$$

С учетом этого на векторной диаграмме токи  $I_b$  и  $I_c$  показаны сдвинутыми по фазе на  $180^\circ$  (рисунок 2, б).

Ток в нулевом проводе схемы равен сумме токов двух поврежденных фаз ( $I_b$  и  $I_c$ ), но так как последние равны и противоположны по фазе (рисунок 2, б), то ток в нулевом проводе также отсутствует

$$I_{н.н} = I_b + I_c = 0$$

Поэтому реле IV, включенное в нулевой провод, не будет реагировать на нагрузку и междуфазные КЗ, в чем состоит важная особенность схемы звезды.

В действительности в результате не идентичности характеристик и погрешностей трансформаторов тока сумма вторичных токов в обоих случаях отличается от нуля. В нулевом проводе проходит, некоторый остаточный ток, называемый током небаланса  $I_{нн} = I_{нб}$ . При нормальном режиме ток небаланса

имеет величину порядка 0,01 – 0,2 а. При КЗ в связи с увеличением токов намагничивания величина тока небаланса возрастает.

При однофазных КЗ первичный ток КЗ проходит только по одной поврежденной фазе (рисунок 2, в). Соответствующий ему вторичный ток проходит также только через одно реле и замыкается по нулевому проводу.

При двухфазных КЗ на землю (рисунок 2, г) ток проходит в двух реле, включенных на поврежденные фазы (например, В и С). В нулевом проводе проходит геометрическая сумма этих токов, всегда отличная от нуля, что следует из их векторной диаграммы.

При двойном замыкании на землю в разных точках прохождения токов в сети показано на рисунке 2, д.

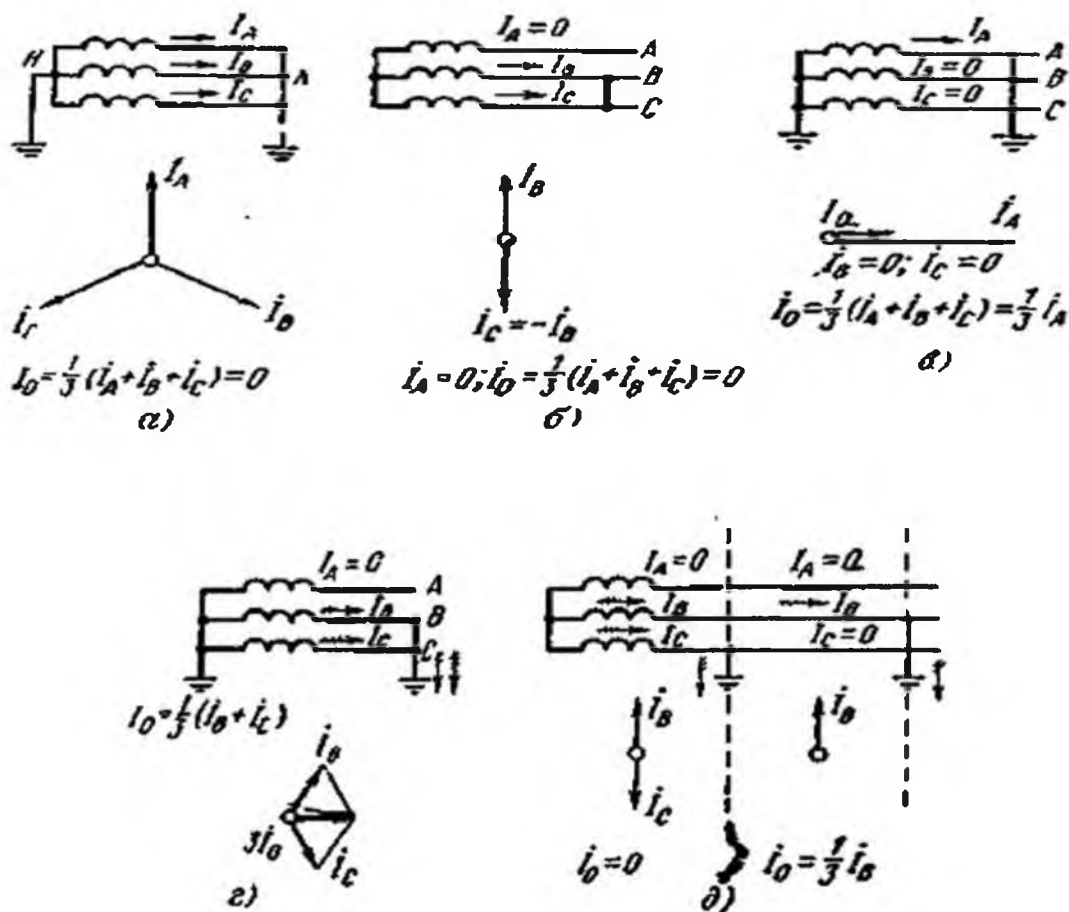


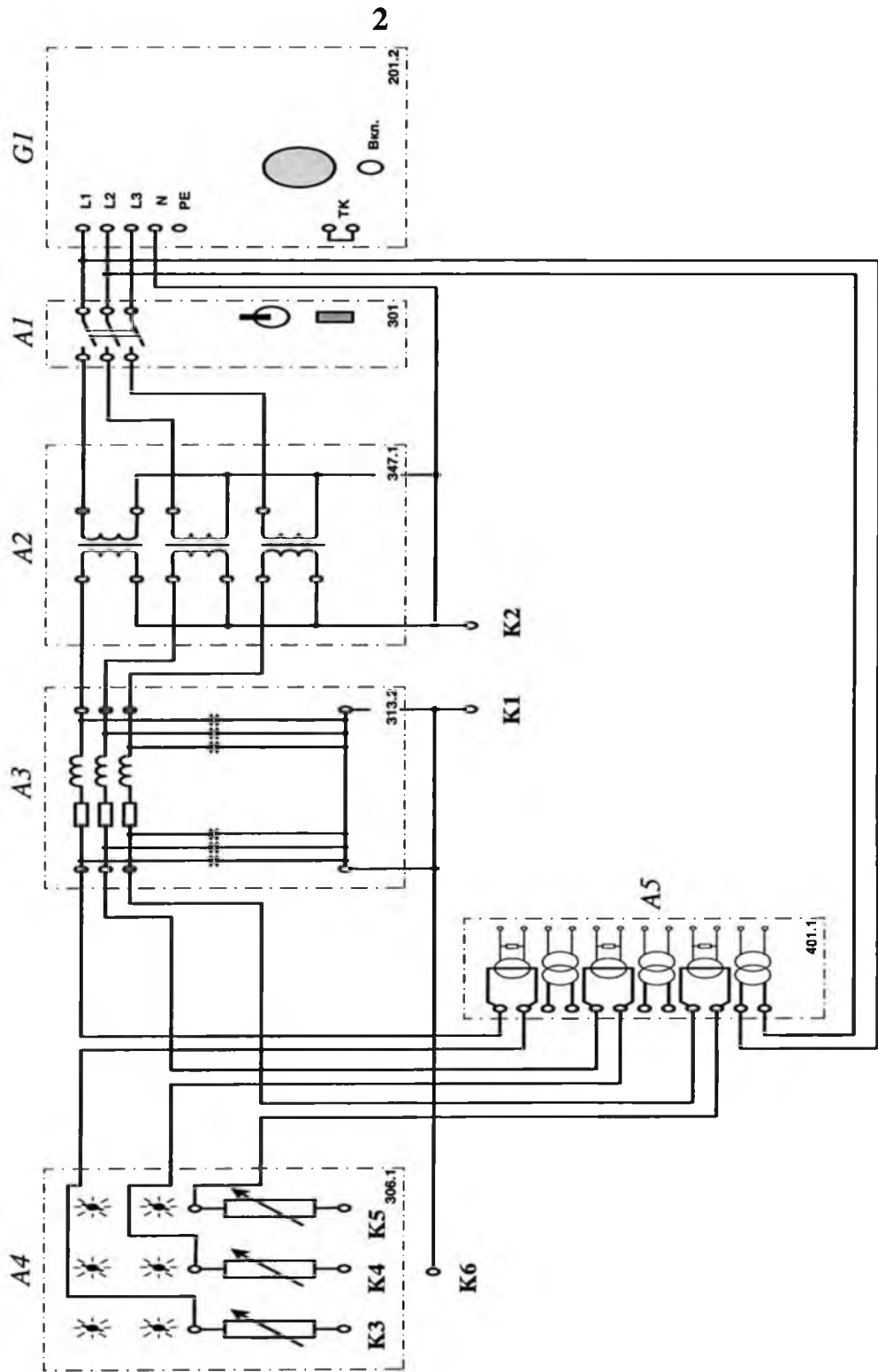
Рисунок 2 – Векторная диаграмма токов.

