

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Кафедра автоматических и мехатронных систем

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания к лабораторным работам

Составители:  
Е. В. ЕРОПОВА  
Р. В. РОДИОНОВ  
В. П. УМНОВ



Владимир 2013

УДК 321.313  
ББК 31.21  
Э45

Рецензент  
Доктор технических наук, профессор  
кафедры электротехники и электроэнергетики  
Владимирского государственного университета  
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых  
*В. А. Шахнин*

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

**Электрические** машины : метод. указания к лаб. работам /  
Э45 Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых ; сост.: Е. В. Еропова,  
Р. В. Родионов, В. П. Умнов. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2013. – 79 с.

Содержат методические указания к лабораторным работам по курсу «Электрические машины». Даны рекомендации по выполнению и оформлению лабораторных работ.

Предназначены для студентов вузов, обучающихся по специальностям 221000 – Мехатроника и робототехника, 140400 – Электроэнергетика и электротехника (профиль «Электрооборудование автомобилей и тракторов»), и для студентов колледжей, обучающихся по специальностям 140448 – Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования, 190625 – Эксплуатация транспортного электрооборудования.

Разработаны в соответствии с Государственным образовательным стандартом Министерства образования и науки РФ.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

УДК 321.313  
ББК 31.21

## **ВВЕДЕНИЕ**

*Лабораторные занятия – один из важнейших элементов учебного процесса. При проведении лабораторных занятий преследуются такие цели, как возможность на практике убедиться в теоретических положениях, развитие творческого мышления студента.*

*Выполнение контрольных заданий – основной вид занятий по курсу «Электрические машины», при изучении которого студенты приобретают необходимые знания о конструкциях электрических машин, физических процессах в них протекающих, основных методах расчетов параметров и режимов машин.*

*Потребность в появлении настоящих методических указаний обусловлена необходимостью закрепления знаний студентов, полученных на лекциях и практических занятиях, проведения самостоятельных расчетов режимов электрических машин и некоторых соотношений их параметров.*

*Методические указания к выполнению лабораторных работ содержат программы выполнения девяти лабораторных работ, теоретические сведения и расчетные формулы по каждой работе.*

*В настоящих методических указаниях составителями использованы материалы работ [2, 4].*

# Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

## Цель работы

Исследование трехфазного трансформатора при различных схемах соединения первичных и вторичных обмоток.

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: трансформаторы, принцип действия, работа под нагрузкой, КПД, рабочие характеристики; трехфазный трансформатор.

2. Подготовить таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения рабочих характеристик.

## Содержание работы

1. Определение параметров трансформатора при соединении «звезда – звезда» ( $Y/Y$ ).

2. Определение параметров трансформатора при соединении «звезда – треугольник» ( $Y/\Delta$ ).

3. Определение параметров трансформатора при соединении «треугольник – треугольник» ( $\Delta/\Delta$ ).

4. Определение параметров трансформатора при соединении «треугольник – звезда» ( $\Delta/Y$ ).

## Описание виртуальной лабораторной установки

Виртуальная лабораторная установка представлена на рис. 1.1. Модель содержит:

- источник переменного напряжения  $E_1$  из библиотеки *Power System Blockset/Electrical Sources*;
- измерители напряжения  $V_1, V_2$ , измерители тока  $I_1$  и  $I_2$  в первичной и вторичной цепях трансформатора из библиотеки *Power System Blockset/Measurement*;
- исследуемый трансформатор (*Linear Transformer*) и нагрузку (*R Load*) из библиотеки *Power System Blockset/Elements*;

- измерители активной и реактивной мощности в первичной и вторичной цепях трансформатора ( $P_1, Q_1; P_2, Q_2$ ) из библиотеки *Power System Blockset/Extras/Measurement*;
- блок пользователя (*Powergui*), который измеряет значения  $V_1, V_2$ ;
- блоки *Display1, Display2* для количественного представления измеренных мощностей и блок *Scope* для наблюдения формы кривых тока и напряжения во вторичной цепи являются блокам главной библиотеки *Simulink/Sinks*.

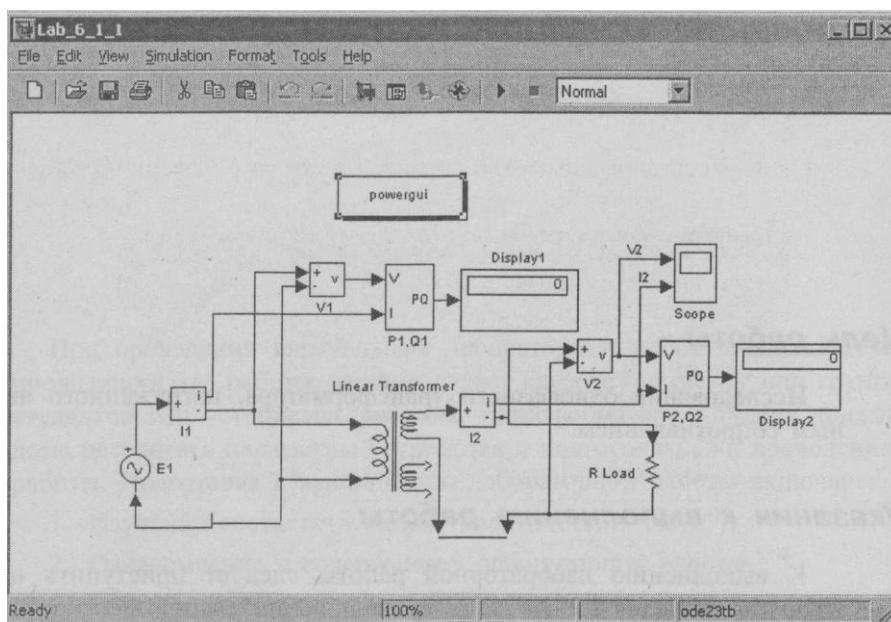


Рис. 1.1. Модель для исследования однофазного трансформатора

Параметры трансформаторов для выполнения лабораторной работы приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Тип трансформатора	$S_H$ , кВА	$U_k$ , %	$P_k$ , Вт	$P_{10}$ , Вт	$I_{10}$ , %
ТС-10/066	10	4,5	280	90	7
ТС-16/066	16	4,5	400	125	5,8
ТС-25/066	25	4,5	560	180	4,8
ТС-40/066	40	4,5	800	250	4,0
ТС-63/066	63	4,5	1090	355	3,3
ТС-100/066	100	4,5	1500	500	2,7
ТС-160/066	160	4,5	2060	710	2,3

На рис. 1.2 представлена модель трехфазного трансформатора. По сравнению с моделью однофазного трансформатора (см. рис. 1.1) здесь не используются блоки для измерения основных характеристик (основные характеристики трехфазного трансформатора и однофазного трансформатора идентичны), но добавлен блок *Multimeter*, измеряющий токи и напряжения трансформатора. Значения этих токов отсчитываются с окна блока *Powergui*. Там же снимаются значения входного  $U_1$  и выходного  $U_2$  напряжений и разность фаз между ними.

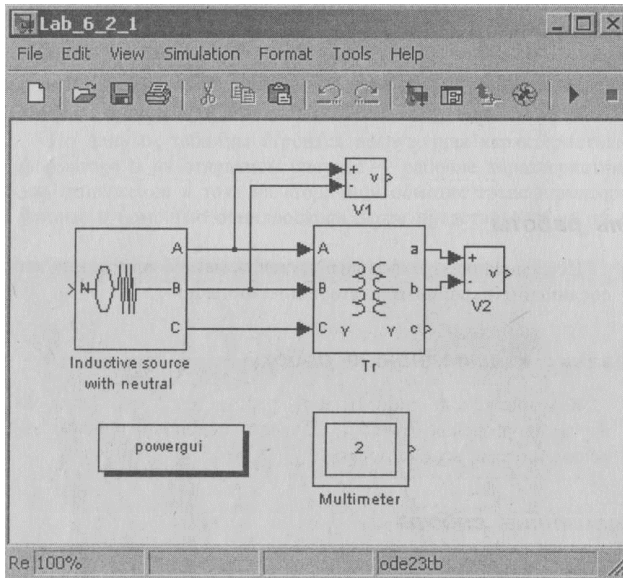


Рис. 1.2. Модель трехфазного трансформатора

Окно настройки параметров трехфазного трансформатора показано на рис. 1.3.

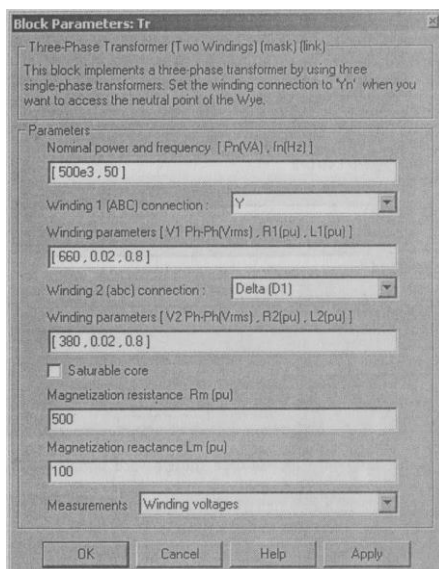


Рис. 1.3. Окно настройки параметров трехфазного трансформатора

В отличие от окна настройки параметров однофазного трансформатора оно содержит два дополнительных поля:

- Winding 1 (ABC) connection – схема соединения первичных обмоток;
- Winding 2 (abc) connection – схема соединения вторичных обмоток.

В выпадающем меню этих полей задается схема соединения. В поле *Measurement* выбрана опция *Winding Voltage*, при которой измеряются напряжения обмоток.

## Порядок проведения лабораторной работы

Параметры источника питания *Inductive source* (см. рис. 1.2) задаются в соответствии с параметрами трансформатора. Окно настройки источника питания показано на рис. 1.4.

Параметры моделирования видны на рис. 1.5.

Для каждого пункта проводится моделирование и заполняется отдельная таблица (табл. 1.2).

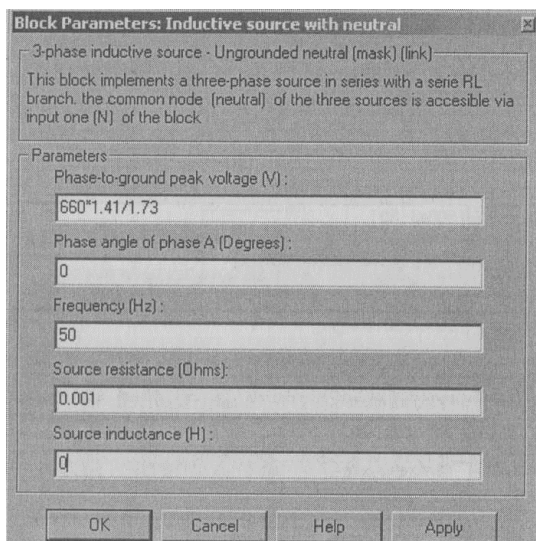


Рис. 1.4. Окно настройки параметров трехфазного источника

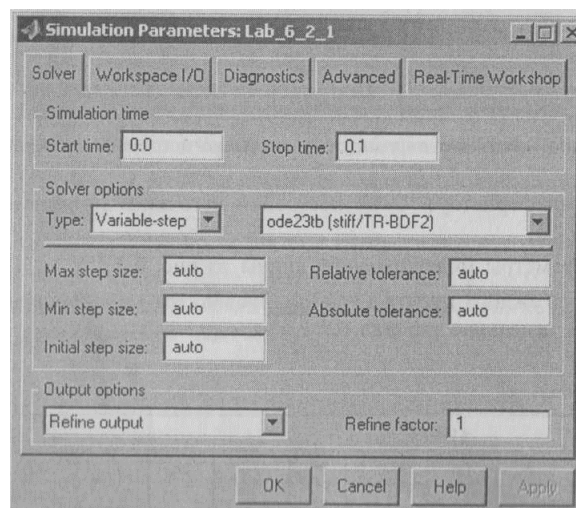


Рис. 1.5. Параметры моделирования

Таблица 1.2

Схема соединения	Измерения								Вычисления
	$U_{1\phi}$ , В	$I_{1\phi}$ , А	$U_{1, В}$	$\varphi_1$ , град	$U_{2\phi}$ , В	$I_{2\phi}$ , А	$U_2$ , В	$\varphi_{12}$ , град	Коэффициент трансформации

На рис. 1.6 показано окно блока *Powergui* с результатами моделирования при соединении обмоток по схеме «звезда – звезда». В левой колонке представлены измеряемые переменные, в средней – их действующие значения, в правой – их начальные фазы.

Коэффициент трансформации и разность фаз между входным ( $U_1$ ) и выходным ( $U_2$ ) напряжениями рассчитывается по выражениям

$$n = \frac{U_1}{U_2}, \quad \varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

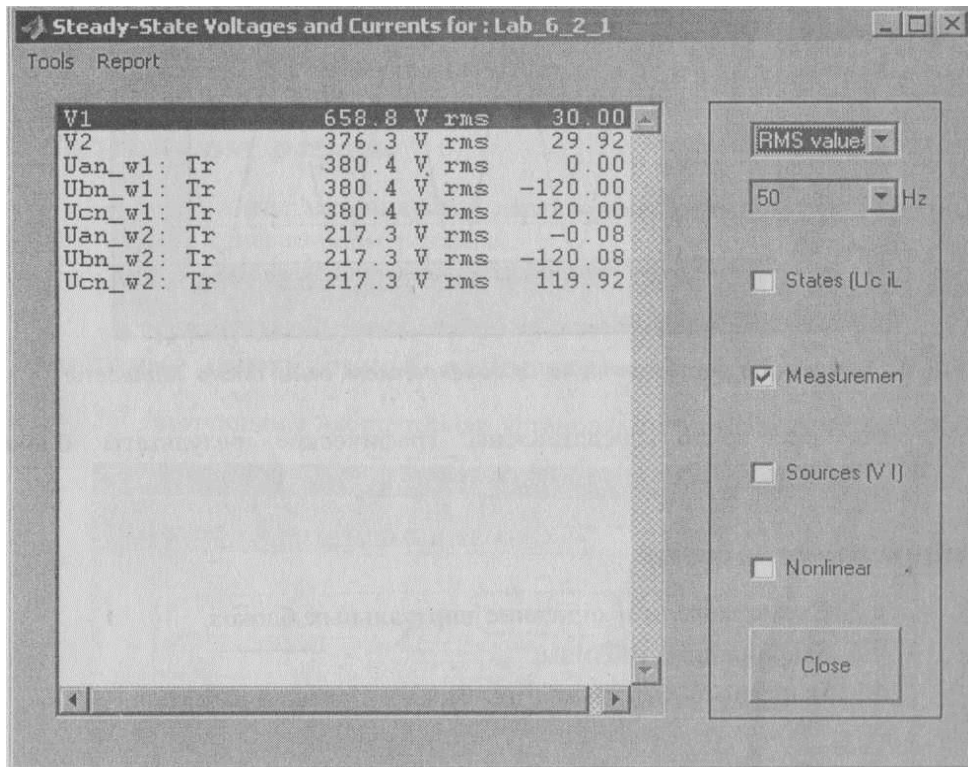


Рис. 1.6. Результаты моделирования при соединении обмоток Y/Y

На рис. 1.7 представлены графические результаты блока *Multimeter*.

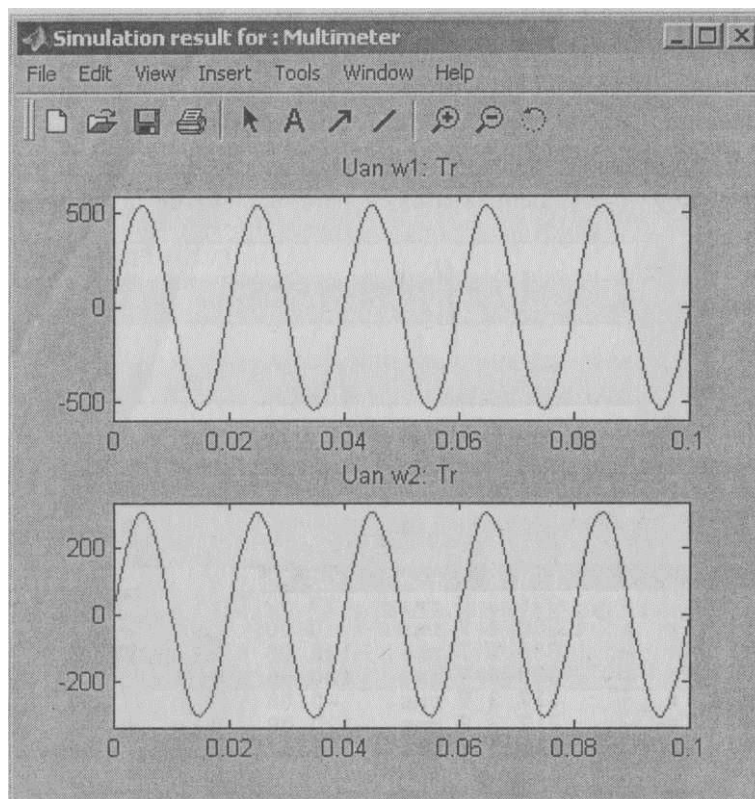


Рис. 1.7. Результаты моделирования в графическом окне блока *Multimeter*



### **Содержание отчета**

1. Схема модели и описание виртуальных блоков.
2. Заполненные таблицы.
3. Векторные диаграммы для каждого пункта работы.

*Примечание.* Векторные диаграммы по каждому пункту строятся отдельно для первичной и вторичной цепи.

### **Контрольные вопросы**

1. Каково назначение трансформаторов?
2. Какие существуют типы трансформаторов?
3. Как устроен трансформатор?
4. Объясните принцип работы однофазного трансформатора?
5. Какие режимы работы имеются у трансформатора?
6. Какие величины принимаются за базовые при расчете относительного значения момента и относительной частоты вращения?

## **Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

### **Цель работы**

Изучить конструкцию и получить практические навыки сборки схемы включения двигателя, а также опытного исследования двигателя для получения данных и построения его рабочих характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах универсального коллекторного двигателя.

### **Подготовка к работе**

1. Повторить теоретический материал: устройство универсального коллекторного двигателя, особенности коммутации на переменном токе; принципиальная схема двигателя, сравнение рабочих характеристик двигателя при его работе на постоянном и переменном токах.
2. Подготовить таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения рабочих характеристик.

## Порядок выполнения работы

*Схема соединений и пробный пуск.* Универсальные коллекторные двигатели по своему устройству почти не отличаются от двигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Разница состоит в том, что магнитная система универсальных двигателей делается полностью шихтованной из тонколистовой электротехнической стали. На двух явно выраженных полюсах универсального двигателя располагают четыре полюсные катушки (K1, K2, K3 и K4), соединенные последовательно между собой и с обмоткой якоря (рис. 2.1). При включении двигателя в сеть постоянного тока используют четыре полюсные катушки, а при включении в сеть переменного тока – только две (K2 и K3). Благодаря такому способу включения свойства двигателя на постоянном и переменном токах оказываются приблизительно одинаковыми, однако точного совпадения характеристик универсального двигателя при его работе на постоянном и переменном токах добиться невозможно.

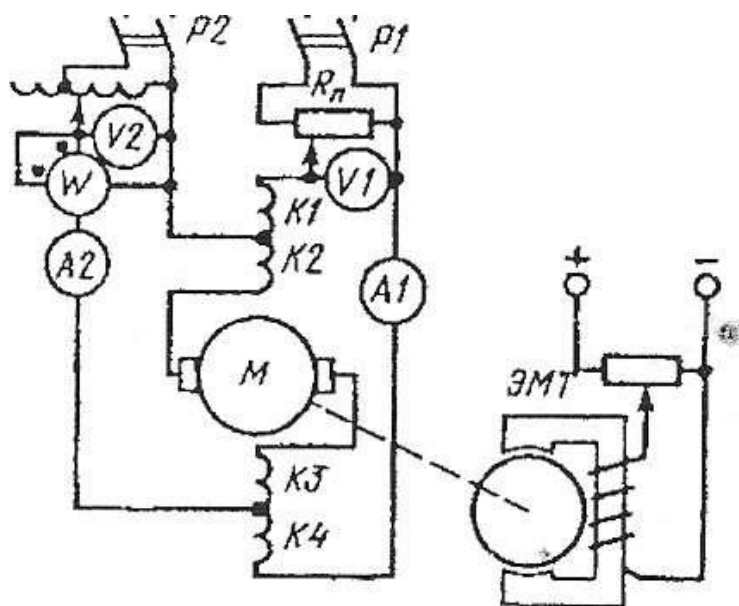


Рис. 2.1. Схема включения универсального коллекторного двигателя

Универсальные двигатели выполняются на небольшую мощность (до 250 Вт), поэтому, хотя они и имеют последовательное возбуждение, их можно включать без предварительной нагрузки на валу.

На представленной на рис. 2.1 схеме включение двигателя выполняется либо рубильником P1 (в сеть постоянного тока), либо рубильником P2 (в сеть переменного тока). Потенциометр R<sub>п</sub> и одно-

фазный регулятор напряжения (РНО) позволяют регулировать напряжение, подводимое к двигателю. В цепь постоянного тока включены амперметр А1 и вольтметр V1, в цепь переменного тока – амперметр А2, вольтметр V2 и ваттметр W. В качестве нагрузочного устройства в схеме применен электромагнитный тормоз ЭМТ. Возможны и другие нагрузочные устройства.

