

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИШЭ

\_\_\_\_\_ А.С. Матвеев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

## **МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Мехатронные системы летательных аппаратов»  
для студентов IV курса, обучающихся по направлению  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

*Составители* **А.Б. Цукублин, Н.Ю. Сипайлова**

Томский политехнический университет  
2021

Мехатронные системы летательных аппаратов: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов IV курса, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / сост. А.Б. Цукублин, Н.Ю. Сипайлова; Томский политехнический университет. – Томск: Томский политехнический университета, 2021. – 129 с.

Руководитель ОЭЭ \_\_\_\_\_ *А.С. Ивашутенко*

Руководитель ООП \_\_\_\_\_ *П.В. Тютева*

*Рецензент*

Доктор технических наук, профессор ОЭЭ ИШЭ  
*А.Г. Гарганеев*

© Составление. ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2021

© Цукублин А.Б., Сипайлова Н.Ю., составление, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ</b> .....	6
<b>1. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА</b> .....	7
<b>2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ</b> .....	17
<b>3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ДВИГАТЕЛЯ</b> .....	31
<b>4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТАХОГЕНЕРАТОРОВ</b> .....	39
<b>5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА</b> .....	51
<b>6. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ПЕРЕДАЧИ УГЛА НА ОДНОФАЗНЫХ СЕЛЬСИНАХ</b> .....	64
<b>7. ИССЛЕДОВАНИЕ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ</b> .....	75
<b>8. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА</b> .....	88
<b>9. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ</b> .....	98
<b>10. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ</b> .....	106
<b>11. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРТОРА</b> .....	113
<b>12. ОСНОВЫ РАБОТЫ С ВИРТУАЛЬНЫМИ МОДЕЛЯМИ В МАТЛАВ+SIMULINK</b> ....	121
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	127

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Мехатронные системы летательных аппаратов» предполагает формирование, в числе прочих, компетенций исследовательской деятельности и приобретения студентами опыта проведения экспериментальных работ (см. выписку из характеристики ООП).

Составляющие результатов освоения дисциплины (дескрипторы компетенции)	
Код	Наименование
ПК(У)-2.1В2	Владеет навыками работы с приборами и установками для экспериментальных исследований
ПК(У)-2.1У2	Умеет проводить экспериментальные проверки работоспособности мехатронных систем летательных аппаратов
ПК(У)-2.1З2	Знает типовые стандартные приборы, устройства, аппараты, программные средства, используемые при проектировании и испытаниях мехатронных систем летательных аппаратов

В наибольшей степени формированию указанных компетенций способствует выполнение лабораторных работ. В соответствии с учебными планами студенты должны выполнить ряд лабораторных работ, закрепляющих теоретический материал лекционного курса и способствующих приобретению определенных практических навыков.

Настоящее издание касается вопросов курса «Мехатронные системы летательных аппаратов» в аспекте исследования электромеханических и полупроводниковых преобразователей как важнейших элементов мехатронных систем.

Лабораторный практикум предназначен как для теоретической подготовки студентов к лабораторным работам, так и для непосредственного их выполнения; содержит основные теоретические положения и методические указания для проведения экспериментов. Это особенно важно, когда выполнение лабораторных работ опережает материал лекций.

В описания включены основные теоретические сведения по изучаемому объекту, а также вопросы для самоконтроля. Для удобства выполнения лабораторных работ нумерация рисунков и таблиц в каждой работе самостоятельная.

Для подготовки к выполнению и защите лабораторных работ необходимо изучить материал по рекомендованному списку литературы. Приведенные в практикуме описания лабораторных установок, а также методические указания по выполнению работ позволяют студентам работать самостоятельно.

Комплекс лабораторных работ состоит из двух частей. Первая часть включает работы, связанные с исследованием характеристик электромеханических преобразователей. Эти работы выполняются в физической лаборатории, содержащей помимо стендов для испытаний, образцы электромеханических преобразователей, позволяющие познакомиться с особенностями их конструкции.

Вторая часть – исследование полупроводниковых преобразователей – выполняется в компьютерном классе на виртуальных моделях в математическом пакете MatLab+Simulink. Виртуальные модели как более гибкие и универсальные по сравнению с физическими, снимают ряд ограничений последних и позволяют расширить спектр исследований. Кроме того, каждый студент может получить индивидуальное задание.

Порядок подготовки, проведения лабораторных работ и оформление отчетов изложены в СТП ТПУ 2.3.05-00 – Занятия лабораторные. Общие требования к организации и проведению.

Для проверки знаний студентов перед лабораторной работой проводится опрос на основе контрольных вопросов, помещенных в пособие. После выполнения лабораторной работы студенты составляют отчет (индивидуальный или групповой). Отчеты могут включать результаты исследований разных групп студентов, если отдельные эксперименты по одной лабораторной работе проводились разными группами. Такая организация работы необходима для объемных (например 4-х часовых) лабораторных работ.

## **ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

1. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж на рабочем месте и показавшие при проверке удовлетворительные знания техники безопасности.

2. Перед началом работы студенты должны изучить схему стенда, назначение приборов, их пределы измерения, назначение и функциональное взаимодействие имеющихся в схеме выключателей, переключателей и регуляторов.

3. Наличие светящегося табло на лицевой панели стенда, показывающего его номер, свидетельствует о том, что на вход стенда подано напряжение сети.

4. Перед включением стенда необходимо проверить исходное положение выключателей и переключателей, а также поставить в необходимое положение регуляторы напряжений.

5. Готовность стенда к работе проверяется преподавателем, ведущим занятия, и им же осуществляется подключение стенда.

6. Включение стенда в работу осуществляется автоматом, расположенным на левой боковой поверхности приборного блока.

7. Переключение испытываемой схемы, в соответствии с порядком работы, производится только при отключенном стенде.

8. При работе на стенде не допускается увеличение тока и напряжения до значений, приводящих к зашкаливанию измерительных приборов.

9. При включенном стенде прикасаться к токоведущим частям, электромеханическим блокам, вынесенным отдельно, исследуемым машинам запрещается.

10. При поражении электрическим током, травмировании или внезапном заболевании кого-либо, необходимо полностью отключить лабораторию, сообщить о случившемся преподавателю и принять совместные меры по оказанию первой медицинской помощи.

11. После завершения лабораторной работы, предусмотренной методическими указаниями, все регуляторы, выключатели и переключатели вернуть в исходное «нулевое» состояние и выключить стенд.

# 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** ознакомиться с принципом действия, основными конструктивными типами исполнительных двигателей постоянного тока и экспериментально исследовать их характеристики при разных способах управления.

## Объект исследований

*Исполнительными* называются электрические двигатели, предназначенные для преобразования подводимого к ним электрического напряжения (сигнала управления) в механическое перемещение или вращение вала, величина или частота вращения которых, жестко связана с величиной сигнала.

*Основными требованиями*, предъявляемыми к исполнительным двигателям, являются:

- линейность и однозначность регулировочных и механических характеристик;
- полная управляемость двигателем (т.е. при отсутствии сигнала он не должен создавать момента движения);
- широкий диапазон изменений частоты вращения;
- устойчивость работы во всем диапазоне возможных изменений частоты вращения;
- максимальное быстродействие.

Этим требованиям в полной мере удовлетворяют коллекторные двигатели постоянного тока с независимым возбуждением.

Различают *якорное* (напряжение управления подается на обмотку якоря, рис. 1.1) и *полюсное* управление (напряжение управления подается на обмотку индуктора, рис. 1.2). Якорное управление осуществляется у машин как магнитоэлектрического, так и электромагнитного возбуждений, полюсное управление возможно только при наличии обмотки индуктора.

Конструктивно исполнительные двигатели постоянного тока выполняются в обычном и малоинерционном исполнении. Двигатели с электромагнитным возбуждением могут иметь полностью шихтованную магнитную систему, что позволяет существенно снизить электромеханическую постоянную времени в переходных режимах (например, серия СЛ).

*Особенностью* исполнительных двигателей постоянного тока, независимо от способа управления и конструкции, является выполнение его магнитной системы ненасыщенной, что обеспечивает линейность механических и регулировочных характеристик. Как микромашины и

машины малой мощности исполнительные двигатели не имеют дополнительных полюсов, а удовлетворительная коммутация при их работе обеспечивается соответствующими параметрами коммутирующих контуров.

Исполнительные двигатели практически не работают с установившимися частотами вращения. Для них характерны частые пуски и реверсы, разгоны и торможения. Поэтому в таких машинах щетки устанавливают на геометрической нейтрали.

Рассмотрим работу исполнительных двигателей постоянного тока при разных способах управления и следующих основных допущениях:

- магнитная цепь машины ненасыщенная;
- щетки расположены строго на геометрической нейтрали;
- поток якоря не оказывает влияния на величину магнитного потока индуктора, который линейно связан с величиной приложенного к обмотке напряжения.

В случае якорного управления (рис. 1.1) магнитный поток индуктора, с учетом допущений, пропорционален приложенному напряжению к обмотке возбуждения  $\Phi_B = C_\phi \cdot U_B$ , а момент вращения, создаваемый двигателем постоянного тока  $M = C_M \cdot \Phi_B \cdot I_y$ , где ток

$$I_y = \frac{U_y - C_e \cdot C_\phi \cdot U_B \cdot n}{R_y} \quad \text{получен из уравнения равновесия напряжений.}$$

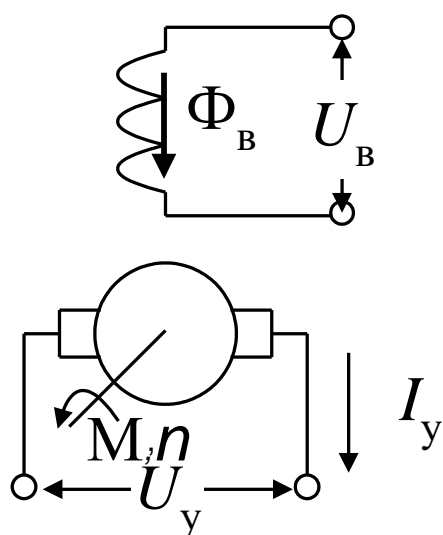


Рисунок 1.1. Якорное управление

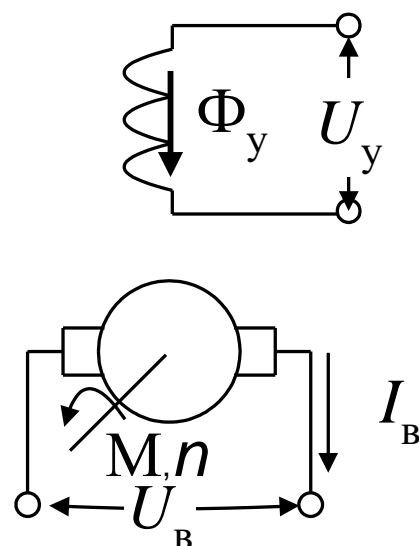


Рисунок 1.2. Полюсное управление



Подставляя выражения для тока и потока в уравнение момента, получим:

$$M = C_M \cdot C_\Phi \cdot \frac{U_B^2}{R_y} \cdot (\alpha - C_e \cdot C_\Phi \cdot n),$$

где  $\alpha = \frac{U_y}{U_B}$  – коэффициент сигнала.

Обычно характеристики исполнительных двигателей рассматривают в относительных единицах, принимая за базовые следующие величины:

$$M_\zeta = M_{\kappa 0} = C_M \cdot C_\Phi \cdot \frac{U_B^2}{R_y} \text{ – базовый момент, равный моменту}$$

короткого замыкания при единичном сигнале управления, т.е. при  $\alpha=1$  и

$n=0$ ;

$$n_\zeta = n_0 = \frac{1}{C_e \cdot C_\Phi} \text{ – базовая частота вращения, равная частоте}$$

вращения идеального холостого хода при единичном сигнале, т.е. при  $M=0$  и  $\alpha=1$ ;

$U_\zeta = U_B$  – базовое напряжение, равное напряжению возбуждения (обычно  $U_\zeta = U_{\text{вном}}$ ).

Записывая момент и частоту вращения в относительных единицах,

$$m = M/M_{\kappa 0}; \quad v = n/n_0$$

окончательно получим  $m = \alpha - v$ .

Это уравнение определяет механические и регулировочные характеристики исполнительного двигателя при якорном управлении (рис. 1.3, а, б).

Мощность управления в этом случае  $P_y = U_y \cdot I_y$ . Выражая все величины в относительных единицах, получим  $P_y^* = \alpha^2 - \alpha v$ , где за базовую мощность принимается потребляемая машиной мощность в режиме короткого замыкания при единичном сигнале (при  $n=0$ ,  $\alpha=1$ )

$$P_\zeta = P_{\kappa 0} = \frac{U_B^2}{R_y}.$$

На рис. 1.3, в приведены характерные зависимости потребляемой мощности от частоты вращения и сигнала, из которых видно, что увеличение частоты вращения при одном и том же сигнале приводит к

уменьшению потребляемой мощности. Это объясняется наличием противо-ЭДС, которая уменьшает величину потребляемого тока. Аналогично могут быть определены характеристики исполнительного двигателя с полюсным управлением.