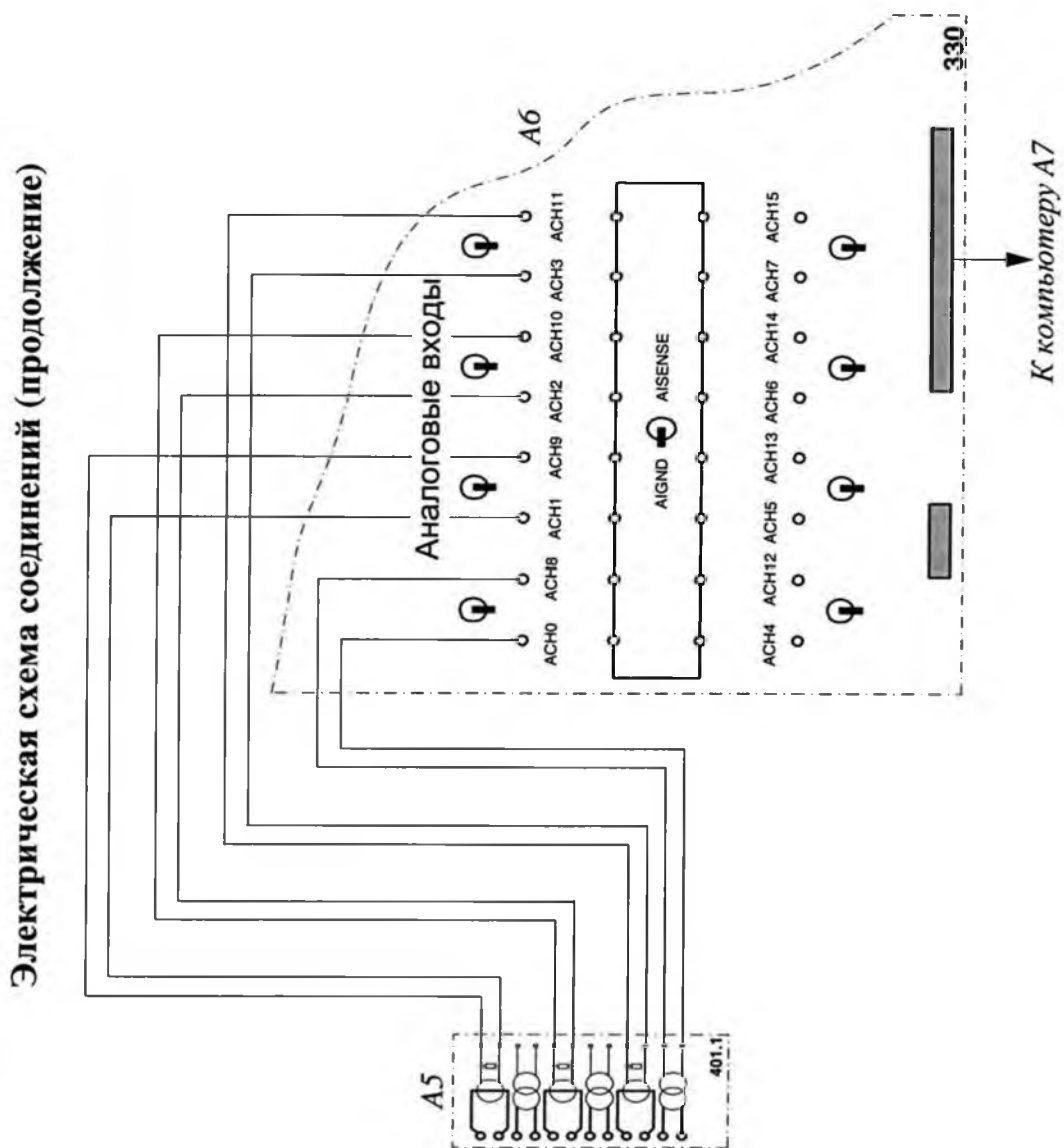
а – при трехфазном КЗ; б – при двухфазном КЗ; в – при однофазном коротком замыкании; г – при двухфазном КЗ на землю; д – при двойном замыкании на землю в разных точках.

На участке между местами замыкания на землю условия аналогичны однофазному КЗ, а между источником питания и ближайшим к нему местом повреждения они соответствуют двухфазному КЗ.

# Электрическая схема соединений

Электрическая схема соединений





### Указания мер безопасности

К работе с источником допускаются лица, ознакомленные с его устройством, принципом работы и мерами безопасности в соответствии с требованиями, приведенными в настоящем разделе.

Запрещается эксплуатация источника при снятом кожухе.

Периодически проверяйте работоспособность устройства защитного отключения (УЗО) путем нажатия кнопки “TEST” при включенном источнике. При этом источник должен отключаться, о чем свидетельствует потухание светодиодов.

### Подготовка к работе

Произвести внешний осмотр источника и убедиться в надежном креплении кожуха и элементов на передней панели.

Присоедините розетку электрического соединителя шнура питания к

трехфазной вилке разъема источника.

Вставьте вилку электрического соединителя шнура питания в трехфазную розетку блока розеток.

Соедините выходные гнезда и розетки источника с внешними устройствами согласно схеме электрического соединения конкретного эксперимента, описанной в руководстве по проведению базовых экспериментов.

Соедините гнезда “ТК” через внешний термоконтакт, а при его отсутствии – просто проводником.

Включите автоматические выключатели во всех фазах источника.

Включите устройство защитного отключения.

Вставьте ключ в замок ключа – выключателя и поверните его по часовой стрелке до упора.

### **Порядок работы**

Нажмите кнопку ВКЛ. При этом должны загореться светодиоды, сигнализируя о наличии выходных фазных напряжений источника, то есть о его включении.

Для снятия выходных напряжений (отключения) источника нажмите красную кнопку–гриб. При этом светодиоды должны погаснуть.

Для исключения возможности несанкционированного включения источника, вставьте ключ в замок ключа – выключателя и поверните его против часовой стрелки до упора.

### **Контрольные вопросы**

1. Как соединить обмотки трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности?
2. Как должна быть выполнена схема защиты для того, чтобы она не реагировала на токи нулевой последовательности?
3. Почему считается, что двухфазная однорелейная схема МТЗ имеет неодинаковую чувствительность при различных видах междуфазных КЗ?

**Лабораторная работа №3.** Общие вопросы теории машин переменного тока.

Цель работы: научиться определять координаты и параметры электрической машины в статическом режиме; по данным опытов построить статическую механическую характеристику двигателя; научиться регулировать скорость вращения двигателя изменением напряжения статора; определить координаты и параметры электропривода в переходном режиме.

### **Краткие теоретические сведения**

Одним из возможных способов регулирования координат АД является изменение напряжения на выводах его статора, при этом частота такого



напряжения постоянна и равна частоте сети переменного тока. На рисунке 1, а приведена схема электропривода при реализации этого способа. Между выводами питающей сети и статора АД включен преобразователь напряжения, при использовании которого может изменяться напряжение, подводимое к статору АД.

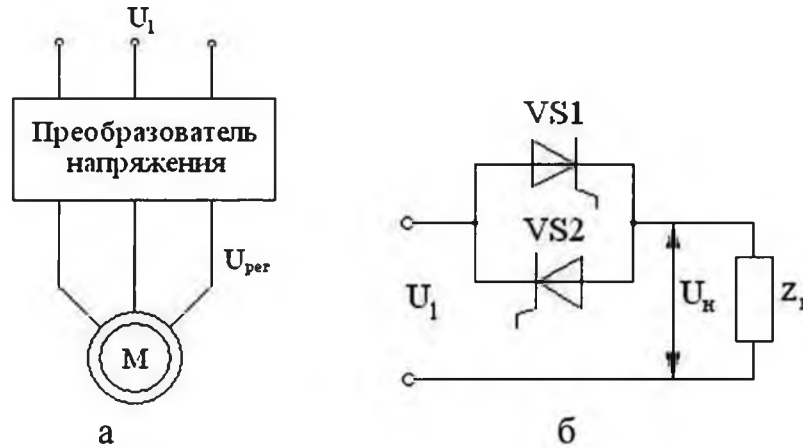


Рисунок 1 – Схема электропривода

Возможность регулирования координат АД с помощью изменения напряжения следует из анализа формулы

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2})},$$

согласно которой путем регулирования фазного напряжения  $U_\phi$  можно изменять критический (максимальный) момент АД и получать тем самым искусственные характеристики. Критическое скольжение АД и его синхронная скорость от напряжения не зависят и остаются неизменными при его регулировании.

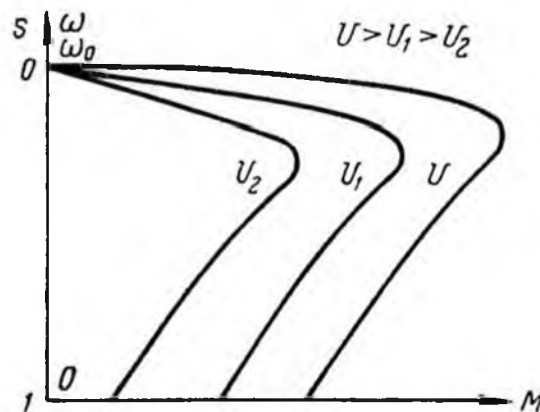


Рисунок 2 – Механические характеристики асинхронного двигателя при различном напряжении сети

На рисунке 2 приведены характеристики для напряжений, меньших номинального.

Для регулирования напряжения на выводах статора АД могут использоваться различные устройства – автотрансформаторы, магнитные усилители и тиристорные преобразователи напряжения (ТПН). Последний вид регуляторов напряжения – ТПН получил широкое распространение и серийно выпускается промышленностью.

На рисунке 1, б приведена силовая часть схемы регулирования напряжения на однофазной нагрузке  $z_n$ . Если на тиристоры VS1 и VS2 не подаются импульсы управления от СИФУ (на схеме не показана), то они закрыты и напряжение на нагрузке  $U_n$  равно нулю. При подаче на тиристоры импульсов управления в момент их естественного открытия (угол управления  $\alpha = 0$ ) они будут полностью открыты и к нагрузке будет приложено все напряжение сети  $U_1$ . Если осуществлять подачу импульсов управления на тиристоры с некоторой задержкой относительно момента естественного открытия (угол управления  $\alpha \neq 0$ ), то к нагрузке будет прикладываться часть напряжения сети. Изменяя угол управления  $\alpha$  от нуля до  $\pi$ , можно регулировать напряжение на нагрузке от полного напряжения сети до нуля. Показанное на рисунке 2 соединение тириستоров называется встречно-параллельным. Оно обеспечивает поочередную работу каждого из тиристоров в течение одного полупериода частоты сети. Такие пары встречно-параллельно соединенных тиристоров используются и для регулирования напряжения трехфазного АД.

С помощью ТПН можно осуществить пуск, реверсирование, торможение и регулирование скорости, тока и момента АД. Это говорит о больших возможностях использования асинхронного электропривода с ТПН и определяет широкую область его применения.

Основными достоинствами рассматриваемой системы электропривода являются ее относительная простота, надежность, легкость автоматизации в общей технологической схеме производства, удобство управления. Вместе с тем эта система имеет существенный недостаток, заключающийся в больших потерях в обмотке ротора при работе на низких скоростях. Действительно, согласно выражению

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 = M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot \omega_0 \cdot s = P_1 \cdot s,$$

где  $P_1$  – мощность, потребляемая из сети, кВт;

$P_2$  – полезная механическая мощность, отданная с вала, кВт;

$\Delta P_2$  – электрические потери в роторной цепи, называемые потерями скольжения, кВт.

Электрические потери в роторе при низких скоростях и, следовательно, больших скольжениях могут быть весьма высокими, что уменьшает КПД электропривода. Отмеченный недостаток не является очень серьезным в том случае, когда время работы АД на пониженной скорости мало по сравнению со временем цикла его работы. Для примера назовем механизм передвижения (тележку) электрических кранов, где пониженная скорость АД используется

для точной остановки тележки с грузом. В этих случаях рассматриваемая система электропривода оказывается целесообразной.

Остановимся кратко на основных показателях регулирования данной системы электропривода.