После сборки схемы и проверки ее преподавателем производят пробный пуск двигателя сначала на постоянном (включают Р1), а затем на переменном токе (включают Р2). При каждом включении следует проверить возможность регулировки частоты вращения двигателя изменением подводимого к двигателю напряжения.

*Рабочие характеристики.* Двигатель включают в сеть постоянного тока (замыкают Р1) и нагружают его до номинального тока нагрузки  $I = I_{\text{ном}}$ . Затем постепенно разгружают двигатель до режима ХХ и через приблизительно одинаковые интервалы тока нагрузки снимают показания приборов и заносят их в таблицу.

Номер измерения и вычисления	Измерения				Вычисления		
	$U$ , В	$I$ , А	$n$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P_1 = U_1$ , Вт	$P_2 = n \cdot M_2 \times 0,105$ , Вт	КПД $\eta = \frac{P_2}{P_1} 100$ %, %

Затем отключают двигатель от сети постоянного тока и включают его в сеть переменного тока (замыкают Р2). Опыт повторяют, и показания приборов заносят в таблицу, аналогичную приведенной выше.

Как в первом случае, так и во втором напряжение питания следует поддерживать постоянным. Выполнив необходимые вычисления, заполняют таблицы и строят рабочие характеристики двигателя при его работе на постоянном и переменном токах: зависимость частоты вращения  $n$ , потребляемого тока  $I$ , полезной мощности  $P_2$  и КПД  $\eta$  от момента на валу  $M_2$ . Все графики строят в одних осях координат, при этом одноименные графики изображают разным цветом. Примерный вид рабочих характеристик универсального коллекторного двигателя представлен на рис. 2.2.

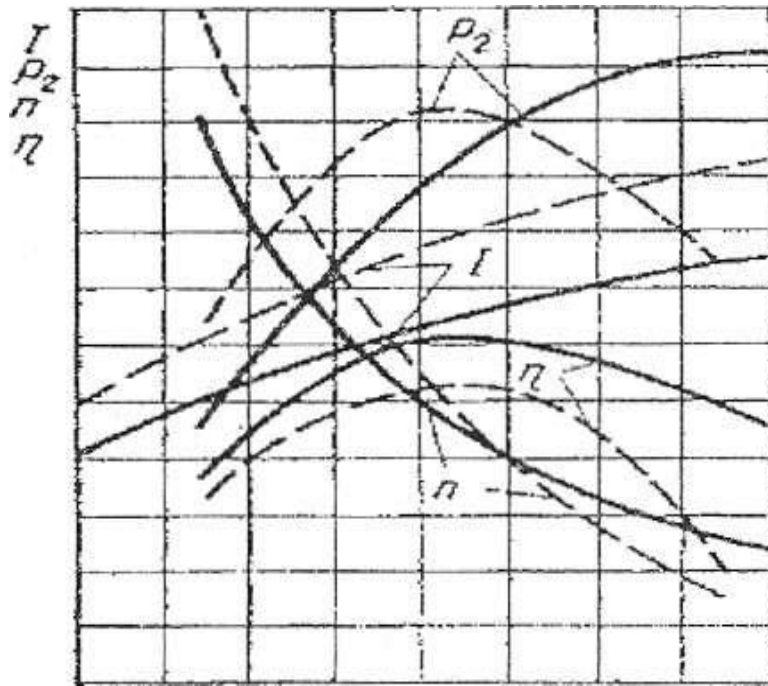


Рис. 2.2. Рабочие характеристики универсального коллекторного двигателя

### Анализ результатов лабораторной работы

В первую очередь устанавливают, соответствуют ли номинальные данные универсального двигателя на постоянном и переменном токах, полученные опытным путем, паспортным данным. Затем путем сравнения одноименных графиков рабочих характеристик двигателя при его работе на постоянном и переменном токах выясняют, по каким параметрам свойства двигателя на постоянном токе отличаются от его свойств на переменном токе. При этом необходимо указать причины, обусловившие разницу этих параметров.

### Контрольные вопросы

1. С какой целью магнитную систему универсального двигателя делают шихтованной?
2. Почему при включении универсального двигателя в сеть переменного тока уменьшают число витков в обмотке возбуждения?
3. Почему универсальные коллекторные двигатели делают только с последовательным возбуждением?
4. Почему при работе от сети переменного тока ток, потребляемый универсальным двигателем, больше, чем при работе от сети постоянного тока, а КПД, наоборот, меньше?

## Лабораторная работа № 3. КОНСТРУКЦИЯ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

### Цель работы

Изучение конструкции, принципа действия, технологии разборки и сборки, оценка технического постоянного тока с постоянными магнитами.

### Теоретические основы лабораторной работы

Существует множество электродвигателей, принцип работы которых основан на электромагнитном преобразовании энергии. К ним относятся двигатели с постоянными магнитами, которые благодаря высоким характеристикам получили широкое распространение в электроприводах систем автоматики. В данном разделе основное внимание уделено рассмотрению принципа действия коллекторных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов.

*Основные термины.* Для рассмотрения принципа работы коллекторных двигателей постоянного тока обратимся к рис. 3.1.

Прежде чем изучить принцип работы этого двигателя, остановимся на терминах, используемых в электромеханике:

- *ротор* – вращающаяся часть двигателя;
- *статор* – неподвижная часть двигателя;
- *система возбуждения* – часть двигателя, создающая магнитный поток для образования момента. В двигателе, изобра-

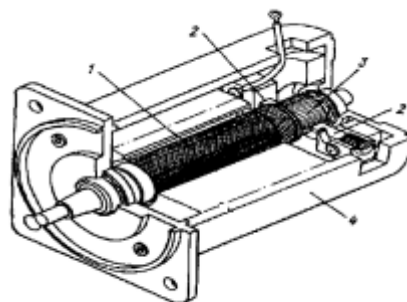


Рис. 3.1. Двигатель постоянного тока в разрезе:  
1 – ротор (якорь); 2 – щетка;  
3 – коллектор; 4 – постоянный магнит (для создания магнитного потока)

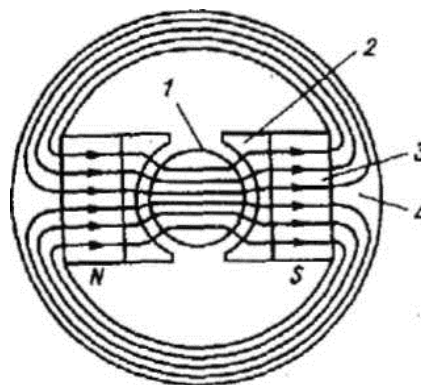


Рис. 3.2. Система возбуждения; направление магнитного потока:  
1 – ротор; 2 – магнитный полюсный наконечник (сделан из магнитомягкого материала); 3 – постоянный магнит; 4 – ярмо (концентратор магнитного потока)

женном на рис. 3.1, система возбуждения состоит из двух постоянных магнитов с полюсными наконечниками, выполненных из магнетомягкого материала и входящих в состав статора (рис. 3.2);

- **якорь** – часть двигателя, которая проводит электрический ток, взаимодействующий (для создания момента) с магнитным потоком. В двигателе, показанном на рис. 3.1, ротор является якорем, поскольку содержит намотанные на него обмотки;

- **щетки** – часть электрической цепи, по которой от источника питания электрический ток передается к якорю. Щетки изготавливаются из графита или других материалов. Двигатель постоянного тока содержит одну пару щеток или более. На рис. 3.1 показано, что одна из щеток соединена с положительным, а другая с отрицательным выводом источника питания;

- **коллектор** – часть двигателя, контактирующая со щетками. С помощью щеток и коллектора электрический ток распределяется по катушкам обмотки якоря.

Конструкции коллекторных двигателей постоянного тока с постоянными магнитами.

*Основы теории постоянных магнитов.* Конструкция системы возбуждения двигателя тесно связана с природой используемых в нем постоянных магнитов. На рис. 3.3, а показана петля гистерезиса. В большинстве случаев постоянный магнит используется во втором и четвертом квадрантах петли гистерезиса. В них направления напряженности магнитного поля  $H$  и индукции  $B$  противоположны друг другу.

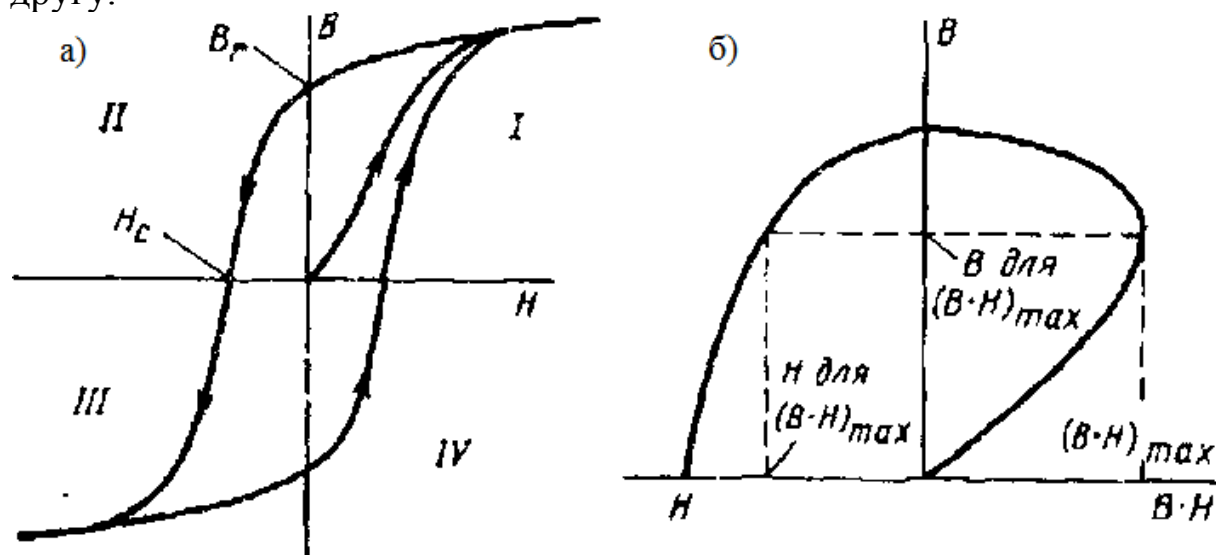


Рис. 3.3. Петля гистерезиса, кривая размагничивания и магнитная энергия:  
 I – первый квадрант; II – второй квадрант; III – третий квадрант;  
 IV – четвертый квадрант

Кривая  $B - H$ , расположенная во втором квадранте, называется кривой размагничивания. В этой области магнитные характеристики называются характеристиками размагничивания. Главными точками характеристик размагничивания являются следующие точки.

1. Остаточная индукция и коэрцитивная сила (по индукции).

Однажды намагниченный постоянный магнит остается намагниченным даже в том случае, если напряженность магнитного поля уменьшается до нуля. Магнитная индукция в этой точке носит название остаточной индукции и обозначается  $B_r$ . При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля в противоположном направлении магнитная индукция уменьшается по кривой размагничивания до нуля. Напряженность магнитного поля полностью размагниченного магнита называют магнитной коэрцитивной силой по индукции и обозначают  $H_c$ .

2. Магнитная энергия и максимальная магнитная энергия. Магнитная энергия – это значение произведения магнитной индукции  $B$  и напряженности магнитного поля  $H$  в каждой точке кривой размагничивания. Магнитная энергия в функции от  $B$  во втором квадранте показана на рис. 3.3, б. Максимальное значение магнитной энергии называется максимальной магнитной энергией и является показателем энергоемкости постоянного магнита.

Напряженность магнитного поля и коэрцитивная сила измеряются в Международной системе единиц СИ в  $A \cdot m^{-1}$ , магнитная индукция и остаточная индукция – в Тл, магнитная энергия – в  $кДж \cdot м^{-3}$ .

3. Прямые возврата. Участок петли гистерезиса, лежащий во втором квадранте, может быть аппроксимирован прямой линией, называемой линией возврата. Прямая  $AC$  на рис. 3.4 является прямой возврата.

4. Стабилизация. При работе двигателя из-за уменьшения уровня магнитного потока уменьшаются коэффициенты момента и противо-ЭДС. Это так называемое размагничивание машины. Для того чтобы

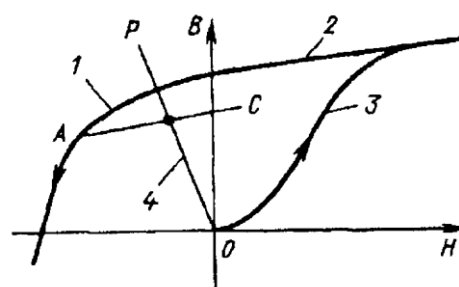


Рис. 3.4. Прямая возврата:  
 1 – кривая размагничивания;  
 2 – предельная петля гистерезиса;  
 3 – кривая первоначального намагничивания;  
 4 – прямая магнитной проводимости

исключить размагничивание в процессе работы, необходимо стабилизировать постоянные магниты перед их использованием в машине, что достигается определенным выбором рабочей точки на прямой возврата, положение которой определяется значением магнитной индукции  $B$  и напряженности магнитного поля  $J$ . Такой процесс называется стабилизацией и обычно выполняется при изготовлении деталей.

5. Рабочая точка. При отсутствии тока якоря рабочая точка постоянного магнита лежит на пересечении прямой возврата и прямой магнитной проводимости  $OP$ . Прямая магнитной проводимости определяется параметрами конструкции машины: длиной воздушного зазора, размерами магнитной системы и числом витков обмотки якоря. При работе двигателя ток якоря вызывает смещение рабочей точки: рабочая точка одного полюса постоянного магнита перемещается в одну сторону по прямой возврата, рабочая точка другого полюса – в обратную сторону по этой же прямой. Поэтому в целом магнитный поток постоянного магнита остается почти постоянным до тех пор, пока рабочая точка не переместится до основной кривой размагничивания предельной петли гистерезиса.

*Типы постоянных магнитов.* В двигателях постоянного тока малой мощности в основном применяются три различных типа постоянных магнитов: магниты типа альнико, керамические, или ферритовые, магниты и редкоземельные магниты (на основе интерметаллических соединений кобальта и редкоземельных элементов). Как видно из рис. 3.5, характеристики намагничивания трех типов постоянных магнитов отличаются друг от друга.

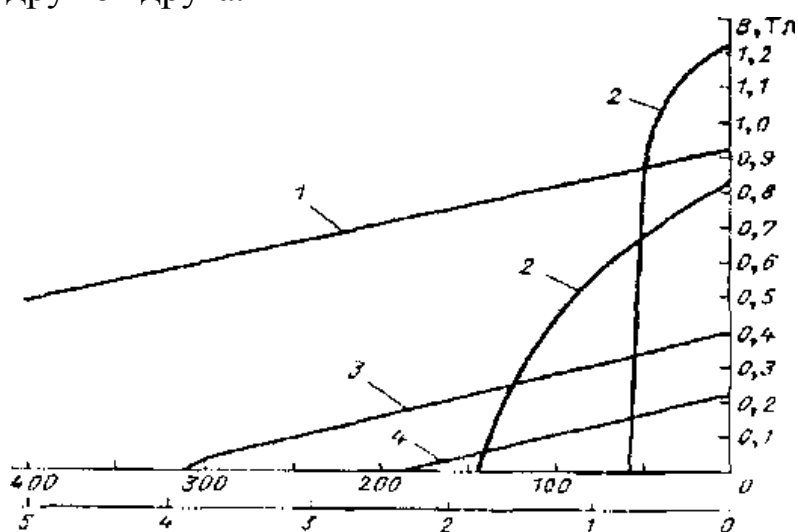


Рис. 3.5 Напряженность магнитного поля, кА/м



Отметим следующие особенности постоянных магнитов:

- магнит типа альнико – создает большую индукцию, но имеет малую коэрцитивную силу. Из-за этого два близкорасположенных противоположных полюса постоянного магнита ослабляют магнитное поле друг друга. Вот почему магниты на основе альнико используют с предварительным продольным намагничиванием;

- ферритовый магнит (керамический магнит) – в противоположность магнитам типа альнико этот тип магнита создает малую индукцию, но имеет большую коэрцитивную силу. Поэтому из-за большой коэрцитивной силы возможно их поперечное намагничивание. Магниты на основе феррита получили широкое распространение вследствие их низкой стоимости как материала и удобства в изготовлении;

- редкоземельные магниты – имеют высокие значения как остаточной индукции, так и коэрцитивной силы. Ранее из-за высокой стоимости магниты на основе самарий-кобальта применялись лишь в серводвигателях самолетов и военном оборудовании, а также в электродвигателях периферийных устройств ЭВМ. Однако в настоящее время области применения упомянутых магнитов значительно расширяются.

*Конструкция системы возбуждения.* Рассмотрим конструктивные особенности применения каждого типа постоянных магнитов.

1. Магниты типа альнико. Магниты этого типа применяются в высококачественных серводвигателях постоянного тока благодаря высокому значению остаточной индукции  $B_r$ .

По причинам, упомянутым выше, для получения высокого значения индукции магниты предварительно продольно намагничиваются. Примеры построения систем возбуждения показаны на рис. 3.6.

На рис. 3.6, *а, в* изображены двухполюсные конструкции, а на рис. 3.6, *б, г* – четырехполюсные конструкции двигателей.

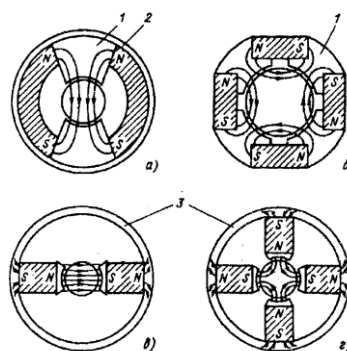


Рис. 3.6. Система возбуждения с магнитами альнико:

1 – полюс; 2 – корпус;

3 – ярмо

Конструкция двухполюсного маломощного двигателя, система возбуждения которого выполнена на основе анизотропного альнико, показана на рис. 3.7.

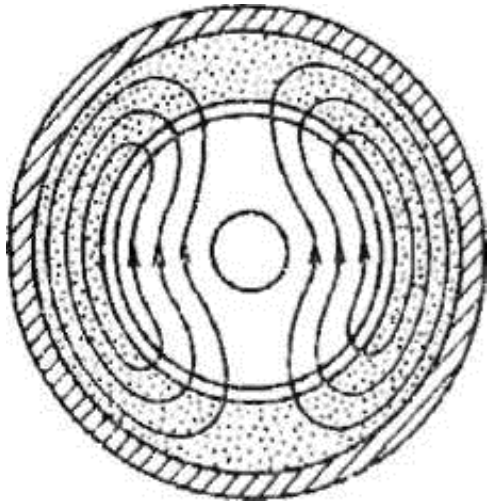


Рис. 3.7. Конструкция системы возбуждения маломощного двигателя с магнитами альнико

Для коллекторных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов количество полюсов обычно равно двум или четырем, однако существуют и другие разновидности двигателей, использующих шестиполюсную магнитную систему и даже больше.

2. Ферритовые магниты. Магниты этого типа из-за высокого значения коэрцитивной силы не размагничиваются даже при значительном внешнем поле. Сечения конструкций системы возбуждения, использующих один или два ферритовых магнита, показаны на рис. 3.8.

Рис. 3.8. Конструкции систем возбуждения на основе ферритовых магнитов: а – кольцевого анизотропного ферритового; б – анизотропного ферритового; в – с полюсными башмаками в виде «ласточка хвоста»; 1 – магнитомягкая сталь (ядро); 2 – магнит; 3 – полюсный башмак

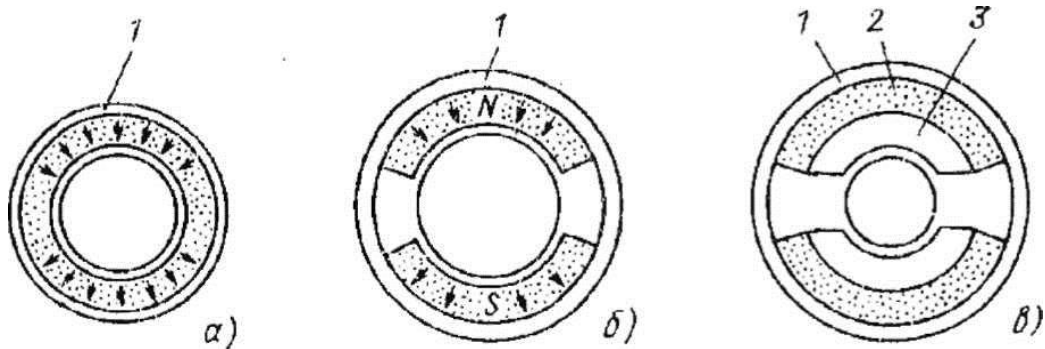


Рис. 3.8. Конструкции систем возбуждения на основе ферритовых магнитов: а – кольцевого анизотропного ферритового; б – анизотропного ферритового; в – с полюсными башмаками в виде «ласточка хвоста»; 1 – магнитомягкая сталь (ядро); 2 – магнит; 3 – полюсный башмак

На практике применяют некоторые конструктивные меры по увеличению индукции в воздушном зазоре. Так как ферритовые магниты имеют низкое значение остаточной индукции, для увеличения

индукции в воздушном зазоре делают постоянный магнит по длине больше длины ротора, как это показано на рис. 3.9.