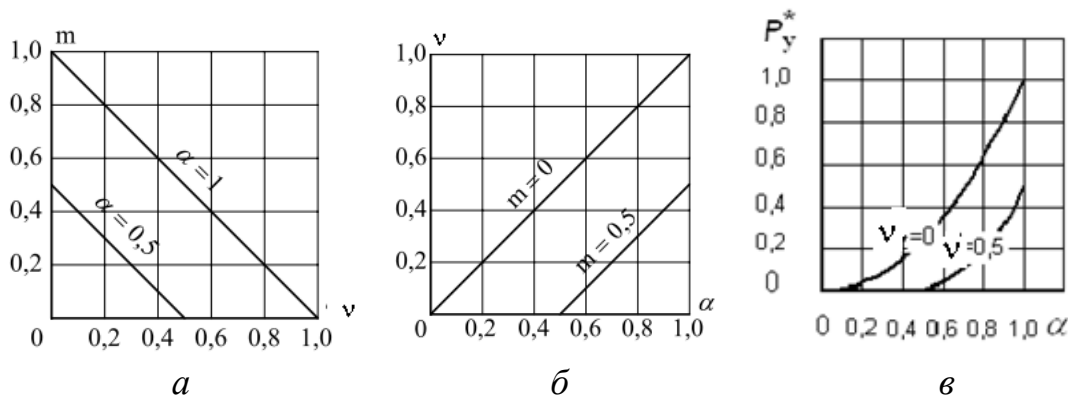


Рисунок 1.3. Механические (а), регулировочные (б) характеристики и характеристики мощности (в) исполнительного двигателя с якорным управлением

Оставляя неизменными базовые значения величин момента, мощности, частоты вращения и сигнала и поменяв местами  $R_y$  и  $R_B$ , нетрудно доказать, что при полюсном управлении имеет место следующая зависимость (в относительных единицах)

$$m = \alpha - \alpha^2 \cdot v.$$

В отличие от двигателей с якорным управлением, здесь имеет место зависимость жесткости механических характеристик от величины коэффициента сигнала. Кроме того, регулировочные характеристики нелинейные и неоднозначные, что существенно сужает область применения такого способа управления. На рис. 1.4 показаны характеристики двигателя с полюсным управлением.

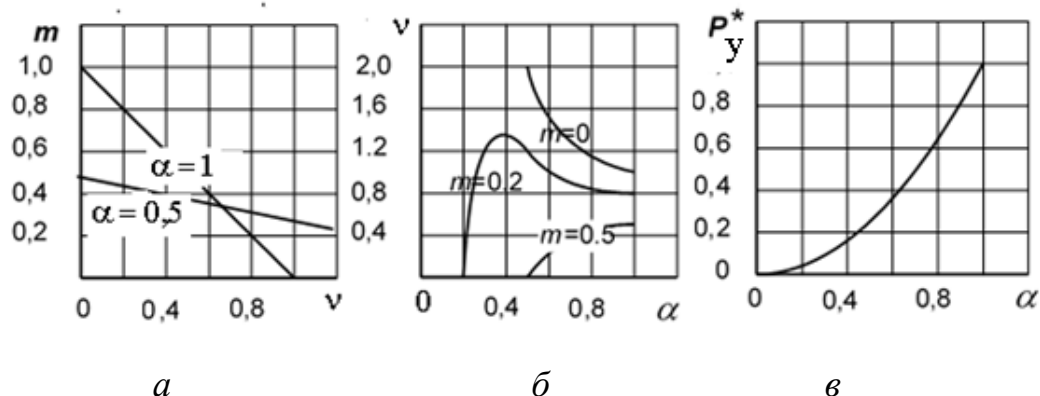


Рисунок 1.4. Механические (а), регулировочные (б) характеристики и характеристики мощности (в) исполнительного двигателя с полюсным управлением

Следует отметить, что в этом случае мощность управления, потребляемая обмоткой индуктора, не зависит от частоты вращения, поскольку в ней не наводится какой-либо ЭДС.

Как видно из характеристик, эксплуатация двигателя с полюсным управлением как исполнительного, возможна лишь при наличии неотключаемого момента нагрузки на его валу не менее  $m=0,5$  о.е. При этом его регулировочная характеристика остается нелинейной, но до  $\nu=1$  становится однозначной.

### **Описание экспериментальной установки**

Экспериментальная установка (рис. 1.5) состоит из приборного блока и электромеханического агрегата.

*Приборный блок* обеспечивает возможность проведения испытаний двигателя в различных режимах работы и измерения токов и напряжений как щитовыми, так и приборами повышенной классности.

*Электромеханический агрегат* состоит из испытуемого двигателя, тахогенератора и нагрузочного устройства. В качестве нагрузочного устройства используется индукционный моментомер серии ТЕС. Управление нагрузочным устройством осуществляется с приборного блока, а измерение момента производится отсчетом на шкале моментомера.

Приборный блок приводится в рабочее состояние включением автомата, расположенного на правой панели стенда. При включении автомата подается напряжение питания на аппаратуру регулирования, о чем свидетельствует включение светодиодов.

В работе исследуется исполнительный двигатель постоянного тока, имеющий следующие технические данные:

- тип ДК–11;
- номинальное напряжение – 24 В;
- номинальная мощность – 10 Вт;
- номинальная частота вращения – 2000 об/ мин.

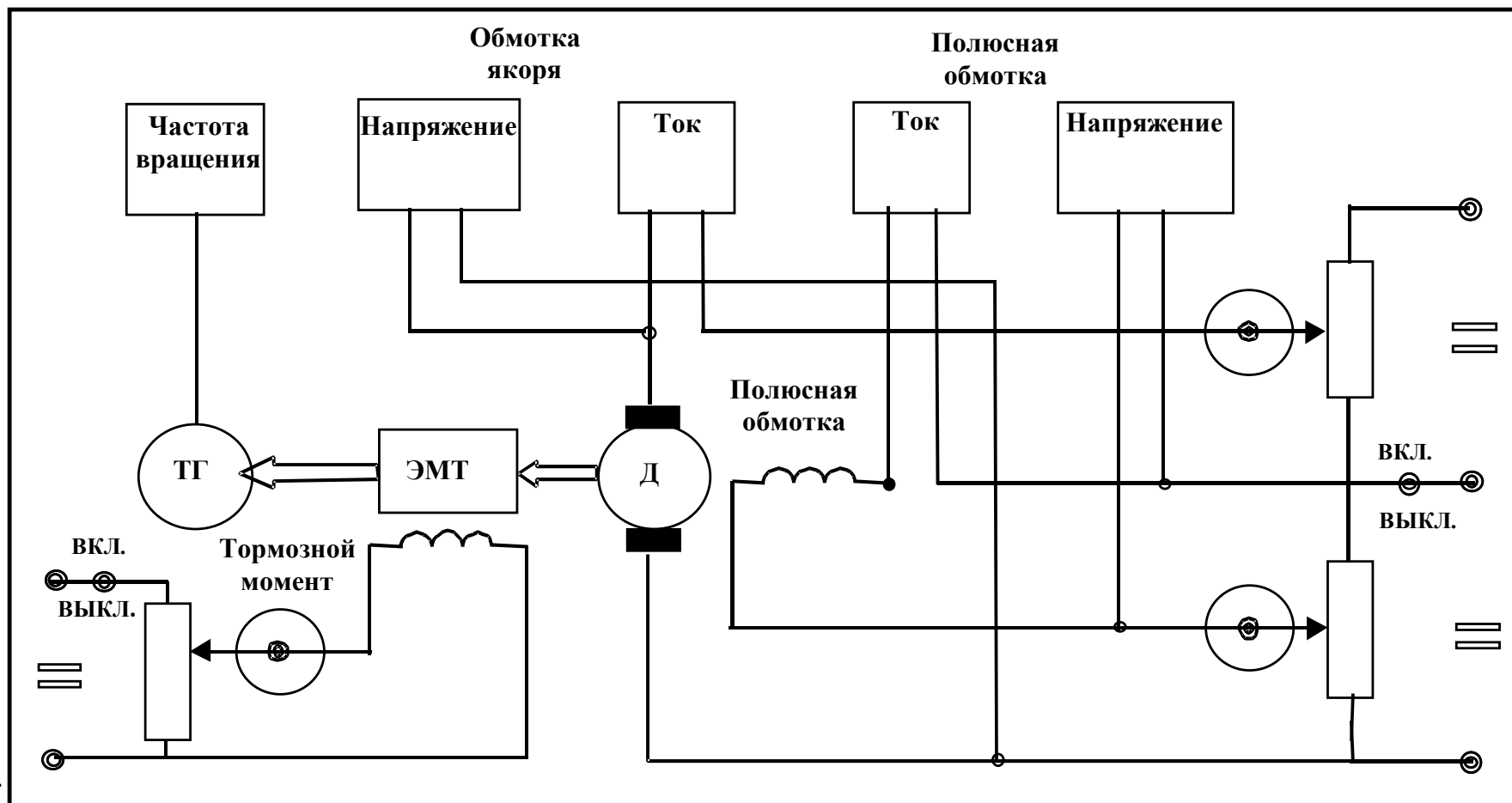


Рисунок 1.5. Схема экспериментальной установки

## Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией испытуемого двигателя и его номинальными данными.
2. Экспериментально определить базовые величины мощности, момента вращения, частоты вращения, напряжения.
3. Экспериментально снять для якорного и полюсного управлений:
  - 3.1. механические характеристики  $M = f(n)$  при  $U_y = \text{const}$ ;
  - 3.2. регулировочные характеристики  $n = f(U_y)$  при  $M = \text{const}$ ;
  - 3.3. характеристики мощности управления  $P_y = f(U_y)$  при  $n = \text{const}$ .
4. Рассчитать и построить в относительных единицах для якорного и полюсного управлений отдельно:
  - 4.1. механические характеристики  $m = f(v)$  при  $\alpha = \text{const}$ ;
  - 4.2. регулировочные характеристики  $v = f(\alpha)$  при  $m = \text{const}$ ;
  - 4.3. зависимости  $P_2^* = f(v)$  при  $\alpha = \text{const}$ ;  $P_2^* = f(\alpha)$  при  $v = \text{const}$ ;
  - 4.4. по характеристикам мощности определить номинальный режим работы двигателя.
5. Сравнить свойства исполнительных двигателей при разных способах управления.

### Методические указания

#### 1. Определение базовых величин.

Для определения основных базовых величин проводятся несколько опытов работы двигателя на нагрузку при номинальных значениях напряжения управления и возбуждения. Запуск двигателя производится на холостом ходу. Затем устанавливается произвольная нагрузка и номинальные напряжения на якорной и полюсной обмотках. Показания приборов заносятся в табл. 1.1.

Таблица 1. 1

*Определение базовых величин*

№ опыта	$M_{\text{нагр}}$	$U_a$	$I_a$	$U_{\text{п}}$	$I_{\text{п}}$	$n$	$n_0$	$M_{\text{к0}}$	$P_{\text{к0}}$
Ед. изм.	Гсм	В	А	В	А	об/мин	об/мин	Гсм	Вт
1									
2									

В табл. 1.1:  $U_a, I_a$  – напряжение, подаваемое на якорь, и ток якорной обмотки,  $U_n, I_n$  – напряжение и ток полюсной обмотки. Значения базовых величин следует занести в табл. 1.1, рассчитав их по следующим выражениям

$$n_0 = \frac{M_{\text{нагр}1} \cdot n_2 - M_{\text{нагр}2} \cdot n_1}{M_{\text{нагр}1} - M_{\text{нагр}2}}, \text{ об/мин,}$$

$$M_{k0} = \frac{M_{\text{нагр}1} \cdot n_2 - M_{\text{нагр}2} \cdot n_1}{n_2 - n_1}, \text{ Гсм,}$$

$$P_{k0} = \frac{U_{a1} \cdot I_{a1}}{M_{\text{нагр}1}} \cdot \frac{(M_{\text{нагр}1} \cdot n_2 - M_{\text{нагр}2} \cdot n_1)^2}{(M_{\text{нагр}1} - M_{\text{нагр}2})(n_2 - n_1)n_1}, \text{ Вт,}$$

$$U_{\zeta} = U_{\text{НОМ}}, \text{ В.}$$

## 2. Снятие механических характеристик.

Для снятия механических характеристик используется рабочая схема (рис. 1.5).