Диапазон регулирования скорости при использовании обратных связей, например по скорости, относительно высок и достигает десяти. При использовании обратных связей могут быть получены жесткие характеристики.

Экономичность регулирования зависит от конкретных условий работы электропривода. В частности, если время работы на пониженной скорости невелико по сравнению со временем цикла, то экономичность может быть высокой.

Регулирование скорости АД в этой системе плавное и производится только вниз от естественной (основной) характеристики.

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмоток машины постоянного тока G3 с параллельным возбуждением, работающей в режиме тормоза.

Преобразователь угловых перемещений G4 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P1 электромашинного агрегата.

Тиристорный преобразователь/регулятор G5 служит для получения регулируемого трехфазного напряжения для питания двигателя M1.

Машина (асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором) M1 получает питание от тиристорного преобразователя/регулятора G5 через трехполюсный выключатель A3.

Измеритель мощностей P2 используется для измерения активной мощности в фазе "А" исследуемого двигателя M1.

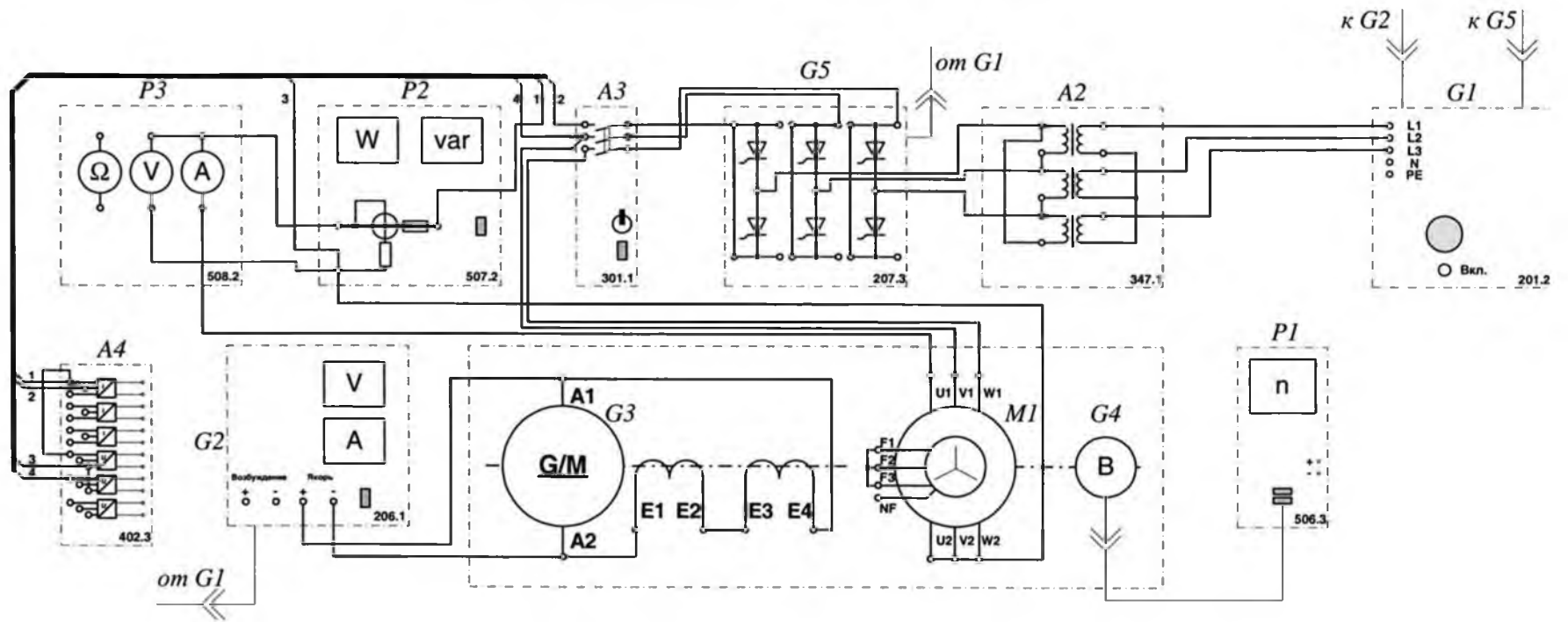
С помощью мультиметра блока P1 контролируется ток фазы "А" двигателя M1.

Датчики тока и напряжения блока A4 гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормирует сигналы о токе фазы "А", напряжении фазы "А" и напряжении фазы "В" исследуемого двигателя M1.

Коннектор A5 выполняет функцию связующего звена между компьютером A6 и блоком измерительных трансформаторов A4.

Компьютер A6 используется в режиме информационно-измерительной системы.

## Электрическая схема соединений



### Определение координат и параметров электропривода в статическом режиме

- Частоту вращения  $n$  [ $\text{мин}^{-1}$ ] двигателя М1 следует измерять с помощью указателя Р1.
- Активную  $P$  [Вт] и реактивную  $Q$  [Вар] мощности, потребляемые двигателем М1, следует определять с помощью измерителя Р2.
- Ток статора двигателя М1 следует измерять мультиметром блока Р3.

### Определение статической механической характеристики двигателя

- Нажать кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, требуется изменять момент на валу исследуемого двигателя М1 и заносить значения тока  $I$  его статорной обмотки, активной мощности  $P$  и частоты вращения  $n$  в таблицу 1.

Таблица 1

$I, A$									
$P, Вт$									
$n, \text{мин}^{-1}$									

• По завершении эксперимента необходимо повернуть регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до упора и нажать кнопку "ОТКЛ.". Отключить выключатель А3 нажатием на кнопку "ОТКЛ." и источник G1 нажатием на кнопку - гриб. Отключить выключатели "СЕТЬ" задействованных в эксперименте блоков.

• Используя данные таблицы 1, необходимо вычислить значения угловой скорости  $\omega$  по выражению

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

и электромагнитного момента  $M$  двигателя по выражению

$$M = \frac{3 \cdot P - 3 \cdot I^2 \cdot r}{\omega_0},$$

где  $P$  – активная мощность, потребляемая фазой двигателя М1, Вт;  
 $r$  – активное сопротивление фазы статорной обмотки двигателя М1, ( $r=21 \text{ Ом}$ );  
 $I$  – фазный ток двигателя М1;

$\omega_0$  – угловая частота вращения магнитного поля двигателя М1 ( $\omega_0 = 157 \text{ с}^{-1}$ ).

- Полученные результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

$M, Н \cdot м$									
$\omega, \text{с}^{-1}$									

- Используя данные таблицы 2, требуется построить механическую характеристику  $\omega = f(M)$  двигателя.

### Регулирование скорости вращения двигателя изменением напряжения статора

- Включить источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.

- Включить выключатели "СЕТЬ" блоков, используемых в эксперименте.

- Нажать кнопку "РЕГУЛЯТОР 3Ф НАПРЯЖЕНИЯ" на лицевой панели преобразователя G5 и удерживать ее до тех пор, пока не загорится расположенный рядом с ней светодиод.

- Вращая регулировочную рукоятку преобразователя G5, установить его угол управления 0 град.

- Включить выключатель А3 нажатием на кнопку "ВКЛ." на его передней панели.

- Нажать кнопку "ВКЛ." источника G2.

- Вращением регулировочной рукоятки источника G2 установить ток на его выходе "ЯКОРЬ" равным, например, 0,5 А.

- Вращая регулировочную рукоятку, изменять угол управления преобразователя G5 в диапазоне 0..170 град. и заносите показания вольтметра блока P3 и указателя P1 в таблицу 3.

Таблица 3

U, В									
n, мин <sup>-1</sup>									

- По завершении эксперимента необходимо повернуть регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до упора и нажать кнопку "ОТКЛ.". Отключить выключатель А3 нажатием на кнопку "ОТКЛ." и источник G1 нажатием на кнопку – гриб. Отключить выключатели "СЕТЬ" задействованных в эксперименте блоков.

- Используя данные таблицы 3, требуется вычислить значения скорости  $\omega$  двигателя по выражению  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$  и занести полученные результаты в таблицу 4.

Таблица 4

U, В									
$\omega$ , с <sup>-1</sup>									

- Используя данные таблицы 4, требуется построить зависимость  $\omega = f(U)$ .

## **Определение координат и параметров электропривода в переходном режиме**

- Необходимо привести в рабочее состояние персональный компьютер А7. Запустить программу "Регистратор режимных параметров машины переменного тока".

- Включить выключатели "СЕТЬ" у всех используемых в эксперименте блоков.

- Включить источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся светодиоды.

- Нажать кнопку "РЕГУЛЯТОР 3Ф НАПРЯЖЕНИЯ" на лицевой панели преобразователя G5 и удерживать ее до тех пор, пока не загорится расположенный рядом с ней светодиод.

- Вращая регулировочную рукоятку преобразователя G5, установить его угол управления 0 град.

- Осуществить пуск двигателя М1 включением выключателя А3.

- Нажать кнопку "ВКЛ." источника G2.

- Вращением регулировочной рукоятки источника G2 установить его выходной ток равным 0,5 А.

- Чтобы начать сбор данных, необходимо нажать виртуальную кнопку "Запустить" ►.

- Следует организовать интересующий переходный процесс, например, сброс-наброс нагрузки двигателя М1. Для чего необходимо нажать кнопку "ОТКЛ." и спустя 5 с – кнопку "ВКЛ." источника G2.

- Необходимо следить за изменением координат и параметров электропривода в реальном времени.

- Сразу после завершения переходного процесса надо нажать виртуальную кнопку "Остановить" ■ и произвести анализ полученных зависимостей координат и параметров электропривода от времени.

- По завершении эксперимента необходимо отключить выключатель А3 нажатием на кнопку "ОТКЛ." и источник G1 нажатием на кнопку - гриб. Отключить выключатели "СЕТЬ" задействованных в эксперименте блоков.

## **Контрольные вопросы**

1. Какой способ регулирования координат АД исследуется в данной лабораторной работе?

2. Как конструктивно выполнен ТРН?

3. В какую сторону производится регулирование скорости в системе ТРН-АД?

4. Изобразите механические характеристики  $\omega = f(M)$  асинхронного двигателя для различных  $U$  ( $U_1 > U_2 > U_3$ ).

5. Каковы основные достоинства системы ТРН-АД?

6. Область применения электропривода системы ТРН-АД.

## Лабораторная работа № 4 Асинхронные машины.

Цель работы: приобрести практические навыки в выполнении опытов по снятию данных и построению механических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

### Краткие теоретические сведения

Наибольшее распространение получили асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, обладающие жесткой механической характеристикой (при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной их частота вращения уменьшается на 2-5 %).