При использовании такого конструктивного решения достаточно велика площадь, занятая магнитопроводом статора (корпусом), что позволяет уменьшить его толщину и соответственно массу всего двигателя.

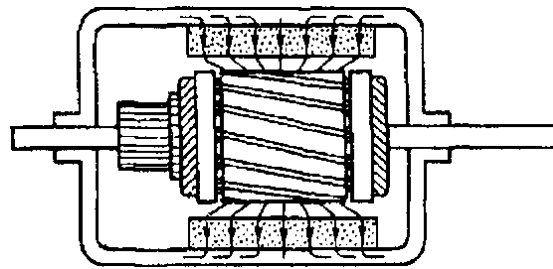


Рис. 3.9 Двигатель с увеличенной длиной магнита

3. Редкоземельные магниты. Магниты этого типа, так же как и ферриты, имеют высокое значение коэрцитивной силы. Конструктивно редкоземельные постоянные магниты выполняются тонкими (из-за их высокой стоимости). Редкоземельные магниты в конструкции системы возбуждения расположены идентично расположению ферритовых магнитов, как это показано на рис. 3.10.

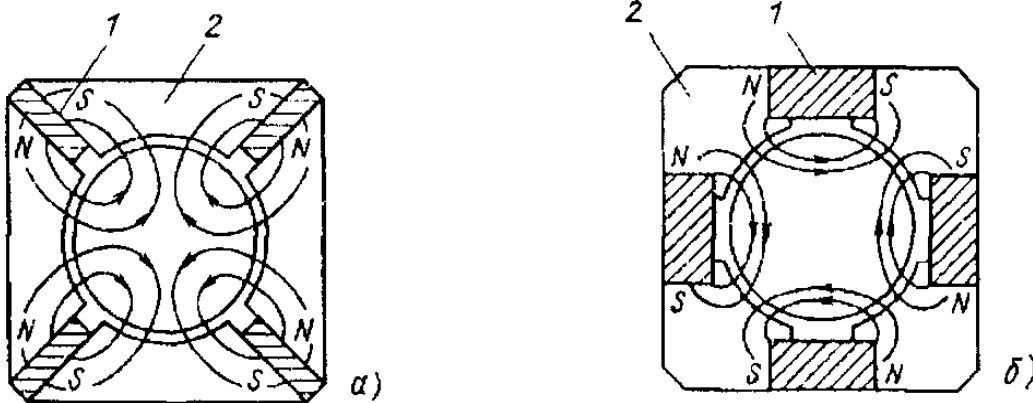


Рис. 3.10. Сравнение конструкций системы возбуждения, выполненных на редкоземельных магнитах (а) и магнитах альнико (б): 1 – магнит; 2 – полюсный башмак; N – северный полюс; S – южный полюс

Однако конструкция ротора двигателя с редкоземельными магнитами отличается от конструкции ротора двигателя с ферритовыми магнитами, поскольку самарий-кобальтовые магниты обладают высокой остаточной индукцией. У редкоземельных магнитов индукция вдвое больше по сравнению с ферритовыми магнитами при одинаковых конструктивных размерах (площади и длине). Поэтому, казалось бы, что и момент, развиваемый двигателем с редкоземельными постоянными магнитами, должен был бы во столько же раз увеличиться. Однако у двигателей с ферритовыми постоянными магнитами имеется возможность увеличить линейную нагрузку за счет изменения соотношения ширины паза к ширине зубца.

*Конструкции якоря.* Существуют три основные конструкции роторов двигателей постоянного тока, сечения которых показаны на рис. 3.11 – 3.13.

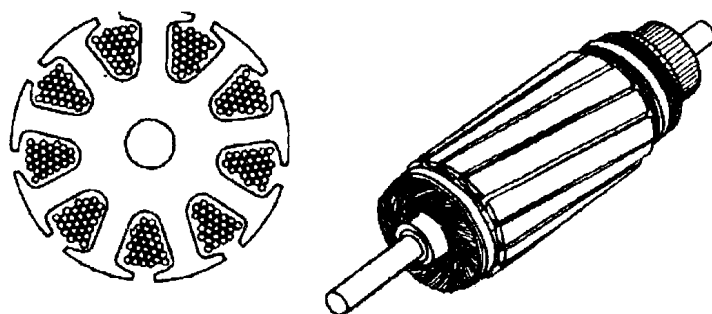


Рис. 3.11. Пазовая конструкция ротора

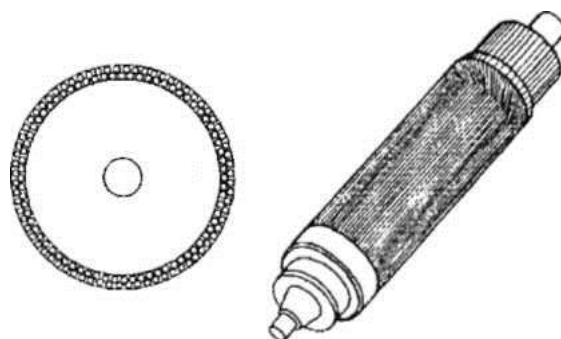


Рис. 3.12. Беспазовый ротор

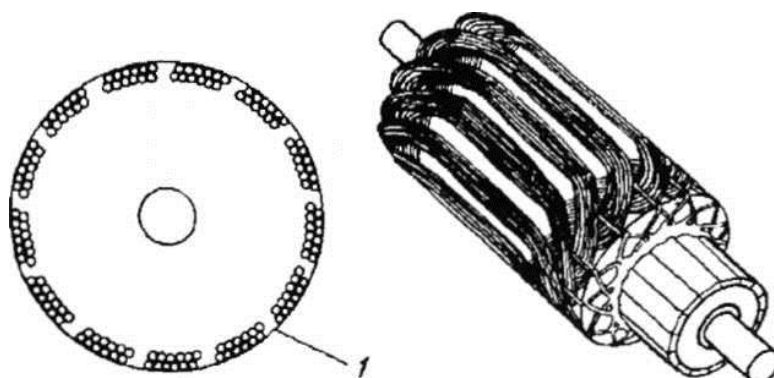


Рис. 3.13. Полый ротор: 1 – стекловолокно

*Основная конструкция вентильного двигателя постоянного тока.* В обычном коллекторном двигателе постоянного тока якорь является ротором, а постоянные магниты расположены на статоре. Такую конструкцию очень трудно реализовать в вентильном двигателе постоянного тока. Конструкция современного вентильного двигателя очень близка к конструкции двигателя переменного тока, известной под названием синхронного двигателя с постоянными магнитами (рис. 3.14).

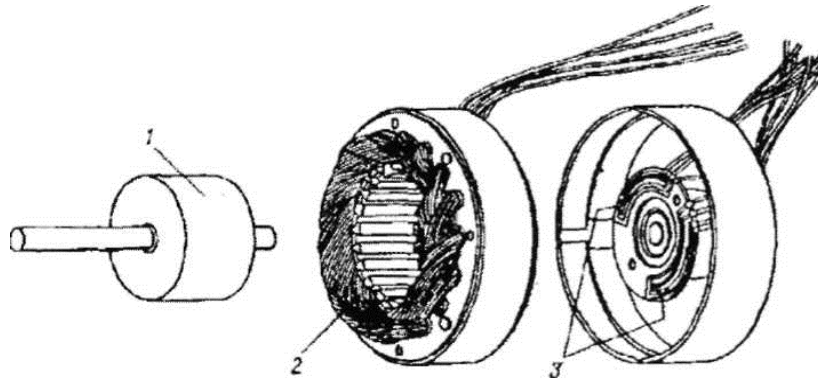


Рис. 3.14. Вентильный двигатель постоянного тока в разобранном виде: 1 – ротор на основе постоянного магнита; 2 – обмотка; 3 – элементы Холла

Обмотки якоря являются частью статора, а ротор состоит из одного или нескольких постоянных магнитов. Обмотки вентильного двигателя выполняются такими же, как и обмотки многофазного двигателя переменного тока, однако общепринятой и наиболее эффективной конструкцией является трехфазная конструкция двигателя, работающая при двухполупериодном управлении (рис. 3.15).

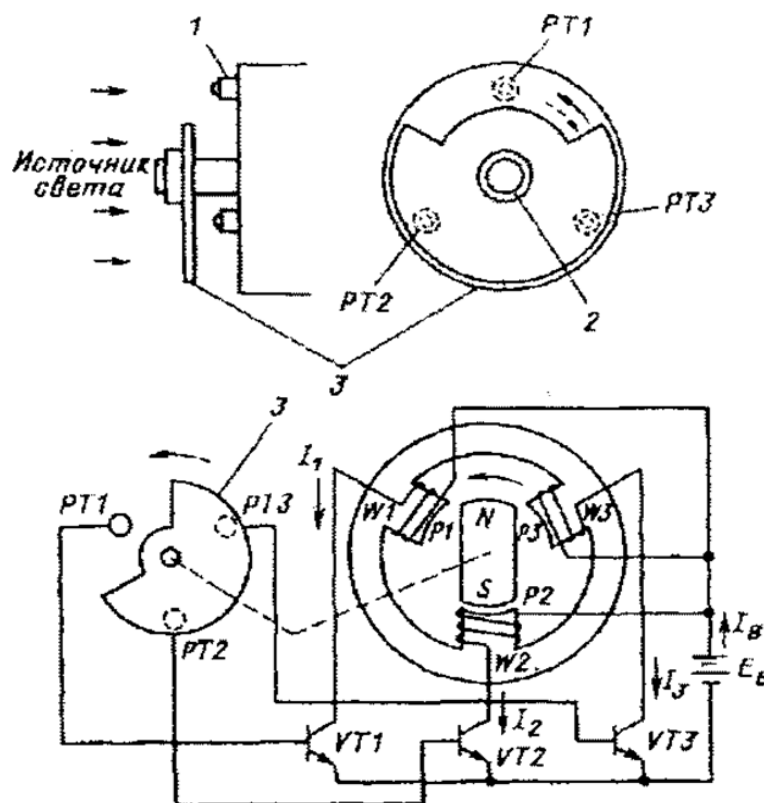


Рис. 3.15. Трехфазный вентильный двигатель постоянного тока с однополупериодной схемой управления: 1 – фототранзисторы; 2 – вал двигателя; 3 – вращающийся затвор;  $N, S$  – полюсы ротора

Вентильные двигатели постоянного тока отличаются от синхронных двигателей переменного тока тем, что первые содержат некоторые технические средства определения положения ротора (или магнитных полюсов) с целью выработки сигналов управления полупроводниковыми ключами. Наиболее распространенным датчиком положения является элемент Холла, однако в некоторых двигателях применяются оптические датчики положения.

Рассматривая модель простого трехфазного двигателя с однополупериодным управлением, можно легко уяснить принцип действия вентильных двигателей постоянного тока. На рис. 3.15 показан двигатель такого типа, в котором в качестве датчиков положения ротора используются оптические датчики (фототранзисторы). Три фототранзистора  $PT1$ ,  $PT2$  и  $PT3$ , расположенные с интервалом  $120^\circ$  на периферии платы, последовательно освещаются с помощью вращающегося затвора, установленного на валу двигателя.

Как видно из рис. 3.15, южный полюс ротора расположен напротив неподвижного полюса  $P2$  статора. При этом освещенный фототранзистор  $PT1$  включает транзистор  $VT1$ . На неподвижном полюсе  $P1$  статора создается южный полюс за счет протекания тока по обмотке  $W1$ , который притягивает северный полюс ротора, заставляя ротор поворачиваться против часовой стрелки.

При повороте ротора его южный полюс оказывается напротив неподвижного полюса статора  $P1$ . Затвор, установленный на валу ротора, затемняет фототранзистор  $PT1$  и освещает фототранзистор  $PT2$ , последний включает транзистор  $VT2$ . Протекающий по обмотке  $W2$  ток создает южный полюс на неподвижном полюсе  $P2$ , тогда северный полюс ротора повернется по стрелке и расположится напротив неподвижного полюса  $P2$ . В этот момент затвор затемняет фототранзистор  $PT2$  и освещает  $PT3$ , что обесточивает обмотку  $W2$  и включает обмотку  $W3$ . Поэтому неподвижный полюс  $P2$  размагничивается, в то время как неподвижный полюс  $P3$  намагничивается и становится южным полюсом. Следовательно, северный полюс ротора продолжит свое вращение от  $P2$  к  $P3$ . Ротор на постоянном магните будет непрерывно вращаться, если переключения транзисторов повторяются в последовательности, показанной на рис. 3.15.

## **Порядок выполнения работы**

### **1. Внеаудиторная подготовка к работе в лаборатории.**

1.1. Используя конспекты лекций, учебники и учебные пособия, методические указания к настоящей лабораторной работе, а также доступный справочный материал:

- ознакомиться с назначением и принципом действия двигателя постоянного тока с постоянными магнитами;
- изучить устройство двигателей, назначение их узлов и элементов;
- ознакомиться с основными техническими характеристиками;
- ознакомиться с требованиями к техническому состоянию основных узлов и элементов;
- изучить технологию разборки двигателя.

1.2. В процессе подготовки к работе в лаборатории найти ответы на контрольные вопросы к данной лабораторной работе.

1.3. Подготовить таблицу оценки технического состояния элементов и узлов двигателя по образцу, приведенному в настоящих указаниях.

### **2. Работа в лаборатории.**

2.1. Для ознакомления с конструкцией и элементами двигателя изучить демонстрационный стенд и плакаты.

2.2. Получить набор инструментов, необходимых для разборки и сборки двигателя.

2.3. Разобрать двигатель в следующем порядке:

2.3.1. С помощью ключа № 14 отвернуть гайку крепления фланца.

2.3.2. Отвернуть отверткой винт крепления щеткодержателя и снять щеткодержатель.

2.3.3. Снять крышку, вентиль с выводами обмотки статора, а затем ротор в сборе.

2.3.4. Извлечь статор из крышки.

2.4. Оценить техническое состояние двигателя.

2.4.1. Осмотреть состояние статора и ротора двигателя. Оценить состояние изоляции видимой части обмотки. Осмотреть обмотку ротора и коллектор и сделать заключение о состоянии изоляции и коллекторных пластин. При наличии нагара произвести их очистку с по-

мощью абразивной бумаги. Провод роторной обмотки не должен иметь следов перегрева.

**Примечание:** все выводы и результаты оценки технического состояния элементов и узлов записать в заготовленную ранее таблицу.

С помощью омметра проверить целостность изоляции обмотки. Для этого один зажим прибора необходимо подключить к одной из коллекторных пластин, а другой к магнитопроводу. Сопротивление изоляции должно быть равным бесконечности. С помощью омметра проверить целостность роторной обмотки, для чего следует измерить сопротивление каждой катушки, оно должно быть близким к паспортному значению.

2.4.2. Визуально проследить прохождение обмоточного провода обмотки, ближайшей к внутренней поверхности магнитопровода статора, на основании чего составить схему укладки трехфазной обмотки статора.

2.4.3. Проверить состояние подшипников. Внешние обечайки подшипников должны свободно вращаться относительно внутренних обечаек. Кроме этого, люфт одной обечайки относительно другой должен практически отсутствовать.

2.4.4. Осмотреть щеткодержатель со щетками. Длина щеток не должна быть менее 8 мм. Щетки должны свободно перемещаться в направляющих, не иметь сколов. Поверхность трений о кольца должна быть ровной. Направляющие щеткодержателя должны быть без механических повреждений и следов подгара или оплавления. Щетки должны выступать из щеткодержателя не менее чем на 5 мм. Пружин щеткодержателя должны быть исправными. Исправность пружин можно проверить путем нажатия на щетки: при снятии усилия щетки должны вернуться под действием пружин в исходное положение.

2.4.5. Проверить состояние крышек генератора. Они не должны иметь механических повреждений.

Все результаты оценки технического состояния двигателя занести в таблицу.



### **Контрольные вопросы**

1. Каково назначение электрических машин переменного тока?
2. Как устроены электрические машины переменного тока?
3. По каким конструктивным характеристикам различают электрические машины переменного тока?
4. Каково назначение каждого из узлов двигателя и какие функции этот узел выполняет?
5. Какие виды возбуждения бывают в электрических машинах переменного тока?
6. По каким параметрам выбирают электрические машины переменного тока для различных сфер применения?

## **Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **Цель работы**

Приобрести практические навыки в сборке схемы и регулировке исполнительного двигателя постоянного тока при якорном способе управления; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах исполнительных двигателей постоянного тока.

### **Подготовка к работе**

1. Повторить теоретический материал: назначение и особенности устройства исполнительных двигателей постоянного тока; якорное и полюсное способы управления, механические и регулировочные характеристики двигателей, зависимость полезной мощности от частоты вращения.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с конструкцией исполнительного двигателя и нагрузочного устройства; записать паспортные данные двигателя и данные измерительных приборов.

2. Подготовить таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

3. Собрать схему по рисунку и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск двигателя, проверить возможность регулировки двигателя; определить напряжение трогания двигателя при якорном управлении.

4. Снять данные и построить механическую характеристику двигателя при якорном управлении.

5. Снять данные и построить регулировочную характеристику двигателя при якорном управлении.

6. Используя данные двигателя, полученные в п. 3, рассчитать параметры и построить график зависимости полезной мощности двигателя от частоты вращения.

7. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

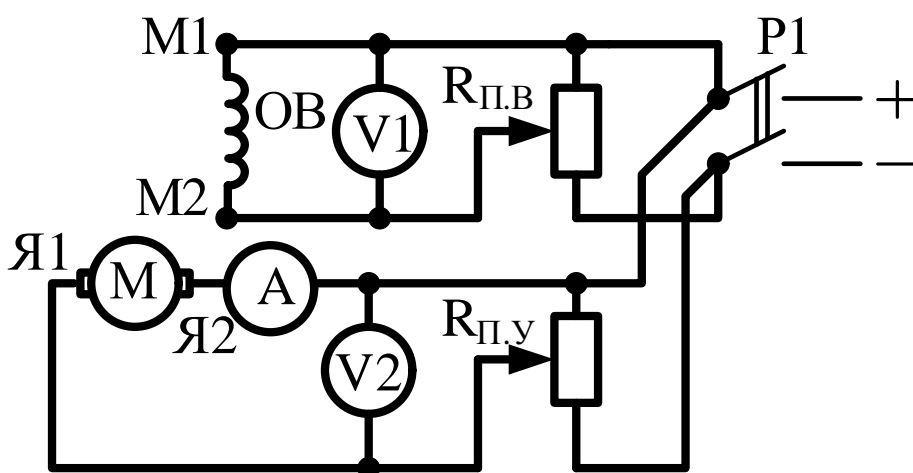


Схема включения исполнительного постоянного тока

*Схема включения и пробный пуск двигателя.* Схема включения исполнительного двигателя (см. рисунок) содержит два потенциометра: потенциометр  $R_{п.в}$  для создания на обмотке возбуждения номинального напряжения  $U_{в.ном}$  и потенциометр  $R_{п.у}$  для изменения напряжения на обмотке якоря (напряжения управления)  $U_y$  в диапазоне от нуля до номинального значения  $U_{y.ном}$ .

Для измерения указанных напряжений в схеме предусмотрены два вольтметра: вольтметр  $V_1$  для измерения напряжения возбуждения  $U_b$  и вольтметр  $V_2$  для измерения напряжения управления  $U_y$ . Кроме

того, в схеме применен амперметр А для контроля за током в цепи управления  $I_y$ , который не должен превышать номинального значения.

Тип применяемого тормозного устройства определяется в основном мощностью исследуемого двигателя; при мощности до 20 Вт целесообразно применение ленточного тормоза маятникового типа, а при большой мощности – электромагнитного тормоза.

Для измерения частоты вращения желательно использовать строботаксометр, но при мощности более 50 Вт возможно применение тахометра часового типа или тахогенератора.

Схему собирают по рисунку и после ее проверки преподавателем выполняют пробный пуск двигателя. С этой целью движки потенциометров  $R_{п.в}$  и  $R_{п.у}$  ставят в положение, соответствующее минимальному напряжению, и включают рубильник  $P_1$ . Затем потенциометром  $R_{п.в}$  устанавливают в цепи обмотки возбуждения номинальное напряжение  $U_{в.ном}$ . Если при этом якорь двигателя остается неподвижным, то это свидетельствует об отсутствии в двигателе самохода, т. е. о соблюдении одного из основных требований, предъявляемых к исполнительным двигателям.