Механическая характеристика представляет собой зависимость в относительных единицах:  $m = f(v)$  при  $\alpha = \text{const}$ . При снятии этой характеристики напряжение возбуждения поддерживается постоянным и равным номинальному, а напряжение управления (коэффициент сигнала) устанавливается необходимой величины и также поддерживается постоянным во время снятия каждой характеристики. Нагрузка изменяется с помощью электромагнитного тормоза (индукционного моментомера) от 0 до  $M_{\text{макс}}$ , при этом одновременно фиксируются значения частоты вращения. Показания приборов заносятся в табл. 1.2 в именованных единицах, а затем пересчитываются в относительные. Базовые значения величин определены в п.1. Для каждой кривой снимается 5–6 точек.

*Характеристики якорного и полюсного управлений снимаются отдельно.*

Таблица 1.2

*Механические характеристики*

$\alpha=1$					$\alpha=0,7$					$\alpha=0,5$				
$M$	$n$	$m$	$v$	$P_2^*$	$M$	$n$	$m$	$v$	$P_2^*$	$M$	$n$	$m$	$v$	$P_2^*$
Гсм	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	о.е.	о.е.	о.е.	Гсм	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	о.е.	о.е.	о.е.	Гсм	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	о.е.	о.е.	о.е.

Величина полезной мощности в относительных единицах рассчитывается в соответствии с выражением  $P_2^* = m \cdot v$ .

### 3. Снятие регулировочных характеристик.

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость  $v = f(\alpha)$  при  $m = \text{const}$ . После запуска двигателя и установки номинального значения напряжения возбуждения изменяют значения напряжения управления, поддерживая постоянной величину момента нагрузки. При этом фиксируются значения частоты вращения, напряжения управления и момента нагрузки. Данные 5–6 экспериментов сводятся в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Регулировочные характеристики

$m=0$				$m=0,3$				$m=0,5$			
$U_y$	$n$	$\alpha$	$v$	$U_y$	$n$	$\alpha$	$v$	$U_y$	$n$	$\alpha$	$v$
В	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	о.е.	о.е.	В	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	о.е.	о.е.	В	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	о.е.	о.е.

Особое внимание следует уделить снятию регулировочных характеристик при полюсном управлении. Поскольку эти характеристики нелинейны и неоднозначны при  $0 \leq m \leq 0.5$ , то при регулировании желательно снять точку максимальной частоты вращения при выбранном моменте нагрузки.

### 4. Снятие характеристик мощности управления.

Зависимость мощности управления от коэффициента сигнала  $P_y^* = f(\alpha)$  при  $v = \text{const}$  снимается отдельно для якорного и полюсного управлений. Для снятия этой характеристики изменяют коэффициент сигнала  $\alpha$ , т. е. напряжение управления, поддерживая неизменной частоту вращения путем изменения величины момента нагрузки. Экспериментальные данные для 4–5 точек каждой характеристики заносят в табл. 1.4. Мощность управления в относительных единицах определяется по выражению  $P_y^* = \frac{U_y \cdot I_y}{P_{к0}}$ , где значение базовой

мощности  $P_{к0}$  определено в п. 1.

Таблица 1.4

Характеристики мощности управления

$v = 0,8$					$v = 0,6$					$v = 0,4$				
$I_y$	$U_y$	$P_y$	$\alpha$	$P_y^*$	$I_y$	$U_y$	$P_y$	$\alpha$	$P_y^*$	$I_y$	$U_y$	$P_y$	$\alpha$	$P_y^*$
А	В	Вт	о.е.	о.е.	А	В	Вт	о.е.	о.е.	А	В	Вт	о.е.	о.е.

### 5. Построение характеристик.

Все экспериментальные характеристики строятся в относительных единицах. На графики наносятся все экспериментальные точки, независимо от хода аппроксимирующей кривой.

Для регулировочных и механических характеристик определяется величина отклонения от линейности в соответствии с выражениями

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta v_{\max}}{v_{\max}} \cdot 100\%, \quad \varepsilon_m = \frac{\Delta m_{\max}}{m_{\max}} \cdot 100\% \quad , \quad \text{где } \Delta v_{\max} \text{ и } \Delta m_{\max} -$$

максимальное отклонение реальной кривой регулировочной и механической характеристик от линейных, проведенных через точку  $v_{\max}$  и  $m_{\max}$  этих же характеристик.

Номинальный режим исполнительного двигателя определяется по кривым  $P_2^* = f(v)$  при  $\alpha=1$  и соответствует точке максимальной полезной мощности. Представить номинальные данные в именованных единицах.

#### Контрольные вопросы и задания

1. Чем объясняется линейность механических и регулировочных характеристик исполнительного двигателя с якорным управлением?
2. Чем объясняется параллельность характеристик исполнительного двигателя с якорным управлением?
3. Почему характеристики исполнительных двигателей рассматриваются в относительных единицах, что принимается за базовые величины?
4. Дать оценку нелинейности характеристик двигателя.
5. Почему и как выбирается номинальный режим исполнительного двигателя? Дать оценку полученным значениям величин номинального режима.
6. Сравнить характеристики двигателя при якорном и полюсном управлениях.

#### Литература

1. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие / Ф. М. Юферов. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Москва: Высшая школа, 1988. – 479 с. – ISBN 506001312-X.



## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** ознакомиться с особенностями исполнительных асинхронных двигателей, способами управления ими, особенностями характеристик; снять опытным путем характеристики асинхронных двигателей при различных способах управления и дать их сравнительную оценку.

### Объект исследований

Двухфазный асинхронный микродвигатель получил большое распространение в следящих системах и в системах автоматического регулирования как исполнительный орган. Исполнительный двигатель (ИД) служит для преобразования электрического сигнала (напряжения управления) в механическое перемещение вала или его вращение с заданной частотой.

*Исполнительные асинхронные двигатели* изготавливаются мощностью от сотых долей до нескольких сотен ватт как стандартной (50 Гц), так и повышенной (200, 400, 500 и 1000 Гц) частоты, с синхронной частотой вращения от 1500 до 30 000 об/мин.

*К достоинствам асинхронного исполнительного двигателя* следует отнести:

– широкий диапазон плавного регулирования частоты вращения, обусловленный возможностью изменения в больших пределах конфигурации магнитного поля в воздушном зазоре;

– способность двигателя к самоторможению, т.е. остановке ротора при снятии сигнала с обмотки управления, что достигается выполнением критического скольжения больше единицы;

– большой пусковой момент вследствие повышенного сопротивления ротора, что в совокупности с малым моментом инерции обеспечивает малую электромеханическую постоянную времени двигателя, его быстродействие и повышение устойчивости следящих систем;

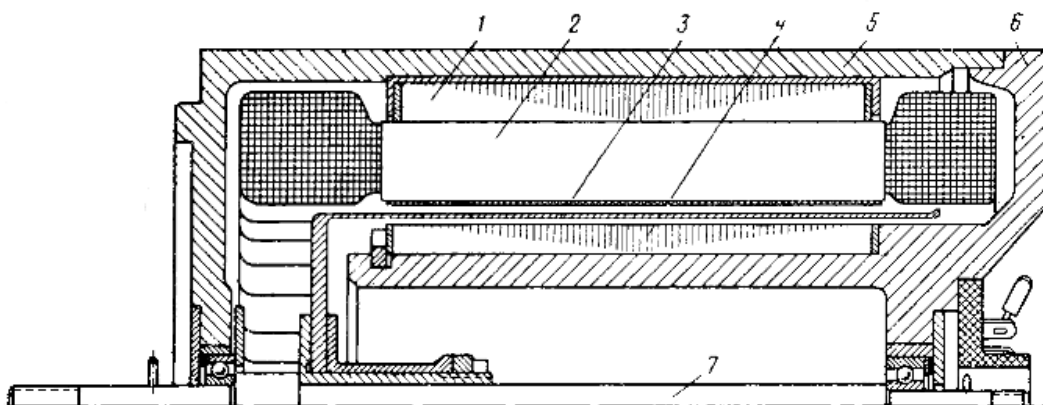
– близкая к линейной механическая характеристика двигателя, что достигается за счет большого критического скольжения, обусловленного повышенным активным сопротивлением ротора (обычно эти двигатели имеют  $S_k=4\div 7$ );

– отсутствие скользящего контакта обеспечивает малый момент трения, стабильность параметров, отсутствие искровой коммутации и связанных с ней радиопомех.

В зависимости от конструкции ротора различают *четыре типа двухфазных управляемых асинхронных двигателей*: с короткозамкнутым

ротором типа «белочья клетка»; с полым немагнитным ротором; с полым ферромагнитным ротором и массивным ферромагнитным ротором. Наиболее широкое применение в автоматике нашли двигатели первых двух типов.

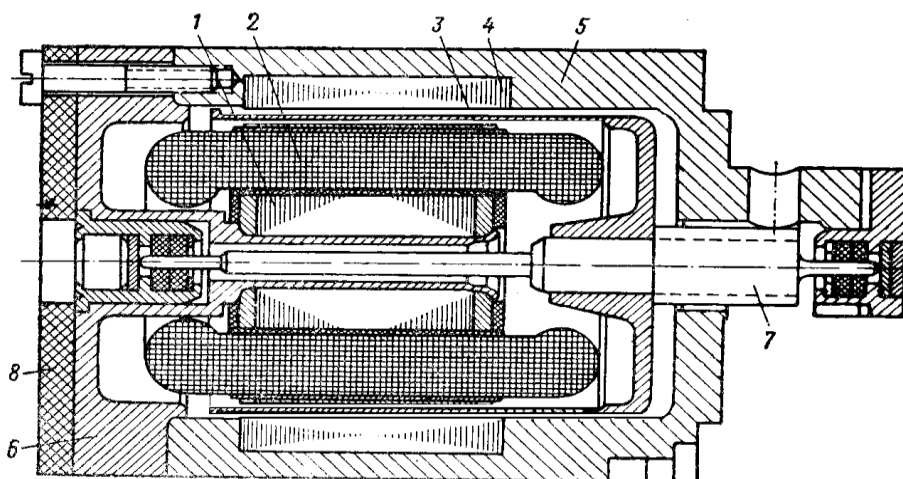
Исполнительные двигатели с полым немагнитным ротором имеют магнитопровод статора, состоящий из двух сердечников – внутреннего и внешнего. Воздушный зазор в машине достигает больших значений 0,5– 1,0 мм; ротор выполняется в виде тонкостенного стакана из легкого алюминиевого сплава. Обмотки располагают на внешнем статоре при мощностях двигателя более 1 Вт, и на внутреннем – при меньших. На рис.2.1 и 2.2 приведены конструкции исполнительных двигателей с полым немагнитным ротором с различным расположением обмоток статора. Характерной особенностью этих двигателей является значительный ток холостого хода, составляющий 65–95 % номинального.



*Рисунок 2.1. Асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором  
(конструктивная схема с обмоткой на внешнем статоре):*

*1 – внешний статор, 2 – обмотка, 3 – полый ротор, 4 – внутренний статор,  
5 – корпус, 6 – подшипниковый щит, 7 – вал*

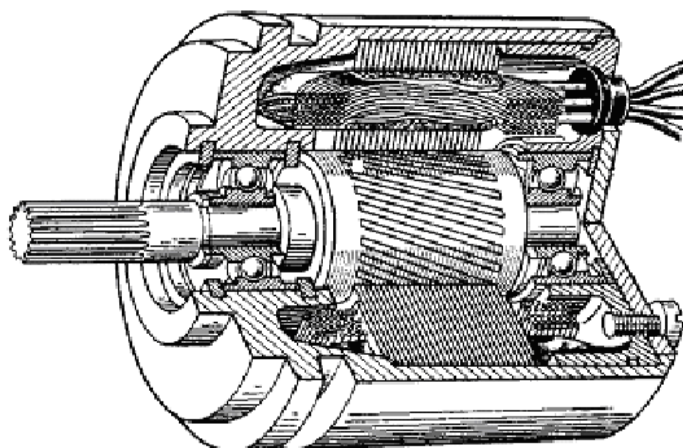
В двигателе с полым ферромагнитным ротором внутренний статор не требуется. Однако, у него имеется ряд существенных недостатков: возможность прилипания ротора к статору при неравномерном воздушном зазоре, чрезмерно большое активное сопротивление ротора и пониженное быстродействие.



*Рисунок 2.2. Асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором (конструктивная схема с обмоткой на внутреннем статоре):  
1 – внутренний статор; 2 – обмотка; 3 – полый ротор; 4 – внешний статор;  
5 – корпус; 6 – подшипниковый щит; 7 – вал-шестерня; 8 – клеммная плата*

Двигатели с ротором типа «беличья клетка» выполняют в следующих модификациях: обычный управляемый двигатель; двигатель с электромагнитным демпфером; двигатель с демпфирующим тахогенератором и двигатель «сквозной конструкции».