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором обладают высоким начальным пусковым вращающим моментом.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя

$$M = \frac{3U_1^2 r_2' / s}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2]},$$

где  $U_1$  – напряжение, подведенное к обмотке статора;

$f_1$  – частота тока в обмотке статора;

$r_1$  и  $x_1$  – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора;

$r_2'$  и  $x_2'$  – приведенные значения активного и индуктивного сопротивлений обмотки ротора.

Скольжение определяется по формуле:

$$S = (n_1 - n_2) / n_1,$$

$n_1$  – синхронная частота вращения, об/мин;

$n_2$  – частота вращения ротора.

При скольжениях  $S < S_{кр}$  механическая характеристика имеет вид прямой линии (рабочий участок характеристики), а при  $S > S_{кр}$  механическая характеристика имеет вид, близкий к гиперболе.

Критическое скольжение асинхронного двигателя можно определить:

$$S_{кр} = S_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}),$$

где  $S_{ном}$  – скольжение при номинальной нагрузке;

$\lambda = M_{макс} / M_{ном}$  – перегрузочная способность двигателя.

Принимая значения скольжения в диапазоне от 0 до +2 и от 0 до -2 можно определить текущие значения момента  $M$  и построить естественную механическую характеристику  $M = f(S)$ . При этом каждому режиму работы соответствует определенный диапазон скольжения: двигательный режим  $0 < S < 1$ ; генераторный режим  $0 > S > -\infty$ ; режим торможения противовключением  $1 < S < +\infty$ .



При введении в цепь ротора двигателя добавочного сопротивления  $r_{доб}$  работа его происходит в соответствии с искусственной характеристикой. Построение такой характеристики ведется на основании естественной характеристики: задавшись значениями моментов ( $M_1, M_2, M_3$  и т.д.), определяют соответствующие значения скольжения по естественной характеристике ( $S_{e1}, S_{e2}, S_{e3}$  и т.д.), а затем находят значения скольжения, соответствующие работе двигателя при включенном в цепь ротора добавочном сопротивлении  $r_{доб}$ .

$$S_u = S_e R_2 / r_2,$$

где  $R_2 = r_2 + r_{доб}$

Асинхронный двигатель кроме двигательного имеет также три тормозных режима: генераторный тормозной с отдачей энергии в сеть; торможения противовключением; динамическое торможение.

Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть наступает при частоте вращения ротора  $n_2$ , превышающей синхронную частоту  $n_1$ . В этом режиме электродвигатель отдает в сеть активную энергию, а из сети в двигатель поступает реактивная энергия, необходимая для создания магнитного поля. Торможение двигателя в этом режиме происходит лишь до синхронной частоты вращения  $n_1$ , так как при этой частоте вращения ротора генераторный режим прекращается.

Механическая характеристика для генераторного режима является продолжением характеристики двигательного режима во второй квадрант осей координат (рисунок 1).

Торможение противовключением соответствует направлению вращения магнитного поля статора, противоположно вращению ротора. В этом режиме скольжение больше единицы, а частота вращения ротора по отношению к частоте вращения поля статора – отрицательна. Ток в роторе, а следовательно и в статоре достигает большой величины. Для ограничения этого тока в цепь ротора вводят добавочное сопротивление.

Режим торможения противовключением наступает при изменении направления вращения магнитного поля статора (переключением двух фаз на выводах обмотки статора), в то время как ротор электродвигателя и механически соединенные с его валом элементы электропривода продолжают вращение по инерции. Этот режим возможен так же и в случае, когда поле статора не меняет направление вращения, но ротор двигателя под действием внешнего момента изменяет направление вращения. Механические характеристики являются продолжением характеристик двигательного режима и располагаются в четвертом квадранте осей координат (рисунок 1).

При динамическом торможении обмотку статора отключают от сети. Постоянный ток, проходя по обмотке статора, образует магнитное поле, неподвижное относительно сердечника статора. Но так как ротор двигателя

продолжает вращение по инерции, то это магнитное поле наводит в обмотке ротора переменный ток. Взаимодействие тока ротора с магнитным полем статора создает тормозной момент, величина которого определяется величинами магнитодвижущей силы обмотки статора, активного сопротивления обмотки ротора и частоты вращения ротора. Торможение длится до полной остановки ротора. Для более эффективного торможения в цепь ротора вводят активное сопротивление.

Механические характеристики двигателя в режиме динамического торможения располагаются в начальной части второго квадранта осей координат. Так как этот режим торможения выполняется при введенном в цепь ротора добавочном сопротивлении, механические характеристики имеют вид прямых линий (рисунок 1).

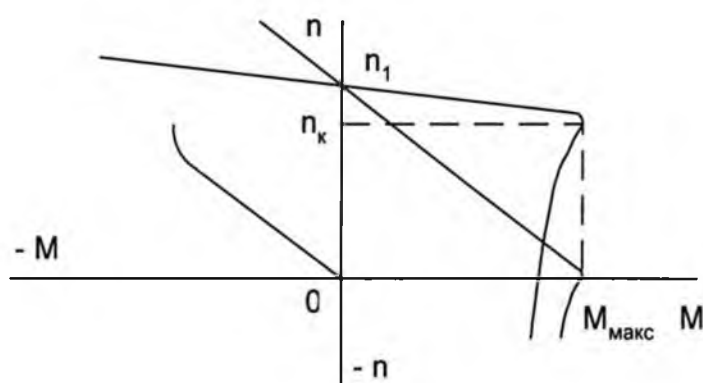
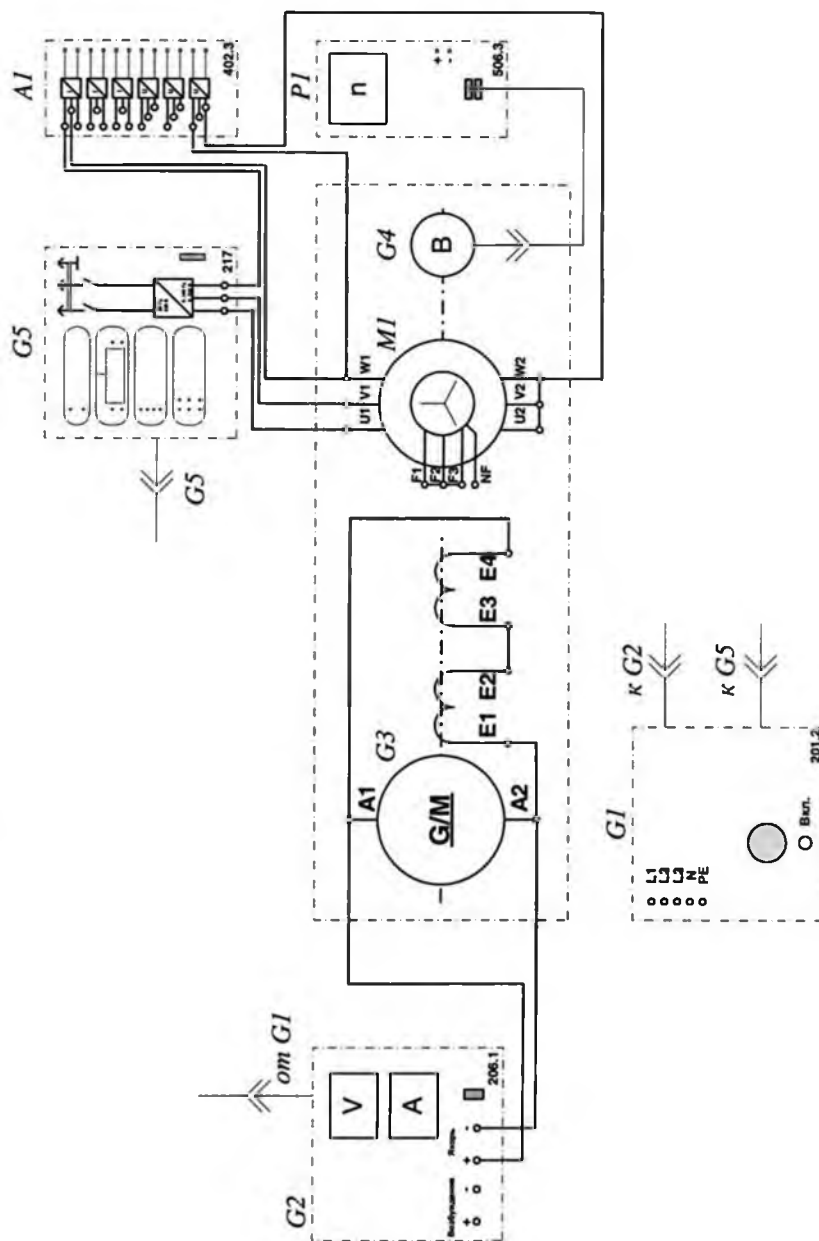


Рисунок 1 – Механические характеристики асинхронного двигателя.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором обладают высоким начальным пусковым вращающим моментом.

Наиболее экономичным и эффективным регулированием скорости асинхронного двигателя, считается способ регулирования путем изменения частоты питающего напряжения. При частотном регулировании скольжение машины независимо от диапазона регулирования поддерживается не большим, и потери в двигателе невелики. Асинхронный электропривод не уступает электроприводу постоянного тока ни по статическим, ни по динамическим свойствам, а с учетом того, что асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в 1,5 - 2 раза легче и дешевле, чем аналогичный двигатель постоянного тока, то целесообразнее использовать асинхронный двигатель с частотным управлением.

## Электрическая схема соединений



### Описание электрической схемы соединений

Источник G1 – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмоток машины постоянного тока G3 с параллельным возбуждением, работающей в режиме тормоза.

Преобразователь угловых перемещений G4 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P1 электромашинного агрегата.

Преобразователь частоты G5 служит для получения регулируемого трехфазного напряжения для питания двигателя M1.

Датчики тока и напряжения блока A1 гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормирует сигналы о токе и напряжении фазы "А" двигателя M1.

Терминал А4 служит для разветвления на отдельные проводники кабеля, подключенного к преобразователю частоты G5.

Коннектор А3 выполняет функцию связующего звена между компьютером А4 и блоком измерительных трансформаторов А1.

Блок А4 выполняет функцию усилителя цифровых сигналов.

Компьютер А5 используется в режиме информационно-измерительной системы и в качестве устройства управления преобразователем частоты G5.