Постепенно повышают напряжение  $U_y$  до номинального значения и наблюдают за нарастающей частотой вращения двигателя. Затем напряжение  $U_y$  уменьшают до нуля, после чего очень медленно повышают его до такого небольшого значения, при котором начинается вращение якоря. Измеренное при этом напряжение управления представляет собой напряжение трогания  $U_{у.тр}$ . Напряжение возбуждения, как и при всех последующих опытах, должно сохраняться номинальным. При выполнении этого опыта по определению напряжения трогания в качестве вольтметра  $V_2$  следует применить вольтметр с небольшим пределом измерения (не более  $0,20 U_{у.ном}$ ). Для получения более точного результата опыт повторяют три раза и получают три значения напряжения трогания  $U_{у.тр1}$ ,  $U_{у.тр2}$ ,  $U_{у.тр3}$ , а затем определяют среднее значение напряжения трогания:

$$U_{у.тр.ср} = (U_{у.тр1} + U_{у.тр2} + U_{у.тр3}) / 3. \quad (4.1)$$

*Механические характеристики.* Механическая характеристика исполнительного двигателя представляет собой зависимость момента

на валу от частоты вращения при неизменной величине сигнала, например при номинальном напряжении сигнала. Данные для построения механической характеристики получают следующим образом: потенциометрами  $U_{п.в}$  и  $R_{п.у}$  устанавливают номинальные напряжения возбуждения  $U_{в.ном}$  и управления  $U_{у.ном}$ , и с помощью тормозного устройства затормаживают якорь двигателя. При этом измеряют начальный пусковой момент  $M_{п}$  при  $n = 0$ . Постепенно уменьшая нагрузку на вал двигателя вплоть до холостого хода (х. х.) ( $M_2 = 0$ ), через приблизительно одинаковые интервалы этого момента измеряют частоту вращения двигателя. Делают не менее пяти замеров, а результаты заносят в табл. 4.1. Полученные значения момента и частоты вращения пересчитывают в относительные единицы:

$$m = M_2 / M_n ; \quad (4.2)$$

$$\gamma = n / n_0 .$$

Таблица 4.1

Номер измерения	$M_2$ , Н.м	$n$ , об/мин	$m$	$\gamma$

В этих выражениях начальный пусковой момент  $M_{п}$  (при  $n = 0$ ) и частота вращения в режиме х. х.  $n_0$  (при  $M_2 = 0$ ) приняты за базовые величины. Полученные относительные значения момента  $m$  и частоты вращения  $\gamma$ , соответствующие коэффициенту сигнала  $\alpha = U_y / U_{в.ном} = U_{у.ном} / U_{в.ном} = 1$ , заносят в табл. 4.1, и строят механическую характеристику исполнительного двигателя постоянного тока  $m = f(\gamma)$ :

$$\Delta m = 100(DB / AB) . \quad (4.3)$$

*Регулировочная характеристика.* Регулировочная характеристика исполнительного двигателя представляет собой зависимость частоты вращения от напряжения управления или же, переходя к относительным величинам, зависимость относительной частоты вращения  $\gamma$  от коэффициента сигнала  $\alpha = U_y / U_{в.ном}$ . Данные для построения регулировочной характеристики снимают при неизменной нагрузке на валу двигателя. В данной работе эти данные снимают в режиме х. х. ( $M_2 = 0$ ).

Поставив потенциометр  $R_{п.у}$  в положение, соответствующее  $U_y = 0$ , а потенциометр  $R_{п.в}$  – в положение, соответствующее  $U_{в.} = U_{в.ном}$ , постепенно повышают напряжение управления до номинального значения. При этом через приблизительно одинаковые интервалы этого напряжения измеряют частоту вращения двигателя. Всего делают не менее пяти замеров и заносят показания в табл. 4.2, а затем рассчитывают относительные значения измеренных величин: напряжение управления – коэффициент сигнала

$$\alpha = U_y / U_{в.ном}, \quad (4.4)$$

и относительную частоту вращения  $\gamma$  (4.2), где за базовую величину  $n_0$  принимают частоту вращения в режиме х. х. при  $\alpha = 1$ , т. е. при  $U_y = U_{ном}$ .

Таблица 4.2

Номер измерений	$U_y, В$	$n, об/мин$	$\alpha$	$\gamma$

Результаты вычислений заносят в табл. 4.2, строят регулировочную характеристику исполнительного двигателя постоянного тока при якорном управлении  $\gamma = f(\alpha)$  и определяют ее нелинейность.

*Зависимость полезной механической мощности двигателя от частоты вращения.* Используя данные, приведенные в табл. 4.1, определяют полезную механическую мощность двигателя (Вт).

$$P_2 = 0,105 M_2 \cdot n. \quad (4.5)$$

Результаты вычислений заносят в табл. 4.3.

Таблица 4.3

$\gamma$					
$P_2, Вт$					

По результатам вычислений строят графики  $P_2 = f(\gamma)$  при якорном способе управления исполнительным двигателем постоянного тока.

### Контрольные вопросы

1. Что такое механическая характеристика?
2. Какой вид имеет механическая характеристика ДПТ при различных видах возбуждения?

3. Что такое механическая мощность?
4. Что такое регулировочная характеристика?
5. Как обеспечить постоянство полезной мощности в ДПТ?

## Лабораторная работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

### Цель работы

Приобрести практические навыки в сборке схемы и регулировке асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах асинхронных исполнительных двигателей при указанных способах управления.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: назначение асинхронных исполнительных двигателей и способы их управления; самоход и пути его устранения; асинхронный исполнительный двигатель с полым немагнитным ротором; механические и регулировочные характеристики двигателя при различных способах управления; зависимость полезной механической мощности асинхронного исполнительного двигателя от частоты вращения.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

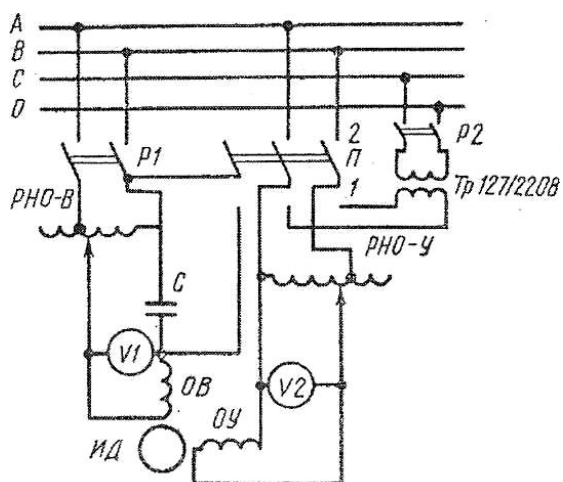


Рис. 5.1. Схема включения

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией двигателя, записать его паспортные данные, данные измерительных приборов и регуляторов напряжения.

2. Собрать схему по рис. 5.1 и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск двигателя и его реверсирование; проверить отсутствие самохода и измерить напряжение трогания.

3. Снять данные и построить механические характеристики двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления двигателем; определить нелинейность механических характеристик.

4. Снять данные и построить регулировочные характеристики двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления; определить нелинейность регулировочных характеристик.

5. Используя данные двигателя, полученные в п. 3, рассчитать параметры и построить графики зависимости полезной мощности двигателя от частоты вращения.

*Основные сведения.* Асинхронные исполнительные двигатели применяются в устройствах автоматики и вычислительной техники в качестве исполнительного органа, т.е. для преобразования электрических сигналов в механическое перемещение вала.

На статоре исполнительного двигателя (ИД) имеются две обмотки, сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. Одну обмотку называют обмоткой возбуждения (ОВ), она постоянно находится под напряжением; на другую, называемую обмоткой управления (ОУ), напряжение (электрический сигнал) подается лишь при необходимости вызвать вращение вала двигателя.

Величина вращающего момента, развиваемого асинхронным исполнительным двигателем, зависит от величины напряжения (напряжения управления)  $U_y$ , поданного на обмотку управления, и его фазового сдвига  $\beta$  относительно напряжения на обмотке возбуждения.

Существует три способа управления асинхронными исполнительными двигателями:

- изменением величины (амплитуды) напряжения управления  $U_y$  при неизменной его фазе  $\beta$  ( $U_y = \text{var}$ ;  $\beta = \text{const}$ ) – амплитудное управление;
- изменением фазы напряжения управления при неизменной его величине ( $U_y = \text{const}$ ;  $\beta = \text{var}$ ) – фазовое управление;
- одновременным изменением величины (амплитуды) напряжения управления и его фазы ( $U_y = \text{var}$ ;  $\beta = \text{var}$ ) – амплитудно-фазовое управление.

Наибольшее практическое применение получили два способа управления – амплитудное и амплитудно-фазовое. Они и будут исследоваться в данной лабораторной работе.

Помимо общих требований ко всем электрическим машинам (минимальные габариты, масса и стоимость, высокий КПД и т. д.) к асинхронным исполнительным двигателям предъявляются некоторые специфические требования: широкий диапазон регулирования частоты вращения, отсутствие самохода, малоинерционность, прямолинейность механических и регулировочных характеристик. Последнее требование в асинхронном ИД полностью не может быть выполнено, т.е. характеристики этого двигателя всегда отличаются от прямолинейных, поэтому при оценке свойств асинхронного исполнительного двигателя вводят понятие «нелинейность характеристики».

Нелинейность механической характеристики (%):

$$\Delta m = 100(DB / AB). \quad (5.1)$$

Для определения отрезков  $DB$  и  $AB$  (рис. 5.2, а) проводят прямую, соединяющую точки пересечения механической характеристики с осями координат, а затем параллельно этой прямой проводят касательную к механической характеристике и получают точку  $B$ . Из этой точки опускают перпендикуляр  $BA$  на ось абсцисс и получают искомые отрезки  $DB$  и  $AB$ .

*Нелинейность регулировочной характеристики*  $\Delta v$  (рис. 5.2, б) определяют по выражению, аналогичному (5.1):

$$\Delta v = 100(DB / AB). \quad (5.2)$$

Известно, что для получения в двухфазном двигателе вращающегося магнитного поля необходим фазовый сдвиг между токами в обмотке возбуждения ОВ и в обмотке управления ОУ. При пространственном сдвиге осей этих обмоток в 90 эл. град. желательно, чтобы фазовый сдвиг между токами составлял  $\beta = 90^\circ$ .

При *амплитудном способе управления* исполнительным двигателем это достигается тем, что обмотки статора включают на напряжения, сдвинутые по фазе относительно друг друга на  $90^\circ$ . Для получения таких напряжений существует несколько способов. Наиболее простой – воспользоваться трехфазной сетью с нулевым проводом. При этом цепь обмотки ОВ подключают к линейным проводам А и В на напряжение  $U_{AB}$ , а цепь обмотки ОУ к линейному проводу С и нулевому проводу О на фазное напряжение  $U_C$  (см. рис. 5.1). Фазовый сдвиг между векторами этих напряжений составляет  $90^\circ$  (рис. 5.3).



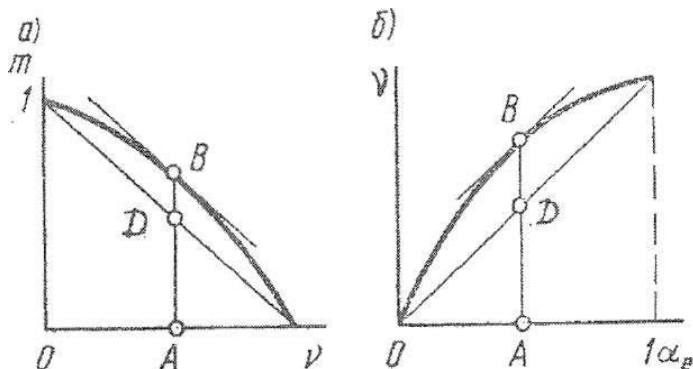


Рис. 5.2. Определение нелинейности механической (а) и регулировочной (б) характеристик

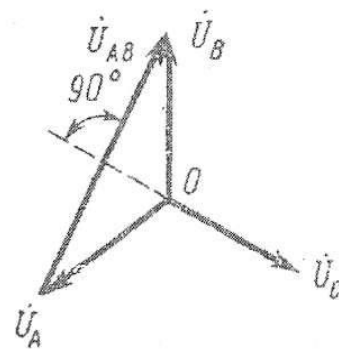


Рис. 5.3. Векторная диаграмма напряжений трехфазной сети с нулевым проводом

При амплитудно-фазовом способе управления ИД сдвиг по фазе между напряжениями  $U_B$  и  $U_Y$  создается конденсатором  $C$  в цепи обмотки  $OB$  (см. рис. 5.1). Емкость этого конденсатора в асинхронном ИД выбирается такой, чтобы обеспечить фазовый сдвиг  $\beta = 90^\circ$  при пуске двигателя. При этом следует помнить, что при других режимах работы двигателя фазовый сдвиг  $\beta \neq 0^\circ$ .

*Схема соединений.* На рис. 5.1 представлена схема включения асинхронного исполнительного двигателя. В ней применены два однофазных регулировочных автотрансформатора (РНО-В и РНО-У), позволяющие осуществлять независимую регулировку напряжения как в цепи  $OB$ , так и в цепи  $OY$ .

Переключение ИД с амплитудного управления на амплитудно-фазовое осуществляется переключателем  $\Pi$ : положение 1 этого переключателя соответствует амплитудному управлению двигателя (конденсатор  $C$  зашунтирован, а цепь управления подключена на фазное напряжение  $U_C$ ); при положении 2 переключателя управление двигателя амплитудно-фазовое (цепь управления подключена параллельно цепи возбуждения на линейное напряжение  $U_{AB}$ , а последовательно обмотке возбуждения включен конденсатор  $C$ ).

Для получения одинаковых напряжений на входах РНО-В и РНО-У в схему включают повышающий трансформатор  $Tr$ , увеличивающий фазное напряжение  $U_C$  в  $\sqrt{3}$  раз. Во время выполнения работы рубильник  $P2$  должен быть включенным.

Схему собирают по рис. 5.1 и после проверки ее преподавателем осуществляют пробный пуск двигателя. Для этого рукоятки регулято-

ров РНО-В и РНО-У ставят в положение минимального напряжения, включают рубильники Р1 и Р2, а переключатель П ставят в положение 1 (амплитудное управление). Затем регулятором РНО-В устанавливают номинальное напряжение на обмотке возбуждения  $U_v$  (вольтметр V1), а напряжение управления  $U_y$  (вольтметр V2) постепенно повышают регулятором РНО-У до номинального значения, наблюдая за нарастающей частотой вращения ИД. После этого, вернув рукоятки РНО-У и РНО-В в нулевое положение, переключатель П переводят в положение 2 (амплитудно-фазовое управление), устанавливают регулятором РНО-В номинальное напряжение  $U_v$  и постепенно повышают напряжение управления  $U_y$ .

Для изменения направления вращения двигателя (реверса) следует поставить переключатель П в нейтральное положение, поменять местами провода, присоединяемые к выводам обмотки управления, и включить двигатель, поставив переключатель П в положение 1 или 2.

*Проверка отсутствия самохода и определение напряжения трогания ИД.* Для проверки отсутствия технологического самохода, вызванного возможным коротким замыканием части витков в обмотках статора, асимметрией магнитной системы двигателя или замыканием некоторой части пластин магнитопровода, включают в сеть обмотку возбуждения (ОВ) двигателя, установив на ней номинальное напряжение. Обмотка управления (ОУ) при этом должна быть отключенной (переключатель И находится в нейтральном положении). Если при этом ротор ИД остается неподвижным, то это свидетельствует об отсутствии технологического самохода. Затем проверяют отсутствие в двигателе параметрического самохода, обусловленного недостаточным активным сопротивлением ротора. С этой целью включают в сеть обе обмотки статора и с помощью РНО-В и РНО-У устанавливают номинальные напряжения на обмотках возбуждения и управления и после достижения двигателем установившейся частоты вращения регулятором РНО-У уменьшают до нуля напряжение управления. При этом ротор двигателя должен остановиться (параметрический самоход отсутствует).

Под напряжением трогания понимают такое минимальное напряжение в цепи обмотки управления ( $U_{y,тр}$ ), при котором ротор двигателя начинает вращаться. Напряжение на обмотке возбуждения

при этом должно быть номинальным. Опыт проводят в следующем порядке. Включив рубильник Р1 и поставив переключатель П в положение 1 (амплитудное управление), устанавливают с помощью РНО-В номинальное напряжение возбуждения и регулятором РНО-У постепенно повышают напряжение на ОУ от нуля до некоторого значения  $U_{y.тр}$ , при котором начнется вращение ротора двигателя. Так как обычно величина напряжения трогания невелика, то при этом опыте применяют вольтметр V2 с небольшим пределом измерения – не более  $0,10 - 0,15 U_{y.ном}$ . Для получения более точного результата опыт повторяют три раза, результаты измерений заносят в табл. 5.1 и определяют среднее значение напряжения трогания (В):

$$U_{y.тр.ср} = (U_{y.тр1} + U_{y.тр2} + U_{y.тр3}) / 3. \quad (5.3)$$

Затем переключатель П ставят в положение 2 (амплитудно-фазовое управление) и опыт повторяют.

Таблица 5.1

Характеристики	$U_{y.тр1}, В$	$U_{y.тр2}, В$	$U_{y.тр3}, В$	$U_{y.тр.ср}, В$
Способ управления				
Амплитудное				
Амплитудно-фазовое				

*Механические характеристики.* Данные, необходимые для построения механических характеристик ИД, снимают следующим образом. Включают двигатель в сеть при амплитудном способе управления (переключатель П ставят в положение 1), устанавливают номинальные напряжения на обмотках ОВ и ОУ и посредством тормозного устройства (электромагнитного или маятникового тормоза) затормаживают ротор двигателя. При этом измеряют начальный пусковой момент  $M_n$  при  $n_2 = 0$ . Затем постепенно уменьшают величину нагрузочного момента до режима х. х. ( $M_2 = 0$ ) и через приблизительно одинаковые интервалы этого момента измеряют частоту вращения двигателя П2. Всего делают не менее пяти измерений, показания приборов заносят в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Способ управления \ Характеристики	Амплитудное					Амплитудно-фазовое				
	$M_2, \text{Н} \cdot \text{м}$									
$n_2, \text{об/мин}$										
$m$										
$\nu$										

Затем переключатель П переводят в положение 2 и в таком же порядке снимают данные механической характеристики при амплитудно-фазовом способе управления ИД.

Полученные опытным путем данные момента и частоты вращения пересчитывают в относительных единицах:

$$m = M_2 / M_{II}; \quad (5.4)$$

$$\nu = n_2 / n_1,$$

где  $M_{II}$  – начальный пусковой момент,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;

$$n_1 = f_1 60 / p, \quad (5.5)$$

где  $f_1$  – синхронная частота вращения,  $\text{об/мин}$ ;  $p$  – число пар полюсов в обмотках статора.

Полученные относительные значения величин заносят в табл. 5.2 и строят механические характеристики асинхронного исполнительного двигателя  $m = f(\nu)$  при номинальном напряжении управления, а затем определяют их нелинейность  $\Delta m$ .

*Регулировочные характеристики.* Данные, необходимые для построения регулировочных характеристик ИД при амплитудном управлении, снимают в режиме х. х. ( $M_2 = 0$ ), поставив переключатель П в положение 1. Для этого устанавливают в цепи возбуждения номинальное напряжение возбуждения  $U_B$  и с помощью РНО-У постепенно повышают напряжение управления  $U_y$  от нуля до номинального значения. Одновременно измеряют частоту вращения двигателя  $n_2$ . Всего делают не менее пяти замеров приблизительно через одинаковые интервалы напряжения управления и заносят их в таблицу, аналогичную табл. 5.2.

Затем переключатель П ставят в положение 2 и в таком же порядке снимают данные для построения регулировочных характеристик при амплитудно-фазовом управлении ИД.

Относительное значение эффективного коэффициента сигнала

$$a_c = kU_y / U_B, \quad (5.6)$$

где  $k$  – коэффициент трансформации обмоток возбуждения и управления (его величина указана в паспортных данных двигателя). Относительную частоту вращения определяют по (5.4).

По полученным значениям относительных величин строят регулировочные характеристики двигателя  $v = f(a_c)$  и определяют их нелинейность  $\Delta v$ .

*Зависимость полезной механической мощности двигателя от частоты вращения.* Используя данные, приведенные в табл. 5.2, определяют полезную механическую мощность двигателя (Вт):

$$P_2 = 0,105M_2n_2, \quad (5.7)$$

Результаты вычислений заносят в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Способ управления \ Характеристики	Амплитудное					Амплитудно-фазовое				
	$v$									
$P_2, \text{ Вт}$										

### Анализ результатов лабораторной работы

Анализ результатов лабораторной работы состоит главным образом в сравнении свойств асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном и амплитудно-фазовом способах управления. При этом сравнивают следующие параметры: напряжение трогания, начальный пусковой момент, нелинейность механических и регулировочных характеристик, наибольшее значение полезной механической мощности. Для удобства сравнения перечисленных параметров следует заполнить табл. 5.4.

Отмечая достоинства или недостатки способа управления по какому-либо параметру, необходимо физически обосновать пояснение.

При окончательной оценке преимуществ того или иного способа управления асинхронным исполнительным двигателем необходимо также иметь в виду сложность схемы соединений и наличие в ней дополнительных устройств.

Таблица 5.4

Характеристики Способ управления	$U_{\text{нр}}, \text{В}$	$M_{\text{П}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\Delta m, \%$	$\Delta v, \%$	$P_{2 \text{наиб}}, \text{Вт}$
Амплитудное					
Амплитудно-фазовое					

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение исполнительных двигателей?
2. Какие существуют способы управления асинхронными исполнительными двигателями и по каким принципиальным схемам они реализуются?
3. Какие виды самохода возможны в асинхронном ИД?
4. С какой целью асинхронные ИД выполняют с повышенным активным сопротивлением ротора?
5. Как устроен асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором?
6. Объясните устройство асинхронного двигателя «сквозной» конструкции.
7. Что такое напряжение трогания и как его определить?
8. Из каких соображений выбирают величину емкости конденсатора в цепи обмотки возбуждения при амплитудно-фазовом управлении асинхронным ИД?
9. Какие величины принимаются за базовые при расчете относительного значения момента и относительной частоты вращения?