На рис. 2.3 приведена наиболее распространенная конструкция исполнительных двигателей с ротором типа «беличья клетка».

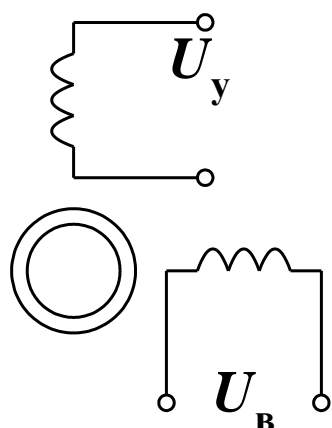


*Рисунок 2.3. Исполнительный двигатель «сквозной конструкции» с ротором типа «беличья клетка»*

Общим для всех конструктивных исполнений машин является размещение на статоре двигателя двух распределенных обмоток, сдвинутых в пространстве на  $90^{\circ}$  эл. Одна из них – обмотка возбуждения  $W_{\text{в}}$  подключается к напряжению  $U_{\text{в}}$  переменного тока постоянной частоты и амплитуды. Ко второй – обмотке управления  $W_{\text{у}}$  – подводится

напряжение  $U_y$  той же частоты, амплитуда или фаза которого может изменяться в соответствии со способом управления (амплитудное, фазовое или амплитудно-фазовое).

*Принцип действия* исполнительного двухфазного асинхронного двигателя основан на формировании момента и частоты вращения путем изменения конфигурации магнитного поля от кругового вращающегося через эллиптическое вращающееся до пульсирующего. На рис. 2.4 и 2.5 показаны схема и механические характеристики исполнительного асинхронного двухфазного двигателя при изменении конфигурации его магнитного поля.



При круговом поле, т.е. при полной симметрии двигателя и симметричном питании, создается только одно прямо вращающееся магнитное поле, которое создает максимально возможный вращающий момент ( $M_{пр}$  при круговом поле рис. 2.5). При появлении несимметрии (амплитудной или фазовой) в питании обмоток двигателя поле в машине становится эллиптическим вращающимся.

Рисунок 2.4. Схема исполнительного двигателя

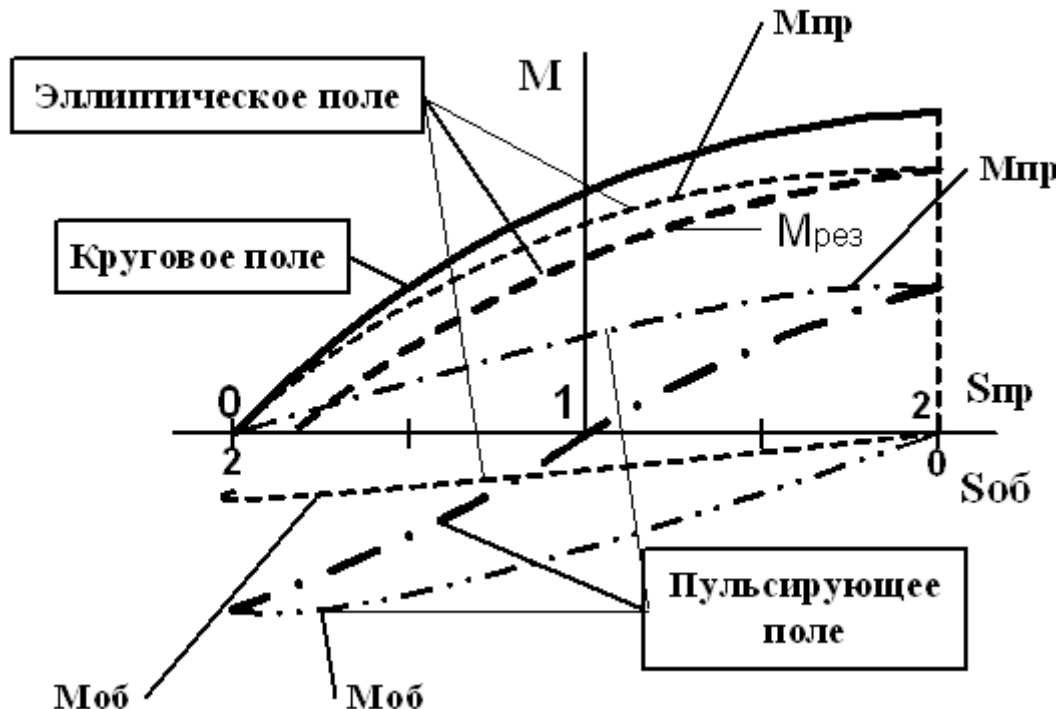


Рисунок 2.5. Механические характеристики

Условно, эллиптическое вращающееся магнитное поле можно представить состоящим из двух круговых вращающихся, имеющих одинаковые частоты вращения, но разные амплитуды и направления вращения. Одно из этих полей носит название прямовращающегося, второе – обратновращающегося. Поле прямого вращения создает двигательный момент (на рис. 2.5 положительного знака), поле обратного вращения – тормозной момент (на рис. 2.5 отрицательного знака). Результирующий момент двигателя равен алгебраической сумме моментов ( $M_{рез}$ ), и механическая характеристика перемещается параллельно самой себе в сторону больших скольжений. При этом уменьшаются не только рабочая частота вращения, но и частота вращения идеального холостого хода. Изменяя соотношения между двигательным и тормозным моментами можно плавно и в широких пределах менять частоту вращения ротора двигателя. Пульсирующее поле характеризуется равенством амплитуд прямо– и обратно вращающихся магнитных полей, поэтому результирующий момент (при критическом скольжении  $S_k$  больше единицы) становится тормозным, независимо от направления вращения двигателя.

Изменение конфигурации магнитного поля в двухфазных асинхронных машинах возможно следующими способами:

- изменением амплитуды напряжения на одной из обмоток;
- изменением фазы напряжения на одной из обмоток;
- изменением амплитуды и фазы напряжения на одной из обмоток;
- пространственным перемещением осей статорных обмоток.

Поэтому *способы управления* исполнительными двигателями носят названия амплитудного, фазового, амплитудно–фазового и пространственного смещения осей обмоток.

#### **Описание экспериментальной установки**

Принципиальная электрическая схема установки для исследования асинхронного исполнительного двигателя приведена на рис. 2.6. Она состоит из *электромашиного агрегата* и *приборного стенда*. Электромашинный агрегат предназначен для осуществления нагрузки и измерения вращающего момента. Нагрузочное устройство представляет собой электродинамический моментомер (ЭМТ) с отсчетом угла отклонения. Величина тормозного момента (без учета момента трения измерительного устройства) определяется выражением

$$M=2000 \sin\gamma, \text{ Гсм,}$$

где  $\gamma$  – угол отклонения измерительной шкалы моментомера в градусах.

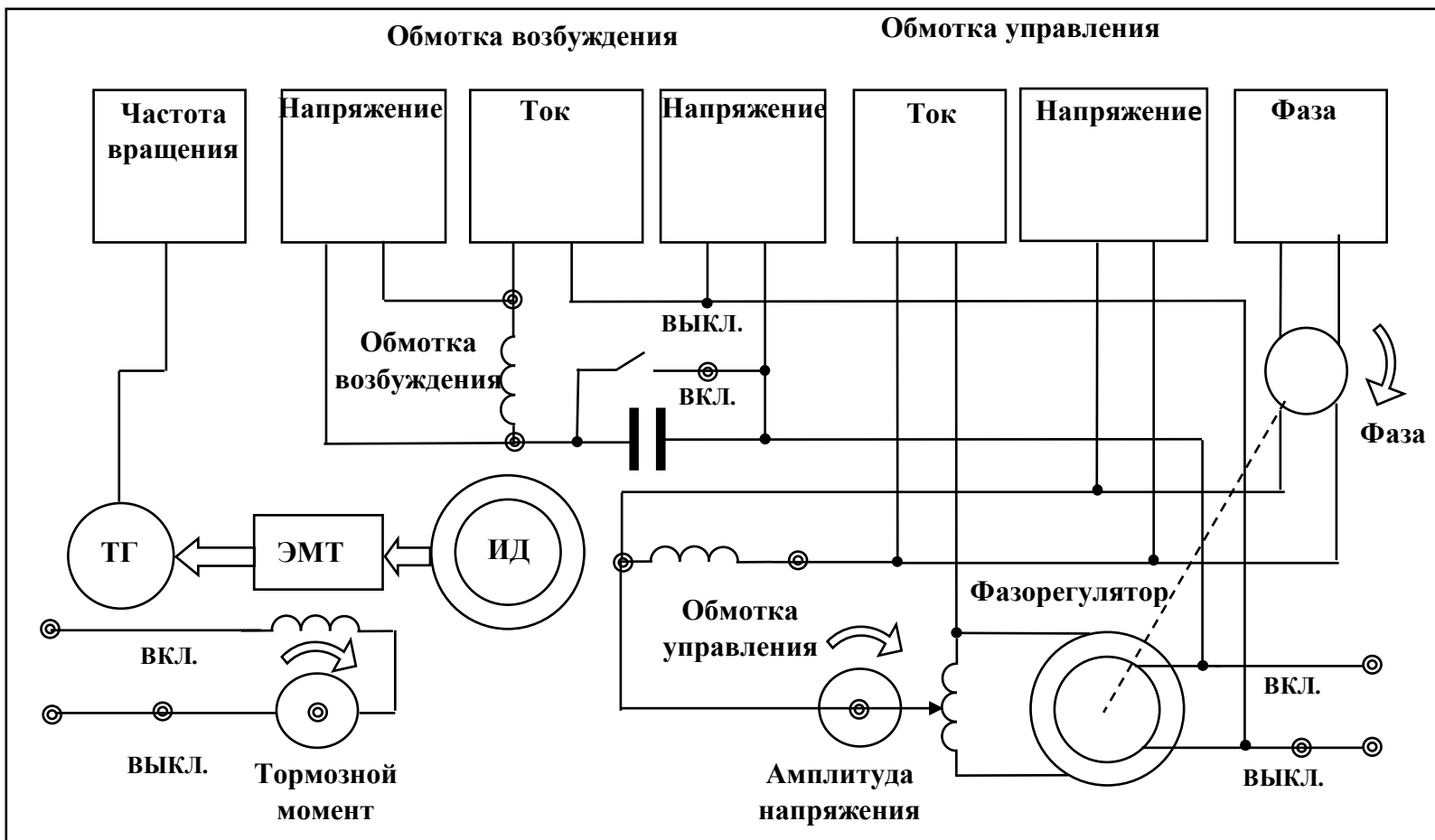


Рисунок 2.6. Схема экспериментальной установки

Испытуемый двигатель типа СМВ представляет собой электромашинный агрегат, состоящий из двухфазного асинхронного двигателя и встроенного синхронного тахогенератора. Возбуждение синхронного тахогенератора осуществляется постоянным магнитом, расположенным на роторе типа «звездочка».

#### Технические данные СМВ

##### Двигатель

- напряжение возбуждения – 220 В;
- напряжение управления – 110 В;
- частота вращения синхронная – 3000 об/мин;
- частота напряжения – 50 Гц;
- частота вращения при холостом ходе – 2750 об/мин;
- полезная мощность – 10 Вт;
- напряжение трогания – 5 В;
- потребляемый ток холостого хода: возбуждения – 0,35 А, управления – 0,6 А;
- пусковой момент при единичном сигнале  $M_{к0} = 1800 \cdot 10^{-4}$  Нм;
- статический момент трения –  $15 \times 10^{-4}$  Нм;
- коэффициент трансформации – 2.

##### Тахогенератор

- крутизна выходного напряжения – 38 мВ/об/мин.

Приборный стенд обеспечивает возможность осуществления любого из возможных способов управления двигателем, регистрацию токов и напряжений во всех его цепях, а также управление величиной нагрузки.

#### Программа работы

1. Ознакомиться с конструкцией и принципом действия асинхронного управляемого двигателя.
2. Экспериментально снять и построить:
  - 2.1. семейство механических и регулировочных характеристик двигателя при фазовом управлении;
  - 2.2. семейство механических и регулировочных характеристик двигателя при амплитудном управлении;
  - 2.3. семейство механических и регулировочных характеристик двигателя при конденсаторном управлении.
3. Оценить степень нелинейности механических и регулировочных характеристик по кривым, построенным в относительных единицах.
4. Рассчитать по механическим характеристикам полезную мощность исполнительного двигателя и построить зависимость этой мощности от частоты вращения.

5. Проанализировать свойства двигателя при разных способах управления.

### Методические указания

#### 1. Экспериментальные характеристики двигателя при амплитудном управлении.

Амплитудное управление двухфазным асинхронным исполнительным двигателем осуществляется при следующих условиях.

Фаза напряжения возбуждения отличается от фазы напряжения управления на  $90^\circ$  эл. ( $\beta = 90^\circ$ ).