### Измерение координат электропривода в статическом режиме

- Частоту вращения  $n$  [ $\text{мин}^{-1}$ ] двигателя М1 следует измерять с помощью указателя Р1. Угловую скорость вращения  $\omega$  [ $\text{рад/с}$ ] двигателя М1 – с помощью виртуального прибора на экране компьютера.

- Электромагнитный момент  $M$  [ $\text{Н}\cdot\text{м}$ ] двигателя М1 следует измерять виртуальным прибором на экране компьютера.

- Ток двигателя  $I$  [ $\text{А}$ ] следует измерять виртуальным амперметром на экране компьютера.

### Определение статической механической характеристики двигателя

- Необходимо нажать виртуальную кнопку "Остановить" **II**.

- Задать следующие параметры ПИД-регулятора:  $P = 0,03$ ,  $I = 0$ ,  $D = 0$  (П-регулятор).

- Нажать виртуальную кнопку "Запустить" **▶**.

- Включить выключатель "СЕТЬ" и нажать кнопку "ВКЛ." источника G2.

- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, требуется изменять ток на его выходе "ЯКОРЬ" в диапазоне  $0 \dots 1,5$  А.

- Следует измерить значения угловой скорости  $\omega$  и электромагнитного момента  $M$  двигателя М1 и занести их в таблицу 1.

Таблица 1

$\omega$ , рад/с									
$M$ , Нм									

### Регулирование скорости вращения двигателя согласованным изменением частоты и величины напряжения статора

- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, необходимо установить ток на его выходе "Якорь" равным 0,5 А.

- Вращая виртуальную регулировочную рукоятку, необходимо изменять задание скорости  $\omega_3$  вращения двигателя М1 в диапазоне  $0 \dots 170$  рад/с и заносить значения скорости  $\omega$  вращения двигателя М1 в таблицу 2.

Таблица 2

$\omega_3$ , рад/с									
$\omega$ , рад/с									

### Определение координат и параметров электропривода в переходном режиме

- Установить задание скорости вращения двигателя М1 150 рад/с.
- Установить значение тока регулируемого выхода "Якорь" источника G2 равное, например, 0,7 А.
- Спустя время записи процесса  $t_{\text{записи}}$  (по умолчанию – 20 с) необходимо организовать интересующий переходный процесс, например, сброс-наброс нагрузки двигателя М1. Для чего следует нажать кнопку "ОТКЛ." и спустя 5 с – кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Спустя время, рассчитываемое по формуле

$$t = \frac{t_{\text{записи}} - t_{\text{п.п.}}}{2},$$

где  $t_{\text{п.п.}}$  - предполагаемое время переходного процесса;

необходимо остановить сбор данных, нажав виртуальную кнопку "Остановить" ■. Например, для времен  $t_{\text{записи}} = 20$  с и  $t_{\text{п.п.}} = 5$  с, время  $t$  составит 7,5 с.

- Необходимо проанализировать отображенные на экране компьютера зависимости от времени частоты вращения, тока и электромагнитного момента двигателя, а также его механическую характеристику.
- По завершении эксперимента следует отключить задействованные в нем блоки.
- По данным таблицы 1 необходимо построить механическую характеристику  $\omega = f(M)$  двигателя.
- По данным таблицы 2 необходимо построить характеристику  $\omega = f(\omega_3)$  двигателя.

### Контрольные вопросы

1. Какой двигатель называется асинхронным?
2. Почему предпочтение отдается АД с короткозамкнутым ротором?
3. На какие группы делятся преобразователи частоты?
4. Изменением какого параметра производится регулирование скорости синхронного генератора?
5. Что служит источником напряжения в электромашинном преобразователе?
6. Нажатием каких кнопок, производится изменение направления вращения двигателя?

### Лабораторная работа № 5 Синхронные машины.

Цель работы: научиться производить регулирование скорости вращения двигателя согласованным изменением частоты и величины напряжения статора

и определять координаты и параметры электропривода в переходном режиме.

### Краткие теоретические сведения

Синхронные двигатели (СД) получили широкое применение в промышленности в большинстве случаев для привода механизмов, работающих с постоянно скоростью. Однако в настоящее время в связи с возможностью использования преобразовательной техники разработаны регулируемые приводы с СД.

Схема включения и механическая характеристика СД представлены на рисунке 1, а и 1, б соответственно.

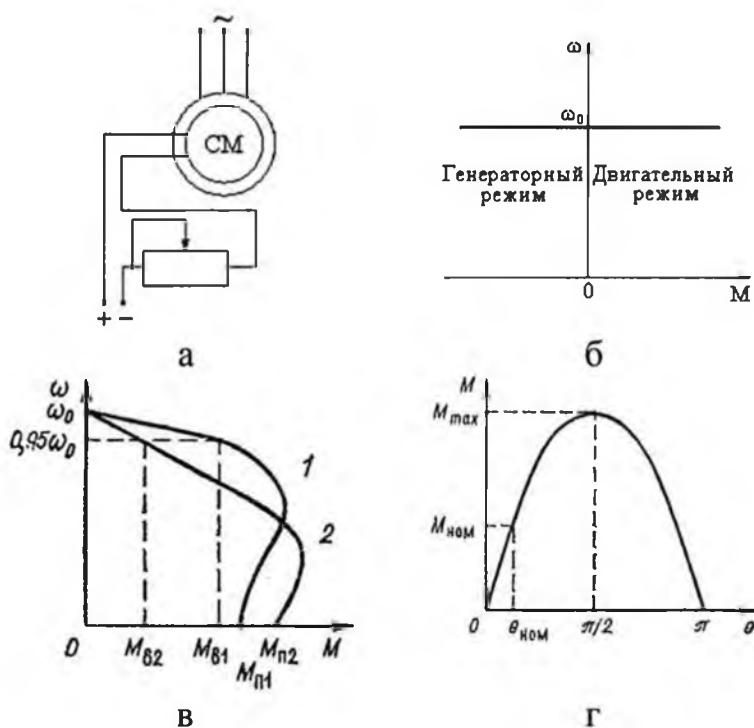


Рисунок 1 – Схема включения и механическая характеристика синхронного двигателя

На статоре СД, выполненном аналогично статору АД, располагается трехфазная обмотка, подключенная к сети переменного тока. Ротор СД выполняется с двумя обмотками: обмоткой возбуждения постоянного тока и короткозамкнутой пусковой обмоткой в виде беличьей клетки. Пусковая обмотка обеспечивает механическую характеристику СД в виде одной из кривых, показанных на рисунке 1, в. Выбор вида пусковой механической характеристики определяется конкретными условиями работы СД.

После вхождения СД в синхронизм его скорость при изменениях момента нагрузки на валу до некоторого максимального значения  $M_{max}$  остается постоянной и равной угловой скорости магнитного поля (синхронной скорости)

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p},$$

где  $p$  – число пар полюсов СД;

$f_1$  – частота питающей сети.

Поэтому его механическая характеристика имеет вид горизонтальной прямой линии. Если момент нагрузки превысит значение  $M_{\max}$ , то СД может выпасть из синхронизма.

Для определения максимального момента СД  $M_{\max}$ , до которого сохраняется синхронная работа СД с сетью, служит угловая характеристика СД. Она отражает зависимость момента  $M$  от внутреннего угла СД  $\theta$ , представляющего собой угол сдвига между ЭДС статора  $E$  и напряжением  $U_\phi$  или, что то же самое, между осью магнитного поля СД и осью его полюсов.

Угловая характеристика СД показана на рисунке 1, г. Максимального значения момент СД достигает при  $\theta = \pi/2$ . Эта величина характеризует собой перегрузочную способность СД. При больших значениях угла СД выпадает из синхронизма, а при меньших углах  $\theta$  его работа устойчива.

Важной величиной является номинальный угол сдвига  $\theta_{\text{ном}}$ , его значение равно  $25-30^\circ$ , которому соответствует номинальный момент  $M_{\text{ном}}$ . При таком значении  $\theta_{\text{ном}}$ , кратность максимального момента  $\lambda_m = M_{\max}/M_{\text{ном}} = 2-2,5$ .

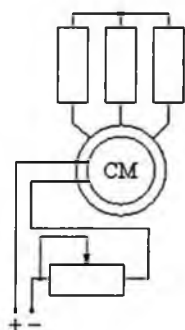


Рисунок 2

Обычно применяется динамическое торможение синхронных двигателей, при котором обмотки статора отключаются от сети и замыкаются на резисторы. Механические характеристики в этом случае подобны характеристикам асинхронного двигателя при динамическом торможении. Интенсивность торможения зависит от сопротивления статорной цепи и от потока, создаваемого током роторной обмотки. Принципиальная схема включения СД при динамическом торможении представлена на рисунке 2.

Торможение СД противовключением практически не применяется, так как оно сопровождается большими толчками тока и ведет к усложнению управления ввиду необходимости отключения двигателя при подходе к нулевой скорости.

К механизмам, которые приводятся СД, работающими с постоянной скоростью, можно отнести насосы, компрессоры, воздуходувки, холодильные

машины, камнедробилки, двигатели преобразовательных установок прокатных станов и т.п.

Широкое применение СД объясняется их высокой перегрузочной способностью, меньшим влиянием колебаний напряжения сети на максимальный момент, а также возможностью использования их для улучшения коэффициента мощности предприятия. Синхронные двигатели для указанных выше механизмов изготавливаются обычно на высокое напряжение, имеют большую мощность, вследствие чего существенным является вопрос о способе их пуска. В современных мощных электрических системах СД часто включаются непосредственно на полное напряжение сети. В этом случае значительно упрощается схема управления и повышается надежность работы электропривода.

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора, нагруженного на активную нагрузку A5.

Возбудитель G3 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения синхронного двигателя M1.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 и указателя угла нагрузки P4.

Машина переменного тока (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A1 и трехполюсный выключатель A2.

Реостат для цепей ротора машины переменного тока включен в цепь ротора двигателя M1 через трехполюсный выключатель A3.

Измеритель мощностей P1 используется для измерения активной мощности в фазе "А" исследуемого двигателя M1.

С помощью мультиметра блока P2 контролируется ток фазы "А" двигателя M1.