## **Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

### **Цель работы**

Исследование машины постоянного тока при работе в двигательном и генераторном режимах.

### **Подготовка к работе**

1. Повторить теоретический материал: машины постоянного тока – конструкция, принцип действия, ЭДС вращения и момент, потери мощности.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### **Содержание работы**

1. Снятие механической характеристики и расчет рабочих характеристик машины в двигательном режиме работы.
2. Снятие механической и расчет рабочих характеристик машины в генераторном режиме работы.
3. Снятие механических характеристик при различных напряжениях питания в цепи якоря.
4. Снятие механических характеристик при различных сопротивлениях в цепи якоря.
5. Снятие механических характеристик при различных потоках возбуждения.
6. Снятие регулировочных характеристик при изменении напряжения якоря.

### **Описание виртуальной лабораторной установки**

Виртуальная лабораторная установка представлена на рис. 6.1.

Она включает источники постоянного напряжения ( $V1$  для питания якоря машины,  $V2$  для питания обмотки возбуждения из библиотеки *Power System Blockset/Electrical Sources*), блок *Moment* для задания момента нагрузки (блок *Constant* из библиотеки *Simulink/Sources*), саму машину постоянного тока (блок *DC Machine* из библиотеки *Power System Blockset/Machines*), блок для измерения переменных состояния машины *Display* и осциллограф *Scope* для визуального наблюдения процессов из библиотеки *Simulink/Sinks*.

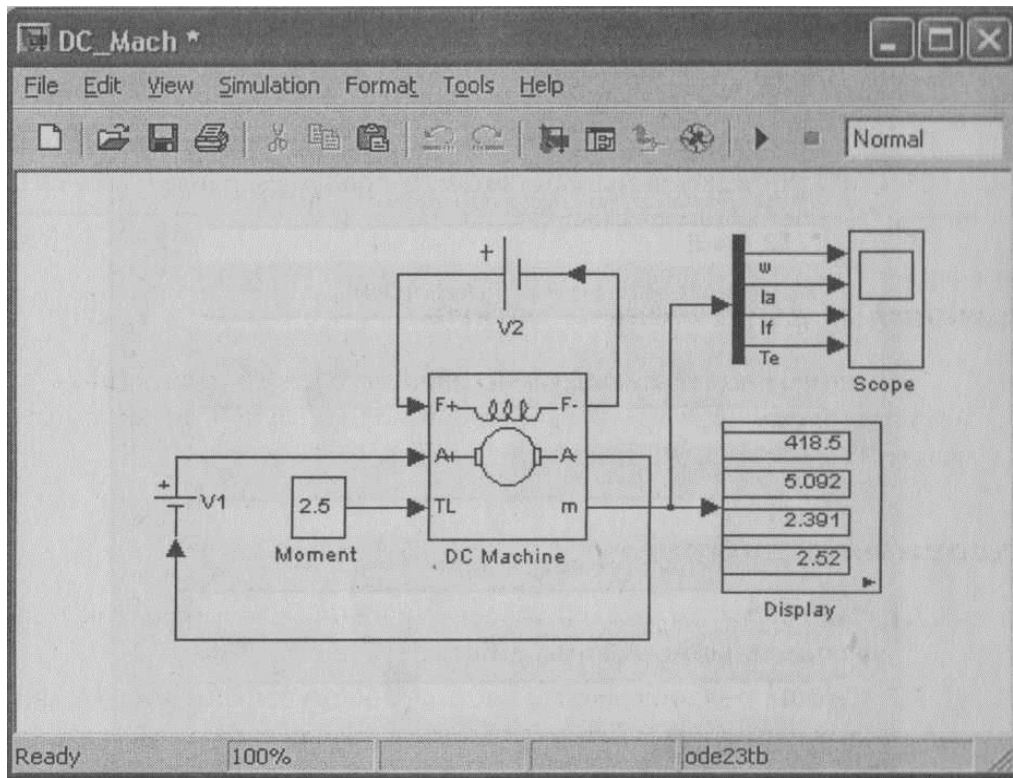


Рис. 6.1. Модель для исследования машины постоянного тока с независимым возбуждением

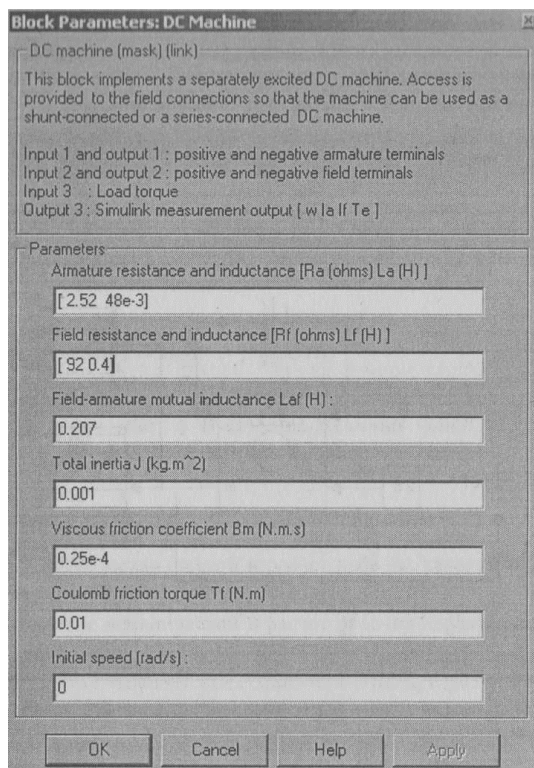


Рис. 6.2. Окно настройки параметров машины постоянного тока

Цепь якоря и цепь возбуждения видны из графического начертания блока, на вход  $TL$  подается момент нагрузки, выход  $m$  предназначен для измерения и наблюдения переменных состояния машины в следующей последовательности: угловая скорость (рад/с), ток якоря (А), ток возбуждения (А), электромагнитный момент (Н · м).

В полях настройки машины (рис. 6.2) задаются:

- параметры обмотки якоря –  $R_a$  (Ом),  $L_a$  (Гн);
- параметры обмотки возбуждения –  $R_f$  (Ом),  $L_f$  (Гн);
- коэффициент  $L_{af}$ ;



- суммарный момент инерции машины и нагрузки –  $J$  ( $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ). Следует подчеркнуть, что параметры ( $L_f, J$ ) важны при исследовании переходных процессов. На установившиеся режимы они не влияют;

- коэффициент вязкого трения –  $B_m$  ( $\text{Н} \cdot \text{мс}$ );
- коэффициент сухого трения –  $T_f$  ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ );
- начальная скорость.

Все эти параметры рассчитываются по выражениям:

- взаимная индуктивность между обмотками возбуждения и якоря для машины с независимым возбуждением определяется последовательным расчетом, с помощью выражений

$$I_B = \frac{U_B}{R_B}, \quad M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30P_H}{\pi n_H}, \quad I_{я.н} = \frac{P_H}{U_{я.н} \eta_H} - I_B, \quad L_{af} = \frac{M_H}{I_{я.н} I_B};$$

- индуктивность обмотки возбуждения при исследовании установившихся процессов может быть принята близкой к нулю. При исследовании переходных процессов значение  $L_B$  для машин обычного исполнения выбирается из неравенства

$$L_B \geq (2 - 5) \frac{L_я R_B}{R_я};$$

- момент инерции для двигателей обычного исполнения определяется из неравенства

$$J = \frac{(5 - 10) L_я P_H^2}{R_я^2 \omega_H^2 I_{я.н}^2};$$

- момент сухого трения и коэффициент вязкого трения определяются из следующих соображений. Общие механические потери для машин обычного исполнения составляют  $\Pi_{мех} = (0,5 - 2\%) P_H$ . Кроме того эти потери равны  $\Pi_{мех} = T_f \omega_H + B_m \omega_H^2$ . Если считать, что потери на трение и вентиляционные потери приблизительно равны, то

$$T_f = \frac{\Pi_{мех}}{2\omega_H}.$$

Паспортные параметры машин постоянного тока приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$n_n$ , об./мин	$\eta_{\mu}$ , %	$R_{я}$ , Ом	$R_{в}$ , Ом	$L_{я}$ , мГн
1	2	3	4	5	6	7	8
2ПН-0,17	0,17	220	750	48,5	27,2	162	514
2ПН-0,25	0,25	220	1120	57	15,47	612	297
2ПН-0,37	0,37	220	1500	61,5	10,61	612	190
2ПН-0,71	0,71	220	2360	70	3,99	123	70
2ПН-1,0	1,0	220	3000	72,5	2,52	92	48

Окно настройки параметров моделирования показано на рис.6.3.

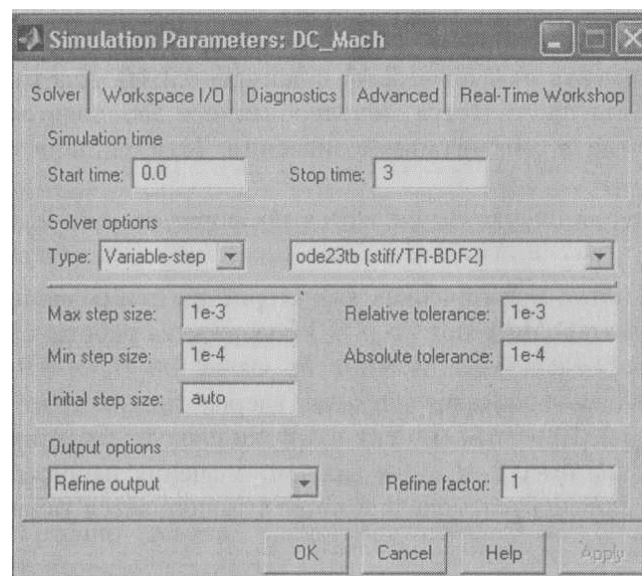


Рис. 6.3. Окно задания параметров моделирования

### Порядок проведения лабораторной работы

1. Для заданной преподавателем (или выбранной при самостоятельной работе) машины рассчитать значение параметров и заполнить поля окна настройки параметров машины.
2. Задать параметры моделирования (см. рис. 6.3).
3. При снятии характеристик по п. 1 содержания работы в окне настройки блока *Moment* последовательно задаются значения момента от 0 до 1,2 М<sub>н</sub> с шагом 0,2 М<sub>н</sub>. Для каждого значения момента осуществляется моделирование и заполняется табл. 6.2 измеренных и рассчитанных значений.

Таблица 6.2

Задание	Измерения			Расчет			
	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\omega, \text{рад/с}$	$I_{\text{я}}, \text{А}$	$I_{\text{в}}, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$\eta$

Вычисления осуществляются по выражениям:

$$P_1 = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}}), \quad P_2 = M_{\text{н}} \omega, \quad \eta = \frac{P_1}{P_2}.$$

4. При снятии характеристик по п. 2 содержания работы в окне настройки блока *Moment* последовательно задаются значения момента от 0 до  $-1,2M_{\text{н}}$  с шагом  $-0,2M_{\text{н}}$ . Для каждого значения момента осуществляется моделирование и заполняется таблица измеренных и рассчитанных значений, аналогичная табл. 6.2.

5. Снятие механических характеристик при различных напряжениях питания в цепи якоря по п. 3 содержания работы следует провести для двух значений напряжения на якоре  $0,6U_{\text{я}}$  и  $0,8U_{\text{я}}$ , где  $U_{\text{я}}$  – первоначальное напряжение на якоре, при котором выполнялись пп. 3.1, 3.2. При этом момент нагрузки следует изменять от  $-1,2 M_{\text{н}}$  до  $1,2 M_{\text{н}}$  с шагом  $0,2 M_{\text{н}}$ . Для каждого значения напряжения на якоре и момента проводится моделирование и заполняется табл. 6.3.

Таблица 6.3

$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	$\omega, \text{рад/с}$

6. Снятие механических характеристик при различных сопротивлениях в цепи якоря по п. 4 содержания работы следует провести для двух значений сопротивления якоря  $2R_{\text{я}}$  и  $4R_{\text{я}}$ , где  $R_{\text{я}}$  – первоначальное значение сопротивления. Изменение сопротивления якоря осуществляется в поле окна настройки параметров машины. При этом момент нагрузки следует изменять от  $-1,2 M_{\text{н}}$  до  $1,2 M_{\text{н}}$  с шагом  $0,2 M_{\text{н}}$ . Для каждого значения сопротивления якоря и момента проводится моделирование и заполняется таблица, аналогичная табл. 6.3.

7. Снятие механических характеристик при различных потоках возбуждения по п. 5 содержания работы следует провести для двух

значений потока  $0,6\Phi_n$  и  $0,8\Phi_n$ . Для этого в поле *Field-armature mutual inductance* необходимо установить значение  $L_{af}$  вначале 0,6, а затем 0,8 от первоначальной величины. При этом момент нагрузки следует изменять от  $-1,2M_n$  до  $1,2M_n$  с шагом  $0,2M_n$ . Для каждого значения потока и момента проводится моделирование и заполняется таблица, аналогичная табл. 6.3.

8. Снятие регулировочных характеристик при изменении напряжения якоря по п. 6 содержания работы проводится для постоянного момента нагрузки, равного номинальному, и изменению напряжения в цепи якоря от 0,4 до 1,2 исходного значения с шагом 0,2 исходного значения напряжения. Для каждого значения напряжения проводится моделирование и заполняется табл. 6.4.

Таблица 6.4

$U_y, В$	$\omega, \text{рад/с}$

### Содержание отчета

1. Схема модели для проведения лабораторной работы.
2. Расчетные формулы параметров машины.
3. Расчетные формулы для мощностей  $P_1, P_2$  и КПД.
4. Заполненные таблицы.
5. Графики рабочих характеристик машины в двигательном и генераторном режимах.
6. Графики механической характеристики машины при различных напряжениях на якоре.
7. Графики механической характеристики машины при различных сопротивлениях якоря.
8. Графики механической характеристики машины при различных потоках.
9. Регулировочная характеристика двигателя.

### Контрольные вопросы

1. Чем различаются двигательный и генераторный режимы работы двигателя?
2. При каких условиях двигатель переходит в генераторный режим?

3. Как зависит механическая характеристика двигателя от активного сопротивления якоря?

4. Как зависит механическая характеристика двигателя от величины магнитного потока возбуждения?

5. Как обеспечить постоянство частоты вращения вала двигателя в ДПТ?

## **Лабораторная работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО (НЕЗАВИСИМОГО) ВОЗБУЖДЕНИЯ**

### **Цель работы**

Приобрести практические навыки в выполнении опытов по снятию данных и построению механических и скоростных характеристик электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения для различных режимов работы; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о скоростных и механических характеристиках этого электродвигателя.

### **Подготовка к работе**

1. Повторить теоретический материал: режимы работы электродвигателей постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения – двигательный (основной), генераторный тормозной с отдачей энергии в сеть (рекуперативный), тормозной противовключением и тормозной динамический; скоростные и механические характеристики электродвигателя при этих режимах; условия перехода электродвигателя из одного режима в другой.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### **Теоретические основы лабораторной работы**

*Основные понятия.* Скоростная характеристика электродвигателя постоянного тока представляет собой зависимость частоты враще-

ния  $n$  от тока в обмотке якоря  $I_a$  при неизменном токе возбуждения и номинальном подведенном напряжении.

Уравнение скоростной характеристики  $n = F(I_a)$  имеет вид

$$n = \frac{U - I_a R}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a R}{c_e \Phi}. \quad (7.1)$$

Механическая характеристика электродвигателя постоянного тока представляет собой зависимость частоты вращения  $n$  от момента  $M$  при неизменном токе возбуждения и номинально подведенном напряжении:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{MR}{c_e c_m \Phi^2}, \quad (7.2)$$

где  $c_e = pN/(60a)$ ;  $c_m = pN/(2\pi a)$  – постоянные коэффициенты;  $\Phi$  – основной магнитный поток, Вб;

$$R = \Sigma r + r_{\text{доб}}, \quad (7.3)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление цепи якоря электродвигателя, Ом;  $\Sigma r$  – сопротивление обмоток в цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, Ом;  $r_{\text{доб}}$  – добавочное сопротивление, включенное в цепь якоря электродвигателя, Ом.

В режиме идеального х. х. ток в цепи якоря  $I_a$ , а следовательно, и момент  $M = 0$ , поэтому частота вращения в режиме идеального х. х. (об/мин):

$$n_0 = U / (c_e \Phi). \quad (7.4)$$

Таким образом, уравнения скоростной и механической характеристик можно привести к виду

$$n = n_0 - \Delta n, \quad (7.5)$$

где  $\Delta n$  – изменение частоты вращения, вызванное нагрузкой двигателя.

Зависимость  $\Delta n$  от тока нагрузки определяется выражением

$$\Delta n = -(I_a R / (c_e \Phi)), \quad (7.6)$$

а зависимость  $\Delta n$  от момента нагрузки имеет вид

$$\Delta n = -(MR / (c_e c_m \Phi^2)). \quad (7.7)$$

Таким образом, как это следует из (7.5), скоростная и механическая характеристики электродвигателя параллельного (независимого) возбуждения представляют собой прямые линии (рис. 7.1).

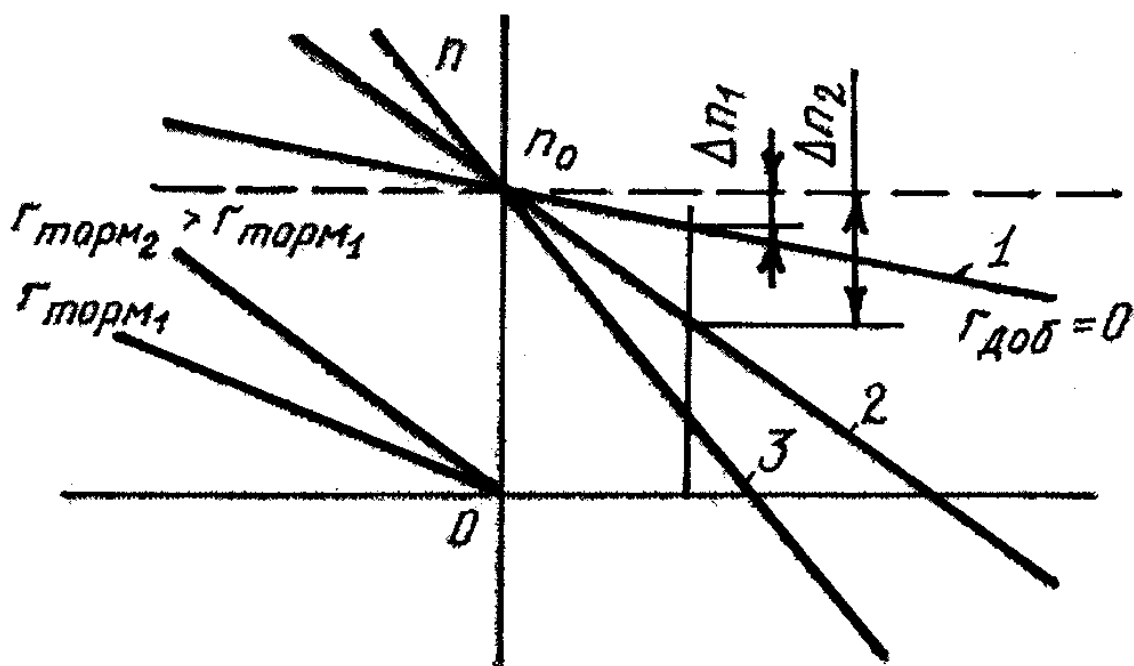


Рис. 7.1. Характеристики электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения

Выражения (7.6) и (7.7) показывают, что изменение частоты вращения электродвигателя, обусловленное изменением его нагрузки, прямо пропорционально электрическому сопротивлению цепи якоря  $R = \Sigma r + r_{\text{доб}}$ . Поэтому наименьшему сопротивлению цепи якоря  $R = \Sigma r$  соответствует наименьшее изменение частоты вращения  $\Delta \omega$ . В этом случае скоростная и механическая характеристики электродвигателя являются наиболее жесткими. Такие характеристики называют естественными (кривая 1).

Если же в цепь якоря ввести добавочное сопротивление, т. е. если, это влияние нагрузки на величину  $\Delta \omega$  становится более значительным и характеристики электродвигателя становятся мягкими, их угол наклона к оси абсцисс увеличивается (кривые 2 и 3), такие характеристики называют искусственными (реостатными). Все характеристики электродвигателя независимо от величины сопротивления цепи якоря пересекаются в точке идеального х. х. (пограничной частоты вращения)  $\omega_0$ . Объясняется это тем, что при идеальном х. х. ток якоря  $I_a$  и момент  $M$  равны нулю, а поэтому изменение частоты вращения  $\Delta \omega = 0$  ((7.6) и (7.7)).