Обмотки смещены в пространстве на  $90^\circ$  эл. ( $\Psi = 90^\circ$ ).

Амплитуда напряжения возбуждения постоянна ( $U_B = \text{const}$ ).

На приборном стенде задают фазу напряжения управления путем установки фазорегулятором величины  $\sin\beta = 1$ . Конденсатор в цепи обмотки возбуждения шунтируется соответствующим положением переключателя. Частота вращения двигателя в этом случае регулируется путем изменения амплитуды напряжения управления, а нагрузка – напряжением питания электромагнитного тормоза (ЭМТ).

При амплитудном управлении используется понятие эффективного коэффициента сигнала (относительное значение напряжения управления), который определяется в общем случае как  $\alpha_e = \alpha \cdot k$ , где

$\alpha = \frac{U_y}{U_B}$  – коэффициент сигнала, а  $k = \frac{w_B k_{обв}}{w_y k_{обу}}$  – коэффициент

трансформации двигателя. Поэтому назначение величины напряжения управления следует производить так, чтобы эффективный коэффициент сигнала изменялся в пределах  $\alpha_e = 0-1$ .

*Механические характеристики  $m=f(v)$*  при амплитудном управлении снимаются следующим образом: поддерживая постоянным напряжение возбуждения (величина выбирается согласно табл. 2.1), изменяют момент нагрузки, фиксируя при этом значения частоты вращения. Данные 4–5 точек для каждой кривой заносятся в табл. 2.1.

Частоту вращения  $v$  и момент  $m$  в относительных единицах следует вычислять в соответствии с выражениями

$$v = n/n_0, \quad m = \frac{M}{M_{к0}},$$

где  $n_0$  – синхронная частота вращения, а  $M_{к0}$  – пусковой момент двигателя при  $\alpha_e = 1$  ( см. номинальные данные ).



Таблица 2.1

*Механические характеристики при амплитудном управлении*

$\alpha_e = 1$					$\alpha_e = 0,8$					$\alpha_e = 0,6$				
$\gamma$	$M_n$	$n$	$m$	$v$	$\gamma$	$M_n$	$n$	$m$	$v$	$\gamma$	$M_n$	$n$	$m$	$v$
град	Н М	об/ мин	о.е. .	о. е.	град	Н М	об/ мин	о.е. .	о.е. .	град	Н М	об/ мин	о.е. .	о.е. .

Ориентировочный вид механических характеристик для амплитудного управления показан на рис. 2.7, а.

*Регулировочные характеристики*  $v = f(\alpha_e)$  при  $m = \text{const}$  снимаются по той же рабочей схеме, что и механические. Для этого после запуска двигателя устанавливают необходимый момент нагрузки, затем с помощью ручек регулирования изменяют величину напряжения управления, поддерживая постоянство нагрузочного момента. Регулировочные характеристики снимаются при трех разных моментах нагрузки такой величины, чтобы охватить возможные режимы работы двигателя. Результаты опытов заносятся в табл. 2.2.

Таблица 2.2

*Регулировочные характеристики при амплитудном управлении*

$\gamma = 0$ $m = 0$				$\gamma =$ $m =$				$\gamma =$ $m =$			
$n$	$U_y$	$v$	$\alpha_e$	$n$	$U_y$	$v$	$\alpha_e$	$n$	$U_y$	$v$	$\alpha_e$
об/ мин	В	о.е.	о.е.	об/ мин	В	о.е.	о.е.	об/ мин	В	о.е.	о.е.

Ориентировочный вид регулировочных характеристик для амплитудного управления показан на рис. 2.7, б.

**2. Фазовое управление.**

Фазовое управление двухфазным асинхронным исполнительным двигателем осуществляется при следующих условиях:

– амплитуда напряжения управления постоянна и равна номинальной ( $U_B = \text{const}$ );

– обмотки смещены в пространстве на  $90^\circ$  эл. ( $\Psi = 90^\circ$ );

– амплитуда напряжения возбуждения постоянна ( $U_B = \text{const}$ ).

На приборном стенде изменяют фазу напряжения управления путем установки фазорегулятором величины  $\sin\beta$ . Конденсатор в цепи обмотки возбуждения также шунтируется соответствующим положением

переключателя. Частота вращения двигателя в этом случае регулируется путем изменения фазы напряжения управления, а нагрузка – напряжением питания электромагнитного тормоза. При фазовом управлении снимаются механические и регулировочные характеристики.

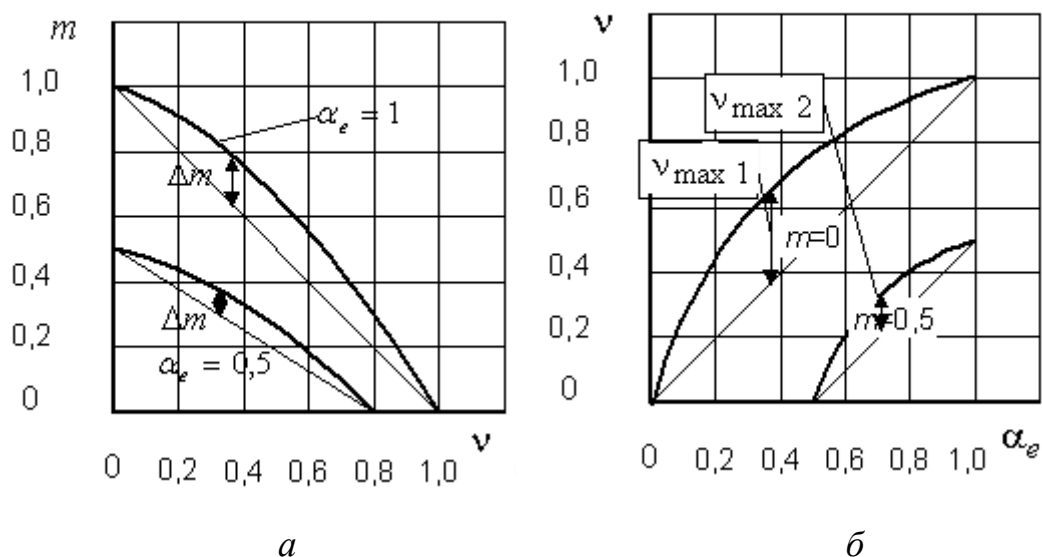


Рисунок 2.7. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики при амплитудном управлении

Механические характеристики  $m = f(v)$  при  $\sin\beta = \text{const}$  снимаются для трех различных коэффициентов сигнала  $\sin\beta$ , при этом частота вращения меняется путем изменения момента нагрузки на валу двигателя. Данные экспериментов заносятся в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Механические характеристики при фазовом управлении

$\sin\beta=1$					$\sin\beta=0,75$					$\sin\beta=0,5$				
$\gamma$	$M_n$	$n$	$m$	$v$	$\gamma$	$M_n$	$n$	$m$	$v$	$\gamma$	$M_n$	$n$	$m$	$v$
Град	Нм	об/мин	о.е	о.е	град	Нм	об/мин	о.е	о.е	град	Нм	об/мин	о.е	о.е

В соответствии с этой таблицей строятся в относительных единицах механические характеристики, примерный вид которых приведен на рис. 2.8, а.

Регулировочные характеристики при фазовом управлении представляют собой зависимости  $v = f(\sin\beta)$  при  $m = \text{const}$  и снимаются при трех различных значениях величины нагрузки, которая во время

эксперимента поддерживается постоянной регулированием напряжения питания электромагнитного тормоза.

Двигатель запускают при  $\sin\beta=1$ . Устанавливают необходимую величину нагрузки, а затем регулируют частоту вращения двигателя с помощью фазорегулятора. При этом следят, чтобы величина нагрузки (угол  $\gamma$ ) оставалась постоянной. Результаты опытов заносят в табл. 2.4, на основании которой строятся регулировочные характеристики при фазовом управлении. Вид этих характеристик показан на рис. 2.8, б.

Таблица 2.4

Регулировочные характеристики при фазовом управлении

$\gamma=0$ $m=0$				$\gamma=$ $m=$				$\gamma=$ $m=$			
$n$	$\sin\beta$	$v$	$\alpha_e$	$n$	$\sin\beta$	$v$	$\alpha_e$	$n$	$\sin\beta$	$v$	$\alpha_e$
об/ МИН	-	о.е.	о.е.	об/ МИН	-	о.е.	о.е.	об/ МИН	-	о.е.	о.е.

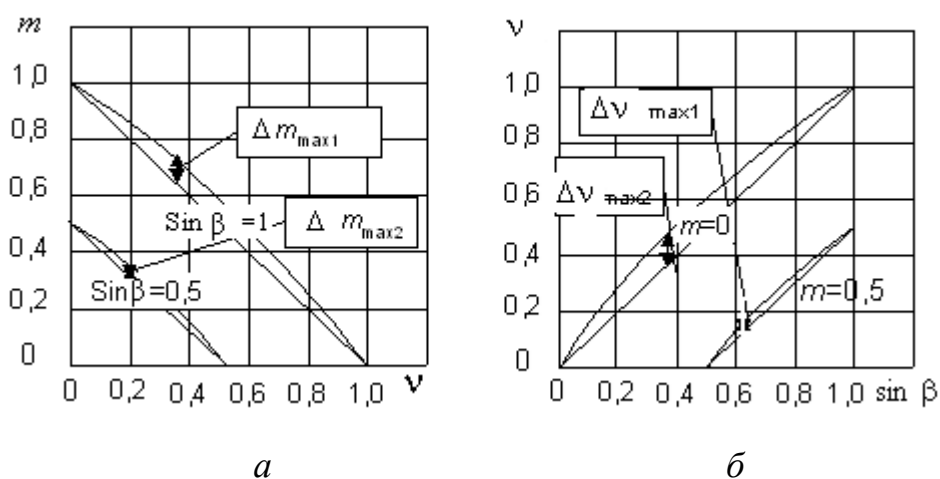


Рисунок 2.8. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики при фазовом управлении

### 3. Конденсаторное управление.

Характеристики исполнительного конденсаторного двигателя зависят от того, как выбран коэффициент трансформации  $K$  и емкость конденсатора  $C$ .

В экспериментальной установке емкость конденсатора выбрана из условий получения кругового вращающегося магнитного поля при пуске двигателя и номинальном напряжении управления. Особенностью конденсаторного управления является то, что при постоянной амплитуде напряжения управления изменение частоты вращения двигателя приводит к изменению величины амплитуды и фазы напряжения

возбуждения. Это приводит к более сильному изменению конфигурации магнитного поля, что существенно сказывается на линейности основных характеристик машины.

*Механические характеристики*  $v = f(m)$  при  $\alpha = \text{const}$  для конденсаторного управления снимаются следующим образом: устанавливают фазорегулятором нулевой фазовый сдвиг напряжения управления  $\sin\beta=0$ . Соответствующим положением переключателя включают конденсатор в цепь возбуждения. Затем устанавливают необходимое напряжение управления и, поддерживая его постоянным, нагружают двигатель электромагнитным тормозом, фиксируя значения частоты вращения и момента. Для каждой характеристики снимают 4–5 точек и заносят в табл. 2.5.

Относительное значение напряжения возбуждения  $U_B^* = U_B / U_{BH}$ , где  $U_{BH}$  – номинальное напряжение возбуждения. Механические характеристики строятся в относительных единицах и имеют вид показанный на рис. 2.9, а.

Таблица 2.5

*Механические характеристики при конденсаторному управлению*

$\alpha_e=1$ $U_y=$							$\alpha_e=$ $U_y=$						
$\gamma$	$M_n$	$n$	$m$	$v$	$U_B$	$U_a^*$	$\gamma$	$M_n$	$n$	$m$	$v$	$U_B$	$U_a^*$
град.	Нм	об/мин	о.е	о.е	В	о.е	град.	Нм	об/мин	о.е	о.е	В	о.е

*Регулировочные характеристики* исполнительного двигателя с конденсаторным управлением имеют большую нелинейность, чем у двигателя при амплитудном и особенно при фазовом управлении. Экспериментально эти характеристики снимаются аналогично подобным при других способах управления, и данные 4–5 точек для каждого из моментов нагрузки заносятся в табл. 2.6.

Таблица 2.6

*Регулировочные характеристики при конденсаторном управлении*

$\gamma=0$ $m=0$				$\gamma=$ $m=$				$\gamma=$ $m=$			
$n$	$U_y$	$v$	$\alpha_e$	$n$	$U_y$	$v$	$\alpha_e$	$n$	$U_y$	$v$	$\alpha_e$
об/мин	В	о.е.	о.е.	об/мин	В	о.е.	о.е.	об/мин	В	о.е.	о.е.

Примерный вид регулировочных характеристик при конденсаторном управлении показан на рис. 2.9, б.