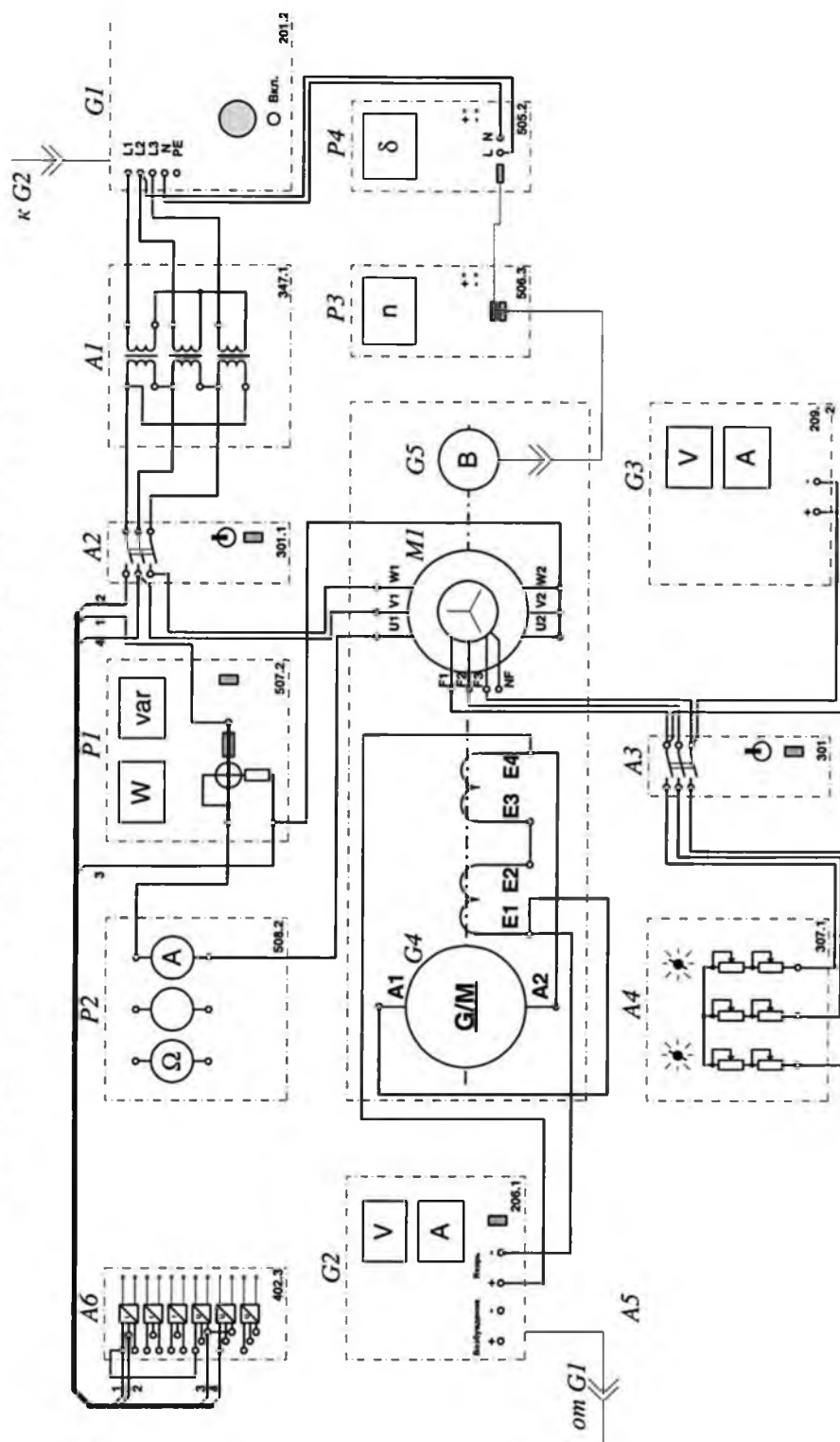
Датчики тока и напряжения блока A4 гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормирует сигналы о токе фазы "А", напряжении фазы "А" и напряжении фазы "В" исследуемого двигателя M1.

Коннектор A7 выполняет функцию связующего звена между компьютером A8 и блоком измерительных трансформаторов A6.

Компьютер A8 используется в режиме информационно-измерительной системы.



Электрическая схема соединений (вариант 1)



### Определение координат и параметров электропривода в статическом режиме

- Частоту вращения  $n$  [ $\text{мин}^{-1}$ ] двигателя  $M1$  следует измерять с помощью указателя  $P3$ .
- Активную  $P$  [Вт] и реактивную  $Q$  [Вар] мощности, потребляемые двигателем  $M1$ , следует определять с помощью измерителя  $P1$ .
- Ток статора двигателя  $M1$  следует измерять мультиметром блока  $P2$ .

- Ток возбуждения двигателя М1 следует измерять амперметром возбудителя G3.
- Угол нагрузки (фазовый сдвиг между ЭДС двигателя М1 и напряжением источника G1) необходимо фиксировать по указателю Р4.

### Определение статических угловых характеристик двигателя

- Нажать кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, необходимо изменять угол нагрузки  $\Theta$  двигателя М1 и заносить показания блока Р4, ваттметра измерителя мощностей Р1 и амперметра блока Р2 в таблицу 1.

Таблица 1

$\Theta$ , Град								
Р, Вт								
I, А								

- В случае перехода двигателя М1 в асинхронный режим работы необходимо разгрузать его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа двигателя с сетью.
- После завершения эксперимента, используя данные таблицы 1, требуется построить угловую характеристику  $P = f(\Theta)$  двигателя М1.
- После завершения эксперимента, используя данные таблицы 1, требуется вычислить значения электромагнитного момента М двигателя по выражению

$$M = \frac{3 \cdot P - 3 \cdot I^2 \cdot r}{\omega_0},$$

где Р – активная мощность, потребляемая фазой двигателя М1, Вт;

г – активное сопротивление фазы статорной обмотки двигателя М1, (г = 21 Ом);

I – фазный ток двигателя М1;

$\omega_0$  – угловая частота вращения магнитного поля двигателя М1 ( $\omega_0 = 157 \text{ c}^{-1}$ ).

Полученные результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

$\Theta$ , Град								
М, Н·м								

- После завершения эксперимента, используя данные таблицы 2, требуется построить угловую характеристику  $M = f(\Theta)$  двигателя М1.

## **Определение координат и параметров электропривода в переходном режиме**

- Необходимо привести в рабочее состояние персональный компьютер А7. Запустить программу "Регистратор режимных параметров машины переменного тока".
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установить активную мощность, потребляемую двигателем M1 из сети, равной, например, 75 Вт.
- Чтобы начать сбор данных, следует нажать на виртуальную кнопку "Запустить" ►.
- Необходимо организовать интересующий переходный процесс, например, сброс-наброс нагрузки двигателя M1. Для чего нажмите кнопку "ОТКЛ." и спустя 5 с – кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Необходимо следить за изменением координат и параметров электропривода в реальном времени.
- Сразу после завершения переходного процесса следует нажать виртуальную кнопку "Остановить" ■■ и проанализировать запомненные зависимости координат и параметров электропривода от времени.
- По завершении эксперимента, вращая против часовой стрелки регулировочную рукоятку источника G2, необходимо разгрузить двигатель M1 по активной мощности. Далее следует нажать кнопку "ОТКЛ." источника G2. Отключить источник G1 нажатием на кнопку-гриб. Отключить выключатели "СЕТЬ" блоков, используемых в эксперименте.

### **Контрольные вопросы**

1. В какой области промышленности нашли применение электроприводы с синхронными двигателями?
2. Изобразите схему включения СД и поясните принцип работы СД.
3. Изобразите угловую характеристику СД и поясните ее назначение.
4. Поясните принцип действия прямого пуска СД.
5. Какой способ торможения применяется для синхронного двигателя?

### **Лабораторная работа № 6** Машины постоянного тока.

Цель работы: экспериментально научиться пускать в ход двигатели постоянного тока независимого, параллельного, последовательного возбуждения, регулировать скорость их вращения, останавливать и изменять направление вращения. Ознакомиться с рабочими характеристиками двигателей.

### **Краткие теоретические сведения**

При работе различных машин и механизмов для обеспечения рационального хода технологического процесса очень часто возникает необходимость

регулирования скорости движения рабочих органов. Регулирование скорости позволяет наиболее рационально использовать производственные механизмы, обеспечить оптимальные режимы их работы и, как правило, уменьшить расход энергии. В настоящее время задача регулирования скорости движения рабочих органов производственных механизмов решается путем регулирования скорости основного источника механической энергии - электродвигателя.

Двигатель постоянного тока преобразует электрическую энергию, подводимую к нему из сети, в механическую энергию вращения, снимаемую с вала двигателя.

Постоянный ток для питания двигателей получается с помощью генераторов постоянного тока или выпрямительных установок, преобразующих переменный ток в постоянный.

Генераторы постоянного тока являются источником питания для промышленных установок, потребляющих постоянный ток низкого напряжения (электролизные и гальванические установки).

Питание обмоток возбуждения синхронных генераторов осуществляется во многих случаях от генераторов постоянного тока.

Широко также распространены генераторы постоянного тока специального исполнения, обладающие особыми свойствами (сварочные, генераторы для освещения поездов, усилители постоянного тока и пр.).

Двигатели постоянного тока стоят в 3 – 5 раз дороже, чем асинхронные короткозамкнутые двигатели, и требуют больших расходов на обслуживание. Поэтому они находят применение в тех случаях, когда их особые свойства (широкие пределы регулирования частоты вращения и возможность получения специальных механических характеристик) и играют решающее значение.

Для оценки свойств регулируемого электропривода основными показателями являются точность регулирования, плавность и диапазон регулирования. Точность регулирования определяется возможными отклонениями переменной (например, скорости) от заданного значения под действием возмущающих факторов (например, момента сопротивления).

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{M_{\max} + M_{\min}}. \quad (1)$$

Плавность регулирования характеризует число дискретных значений регулируемого параметра, реализуемых при данном способе регулирования. Оценивается коэффициентом плавности

$$\varphi_{\omega} = \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}}, \quad (2)$$

где  $\omega_i$  и  $\omega_{i-1}$  - значения скорости на соседних ступенях регулирования.

Плавность регулирования тем выше, чем меньше мощность цепи, параметры которой изменяются при регулировании.

Диапазон регулирования определяется отношением максимально возможной величины переменной к минимальной при заданной точности регулирования

$$D = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} \quad (3)$$

Двигатели постоянного тока широко используются в электрической тяге, в приводе подъемных устройств, в металлургической промышленности.

Мощные двигатели постоянного тока применяются для привода прокатных станов и на судах с электрической передачей для вращения гребных винтов.