Как отмечалось, скоростные и механические характеристики электродвигателя постоянного тока  $n_0$  параллельного (независимого) возбуждения прямолинейны (7.5). В связи с этим положение любой из этих характеристик определяется двумя точками. Одной из них является точка идеального х. х. с координатами  $n_0$  и  $I_a = 0$  или  $M = 0$ , а другой – точка номинальной нагрузки в двигательном (основном) режиме с координатами  $n_{\text{ном}}$  и  $I_{\text{ном}}$  или  $M_{\text{ном}}$ . Если в цепи якоря нет добавочного сопротивления ( $R = \Sigma r$ ), то координаты точки номинальной нагрузки определяются паспортными данными электродвигателя. Если же в цепь якоря включено добавочное сопротивление ( $R = \Sigma r + r_{\text{доб}}$ ), то при номинальном токе якоря  $I_{\text{ном}}$  частота вращения (об/мин):

$$n' = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{аном}} (\Sigma r + r_{\text{доб}})}{U_{\text{ном}} - I_{\text{аном}} \Sigma r}. \quad (7.8)$$

Для двигателей постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения возможны следующие режимы работы: а) двигательный (основной); б) режим генераторного торможения с отдачей энергии в сеть; в) режим торможения противовключением; г) режим динамического торможения.

*Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное).* Такое торможение наступает при частоте вращения якоря, превышающей частоту вращения идеального х. х., т. е. при  $n > n_0$ . В этом случае ЭДС якоря  $E_a$  становится больше напряжения сети  $U_c$ , и ток якоря изменяет свое направление (по сравнению с направлением в двигательном режиме), т. е. становится отрицательным:

$$-I_a = (E_a - U_c) / R. \quad (7.9)$$

В связи с изменением направления тока якоря меняет свое направление и становится тормозящим электромагнитный момент электродвигателя. Характеристики электродвигателя в этом режиме, являясь продолжением характеристик в двигательном режиме, располагаются во втором квадранте осей координат. Уравнение характеристик в тормозном генераторном режиме имеет вид, аналогичный (7.5), но величина  $\Delta n$  в этом случае приобретает отрицательный знак ((7.6), (7.7)):

$$n = n_0 - (-\Delta n) = n_0 + \Delta n. \quad (7.10)$$



Действие тормозного генераторного момента прекращается, как только частота вращения якоря, уменьшаясь, достигнет частоты вращения идеального х. х.

*Торможение противовключением.* Такое торможение происходит в том случае, когда обмотки электродвигателя включены для одного направления вращения якоря, а под действием каких-либо внешних причин якорь вращается в противоположную сторону. Например, если электродвигатель включен для вращения барабана, на который наматывается трос с грузом, но величина этого груза настолько велика, что под действием его силы тяжести груз опускается. При этом барабан вращается в сторону разматывания троса, и якорь электродвигателя вращается встречно электромагнитному моменту, который с этих условий становится тормозящим.

Такой же режим торможения противовключением наблюдается тогда, когда для быстрой остановки якоря электродвигателя переключают провода, присоединяемые к выводам обмотки якоря, т. е. изменяют направление тока в обмотке якоря.

Поскольку в режиме торможения противовключением вращение якоря происходит в сторону, противоположную по сравнению с вращением в двигательном режиме, то ЭДС якоря меняет свое направление и действует согласно с приложенным к цепи якоря напряжением. В этих условиях ток якоря:

$$I_a = (U_c + E_a) / R, \quad (7.11)$$

т. е. ток якоря в режиме торможения противовключением больше, чем в двигательном режиме. Чтобы ограничить ток якоря до значения  $I_a$  меньше или равно  $1,5I_{аном}$ , в цепь якоря на время торможения включают добавочное сопротивление.

Торможение двигателя происходит до полной остановки якоря ( $n = 0$ ). Если же в этот момент электродвигатель не отключить от сети, то произойдет реверс двигателя, т. е. начнется его вращение в противоположную сторону. При этом электромагнитный момент электродвигателя вновь станет вращающим.

Характеристики электродвигателя в режиме торможения противовключением располагаются в четвертом квадранте осей координат и являются продолжением характеристик двигательного режима.

*Динамическое торможение электродвигателя.* Наступает при отключении обмотки якоря от сети и замыкании ее на некоторое со-

противление  $r_{\text{торм}}$ . Обмотка возбуждения при этом остается по-прежнему подключенной к сети. Якорь электродвигателя продолжает вращение за счет сил инерции, т. е. за счет кинетической энергии, запасенной во вращающихся частях системы электропривода. В режиме динамического торможения электродвигатель переходит в генераторный режим, но энергия, вырабатываемая при этом, не отдается в сеть, как это имело место в режиме генераторного торможения, а преобразуется в тепловую энергию, выделяясь на сопротивление  $R = \Sigma r + r_{\text{торм}}$ .

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не изменяет своего направления по сравнению с двигательным режимом, но так как напряжение сети  $U_c = 0$ , то ток якоря, изменив свое направление, действует согласно с ЭДС якоря (а не против ЭДС, как это происходит в двигательном режиме). Другими словами, ток якоря в режиме динамического торможения имеет отрицательное направление (см. рис. 7.1, второй квадрант). В этом режиме ток якоря:

$$I_a = (0 - E_a) / R, \quad (7.12)$$

где  $R = \Sigma r + r_{\text{торм}}$ .

Тормозной момент (Н · м)

$$-M = c_m c_e \Phi^2 n / R, \quad (7.13)$$

(так же, как и ток якоря, тормозной момент отрицательный).

Из выражения (7.13) следует, что торможение якоря происходит до полной остановки якоря, т. е. до  $n = 0$ .

Характеристики электродвигателя в режиме динамического торможения выходят из начала координат и располагаются во втором квадранте. С увеличением сопротивления  $r_{\text{торм}}$  жесткость этих характеристик уменьшается. Уравнение характеристик в режиме динамического торможения получают из (7.5). Но так как в этом режиме электродвигатель отключен от сети ( $U_c = 0$ ), то  $n_0 = 0$ , и поэтому уравнение принимает вид:

$$n = \Delta n. \quad (7.14)$$

При расчете  $\Delta n$  по (7.6) или (7.7) ток якоря принимают отрицательным, поэтому величина  $\Delta n$  становится отрицательной, и с учетом знака минус в (7.14) уравнение принимает вид  $n = \Delta n$ . При построении характеристик для режима динамического торможения частота

вращения откладывается в положительном направлении оси ординат (см. рис. 7.1).

Изложенная о режимах электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения информация иллюстрируется в табл. 7.1, где для разных режимов работы электродвигателя стрелками показаны взаимные направления напряжения сети  $U_c$ , ЭДС якоря  $E_a$  и падения напряжения в цепи якоря  $I_a R$ . Там же приведены выражения, определяющие ток якоря.

Таблица 7.1

Режимы работы электродвигателя	$U_c$	$E_a$	$I_a R$	$I_a$
Двигательный	→	←	←	$I_a = (U_c - E_a) / R$
Генераторный тормозной	→	←	→	$-I_a = (U_c - E_a) / R$
Торможения противовключением	→	→	←	$I_a = (U_c + E_a) / R$
Динамический тормозной	0	←	→	$-I_a = (-E_a) / R$
Короткого замыкания ( $n = 0$ )	→	0	←	$I_a = U_c / R$
Идеального х.х. $n = n_0$	→	←	0	$I_a = 0$

*Лабораторная установка.* Воспроизведение всех режимов работы и торможения электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения возможно на лабораторной установке, состоящей из четырех электрических машин (рис. 7.2).

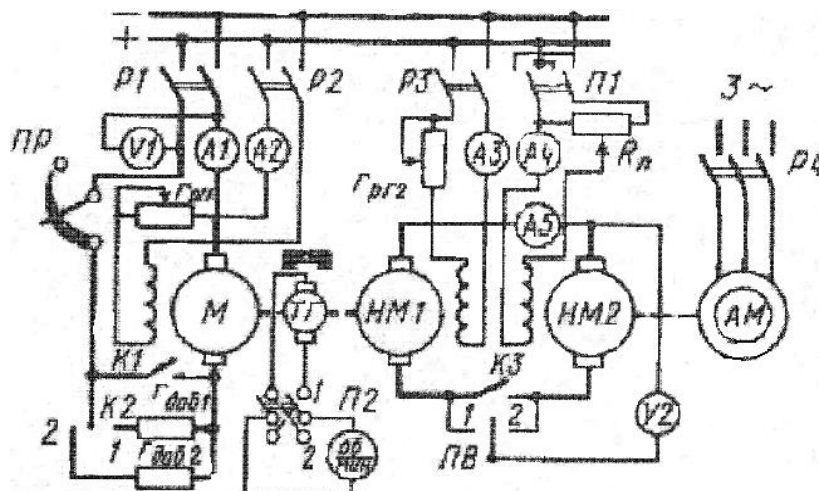


Рис. 7.2. Схема лабораторной установки для снятия скоростных и механических характеристик

Лабораторная установка состоит из: 1 – электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) независимого возбуждения М (исследуемый электродвигатель); 2 – нагрузочной машины НМ1 (машины постоянного тока независимого возбуждения, механически соединенной с электродвигателем М); 3 – нагрузочной машины НМ2 (машины постоянного тока независимого возбуждения); 4 – трехфазной асинхронной машины АМ (асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором), механически соединенной с нагрузочной машиной НМ2.

Обмотка якоря нагрузочной машины НМ1 соединена с обмоткой якоря НМ2 таким образом, что машины образуют систему «генератор – двигатель».

Ток возбуждения нагрузочной машины НМ1 регулируется реостатом  $r_{pr2}$ . В течение всего опыта значение тока поддерживается неизменным, равным номинальному. Цепи якоря нагрузочных машин НМ1 и НМ2 замыкаются ключом К3. Ток в этой цепи измеряют амперметром А5, а напряжение – вольтметром V2. Переключатель ПВ позволяет одним вольтметром V2 измерить напряжение как в цепи якоря машины НМ1, так и в цепи якоря машины НМ2 (при разомкнутом ключе К3). Приборы А1, А4, А5 и V2 должны иметь двустороннюю шкалу.

Включение в сеть трехфазной асинхронной машины осуществляется рубильником Р4, а включение в сеть постоянного тока цепи якоря исследуемого двигателя М выполняется рубильником Р1. Для ограничения пускового тока в цепи якоря электродвигателя М включен двухзажимный пусковой реостат ПР. В цепь якоря этого двигателя включены вольтметр VI, амперметр А1 и добавочные сопротивления. С помощью ключа К2 эти сопротивления подключаются поочередно: в положении 1 включается сопротивление  $r_{доб1}$ , в положении 2 – сопротивление  $r_{доб2}$ . В цепи якоря также имеется ключ К1, позволяющий замыкать цепь якоря электродвигателя без добавочных сопротивлений.

Для измерения частоты вращения исследуемого электродвигателя М в установке применен тахогенератор ТГ с измерительным прибором (об/мин). Этот прибор подключен к тахогенератору через переключатель П2, позволяющий изменять полярность подводимого к

прибору напряжения при изменении направления вращения якоря электродвигателя (в режиме торможения противовключением).

Для создания различных режимов работы исследуемого электродвигателя М меняют условия работы нагрузочной машины НМ1: она используется то как нагрузочный генератор для электродвигателя в его двигательном (основном) режиме, то как электродвигатель, приводящий электродвигатель М во вращение с частотой  $n_0 = n_{ном}$ , т. е. переводя его в генераторный режим. Асинхронная АМ и нагрузочная НМ2 машины образуют агрегат постоянной скорости. В лабораторной установке этот агрегат составляет промежуточное звено, через которое передается энергия либо от сети переменного тока в сеть постоянного тока, либо, наоборот, из сети постоянного тока в сеть переменного тока. Наличие такого звена делает лабораторную установку весьма экономичной, так как расход энергии в ней при выполнении опытов сводится к компенсации потерь в электрических машинах, составляющих эту установку.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки, записать паспортные данные электрических машин и данные измерительных приборов.

2. Подготовить лабораторную установку к снятию данных скоростных и механических характеристик.

3. Снять данные для построения скоростных и механических характеристик электродвигателя в генераторном тормозном, двигательном (основном) режимах и тормозном режиме противовключением: а) при  $r_{доб} = 0$ ; б) при  $r_{доб} = r_{доб1}$ ; в)  $r_{доб} = r_{доб2}$ .

4. Снять данные для построения скоростных и механических характеристик электродвигателя в режиме динамического торможения при  $r_{торм}$ .

5. Построить скоростные и механические характеристики электродвигателя для всех режимов его работы.

6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

Прежде чем приступить к выполнению опытов, необходимо записать следующие данные лабораторной установки:

## Электродвигатель М

Номинальная мощность, Вт .....	$P_{\text{НОМ}}$
Номинальное напряжение, В.....	$U_{\text{НОМ}}$
Номинальная частота вращения, об/мин .....	$n_{\text{НОМ}}$
Номинальный ток, А .....	$I_{\text{НОМ}}$
Номинальный ток возбуждения, А.....	$I_{\text{В.НОМ}}$
Электрическое сопротивление цепи якоря (при рабочей температуре), Ом.....	$\Sigma r$

## Нагрузочные машины, НМ1 и НМ2

Номинальная мощность, Вт .....	$P_{\text{НОМ}}$
Номинальное напряжение, В.....	$U_{\text{НОМ}}$
Номинальная частота вращения, об/мин .....	$n_{\text{НОМ}}$
Номинальный ток якоря, А.....	$I_{\text{НОМ}}$
Номинальный ток возбуждения, А.....	$I_{\text{В.НОМ}}$

## Трехфазная асинхронная машина АМ

Номинальная мощность, Вт .....	$P_{\text{НОМ}}$
Номинальное напряжение, В.....	$U_{\text{НОМ}}$
Номинальный ток статора, А .....	$I_{\text{НОМ}}$
Номинальная частота вращения, об/мин .....	$n_{\text{НОМ}}$

Ознакомившись с устройством лабораторной установки, назначением входящих в нее коммутирующих и регулирующих устройств, а также каждого измерительного прибора и получив разрешение преподавателя, подготавливают лабораторную установку к проведению опытов.

В первую очередь проверяют положение всех рубильников, ключей и переключателей. Все эти устройства должны находиться в положении «выключено». Затем замыкают рубильники Р2 и Р3 и реостатами  $rpr1$  и  $rpr2$  устанавливают в цепях возбуждения электродвигателя М и нагрузочной машины НМ1 номинальные значения токов возбуждения, которые в дальнейшем поддерживают неизменными. Включением рубильника Р1 подают напряжение в цепь якоря электродвигателя М, и он приводится во вращение. Ключ К1 при этом должен быть замкнут, а ключ К3 – разомкнут. Переключатель Г12

ставят в положение 1, при котором прибор указывает частоту вращения (об./мин). Замкнув рубильник Р4, запускают асинхронную машину АМ (в двигательном режиме}. Поставив переключатель П1 в одно из положений, включают в сеть постоянного тока цепь возбуждения нагрузочной машины ПМ2. Затем ставят переключатель ПВ сначала в положение 1, а затем в положение 2 и вольтметром V2 измеряют напряжение сначала в цепи якоря машины НМ1, а затем в цепи якоря машины НМ2. Если полярность этих напряжений оказалась неодинаковой, то переключатель П1 ставят в другое положение, добившись этим одинаковой полярности на выводах цепей якоря нагрузочных машин. Потенциометром  $R_n$  регулируют ток в обмотке возбуждения машины НМ2 таким образом, чтобы получить одинаковые напряжения на выводах цепей якоря машин НМ1 и НМ2. После этого замыкают ключ К3. При этом ток в цепях якоря этих машин равен нулю.

*Снятие данных для построения естественных характеристик.* Данные для построения этих характеристик снимают при номинальном напряжении сети, номинальных значениях тока возбуждения в исследуемом электродвигателе и нагрузочной машине ИТМ1 без добавочных сопротивлений в цепи якоря электродвигателя М (ключ К1 замкнут).

Снятие данных начинают с режима генераторного торможения с отдачей энергии в сеть, а затем постепенно переходят в двигательный (основной), а потом тормозной режим противовключением. С этой целью поступают следующим образом. Потенциометром  $R_n$  увеличивают ток возбуждения нагрузочной машины НМ2, При этом нагрузочная машина начинает работать в двигательном режиме и разгоняет якорь электродвигателя М до частоты вращения идеального х.х.  $n_0$ . О достижении такой частоты вращения будет свидетельствовать нулевое показание амперметра А1. Затем частота вращения начинает превышать  $n_0$  и исследуемый электродвигатель переходит в генераторный режим. При этом ток якоря становится отрицательным.

В режиме генераторного торможения с отдачей энергии в сеть исследуемый электродвигатель М работает в режиме генератора, нагрузочная машина НМ1 – в режиме двигателя, нагрузочная машина НМ2 – в режиме генератора, асинхронная машина АМ – в режиме двигателя. Электроэнергия из сети переменного тока передается в

сеть постоянного тока, частично расходуясь на покрытие потерь в электрических машинах лабораторной установки.

Доведя частоту вращения до допустимого значения (обычно не более  $1,3n_{\text{ном}}$ ) при токе якоря в цепи электродвигателя М не более  $1,25I_{\text{ном}}$ , потенциометром  $Rn$  постепенно уменьшают ток возбуждения машины НМ2. При этом частота вращения и ток якоря электродвигателя М начнут уменьшаться. При частоте вращения  $n < n_0$  режим генераторного торможения прекращается и начинается двигательный (основной) режим электродвигателя М, а ток якоря, пройдя через нулевое значение, вновь нарастает (в положительном направлении). Теперь нагрузочная машина НМ1 работает в генераторном режиме, нагрузочная машина НМ2 – в двигательном, асинхронная машина АМ – в генераторном, отдавая энергию в сеть трехфазного тока. Ток возбуждения машины НМ2 уменьшают до тех пор, пока ток якоря исследуемого двигателя не достигнет значения, не превышающего  $1,25I_{\text{ном}}$ . Таким образом данные для построения естественных характеристик снимают лишь в двух режимах: генераторном тормозном и двигательном (основном). Для каждого из этих режимов следует сделать не менее четырех-пяти замеров; данные следует занести в табл. 7.2.

Скоростную характеристику  $n = f(I_a)$  строят непосредственно по опытными данным. Что же касается механической характеристики  $n = f(M)$ , то для ее построения необходимо предварительно рассчитать ряд значений момента, соответствующих измеренным значениям тока якоря исследуемого двигателя (для  $r_{\text{доб}} = 0$ ), и занести их в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Номер измерения	$n$ , об/мин	$I_a$ , А	$M$ , Н·м	Примечание

Для расчета момента (Н·м) можно воспользоваться выражением

$$M = c_m \Phi I_a. \quad (7.15)$$

Следует иметь в виду, что выражение (7.15) определяет электромагнитный момент электродвигателя, который больше момента на валу на величину момента х. х.  $M_0$ . Однако для электрических машин постоянного тока мощностью 2 кВт и более электромагнитный мо-



мент превышает номинальное значение полезного момента не более чем на 3 – 4 %. Произведение постоянного коэффициента  $c_M$  на основной магнитный поток  $\Phi$  (7.15) можно определить, используя номинальные значения момента  $M_{\text{НОМ}}$  и тока якоря  $I_{\text{АНОМ}}$ :

$$c_M \Phi = M_{\text{НОМ}} / I_{\text{АНОМ}} \cdot \quad (7.16)$$

Номинальное значение момента (Н · м):

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 P_{\text{НОМ}} / n_{\text{НОМ}}, \quad (7.17)$$

где  $P_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность исследуемого электродвигателя, Вт.

Номинальное значение тока якоря (А):

$$I_{\text{АНОМ}} = I_{\text{НОМ}} - I_{\text{В.НОМ}}, \quad (7.18)$$

где  $I_{\text{НОМ}}$  – номинальный ток нагрузки электродвигателя, А;  $I_{\text{В.НОМ}}$  – номинальный ток возбуждения исследуемого электродвигателя, А. Необходимо отметить, что, принимая произведение  $c_M$  одинаковым при определении значений моментов  $M$  для всего диапазона нагрузок исследуемого двигателя, допускают некоторую неточность. Дело в том, что величина основного магнитного потока  $\Phi$  в двигателе параллельного (независимого) возбуждения с ростом тока нагрузки несколько уменьшается. Вызывается это размагничивающим действием реакции якоря. Но это влияние обычно невелико, особенно в электродвигателях современных серий, снабженных стабилизирующей обмоткой (обмоткой с небольшим числом витков, включаемой последовательно в цепь якоря и создающей при нагрузке электродвигателя МДС, компенсирующую МДС реакции якоря).