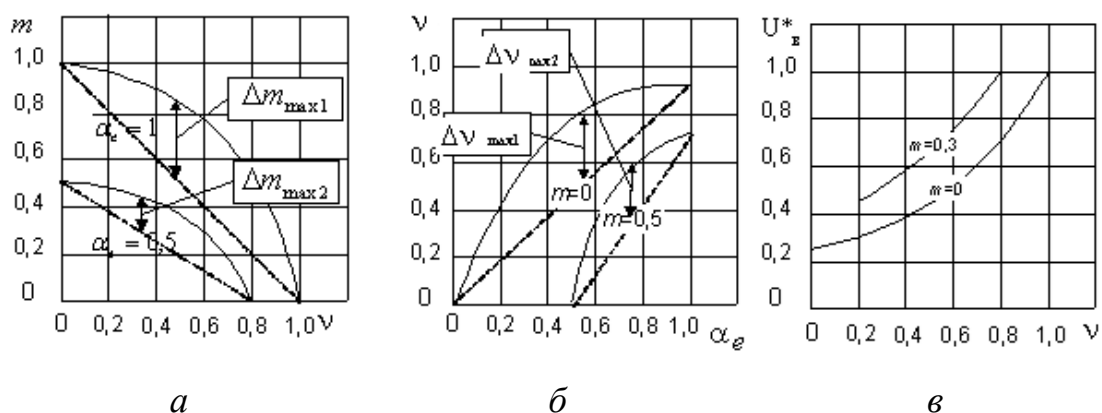


Рисунок 2.9. Механические (а) и регулировочные (б) характеристики при конденсаторном управлении

4. **Нелинейности характеристик** при любом способе управления оцениваются величиной наибольшего отклонения  $\Delta$  реальной характеристики от линейной, проведенной через предельно возможные точки при работе двигателя двигателем.

Нелинейность характеристик определяется в соответствии со следующими выражениями:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta v_{\max}}{v_{\max}} \cdot 100\%, \quad \varepsilon_m = \frac{\Delta m_{\max}}{m_{\max}} \cdot 100\% .$$

Оценка нелинейности проводится для всех снятых кривых всех способов управления и одинаковых постоянных, и данные заносятся в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Оценка нелинейности характеристик

Нелинейности	$\varepsilon_m \%$			$\varepsilon_v \%$		
	$\alpha_c=0$	$\alpha_c=$	$\alpha_c=$	$m=0$	$m=$	$m=$
Управление						
Амплитудное						
Фазовое						
Конденсаторное						

5. **Полезная мощность** двигателя рассчитывается для двух коэффициентов сигнала при всех способах управления двигателем по выражению  $P^*_2 = m V$  при обработке механических характеристик и заносится в табл. 2.8, по которой строятся графики изменения полезной мощности от частоты вращения  $P^*_2 = f(\omega)$ .

Таблица 2.8

*Полезная мощность двигателя*

Амплитудное управление				Фазовое управление				Конденсаторное управление			
$\alpha_e=1$		$\alpha_e=$		$\sin\beta=1$		$\sin\beta=$		$\alpha_e=1$		$\alpha_e=$	
$P_2^*$	$V$	$P_2^*$	$V$	$P_2^*$	$V$	$P_2^*$	$V$	$P_2^*$	$V$	$P_2^*$	$V$

При анализе результатов проведенных опытов сравнить свойства двигателей при разных методах управления по линейности регулировочных и механических характеристик, дать оценку полезной мощности двигателя, пояснить причины отличия характеристик.

**Контрольные вопросы и задания**

1. В чем заключаются параметрические особенности исполнительных асинхронных двигателей?
2. На чем основан принцип регулирования частоты вращения исполнительного асинхронного двигателя?
3. Что такое напряжение трогания и как его определить?
4. Как осуществляются разные способы управления двигателем?
5. Как выбирается величина емкости конденсатора при конденсаторном управлении?
6. Почему конденсаторное управление исполнительным двигателем относится к амплитудно-фазовому способу?

**Литература**

1. Арменский Е. В. Электромашинные устройства автоматики: учебное пособие для вузов / Е. В. Арменский, И. В. Кузина, Г. Б. Фалк. – Москва: Высшая школа, 1986. – 247 с.: ил.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** ознакомиться с конструкцией синхронного гистерезисного микродвигателя, снять опытным путём его механические и рабочие характеристики.

#### Объект исследования

*Гистерезисным двигателем называют синхронный двигатель, в котором основной вращающий момент создаётся за счёт гистерезиса магнитного материала ротора при перемагничивании его вращающимся магнитным полем статора. Кроме основного гистерезисного момента у двигателей с массивным ротором имеется ещё момент от вихревых токов – асинхронный момент. В синхронном режиме вращающий момент гистерезисного двигателя создаётся в результате взаимодействия магнитного потока статора с намагниченным ротором.*

*Статор гистерезисного двигателя ничем не отличается от статора обычных синхронных или асинхронных машин. Он состоит из корпуса 1, сердечника статора 2 и обмотки 5 (рис. 3.1). Обмотка статора (двухфазная или трёхфазная) укладывается в пазах сердечника. Ротор 4 гистерезисного двигателя представляет собой цилиндр без каких-либо явно выраженных полюсов и обмотки.*

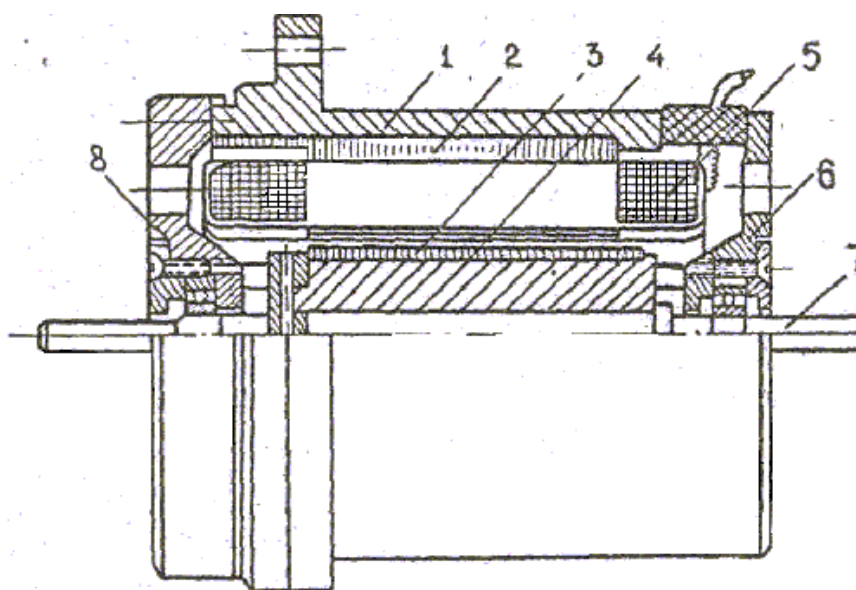


Рисунок 3.1. Конструкция гистерезисного двигателя

*Активный слой ротора 3 выполняется из магнитотвёрдого материала. В качестве магнитотвёрдого материала используются сплавы: викалой, альни, а в качестве немагнитного, из которого выполняется массив ротора, – латунь, сплавы алюминия, пластмассы. Корпус и подшипниковые щиты 6, 8 выполняются из немагнитного материала, а*

вал 7 – из любой конструкционной стали.

С целью уменьшения потерь на вихревые токи активный слой ротора обычно набирается из отдельных изолированных друг от друга плоских колец.

Природа гистерезисного момента заключается в наличии у материала ротора широкой петли гистерезиса. При асинхронной скорости вращения ротор, находясь в магнитном поле, перемагничивается. При этом ось поля ротора, выполненного из магнитотвердого материала, отстает от оси вращающегося поля статора на некоторый угол  $\gamma$ .

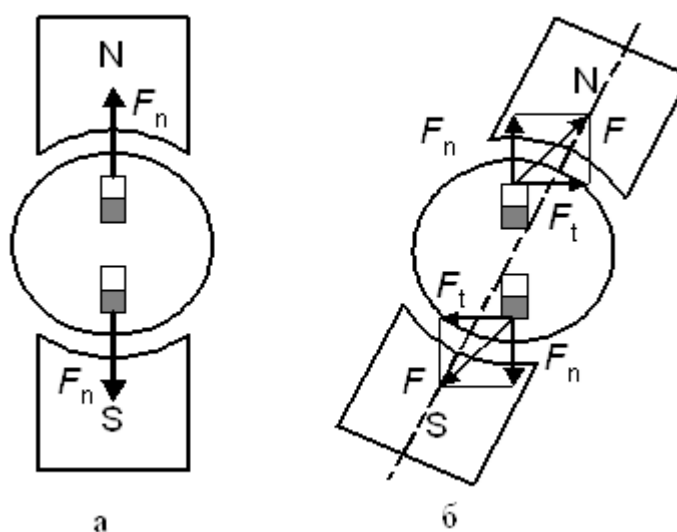


Рисунок 3.2. Принцип действия гистерезисного двигателя

В результате взаимодействия поля ротора с опережающим его вращающимся полем статора возникает вращающий момент. Эффект возникновения момента вращения можно пояснить на следующей модели. Любое ферромагнитное тело можно рассматривать состоящим из большого числа элементарных магнетиков, которые способны поворачиваться вокруг своих осей.

Обычно расположение элементарных магнетиков хаотично.

Если тело из ферромагнитного материала поместить в магнитное поле, то элементарные магнетики ориентируются вдоль линий магнитного поля и на поверхности цилиндра появляются полюса противоположной полю полярности, то есть тело намагничивается.

На рис. 3.2 магнитное поле, создаваемое в гистерезисном двигателе обмоткой статора, условно показано в виде двух полюсов постоянных магнитов. Если предположить, что цилиндр выполнен из магнитомягкого материала, который обладает узкой петлей гистерезиса, то силы



молекулярного трения малы, и при вращении магнитного поля элементарные магнитики будут вращаться синхронно и синфазно с полем (рис. 3.2, а). Силы взаимодействия между элементарными магнитиками и полем в этом случае будут иметь, как и при неподвижном роторе, только нормальные составляющие, уравнивающие друг друга, поэтому ротор двигателя будет оставаться неподвижным.

Другую картину можно будет наблюдать, если во вращающееся магнитное поле поместить ротор из магнитотвёрдого материала. В магнитотвёрдых материалах, обладающих широкой петлей гистерезиса, силы внутреннего молекулярного трения велики, поэтому элементарные магнитики не будут успевать за вращающимся магнитным полем по фазе. Между осью поля и осью наведённых полюсов ротора появляется некоторый угол рассогласования.

В результате этого силы взаимодействия между наведёнными полюсами ротора и внешним магнитным полем будут иметь не только нормальные, но и касательные составляющие (рис. 3.2, б), которые создадут у гистерезисного двигателя вращающий момент. Так как этот момент обуславливается гистерезисом материала ротора, он называется гистерезисным моментом. За счёт гистерезисного момента ротор двигателя разгоняется до синхронной скорости. Во время разгона ротор гистерезисного двигателя перемагничивается, причём частота перемагничивания по мере нарастания частоты вращения постепенно уменьшается, и при достижении синхронной частоты вращения перемагничивание прекращается. В синхронном режиме вращающий момент гистерезисного двигателя создаётся так же, как у обычного магнитоэлектрического синхронного двигателя в результате взаимодействия магнитного поля статора с намагниченным ротором.

*Вращающий момент* гистерезисного двигателя, как и любой электрической машины, пропорционален векторному произведению пространственных векторов магнитного потока  $\Phi$ , создаваемого обмоткой статора, и МДС ротора  $F$ , то есть

$$M = C_m[\Phi \cdot F] = C_m \cdot \Phi \cdot F \cdot \sin \gamma_r,$$

где  $C_m$  – коэффициент пропорциональности, величина которого определяется конструктивными параметрами электрической машины и выбором единиц измерения;  $\gamma_r$  – угол рассогласования между векторами.

Угол рассогласования  $\gamma_T$  зависит только от свойств магнитного материала ротора и не зависит от величины нагрузки на валу двигателя. Поэтому вращающий момент гистерезисного двигателя не зависит от частоты вращения ротора, и механическая характеристика гистерезисного двигателя представляет собой ломаную линию  $ABD$  (рис. 3.3). Участок  $AB$  этой характеристики соответствует разгону двигателя до синхронной частоты вращения, а участок  $BD$  – работе двигателя в синхронном режиме.