Основные части машины постоянного тока показаны на рисунке 1. Сердечник якоря состоит из одного или нескольких пакетов, набранных из лакированных листов электротехнической стали. Между пакетами имеются радиальные вентиляционные каналы. Сердечник удерживается в спрессованном состоянии нажимными кольцами, играющими одновременно роль обмоткодержателей. Сердечник якоря напрессовывается или непосредственно на вал ( $D < 50 - 60$  см), или на цилиндрическую или звездообразную втулку. При  $D > 99$  см сердечник якоря собирается из сегментов.

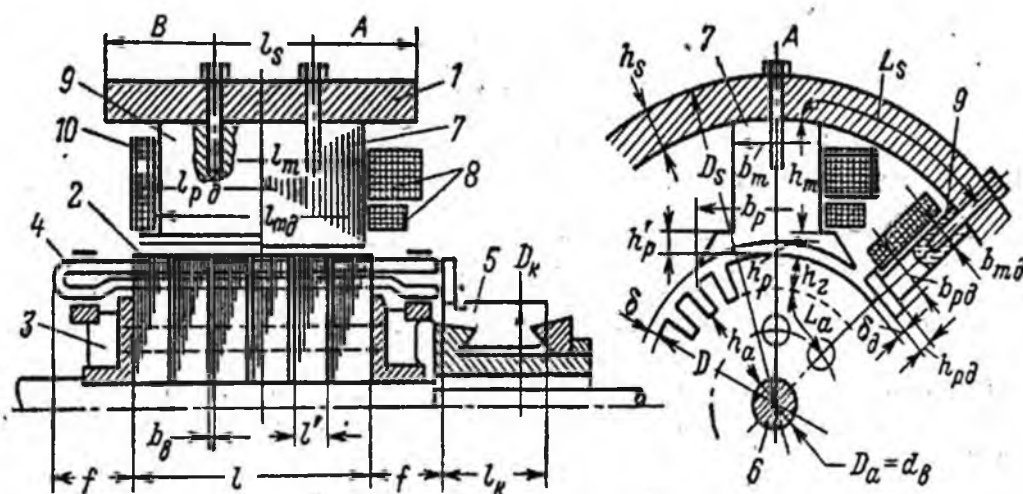


Рисунок 1 – Размеры и устройство машины постоянного тока

- 1 – станина; 2 – пакет сердечника якоря; 3 – обмоткодержатель; 4 – обмотки якоря; 5 – коллектор; 6 – вал; 7 – сердечник главного полюса; 8 – обмотки возбуждения; 9 – сердечник дополнительного полюса; 10 – обмотки дополнительного полюса.

В пазы сердечника якоря укладывается обмотка постоянного тока, соединенная с пластинами коллектора. К коллектору прикасаются щетки, установленные в щеткодержателях, с помощью которых обмотка якоря соединяется с электрической сетью постоянного тока.

Главные и дополнительные полюсы машины укрепляются на станине, охватывающей якорь. Главные полюсы собираются из листов конструкционной стали толщиной 1–2 мм и нажимных щек, стянутых шпильками. Дополнительные полюсы состоят обычно из массивного стального сердечника прямоугольного сечения и такого же полюсного наконечника. Полюсы крепятся к станине болтами.

На главных полюсах располагаются катушки одной или нескольких обмоток возбуждения (последовательная обмотка возбуждения обтекается током якоря, параллельная включается параллельно якорю, независимая – питается от сети постоянного тока).

Катушки дополнительных полюсов соединяются по такой же схеме и включаются последовательно с обмоткой якоря.

Принцип действия (рисунок 2). Постоянное магнитное поле ненагруженной машины ( $I_{я} = 0$ ) создается только н.с. обмотки возбуждения, обтекаемой постоянным током  $I_{в}$ . При вращении якоря со скоростью  $n$  в его обмотке индуцируется ЭДС частоты, где  $f = p\Omega/2\pi$ ,  $\Omega = 2\pi n$ . При помощи коллектора и щеток эта ЭДС выпрямляется и на щетках появляется постоянная по величине и направлению ЭДС.

Если к щеткам машины присоединена сеть постоянного тока или омическое сопротивление, то в обмотке якоря появляется ток, величина и направление которого зависят от соотношения между ЭДС и напряжением сети. При работе в генераторном режиме (вращение по стрелке Г на рис. 2) ЭДС больше, чем напряжение сети ( $E > U$ ), ток якоря совпадает по направлению с ЭДС и механическая энергия, подводимая через вал машины, преобразуется в электрическую энергию, поступающую в сеть.

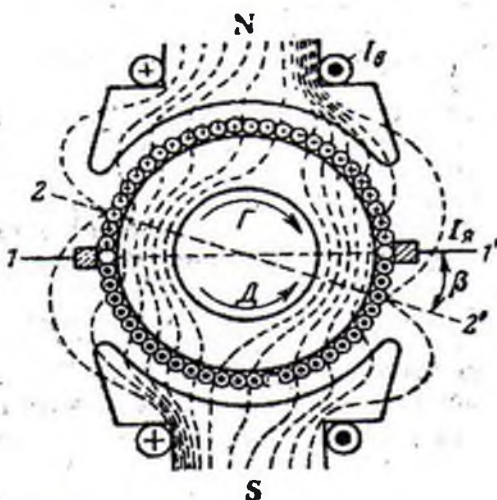


Рисунок 2 – Принцип действия машины постоянного тока

При работе в режиме двигателя (вращение по стрелке Д) ЭДС меньше, чем напряжение сети ( $E < U$ ), ток якоря совпадает по направлению с напряжением сети, а электрическая энергия, поступающая из сети, преобразуется в механическую энергию, передаваемую через вал сопряженной машине.

Когда машина нагружена и работает в режиме двигателя или генератора ( $I_a \neq 0$ ), магнитное поле в ней создается совместным действием н.с. тока возбуждения  $I_b$  и н.с. тока якоря. Картина магнитного поля машины при нагрузке показана на рис. 2, из которого видно, что линия 2-2', проходящая через точки на поверхность якоря, в которых индукция равна нулю (физическая нейтраль), смещаются на угол  $\beta$  по отношению поперечной оси машины.

#### **Машина с независимым возбуждением**

Обмотка возбуждения машины (рисунок 3, А) получает питание от постороннего источника постоянного тока. Применяется в качестве генераторов с весьма широкими пределами регулирования напряжения (от  $U=0$  и до  $U_n$  и выше). Двигатели с независимым возбуждением используются в схеме генератор-двигатель, в которой регулирование частоты вращения двигателя осуществляется путем изменения напряжения на зажимах двигателя.

Машины с независимым возбуждением при постоянном напряжении на зажимах якоря имеют такие же свойства, как машины с параллельным возбуждением.

#### **Машина с параллельным возбуждением**

Обмотка возбуждения машины (рисунок 3, Б) получает питание от зажимов якоря. Частота вращения двигателей при постоянном напряжении мало зависит от нагрузки и уменьшается на 2-8 % при переходе от холостого хода к номинальному режиму. Частота вращения двигателей может быть изменена в пределах 1: 1,5 (1:3) с помощью реостата в цепи обмотки возбуждения. Частота вращения двигателя при увеличении температуры окружающей среды на 50 °С может возрасти на 5-10 %. С целью расширения пределов регулирования частоты вращения двигатель снабжают небольшой последовательной (стабилизирующей) обмоткой или компенсационной обмоткой.

Напряжение генераторов с параллельным возбуждением увеличивается при сбросе номинальной нагрузки на 5-25 % и может регулироваться путем изменения сопротивления в цепи возбуждения в пределах 1: 1,3 (1:1,5).

#### **Машина с последовательным возбуждением**

Обмотка возбуждения машины (рисунок 3, В) включена последовательно с якорем. Применяется главным образом в качестве двигателя для подъемных устройств, в электрической тяге и металлургии.

Частота вращения двигателя при изменении мощности от номинальной до  $\frac{1}{4}$  номинальной увеличивается примерно в 1,5 – 2 раза.

Уменьшение момента на валу двигателя до нуля нельзя допускать. При этом частота вращения двигателя может настолько возрасти, что двигатель будет разрушен. Путем шунтирования обмотки возбуждения и введения сопротивления в цепь якоря частота вращения двигателя может регулироваться в широких пределах. Генераторы последовательного возбуждения применяются только в специальных установках (например, в тепловозах).

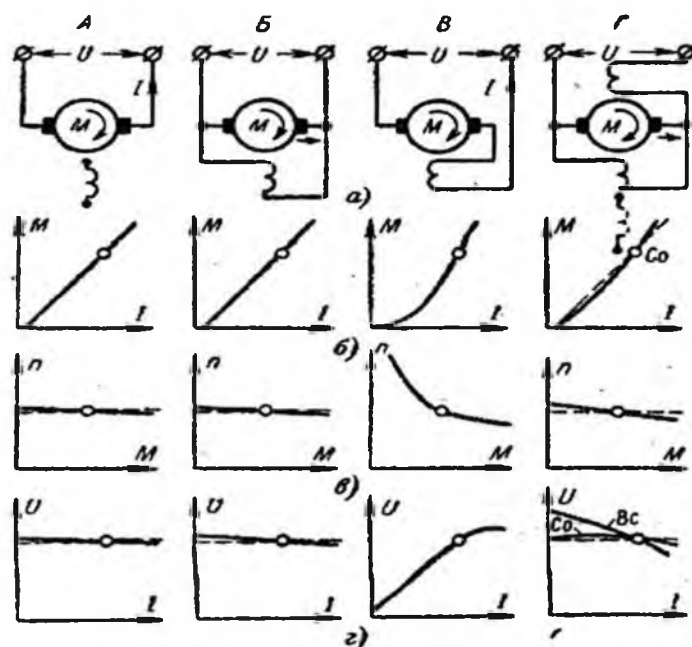


Рисунок 3 – Схемы возбуждения и основные свойства машин постоянного тока.

А – независимое возбуждение; Б – параллельное возбуждение; В – последовательное возбуждение; Г – смешанное возбуждение; а – схемы; б – зависимость вращающего момента на валу от тока якоря в режиме двигателя; г – внешняя характеристика в режиме генератора;  $C_o$  – согласное включение параллельной и последовательной обмоток;  $B_c$  – встречное включение.

### Машина со смешанным возбуждением

Наиболее часто имеют только параллельную и последовательную (рисунок 3, Г) обмотки. Двигатели с согласно включенной последовательной обмоткой имеют более мягкую, чем у двигателя с параллельным возбуждением, механическую характеристику. Изменение напряжения генератора при согласном включении последовательной обмотки может быть уменьшено по сравнению с параллельным генератором.