*Снятие данных для построения искусственных характеристик.* Искусственные характеристики снимают при номинальном напряжении сети, номинальных значениях токов возбуждения исследуемого электродвигателя и нагрузочной машины НМ1 с добавочным сопротивлением в цепи якоря исследуемого электродвигателя (ключ К1 разомкнут, ключ К2 сначала замыкают в положение 1, а затем в положение 2). Как и при снятии естественных характеристик, опыт начинают с генераторного тормозного режима ( $n < n_0$ ), а затем уменьшают ток возбуждения машины НМ2, переходят в двигательный режим. После того как ток возбуждения машины НМ2 уменьшен до нуля, переключателем П1 изменяют полярность подводимого к обмотке напряжения и постепенно увеличивают ток возбуждения (те-

перь уже другого направления). При этом ток в цепи якорей машин НМ1 и НМ2 будет продолжать увеличиваться и момент, создаваемый машиной НМ1, сначала станет равным моменту электродвигателя М, и тогда якорь электродвигателя остановится (режим короткого замыкания), а затем под действием вращающего момента машины НМ1 якорь электродвигателя начнет вращаться в противоположную сторону, т. е. исследуемый электродвигатель перейдет в режим торможения противовключением. В этих условиях электромагнитный момент электродвигателя станет тормозящим, а вырабатываемая в нем электроэнергия будет расходоваться на нагрев сопротивления, машина НМ1 будет работать в двигательном режиме, машина НМ2 – в генераторном, асинхронная машина АМ – в двигательном. Энергия поступает из сети переменного тока и расходуется на покрытие потерь во всех машинах лабораторной установки и на нагрев добавочного сопротивления в цепи якоря исследуемого электродвигателя. Из сети постоянного тока также поступает некоторое количество энергии и расходуется на нагрев сопротивления  $r_{доб}$ . Опыт в режиме торможения противовключением продолжают до тех пор, пока ток якоря исследуемого электродвигателя не достигнет допустимого значения. Необходимо иметь в виду, что в режиме торможения противовключением якорь исследуемого электродвигателя вращается в сторону, противоположную вращению в двигательном (основном) режиме, поэтому для измерения частоты вращения необходимо переключатель П2 перевести в положение 2 (см. рис. 7.2) и показания прибора (об/мин) записывать со знаком минус. Показания приборов, снятые через приблизительно одинаковые интервалы тока якоря электродвигателя, заносят в табл. 7.3. Всего делают по четыре-пять замеров в каждом режиме. Опыт выполняют два раза – сначала с добавочным сопротивлением  $r_{доб1}$  (ключ К2 в положении 1), а затем с добавочным сопротивлением  $r_{доб2}$  (ключ К2 в положении 2).

Значения момента М определяют по (7.15).

Таблица 7.3

Номер измерения	$I_a, A$	$n, об/мин$	$M, Н \cdot м$	$I_a, A$	$n, об/мин$	$M, Н \cdot м$
	$r_{доб1} = \dots Ом$			$r_{доб2} = \dots Ом$		

Снятие данных для построения характеристик в режиме динамического торможения. Для создания режима динамического торможения необходимо изменить схему включения исследуемого электродвигателя: отключить обмотку якоря от сети постоянного тока и присоединить ее к сопротивлениям  $r_{\text{торм}}$  через ключ К4 (рис. 7.3).

В остальной схема лабораторной установки остается прежней. Данные для построения характеристик при динамическом торможении электродвигателя снимают следующим образом. Ставят ключ К4

в положение 1 – цепь якоря замыкают на сопротивление  $r_{\text{торм}}$ . Включением рубильника Р4 (рис. 7.2) запускают асинхронную машину АМ и постепенно увеличивают ток возбуждения нагрузочной машины НМ2, работающей в генераторном режиме.

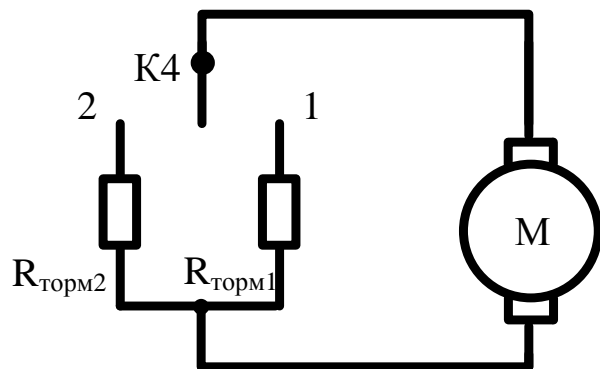


Рис.7.3.Схема включения электродвигателя параллельного (независимого) возбуждения в режиме динамического торможения

Машина НМ1 при этом работает в двигательном режиме и приводит во вращение якорь исследуемого электродвигателя, который, в свою очередь, работает в режиме генератора с отдачей электроэнергии на нагрев сопротивления  $r_{\text{торм}}$ . Создаваемый электродвигателем электромагнитный момент оказывает на якорь тормозящее действие. Постепенно увеличивая ток возбуждения машины НМ2, вызывают увеличение частоты вращения машины НМ1, а следовательно, и частоты вращения исследуемого электродвигателя. При этом ЭДС и ток якоря электродвигателя будут возрастать, что повысит тормозной момент. Показания приборов через приблизительно одинаковые интервалы тока якоря заносят в таблицу, аналогичную табл. 7.3. Всего снимают пять-шесть показаний. Затем ключ К4 (см. рис. 7.3) переводят в положение 2, т. е. замыкают цепь якоря электродвигателя на сопротивление  $r_{\text{торм}}$  и повторяют опыт. Значения тормозного момента определяют по (7.15).

*Построение характеристик.* Все характеристики исследуемого электродвигателя, данные которых были получены в результате опытов, строят на двух координатных сетках. На одной – скоростные характеристики  $n = f(I_a)$ , на другой – механические характеристики  $n = f(M)$ . Для оценки точности результатов по снятию данных и построению характеристик, полученных экспериментально, следует совместно с опытными характеристиками построить расчетные.

В связи с тем, что скоростная и механическая характеристики представляют собой прямые линии (7.5), для их построения достаточно определить координаты двух точек. Одна из них – точка идеального холостого хода с координатами  $I_a = 0, M = 0, n = n_0$ . Частота вращения идеального х. х. определяется (7.4). В качестве второй точки можно использовать точку номинальной нагрузки в двигательном (основном) режиме электродвигателя  $M$  с координатами  $I_{ном}, M_{ном}, n_{ном}$ .

При построении искусственных характеристик точка идеального х. х. остается прежней, а координаты точки номинальной нагрузки сместятся за счет изменения номинальной частоты вращения – с ростом сопротивления  $r_{доб}$  значение  $n_{ном}$  уменьшается. Для расчета номинальной частоты вращения  $n_{ном}$  при введенном в цепь якоря добавочном сопротивлении (сначала  $r_{доб1}$  а затем  $r_{доб2}$ ) следует воспользоваться (7.8).

Результаты расчета заносят в табл. 7.4, а затем строят расчетные скоростные и механические характеристики на общих координатных сетках с опытными характеристиками, выделив их каким-либо цветом.

Таблица 7.4

$I_{ном}, А$	$M_{ном}, Н \cdot м$	$n_0, об/мин$	$n_{ном}, об/мин$	$n'_{ном}, об/мин$	$n''_{ном}, об/мин$

Здесь  $n_{\text{ном}}$ ,  $n'_{\text{ном}}$ ,  $n''_{\text{ном}}$  – номинальные значения частоты вращения при  $r_{\text{доб}} = 0$ ,  $r_{\text{доб}1}$ ,  $r_{\text{доб}2}$  соответственно.

Расчетную характеристику исследуемого электродвигателя в режиме динамического торможения строят также по двум точкам. Одна из этих точек – начало координат, другая – точка при номинальном токе якоря с координатами  $I_{\text{аном}}$  ( $M_{\text{ном}}$ ) и  $n_{\text{ном}}$ .

При номинальном токе якоря  $I_{\text{ном}}$  и сопротивлении в цепи якоря  $r_{\text{торм}}$  частота вращения (об/мин):

$$n_{\text{т.ном}} = I_{\text{аном}} (\Sigma r + r_{\text{торм}}) / (c_e \Phi). \quad (7.19)$$

Сначала определяют частоту вращения  $n'_{\text{ном}}$  при сопротивлении  $r_{\text{торм}1}$ , а затем  $n''_{\text{ном}}$  при сопротивлении  $r_{\text{торм}2}$ . Значение номинального момента принимают из табл. 7.5.

Расчетные скоростные и механические характеристики при динамическом торможении строят совместно с опытными характеристиками, выделив их каким-либо цветом.

*Анализ результатов лабораторной работы.* При анализе результатов лабораторной работы следует сделать вывод о соответствии полученных опытных данных теоретическим положениям: каково влияние величины сопротивления в цепи якоря на жесткость характеристик, отличаются ли опытные характеристики от расчетных и т. п. Следует иметь в виду, что из-за некоторой неточности измерений и расчетов параметров возможен «разброс» точек, что приводит к некоторой криволинейности опытных характеристик по сравнению с расчетными, построенными по двум точкам, а поэтому не отличающихся от прямых линий.

Анализируя работу лабораторной установки во время опытов, необходимо определить режимы работы электрических машин при исследовании электродвигателя М в режимах генераторного торможения, двигательном (основном), торможения противовключением и динамического торможения. Установив режимы работы электрических машин, следует заполнить табл. 7.5.

Таблица 7.5

Диапазоны изменения частоты вращения электродвигателя М	Режимы работы электрических машин			
	Электродвигатель М	Нагрузочные машины		Асинхронная машина АМ
		НМ1	НМ2	
	Генераторный тормозной			
	Двигательный (основной)			
	Тормозной противовключением			
	Динамического торможения			

### Контрольные вопросы

1. Почему естественные и искусственные характеристики электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения пересекаются в одной точке?
2. Какие причины влияют на жесткость механических характеристик электродвигателя параллельного возбуждения?
3. В каких квадрантах осей координат располагаются характеристики электродвигателя параллельного возбуждения?
4. Укажите, в каких режимах работают электрические машины лабораторной установки (рис. 7.2) при работе исследуемого электродвигателя в генераторном тормозном режиме.
5. Почему в режиме идеального х.х. ток якоря электродвигателя параллельного возбуждения равен нулю?
6. В каких режимах работы исследуемого электродвигателя нагрузочная машина НМ2 работает генератором, а в каких – двигателем?

## Лабораторная работа № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

### Цель работы:

Приобрести практические навыки в выполнении опытов по снятию данных и построению механических и скоростных характеристик электродвигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения для различных режимов работы; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о скоростных и механических характеристиках этого электродвигателя.

Исследование уравнения движения ЭП, определение момента инерции вращающихся тел.

### Теоретические основы лабораторной работы

*Уравнение движения электроприводов.* В механическом движении участвуют подвижная часть двигателя, передаточные устройства и исполнительный орган. Совокупность этих элементов называют кинематической схемой, или механической частью электропривода. Движение любого элемента механической части привода подчиняется известным из курса физики законам механики:

- $\sum F = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt}$  – поступательное движение;
- $\sum M = j \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dj}{dt}$  – вращательное движение;
- $M - M_c = y \frac{d\omega}{dt}$  – основное уравнение движения электропривода,

где  $M$  – момент, развиваемый двигателем;  $M_c$  – момент сопротивления;  $y$  – момент инерции.

Момент инерции – величина, характеризующая распределение масс в теле и являющаяся наряду с массой мерой инертности тела при вращательном движении. В механике различают моменты инерции осевые и центробежные.

Осевым моментом инерции тела относительно оси  $z$  называется величина, определяемая равенством

$$I_z = \sum m_i h_i^2 \quad \text{или} \quad I_z = \int_V \rho h^2 dv, \quad (8.1)$$

где  $m_i$  – массы точек тела,  $h_i$  – их расстояния от оси  $z$ ,  $\rho$  – массовая плотность,  $V$  – объем тела. Величина  $I_z$  является мерой инертности тела при его вращении вокруг оси.

Осевой момент инерции можно также выразить через линейную величину  $r_z$ , называемую радиусом инерции относительно оси  $z$ .

Центробежным моментом инерции относительно системы прямоугольных осей  $x, y, z$ , проведенных в точке  $O$ , называют величины, определяемые равенствами

$$I_{xy} = \sum m_i x_i y_i, \quad I_{yz} = \sum m_i y_i z_i, \quad I_{zx} = \sum m_i z_i x_i, \quad (8.2)$$

или же соответствующими объемными интегралами. Эти величины являются характеристиками динамической неуравновешенности тел. Например при вращении тела вокруг оси  $z$  от значений  $I_{xz}$  и  $I_{yz}$  зависят силы давления на подшипники, в которых закреплена ось.

Моменты инерции относительно параллельных осей  $z$  и  $z'$  связаны соотношением (теория Гюйгенса):

$$I_z = I'_z + M d^2, \quad (8.3)$$

где  $z_1$  – ось, проходящая через центр масс тела;  $d$  – расстояние между осями.

Момент инерции относительно любой проходящей через начало координат  $O$  оси  $O1$  с направляющими косинусами  $a, b, g$  находится по формуле

$$I_{O1} = I_x a^2 + I_y b^2 + I_z g^2 - 2I_{xy} ab - 2I_{yz} bg - 2I_{zx} ga. \quad (8.4)$$

Зная  $I_x, I_y, I_z, I_{xy}, I_{yz}, I_{xz}, I_{zx}$ , можно последовательно, используя выражения (8.4) и (8.3), вычислить всю совокупность моментов инерции тела относительно любых осей. Эти шесть величин определяют т. н. тензор инерции тела. Через каждую точку тела можно провести три такие взаимно-перпендикулярные оси, называемые главными осями инерции, для которых  $I_{xy} = I_{yz} = I_{zx} = 0$ .

Тогда, зная главные оси инерции и момент инерции относительно этих осей, можно определить момент инерции тела относительно любой оси.

Момент инерции тел сложной конфигурации обычно определяют экспериментально. Понятием о моменте инерции широко пользуются при решении многих задач механики и техники.



*Определение момента инерции вращающейся части.* Для определения момента инерции применяют следующие методы:

- крутильных колебаний;
- вспомогательного маятника;
- самоторможения.

*Метод крутильных колебаний.* Метод крутильных колебаний следует применять для определения момента инерции вращающихся частей электрических машин мощностью до 100 кВт.

Вращающуюся часть следует подвесить на металлической струне или на струне из иного высокопрочного материала с изотропной структурой (рис. 8.1). Диаметр и длину струны выбирают так, чтобы период крутильных колебаний  $T$  был не менее 1с. Механическая прочность струны должна соответствовать массе вращающейся части. Точка подвеса должна находиться точно на ее оси вращения.

Вращающуюся часть следует подвергнуть крутильным колебаниям и определить их период  $T$ . При этом одностороннее угловое отклонение должно составлять не более  $25^\circ$ .

Таким же образом и на той же струне следует определить период крутильных колебаний  $T_n$  эталона, момент инерции которого определяют расчетным путем.

Момент инерции исследуемой вращающейся части  $I$  ( $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ ) вычисляют по формуле

$$I = I_n \left( \frac{1}{T} \right), \quad (8.5)$$

где  $I_n$  – момент инерции эталона,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;

$T$  – период колебаний исследуемой вращающейся части, с;

$T_n$  – период колебаний эталона, с.

Эталон, момент инерции которого определен расчетным путем, может быть также закреплен на валу исследуемой вращающейся части, как показано на рис. 8.2. В этом случае момент инерции исследуемой вращающейся части  $I$  ( $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ ) следует вычислять по формуле

$$I = \frac{I_n T^2}{T_{\text{чн}}^2 - T^2}, \quad (8.6)$$

где  $T_{\text{чн}}$  – период колебаний исследуемой вращающейся части с эталоном, с.

Более тяжелые вращающиеся части могут быть подвешены на двух параллельных струнах, прикрепленных к вращающейся части симметрично относительно ее оси, в соответствии с рис. 8.3. Длину струн  $l$  и расстояния от струн до оси вращающейся части  $r$  следует выбирать таким образом, чтобы период крутильных колебаний  $T$  составлял не менее 1 с.



Рис. 8.1

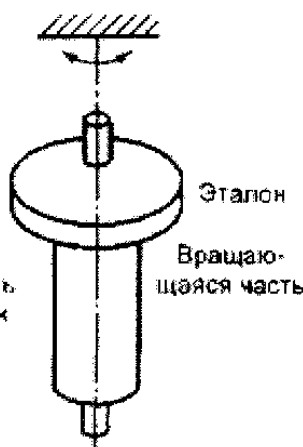


Рис. 8.2

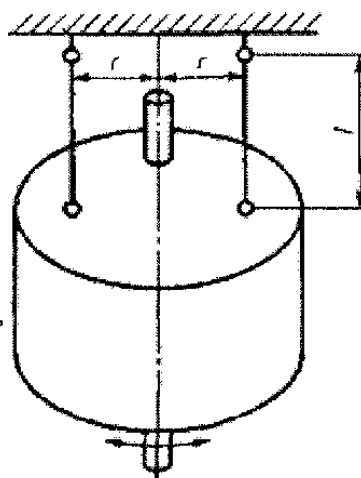


Рис. 8.3

Вращающуюся часть необходимо подвергнуть крутильным колебаниям и измерить их период  $T$ . Кроме того, надлежит определить массу вращающейся части  $m$ . Момент инерции исследуемой вращающейся части  $I$  ( $\text{Н/м}^2$ ) вычисляют по формуле

$$I = \frac{mr^2}{l} \cdot T^2 \cdot \frac{g}{4\pi^2}, \quad (8.7)$$

где  $m$  – масса исследуемой вращающейся части, кг;

$r$  – расстояние от струн до оси вращающейся части, м;

$l$  – длина струн, м;

$T$  – период крутильных колебаний вращающейся части, с;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение земного тяготения.

*Метод вспомогательного маятника.* Метод вспомогательного маятника может применяться для определения момента инерции вращающихся частей машин мощностью от 10 до 1000 кВт. Для вращающихся частей, для которых также применим метод крутильных колебаний, последний является предпочтительным.

Вращающуюся часть следует установить на подшипниках балансировочного станка. Вращающиеся части с подшипниками качения могут быть установлены также на собственных подшипниках. Если испытание проводится в собранной машине, то в случае двигателей с фазным ротором и коллекторных машин следует поднять щетки.

Для определения момента инерции методом вспомогательного маятника следует прикрепить к валу исследуемой вращающейся части дополнительную массу  $m_{\text{доп}}$  посредством рычага, как показано на рис. 8.4. Эту массу следует выбрать таким образом, чтобы масса рычага была пренебрежимо малой по сравнению с дополнительной массой.

Дополнительная масса может быть закреплена также на наружной поверхности самой вращающейся части, на шкиве или полумуфте. Вспомогательный маятник должен быть рассчитан таким образом, чтобы период колебаний  $T$  составлял от 3 до 8 с.

Вращающуюся часть совместно с прикрепленным к ней вспомогательным маятником приводят в колебание. При этом одностороннее угловое отклонение не должно быть более  $15^\circ$ .

Период колебаний  $T$  следует определить как средний из нескольких колебаний. Для обеспечения точности измерения периода колебаний его следует проводить между моментами прохождения маятника через положение статического равновесия.

Момент инерции испытуемой вращающейся части  $I$  ( $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ ) вычисляют по формуле

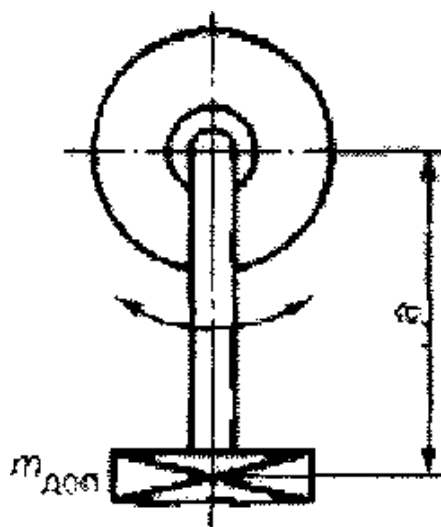


Рис. 8.4

$$I = m_{\text{доп}} \cdot \alpha \left[ \frac{T^2 g}{4\pi^2} - \alpha \right], \quad (8.8)$$

где  $m_{\text{доп}}$  – масса вспомогательного маятника, кг;

$\alpha$  – расстояние от центра тяжести вспомогательного маятника до оси вала вращающейся части, м;

$T$  – период колебаний маятника, с;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение земного тяготения.

Для проверки полученного значения момента инерции опыт необходимо повторить с дополнительной массой другой величины.

*Метод самоторможения.* Метод самоторможения может применяться для определения момента инерции вращающихся частей электрических машин мощностью свыше 100 кВт. Согласно этому методу машину с испытуемой вращающейся частью приводят во вращение с частотой  $n$  выше номинальной при номинальном возбуждении или без него и затем отключают от источника питания. Для машин с фазным ротором и коллекторных машин испытание проводится с минимально необходимым количеством щеток, а остальные щетки надлежит поднять. После отключения определяется кривая самоторможения  $n = f(t)$  в диапазоне частоты вращения от  $1,2n_{\text{ном}}$  до  $0,8n_{\text{ном}}$ . Для

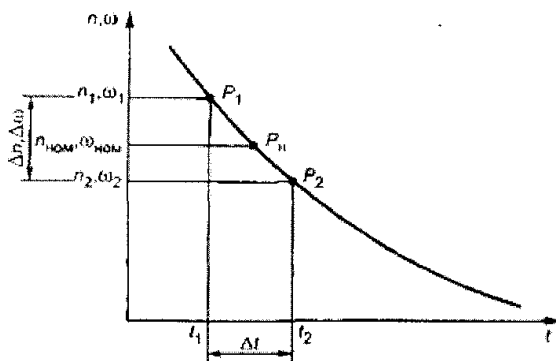


Рис. 8.5

достижения возможной точности при определении этой кривой снижение частоты вращения следует осциллографировать.