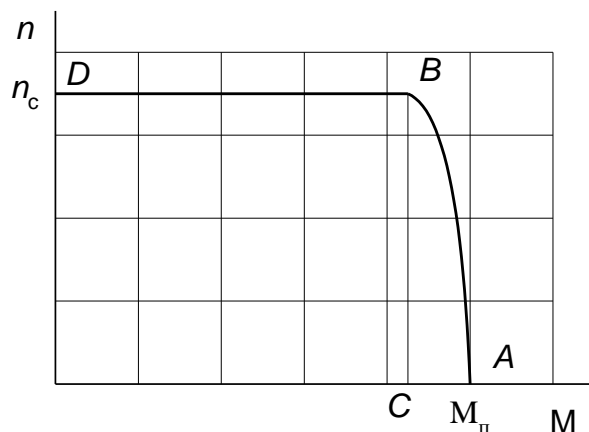


Рисунок 3.3. Механическая характеристика гистерезисного двигателя

В реальном гистерезисном двигателе при разгоне ротора кроме гистерезисного момента имеет место и некоторый асинхронный момент, обусловленный вихревыми токами в роторе, который изменяется от максимального значения, равного отрезку  $AC$  при пуске до нуля при синхронном вращении ротора. Поэтому, пусковой момент  $M_п$  реального гистерезисного двигателя несколько превышает его максимальный синхронный момент, а реальная механическая характеристика (рис. 3.3) изображается кривой  $ABD$ .

Гистерезисные двигатели по сравнению с обычными синхронными двигателями, возбуждаемыми постоянными магнитами, имеют несколько меньший коэффициент мощности  $\cos\varphi=0,3-0,8$  и более низкий КПД  $\eta<0,6$ , что объясняется сравнительно слабой намагниченностью ротора. Чтобы улучшить энергетические показатели гистерезисных двигателей их перевозбуждают, то есть кратковременно повышают напряжение на зажимах двигателя в 1,5–2 раза, а затем его снижают до номинального значения. Кратковременное повышение напряжения позволяет дополнительно подмагнитить ротор гистерезисного двигателя. Гистерезисные двигатели благодаря простой конструкции и хорошим свойствам получили широкое применение в маломощных системах

автоматического управления, а также в прецизионных гироскопических устройствах.

### Описание экспериментальной установки

Схема установки для испытания трёхфазного гистерезисного двигателя представлена на рис. 3.4. Питание двигателя осуществляется от трёхфазной сети через трансформатор, с помощью которого изменяется напряжение на зажимах двигателя. Момент на валу двигателя создаётся и изменяется с помощью электромагнитного тормоза, путем регулирования напряжения питания его катушки. Скорость вращения измеряется с помощью синхронного тахогенератора, конструктивно выполненного в одном корпусе с гистерезисным двигателем.

### Программа работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия гистерезисного двигателя.
2. Снять опытным путём:
  - 2.1. механическую характеристику гистерезисного двигателя при номинальном напряжении питания;
  - 2.2. рабочие характеристики гистерезисного двигателя при номинальном напряжении;
  - 2.3. рабочие характеристики двигателя после подмагничивания.
3. Построить по результатам эксперимента:
  - 3.1. механическую характеристику гистерезисного двигателя  $n=f(M)$  при номинальном напряжении питания;
  - 3.2. рабочие характеристики гистерезисного двигателя  $P_s, P_l, I, \eta, \cos\varphi=f(M)$  при номинальном напряжении;
  - 3.3. рабочие характеристики гистерезисного двигателя  $P_s, P_l, I, \eta, \cos\varphi=f(M)$  после подмагничивания.
4. Проанализировать эффективность подмагничивания.

### Методические указания

1. *Механическая характеристика* двигателя снимается во всем диапазоне возможных частот вращения. После включения стенда, двигатель запускается на холостом ходу (электромагнитный тормоз выключен). Затем увеличивают момент нагрузки, фиксируя показания тахогенератора (частота вращения) и снимают 3–4 точки в синхронном режиме работы двигателя. Продолжая увеличивать нагрузку, *четко фиксируют величину момента выхода двигателя из синхронизма*. В асинхронном режиме также снимают 3–4 экспериментальные точки. Данные экспериментов записывают в табл. 3.1, по которой строятся механические характеристики гистерезисного двигателя.

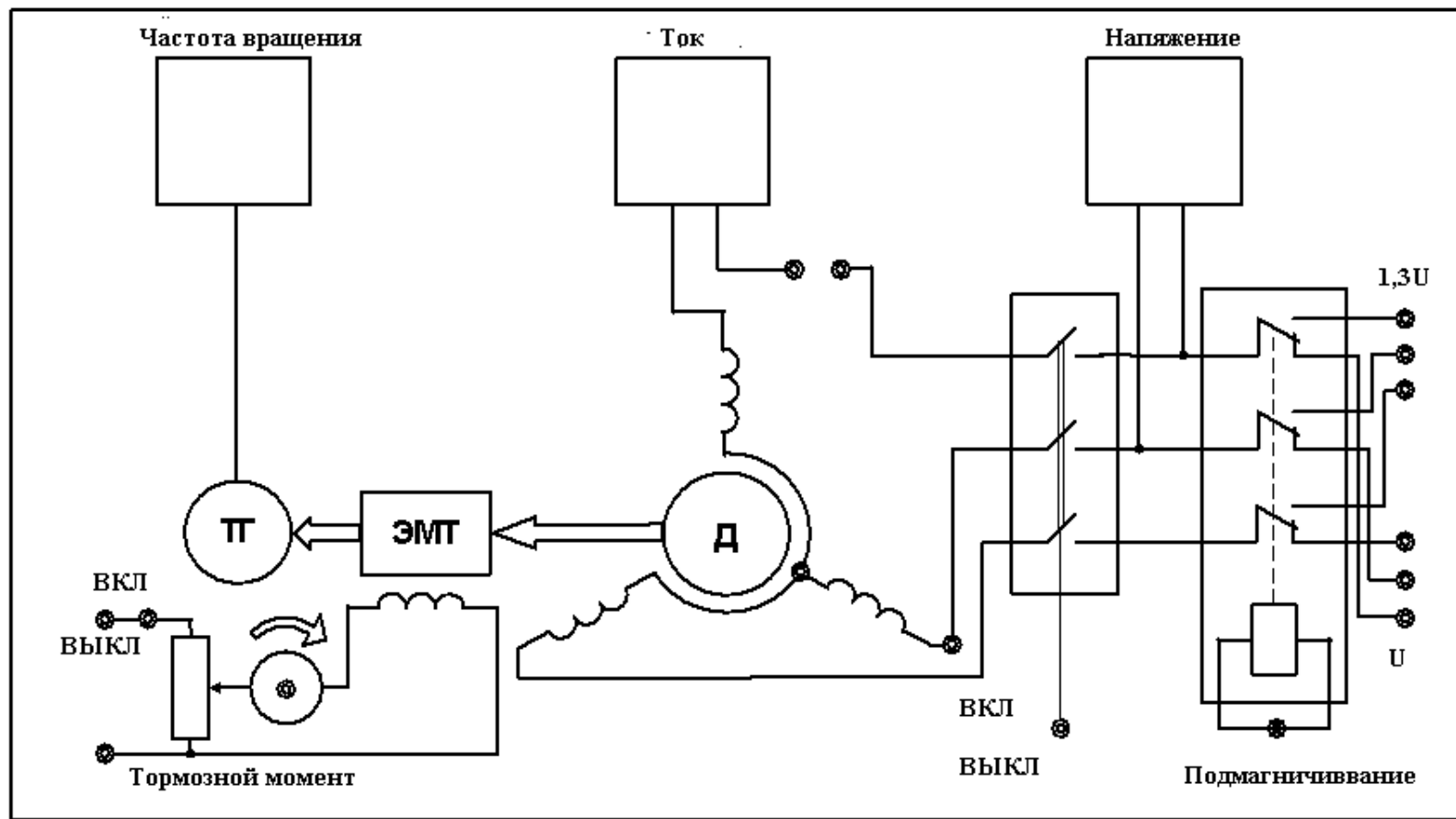


Рисунок 3.4. Схема экспериментальной установки

2. **Рабочие характеристики** гистерезисного двигателя при номинальном напряжении питания снимаются методом, приведенным выше, при этом в цепь питания двигателя включается ваттметр по схеме рис. 3.5 (допускается одновременное снятие механической и рабочих характеристик). Нагружая двигатель, снимают величины момента, частоты вращения, тока статора и мощности, потребляемой двигателем. Экспериментальные данные заносят в табл. 3.1

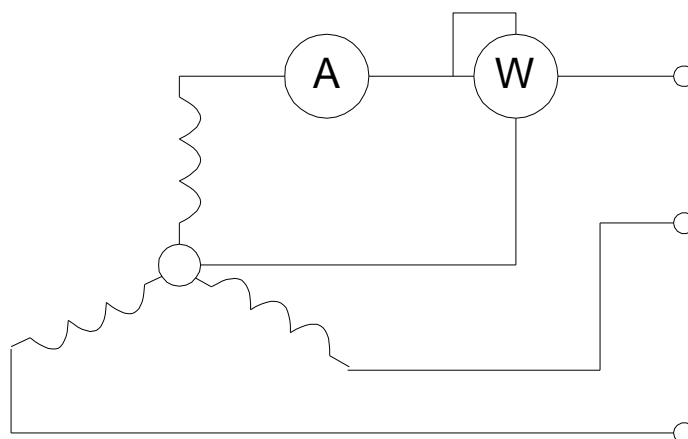


Рисунок 3.5. Схема включения ваттметра

Таблица 3.1

Рабочие характеристики гистерезисного двигателя

$M$	$I$	$U$	$n$	$P_1$	$P_s$	$P_2$	$\eta$	$\cos\varphi$
Гсм	А	В	об/мин	Вт	Ва	Вт	–	–

Величины, входящие в табл. 3.1 и не снимаемые в процессе эксперимента, рассчитываются в соответствии со следующими выражениями

$$P_2 = 1,03 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot n; \quad P_s = \sqrt{3} \cdot I \cdot U; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad \cos\varphi = \frac{P_1}{P_s},$$

где  $U$  – линейное напряжение питания,  $I$  – фазный ток гистерезисного двигателя.  $M$  – величина момента в Гсм,  $n$  – частота вращения в об/мин,  $P_1$  – мощность в Вт, измеренная ваттметром.

Рабочие характеристики двигателя после подмагничивания снимаются по тем же схемам, что и при номинальном напряжении. Для осуществления подмагничивания поступают следующим образом: предварительно повышают напряжение питания до  $1,3 U_n$  нажатием на

кнопки «Подмагничивание», и запускают двигатель на холостом ходу. После достижения ротором синхронной частоты вращения, кнопка «Подмагничивание» отпускается, и двигатель продолжает работать при номинальном напряжении. Снимаются рабочие характеристики двигателя аналогично приведенным для номинального напряжения питания. Данные заносятся в табл. 3.2, аналогичную табл. 3.1. Подмагничивание приводит к улучшению рабочих свойств двигателя в синхронном режиме за счет повышения величины магнитного потока ротора. При снятии характеристик необходимо четко следить за моментом выхода ротора из синхронизма.

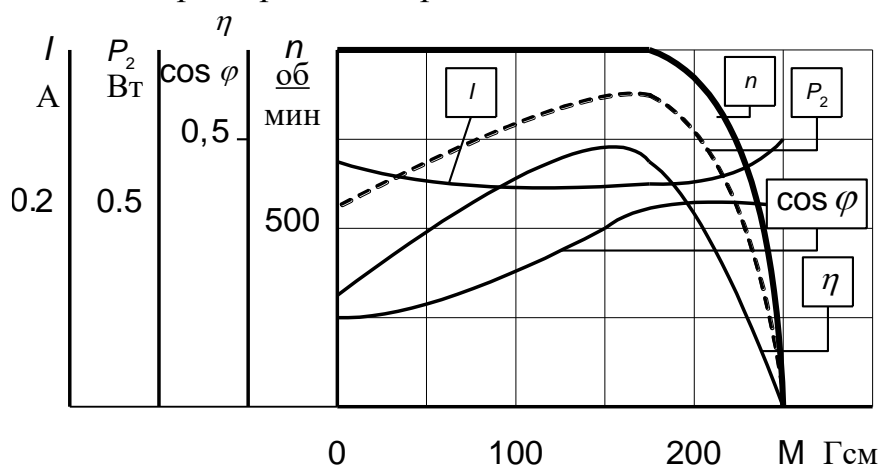


Рисунок 3.6. Рабочие характеристики гистерезисного двигателя

В выводах к работе следует дать сравнительную характеристику свойств подмагниченного двигателя и определить целесообразность проведения такого режима. Общий вид рабочих характеристик гистерезисного двигателя показан на рис. 3.6.

### Контрольные вопросы и задания

1. Какова конструкция гистерезисного двигателя?
2. Какова природа гистерезисного момента?
3. Объясните механическую характеристику гистерезисного двигателя.
4. Назовите достоинства и недостатки гистерезисного двигателя.
5. Что даёт перевозбуждение гистерезисного двигателя?
6. Каким образом влияет степень намагниченности ротора гистерезисного двигателя на его ток и потребляемую мощность?