При встречном включении последовательной обмотки внешняя характеристика смягчается. Генераторы для возбуждения крупных синхронных машин с целью расширения пределов регулирования возбуждения снабжают независимой, параллельной и последовательной обмотками.

Пуск электродвигателей постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения производится путем подключения их обмоток к сети при минимальном сопротивлении  $r$  в цепи параллельной обмотки возбуждения, т. е. при таком значении сопротивления, которому соответствует максимальная сила тока возбуждения  $I_b$ . Сопротивление пускового реостата ПР, включенного в цепь якоря, при пуске должно быть максимальным. В процессе пуска оно постепенно уменьшается.

После запуска двигателя можно изменить скорость вращения, которая возрастет при уменьшении тока возбуждения  $I_b$ . Это объясняется тем, что



неизменное напряжение сети уравнивается противоэлектродвижущей силой и падением напряжения в обмотке якоря. Чем больше ток возбуждения  $I_v$ , тем больше магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый электромагнитными (обмоткой возбуждения), и тем меньше становится скорость вращения  $n$ . С уменьшением потока скорость увеличивается.

Для остановки двигателя снимают нагрузку, если это возможно по технологическому процессу; затем в цепи параллельной обмотки возбуждения выводят реостат (уменьшают сопротивление), что приводит к увеличению тока возбуждения, возрастанию магнитного потока и снижению скорости вращения; затем вводят пусковой реостат и, наконец, при помощи рубильника отключают двигатель от сети.

Чтобы изменить направление вращения электродвигателя постоянного тока, нужно либо изменить направление тока только в обмотке якоря, оставляя неизменным направление тока в параллельной обмотке возбуждения, либо изменить направление тока в обмотке возбуждения, не меняя направления тока в обмотке якоря. Обычно из-за того, что при размыкании цепи возбуждения возникает большая ЭДС самоиндукции, изменяют направление тока в обмотке якоря.

При работе электродвигателя с увеличением нагрузки  $P_2$  на валу двигателя изменяются скорость вращения  $n$ , вращающий момент  $M$ , ток якоря  $I_a$  и коэффициент полезного действия  $\eta$ . Зависимости, выражающие изменение этих величин с изменением мощности на валу двигателя, называются рабочими характеристиками.

### **Описание электрической схемы соединений**

Источник  $G1$  - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока  $G2$  используется для питания регулируемым напряжением обмоток машины (двигателя) постоянного тока  $M1$ , работающей с независимым, параллельным или последовательным возбуждением. При этом в первых двух случаях половины обмотки возбуждения двигателя  $M1$  следует соединить последовательно, а в третьем случае - параллельно.

Преобразователь угловых перемещений  $G5$  генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения  $P1$  электромашинного агрегата.

Машина переменного тока  $G4$ , работающая в режиме генератора и обеспечивающая нагрузку на валу исследуемого двигателя, нагружена на активную нагрузку  $A1$ . Возбудитель  $G3$  питает обмотку возбуждения машины  $G4$  регулируемым напряжением.

Реостат  $A2$  ограничивает ток цепи якоря двигателя  $M1$ . Реостат  $A4$  возбуждения машины переменного тока ограничивает ток цепи возбуждения двигателя  $M1$ .

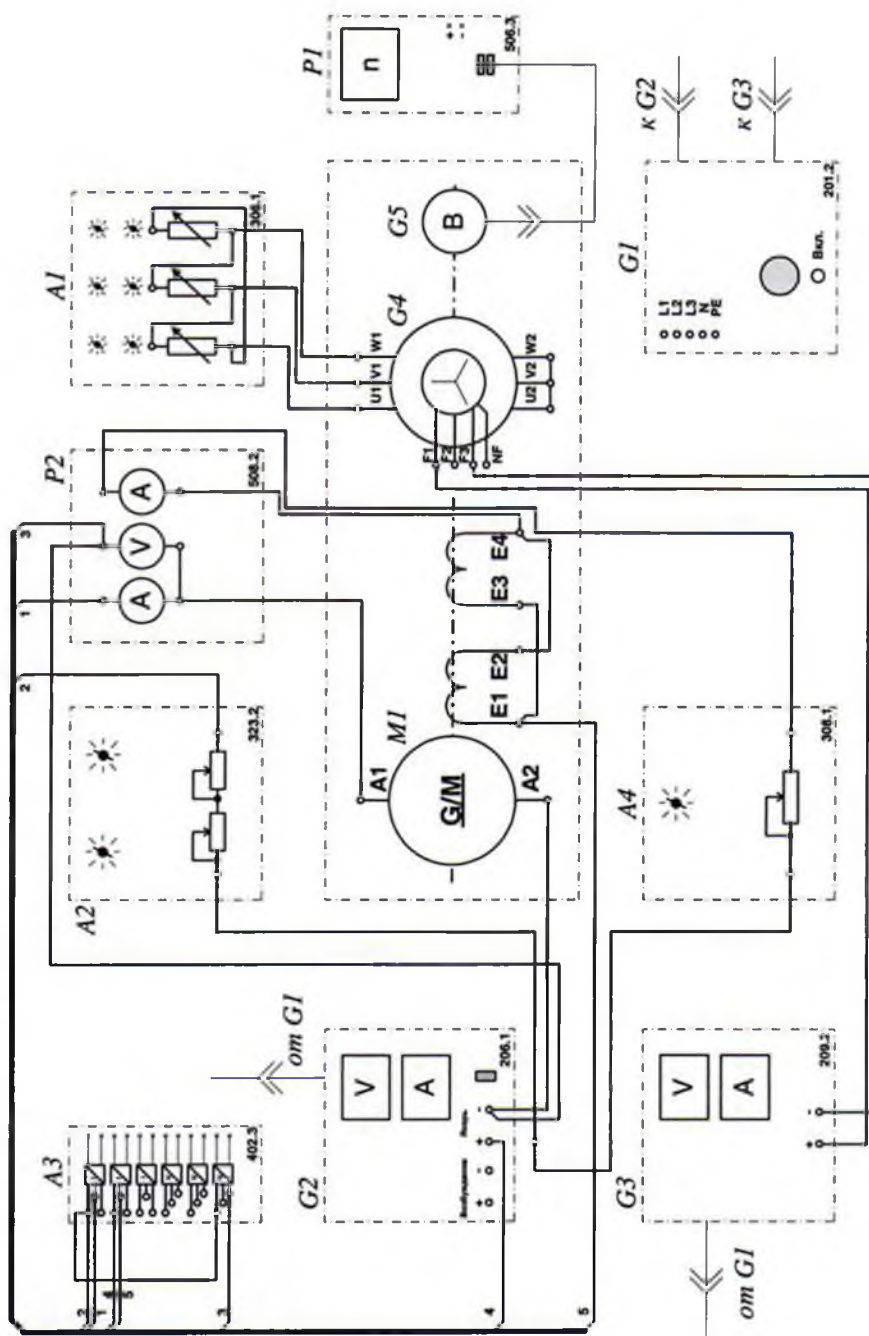
С помощью мультиметров блока  $P2$  контролируются ток и напряжение якоря, а также ток возбуждения двигателя  $M1$ .

Датчики тока и напряжения блока А3 гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормирует сигналы о токе и напряжении якоря и токе возбуждения исследуемого двигателя М1.

Коннектор А5 выполняет функцию связующего звена между компьютером А6 и блоком датчиков тока и напряжения А3.

Компьютер А6 используется в режиме информационно-измерительной системы.

Электрическая схема соединений (вариант 3)



## Описание электрической схемы соединений

Источник G1 – источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмоток машины (двигателя) постоянного тока M1, работающей с независимым, параллельным или последовательным возбуждением. При этом в первых двух случаях половины обмотки возбуждения двигателя M1 следует соединить последовательно, а в третьем случае - параллельно.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P1 электромашинного агрегата.

Машина переменного тока G4, работающая в режиме генератора и обеспечивающая нагрузку на валу исследуемого двигателя, нагружена на активную нагрузку A1. Возбудитель G3 питает обмотку возбуждения машины G4 регулируемым напряжением.

Реостат A2 ограничивает ток цепи якоря двигателя M1. Реостат A4 возбуждения машины переменного тока ограничивает ток цепи возбуждения двигателя M1.

С помощью мультиметров блока P2 контролируются ток и напряжение якоря, а также ток возбуждения двигателя M1.

Датчики тока и напряжения блока A3 гальванически изолируют от силовой электрической цепи и нормирует сигналы о токе и напряжении якоря и токе возбуждения исследуемого двигателя M1.

Коннектор A5 выполняет функцию связующего звена между компьютером A6 и блоком датчиков тока и напряжения A3.

Компьютер A6 используется в режиме информационно-измерительной системы.

### Определение координат и параметров электропривода в статическом режиме

- Частоту вращения  $n$  [мин<sup>-1</sup>] двигателя измеряйте с помощью указателя P1.

- Ток возбуждения  $I_f$  [A], ток  $I_a$  [A] и напряжение  $U_a$  [B] якоря двигателя M1 измеряйте мультиметрами блока P2.

### Определение статической механической характеристики двигателя

- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3 нагрузочного генератора.

- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя генератора G3, изменяйте ток якоря  $I_a$  (до 1 A) двигателя M1 и заносите показания соответствующего амперметра и вольтметра блока P2, а также указателя P1 в таблицу 1.

Таблица 1

$I_a, A$									
$U_a, B$									
$n, \text{мин}^{-1}$									

Таблица 2

М, Н·м									
$\omega$ , с <sup>-1</sup>									

- Используя таблицу 2, постройте в виде графика механическую характеристику  $\omega = f(M)$  двигателя.

### Контрольные вопросы

1. В чем преимущество двигателя постоянного тока перед другими типами двигателей?
2. Чем отличается двигатель смешанного возбуждения от двигателя параллельного возбуждения?
3. Как производится пуск двигателя постоянного тока?
4. В чем достоинство системы "управляемый преобразователь-двигатель"?
5. В чем отличительные особенности двигателя с согласно включенной последовательной обмоткой от двигателя с параллельным возбуждением?

### Литература

1. Вольдек А. И. Электрические машины, Л., Энергия, 1978. – 832с.
2. Копылов И. П. Электрические машины, М., Энергоатомиздат, 1986.
3. Брускин Д. З., Зохорович А. Е., Хвостов В. С., Электрические машины, ч. 1, 2 – М., Высшая школа, 1987.
4. Кацман М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу: Уч. пос. – М.: Высш. школа, 2001.