В соответствии с рис. 8.5 момент инерции  $I$  ( $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ ) исследуемой вращающейся части для невозбужденной машины вычисляют по формуле

$$I = \left[ \frac{30}{\pi} \right]^2 \cdot \frac{P_{\text{мех}} \Delta t}{n_{\text{ном}} \Delta n} = \frac{P_{\text{мех}} \Delta t}{\omega_{\text{ном}} \Delta \omega}. \quad (8.9)$$

Для возбужденной машины момент инерции вычисляют по формуле

$$I = \left[ \frac{30}{\pi} \right]^2 \cdot \frac{(P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}) \Delta t}{n_{\text{НОМ}} \Delta n} = \frac{(P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}) \Delta t}{\omega_{\text{НОМ}} \Delta \omega}, \quad (8.10)$$

где  $P_{\text{мех}}$  – механические потери при номинальной частоте вращения, Вт;

$P_{\text{ст}}$  – потери в стали при номинальной частоте вращения, Вт;

$n_{\text{НОМ}}$  – номинальная частота вращения, мин<sup>-1</sup>;

$D_n$  – разность между верхним и нижним значениями частоты вращения в опыте, мин<sup>-1</sup>;

$D_t$  – время, в течение которого частота вращения машины изменяется на  $D_n$ , с;

$\omega_{\text{НОМ}}$  – номинальная угловая частота вращения, с<sup>-1</sup>;

$D_\omega$  – разность между верхним и нижним значениями угловой частоты вращения, с<sup>-1</sup>.

За верхнюю точку частоты вращения принимают наивысшую возможную точку в опыте, но не менее  $1,1n_{\text{НОМ}}$ . Нижняя точка должна отличаться от номинальной на такую же величину частоты вращения.

В случае невозможности повышения частоты вращения сверх номинального значения вместо номинальной частоты вращения принимается частота вращения, лежащая на участке примерно от 0,9 до 0,8 номинальной частоты вращения. В этом случае потери должны быть измерены на данной частоте вращения.

Из полученного таким образом момента инерции  $I$  следует вычесть момент инерции вращающейся части приводного двигателя и соединительной муфты, подлежащей отдельному определению.

### **Выполнение работы**

С помощью оболочки *Combivis* для преобразования КЕВ задаем частоту (*op.03*) вращения и время разгона (*op.28*).

Обратная связь по скорости должна быть замкнута (*cs.00* = 4).

1. Определение суммарного момента инерции, приведенного к валу двигателя по характеристике разгона.

1.1. Определяем момент сопротивления по заданной частоте вращения. Задаем частоту вращения, равную 1500 об/мин, скорость разгона в *OP.03* = 5 с.

1.2. С помощью *Combivis* запускаем электрический осциллограф (4 луча: скорость энкодера, *ru 09*; фактический момент вращения, *ru 12*; ток, *ru 15*; мощность, *ru 18*).

Ставим вертикальный курсор 1 на характеристику разгона и ставим вертикальный курсор 2 на характеристику установившегося режима работы двигателя. Программа *Combivis* определяет разность:

$$M - M_c = 0,06 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\Delta n = 342 \text{ об/мин};$$

$$\Delta t = 1,919 \text{ с};$$

$$\sum y = \frac{M - M_c}{\frac{\Delta n \cdot \pi}{\Delta t \cdot 30}} = \frac{0,06}{\frac{342 \cdot 3,14}{1,919 \cdot 30}} = 3,22 \cdot 10^{-3} [\text{кг} \cdot \text{м}^2].$$

2. Определение суммарного момента инерции методом самосторможения:

$$y = \frac{M - M_c}{\frac{\Delta n \cdot \pi}{\Delta t \cdot 30}}.$$

Получаем следующие результаты:

•  $M_c = -0,07 \text{ Н} \cdot \text{м}$   $\Delta t = 1,92 \text{ с}$   $\Delta n = -1440 \text{ об/мин}$   
получаем  $y = 8,92 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;

•  $M_c = -0,07 \text{ Н} \cdot \text{м}$   $\Delta t = 1,2 \text{ с}$   $\Delta n = -984 \text{ об/мин}$   
получаем  $y = 8,16 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;

•  $M_c = -0,07 \text{ Н} \cdot \text{м}$   $\Delta t = 0,24 \text{ с}$   $\Delta n = -210 \text{ об/мин}$   
получаем  $y = 7,64 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

3. Определение времени разгона при заданном токоограничении. Необходимо определить время разгона вала двигателя при токоограничении, равном 1,8А. Далее необходимо привести осциллограммы при разных заданиях времени разгона. Таким образом мы определим время разгона при заданном токоограничении.

### Контрольные вопросы

1. Определение момента инерции.
2. Приведение моментов инерции и моментов сопротивления к валу двигателя.
3. Основное уравнение движения электропривода.
4. Метод самосторможения.
5. Метод крутильных колебаний.

# Лабораторная работа № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

## Цель работы

Исследование трехфазной явнополюсной магнитоэлектрической синхронной машины.

## Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: конструкция синхронных машин, принцип действия, энергетическая диаграмма и КПД, электромагнитная мощность, момент.
2. Подготовить таблицы для занесения результатов опытов и координатную сетку для построения рабочих характеристик.

## Содержание работы

1. Снятие рабочих характеристик машины в двигательном режиме.
2. Снятие зависимости потребляемой из сети мощности от потока возбуждения машины.

## Описание виртуальной лабораторной установки

Виртуальная лабораторная установка представлена на рис. 9.1.

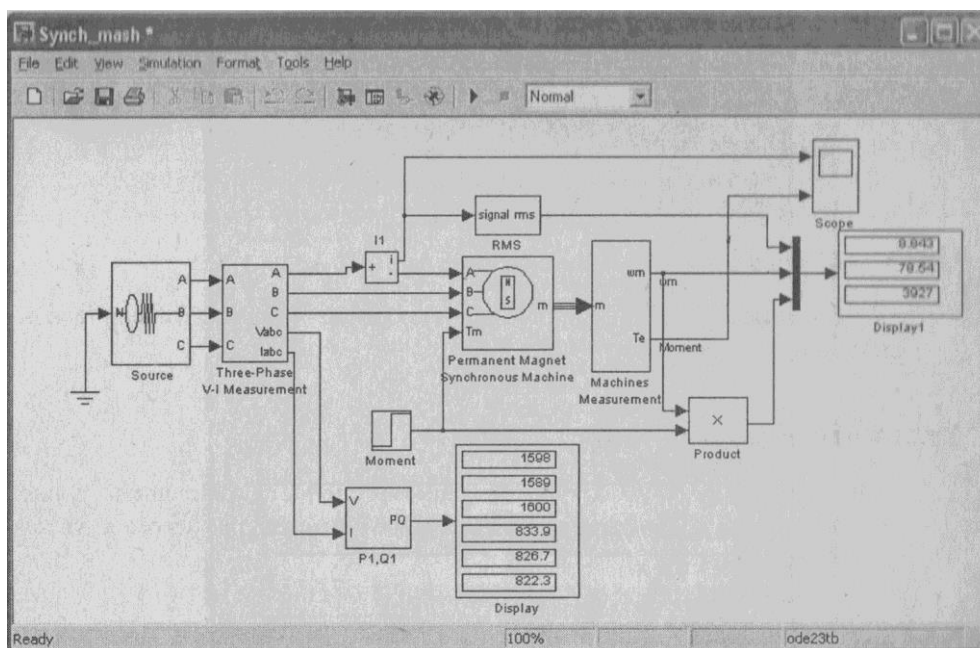


Рис. 9.1. Модель для исследования синхронной машины

Она содержит:

- 1) источник переменного трехфазного напряжения *Source* из библиотеки *Power System Blockset/Extras/Electrical Sources*;
- 2) измеритель трехфазного напряжения и тока *Three-Phase V-I Measurement* из библиотеки *Power System Blockset/Extras/Measurement*;
- 3) исследуемую трехфазную синхронную машину *Permanent Magnet Synchronous Machine* из библиотеки *Power System Blockset/Machines*;
- 4) измеритель активной и реактивной мощности  $P_1$ ,  $Q_1$  из библиотеки *Power System Blockset/Extras/Measurement*;
- 5) блок измерения переменных состояния машины *Machines Measurement* из библиотеки *Power System Blockset/Machines*;
- 6) блок *Display* для количественного представления измеренных мощностей (в трех первых окнах блока представлены активные мощности в каждой фазе машины, в трех последних – реактивные мощности);
- 7) блок *RMS* из библиотеки *Power System Blockset/Extras/Measurement*, измеряющий действующий ток в фазе машины;
- 8) блок *Moment* для задания механического момента на валу машины из главной библиотеки *Simulink/Source*;
- 9) блок *Product* из главной библиотеки *Simulink/Math*, вычисляющий механическую мощность на валу машины;

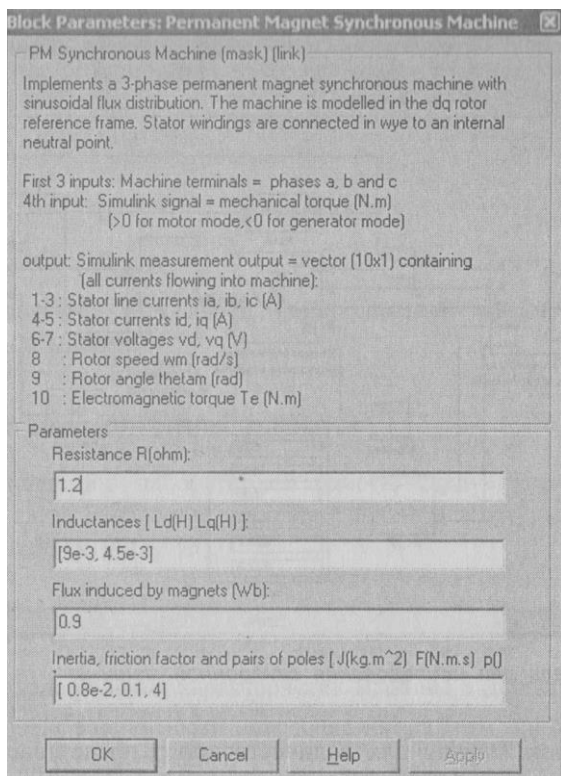


Рис. 9.2. Окно настройки параметров синхронной машины

10) блок *Scope* для наблюдения тока статора, момента и механической мощности синхронной машины из главной библиотеки *Simulink/Sinks*;

11) блок *Display1* для количественного представления измеренных тока (А) и электромагнитного момента (Н · м) машины из главной библиотеки *Simulink/Sinks*;

12) блок *Mux*, объединяющий два сигнала в один векторный главной библиотеки *Simulink/Signal & System*.

Окно настройки параметров синхронной машины показано на рис. 9.2.



В полях окна последовательно задаются:

- активное сопротивление обмотки статора (Ом);
- индуктивности по продольной и поперечной оси (Гн);
- максимальный поток в машине (Вб);
- момент инерции ( $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ), коэффициент вязкого трения ( $\text{Н} \cdot \text{мс}$ ), число пар полюсов.

Окно настройки блока измерения переменных состояния машины показано на рис. 9.3.

Тип машины выбирается в поле *Machine type*. В выпадающем меню этого поля следует выбрать *Permanent magnet synchronous*. Флажки слева включаются у тех переменных состояния, которые подлежат измерению.

Окно настройки параметров источника показано на рис. 9.4. Напряжение и частота источника должны быть согласованы с напряжением, скоростью и числом пар полюсов машины.

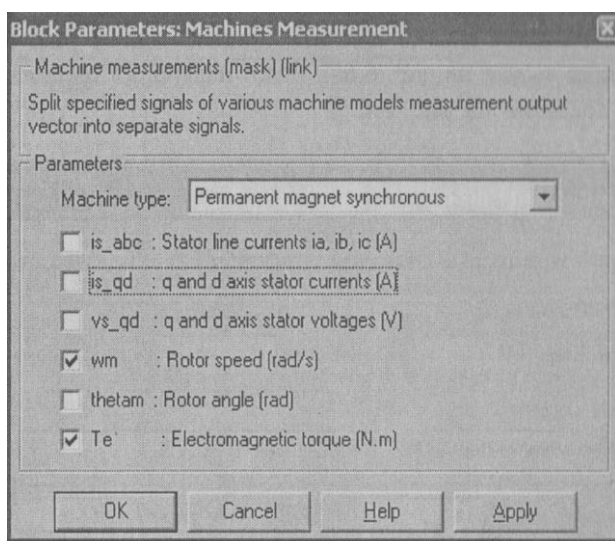


Рис. 9.3. Окно настройки измерителя переменных состояния машины

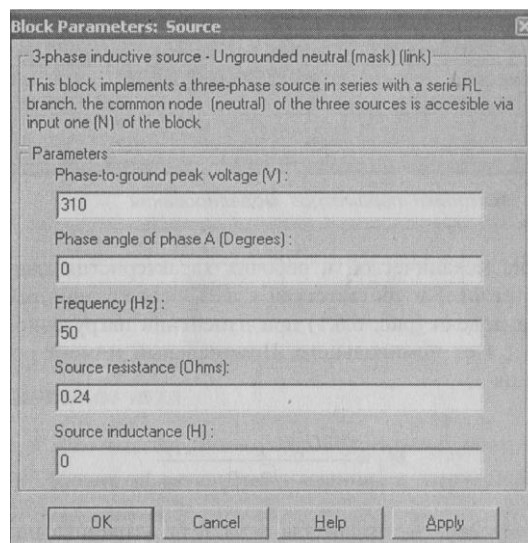


Рис. 9.4. Окно настройки параметров источника питания

### Порядок выполнения работы

Параметры синхронной машины и источника питания для выполнения работы задаются преподавателем. При самостоятельной работе данные машины можно принять такими, как на рис. 9.2, а данные источника – как на рис. 9.4. Окно настройки параметров моделирования показано на рис. 9.5.

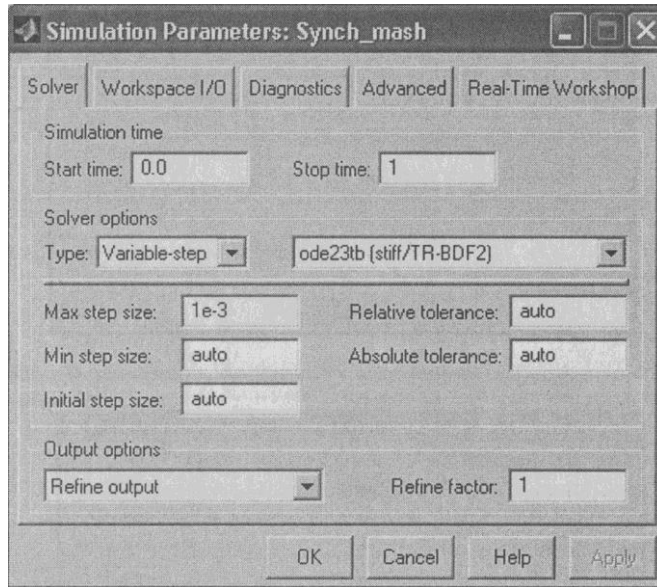


Рис. 9.5. Окно настройки параметров моделирования

Снятие механической и рабочих характеристик машины в двигательном режиме в соответствии с п. 1 содержания работы производится на модели (см. рис. 9.1) при изменении нагрузочного момента от нуля до 1,4 от номинального. Номинальный момент определяется из выражения

$$M_H = \frac{\sqrt{3U_m(U_m - \omega\Phi_m)P}}{\sqrt{2\omega R_s}},$$

где  $U_m$ ,  $\omega = 2\pi f$  – амплитуда и частота источника питания,  $\Phi_m$ ,  $R_s$ ,  $P$  – максимальный поток, сопротивление статора и число пар полюсов машины (см. рис. 9.2).

Для каждого значения момента нагрузки осуществляется моделирование. При проведении исследований заполняется табл. 9.1.

Таблица 9.1

Измерения						Вычисления				
$M$ , Нм	$P_1$ , Вт	$Q_1$ , ВАр	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$\omega$ , рад/с	$P_2$ , Вт	$I_2$ , А	$\varphi$ , град	$\cos \varphi$	$\eta$ , %

В табл. 9.1 обозначено:  $M$  – момент нагрузки;  $P_1$  и  $P_2$  – активная и полезная мощности;  $Q_1$  – реактивная составляющая общей мощности;  $U_1$  – напряжение питания;  $I_1$  и  $I_2$  – сила тока в обмотках статора и ротора;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $\varphi$  – угол между векторами активной и реактивной мощности;  $\eta$  – коэффициент полезного действия.

Вычисления осуществляются по формулам

$$\varphi = \arctg \frac{Q_1}{P_1}, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad P_1 = P_A + P_B + P_C, \quad Q_1 = Q_A + Q_B + Q_C.$$

По данным таблицы строятся рабочие характеристики  $I$ ,  $\cos \varphi$ ,  $h = f(P_2)$ .

На рис. 9.6 видны зависимости переменных состояния машины.

Снятие зависимости потребляемой из сети мощности от потока возбуждения машины в соответствии с п. 2 содержания работы осуществляется на модели (см. рис. 9.1) при постоянном моменте нагрузки (задается преподавателем). Максимальный поток в поле *Flux induced magnets* (см. рис. 9.2) следует задавать в диапазоне 0,6 – 1,2 Вб с шагом 0,05 Вб. Для каждого значения потока необходимо проводить моделирование, по его результатам заполнить табл. 9.2.

Таблица 9.2

$\Phi_m$ , Вб	$Q_1$ , ВАр	$P_1$ , Вт	$\cos \varphi$ ,

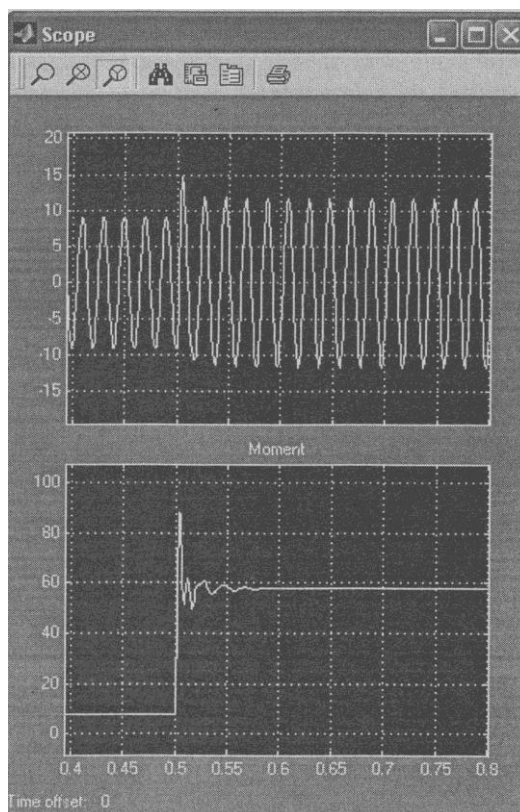


Рис. 9.6. Временные зависимости переменных состояния машины

### **Содержание отчета**

1. Схема модели и описание виртуальных блоков.
2. Рабочие характеристики машины в двигательном режиме.
3. Зависимости  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $\cos \varphi$  от  $\Phi_m$ .

### **Контрольные вопросы**

1. В чем различие явнополусной и неявнополусной электрических машин?
2. Принцип работы классической синхронной машины.
3. Что такое синхронная реактивная машина?
4. Какие рабочие характеристики имеет синхронный двигатель?
5. Что такое косинус  $\varphi$ ?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК\*

1. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов ; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
2. Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардонов. – СПб. : КОРОНА-принт, 2003. – 256 с.
3. Кацман, М. М. Электрические машины / М. М. Кацман. – М. : Высш. шк., 2000. – 463 с.
4. Кацман, М. М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводам : учеб. пособие для учреждений средн. проф. образования / М. М. Кацман. – Изд. 2-е, испр. – М. : Высш. шк., 2001. – 216 с.
5. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М. : Высшая шк., 2000. – 360 с.
6. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.
7. Кравчик, А. Э. Выбор и применение асинхронных двигателей / А. Э. Кравчик [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 96 с.
8. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением / Л. П. Петров [и др.]. – М. : Энергия, 1977. – 200 с.
9. Москаленко, В. В. Электрический привод : учеб. для электротехн. специальностей техникумов / В. В. Москаленко. – М. : Высш. шк., 1991. – 430 с. – ISBN 5-06-001776-1.
10. Основы автоматизированного электропривода : учеб. пособие для вузов / М. Г. Чиликин [и др.]. – М. : Энергия, 1974. – 568 с.

---

\* Приводится в авторской редакции.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	4
Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ .....	9
Лабораторная работа № 3. КОНСТРУКЦИЯ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.....	13
Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	25
Лабораторная работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ .....	30
Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ .....	39
Лабораторная работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО (НЕЗАВИСИМОГО) ВОЗБУЖДЕНИЯ .....	45
Лабораторная работа № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ .....	63
Лабораторная работа № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ.....	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	77

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания к лабораторным работам

Составители:

ЕРОПОВА Елена Валерьевна  
РОДИОНОВ Роман Вячеславович  
УМНОВ Владимир Павлович

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор А. А. Кобзев

Подписано в печать 12.12.13.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 4,69. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.