### Литература

1. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие / Ф. М. Юферов. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Москва: Высшая школа, 1988. – 479 с.. – ISBN 506001312-X.

## 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТАХОГЕНЕРАТОРОВ

**Цель работы:** ознакомиться с основными типами тахогенераторов постоянного и переменного токов, их устройством, принципами действия, основными свойствами и экспериментально исследовать их основные характеристики.

### Объект исследования

*Тахогенераторами* (ТГ) называются электрические *микромашинны*, работающие в генераторном режиме, выходное напряжение которых пропорционально угловой частоте вращения их ротора.

Тахогенераторы *применяются*:

- для получения демпфирующих и форсирующих сигналов в схемах автоматической обработки;
- при вычислительных операциях в счетно–решающих системах;
- для контроля частоты вращения различных машин и механизмов;
- для исследования процессов разбега двигателей различных типов, то есть для снятия зависимости частоты вращения в функции времени  $n=f(t)$ .

Тахогенераторы *делятся по роду тока* на тахогенераторы переменного тока (асинхронные и синхронные) и тахогенераторы постоянного тока (с независимым электромагнитным возбуждением или с постоянными магнитами).

По своему *назначению* в автоматических устройствах тахогенераторы делятся на две группы:

- демпфирующие или форсирующие для обратных связей;
- точные (измерительные) для дифференцирующих и интегрирующих звеньев в счетно–решающих устройствах.

В соответствии с назначением *требования* к выходным характеристикам тахогенераторов указанных групп различны. Например, к тахогенераторам, предназначенным для работы в качестве элементов обратной связи, практика не предъявляет требований высокой точности (нелинейность выходной характеристики не более 0,5–3 %), однако устанавливает требование большой крутизны выходной характеристики. В то же время, нелинейность выходной характеристики тахогенераторов, предназначенных для измерения частоты вращения, не должна превышать 0,1–0,5 %, а работающих в счетно–решающих устройствах 0,05–0,5 %.

Вторым, немаловажным требованием, предъявляемым к тахогенераторам, является требование максимальной крутизны выходной характеристики, то есть максимальное отношение напряжения к его частоте вращения в начальной части выходной характеристики. Это

особенно существенно для тахогенераторов, работающих в электроприводах элементами обратной связи.

Кроме этих специфических требований, к тахогенераторам, как и любой электрической машине, предъявляются требования максимального быстродействия, высокой надежности, малой массы и габаритов, отсутствия всякого рода помех и шумов и т. д.

В настоящей работе исследованиям подвергаются асинхронные тахогенераторы переменного тока и коллекторные тахогенераторы постоянного тока с магнитоэлектрическим возбуждением.

Конструктивно *асинхронный тахогенератор* аналогичен двухфазному асинхронному двигателю с полым немагнитным ротором.

Тахогенератор имеет два статора (внешний и внутренний), на которых расположены две однофазные обмотки, сдвинутые на угол  $90^\circ$  (рис. 4.1). Нередко обмотки размещаются на двух статорах, при этом генераторная ( $\Gamma$ ) располагается, как правило, на внутреннем статоре.

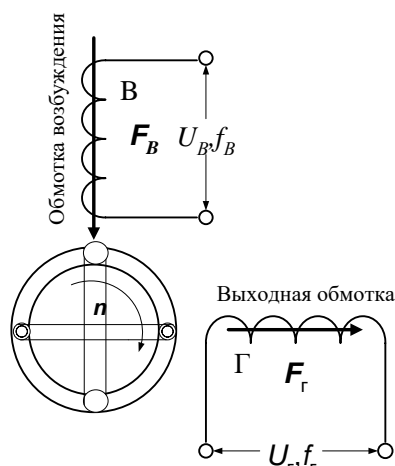


Рисунок 4.1. Схема асинхронного тахогенератора

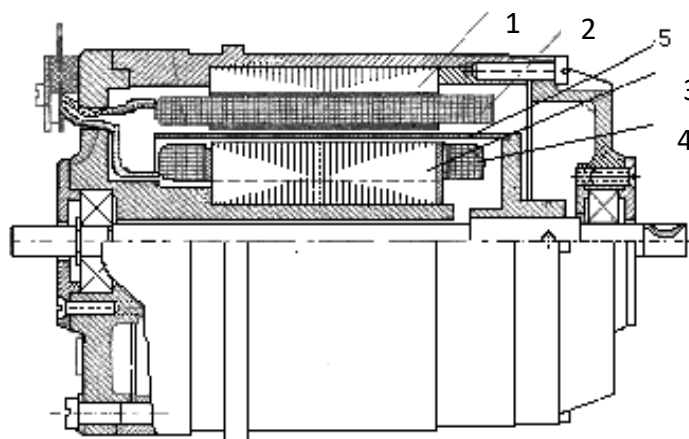


Рисунок 4.2. Конструкция асинхронного тахогенератора с полым ротором:

- 1 – внешний статор; 2 – обмотка возбуждения;
- 3 – внутренний статор; 4 – генераторная обмотка; 5 – полый ротор

*Принцип действия* асинхронного тахогенератора состоит в следующем: при неподвижном роторе (рис. 4.1) обмотка В создает пульсирующий поток  $\Phi_B$ , не сцепленный с обмоткой Г (в случае идеального сдвига обмоток на  $90^\circ$ ). Ось этого потока совпадает с осью обмотки возбуждения (будем считать его продольным  $\Phi_d$ ). Пульсирующий поток  $\Phi_d$  индуцирует в контурах роторной обмотки, оси которых совпадают с осью магнитного потока, *трансформаторную*



ЭДС, которая создает ток в этих контурах и намагничивающую силу по продольной оси. Взаимодействие этой намагничивающей силы с намагничивающей силой обмотки В приводит лишь к изменению тока возбуждения, но не меняет положения потока обмотки В в пространстве. Поэтому в генераторной обмотке Г идеальной машины при неподвижном роторе ЭДС не наводится.

Если ротор асинхронного тахогенератора вращается, то кроме трансформаторной ЭДС потоком  $\Phi_d$  в роторе наводится ЭДС вращения. ЭДС вращения наводится в контурах ротора, оси которых перпендикулярны оси продольного потока.

Однако, точной магнитной симметрии (квадратуры осей обмоток) практически достигнуть невозможно и часть потока  $\Phi_v$  оказывается трансформаторно связанной с обмоткой Г, вызывая в ней наличие остаточной ЭДС.

Главным техническим показателем качества работы асинхронного тахогенератора, как и любого типа тахогенератора переменного и постоянного тока, является линейность выходной характеристики, представляющей зависимость выходного напряжения от частоты вращения:  $U=f(n)$  или  $U=f(v)$ , где  $v=n/n_c$  – относительная частота вращения.

Как известно, в тахогенераторе любого типа происходит дифференцирование механической величины, то есть линейного или углового перемещения, основанное на том, что ЭДС, индуктируемая при постоянном потоке  $\Phi$ , пропорциональна частоте вращения машины:

$$E=Cn\Phi=C_1 n=C_2 d\alpha/dt,$$

где  $E$  – выходная ЭДС тахогенератора;  $C$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  – коэффициенты пропорциональности;  $n$  – угловая частота вращения;  $\alpha$  – угол поворота.

Однако, только в идеальном тахогенераторе зависимость выходной ЭДС или выходного напряжения от частоты вращения можно считать строго линейной. У реального тахогенератора имеют место погрешности выходных величин, вызываемые рядом факторов.

Причинами, вызывающими погрешности, то есть отклонение выходной характеристики от линейной, являются:

- реакция якоря (или ротора);
- изменение параметров (сопротивлений обмоток) под влиянием температуры, насыщения и других причин;
- изменение некоторых параметров в функции частоты вращения (например, сопротивления полого ротора);
- падение напряжения при включении выходной обмотки на нагрузку;

– неизбежные технологические неточности при изготовлении тахогенераторов.

Выходная характеристика  $U = f(v)$  асинхронного тахогенератора может быть записана в комплексной форме:

$$\dot{U} = -\frac{j \cdot k \cdot U_B}{A - B \cdot v^2} \cdot v, \quad (1)$$

где  $U_B$  – напряжение возбуждения;  $\dot{U}$  – выходное напряжение;  $v$  – относительная частота вращения;  $k = \frac{w_\Gamma}{w_B}$  – коэффициент трансформации

обмоток статора (отношение эффективных витков соответствующих обмоток);  $A$  и  $B$  – комплексные коэффициенты, зависящие от параметров схемы замещения тахогенератора:

$$A = \frac{1}{Z_H} \cdot \left( \frac{k^2 \cdot Z_s^2 \cdot C^2}{r_R} + 2Z_s \cdot C + r_R \right) + \frac{Z_s \cdot C^2}{r_R} + C, \quad C = 1 + \frac{Z_s}{r_R} \quad (2)$$

Как видно из уравнений (1, 2) линейность выходной характеристики нарушает содержащаяся в знаменателе частота вращения в квадрате. Происхождение этого фактора нелинейности обусловлено непостоянством потока возбуждения и сопротивления ротора при изменении частоты вращения.

Для получения линейности выходной характеристики, то есть для уменьшения погрешности, при проектировании тахогенератора принимают меры по уменьшению либо коэффициента  $B$ , либо относительной частоты вращения  $v$ .

Так как коэффициент  $B$  определяется выражением

$$B = \frac{k^2}{Z_H} \cdot \frac{Z_s^2}{r_R} + \frac{Z_s}{r_R}, \quad (3)$$

то при заданной нагрузке  $Z_H$  уменьшение  $B$  может быть достигнуто увеличением активного сопротивления ротора  $r_R$  путем применения материала с высоким удельным сопротивлением. К этому же приводит уменьшение полного сопротивления статора  $Z_s$ . Последнее сопряжено с увеличением паза, а, следовательно, и объема машины.

Как правило, тахогенераторы, особенно из категории точных, в схемах автоматики работают в режимах близких к холостому ходу, то есть при  $Z_H = \infty$ , и уменьшение коэффициента  $B$  достигается, главным образом, за счет увеличения сопротивления ротора. При заданной максимальной рабочей частоте вращения выгодно исполнение

тахогенераторов на повышенную частоту питания, так как при этом относительная частота вращения  $v_{\max} = \frac{n_{\max} \cdot p}{60 \cdot f}$  будет меньше, и, следовательно, уменьшается отклонение от линейности выходной характеристики за счет значительного уменьшения  $v_{\max}^2$ .

В современных асинхронных тахогенераторах с полым ротором полная погрешность при максимальной частоте вращения составляет  $\Delta U_V = (0,1 \div 2,5) \%$ , диапазон максимальных рабочих частот вращения –  $\bar{\omega} = v_{\max} / v = 0,1 \div 0,7$ , а крутизна выходной характеристики  $\omega = U_{\text{ВЫХ}} / n = 1 \div 10$ .

Кроме двух выше указанных технических показателей (линейность и крутизна), качество работы тахогенератора оценивается также величиной остаточной ЭДС (нулевой сигнал). *Остаточная ЭДС  $E_0$*  – это ЭДС в генераторной обмотке при неподвижном роторе. Амплитуда остаточной ЭДС зависит от углового положения ротора, и при повороте ротора можно выделить некоторую «постоянную» составляющую остаточной ЭДС  $E_{0=}$  и «переменную»  $E_{0\approx}$ . У современных типов тахогенераторов  $E_{0=} = 25\text{--}100$  мВ,  $E_{0\approx} = 5\text{--}7$  мВ. Для снижения остаточной ЭДС, особенно у точных тахогенераторов, генераторную обмотку помещают на внутреннем статоре, который может поворачиваться, вводят компенсирующую емкость в цепь выходной обмотки, качественно выполняют полый ротор применением специальных технологий.

*Тахогенераторы постоянного тока* (рис. 4.3) по принципу действия и конструкции представляют собой коллекторные машины с независимым возбуждением, чаще магнитоэлектрическим. Существенным достоинством тахогенератора постоянного тока с постоянными магнитами является отсутствие необходимости иметь источник энергии для возбуждения и низкая теплочувствительность. Особенностью тахогенераторов постоянного тока являются малые токи нагрузки и, соответственно, малая плотность тока в щеточно–коллекторном контакте. Теория скользящего контакта показывает, что при малых плотностях тока в контактирующей паре щетка–коллектор сопротивление контакта не остается постоянным при изменении плотности тока, а изменяется так, что постоянным остается падение напряжение в контакте  $U_{\text{щ}}$ . Это явление существенно отличает тахогенератор от силовых генераторов постоянного тока.

Выходной характеристикой тахогенератора является зависимость напряжения на зажимах якоря от частоты его вращения  $U_{\text{я}} = f(n)$ .

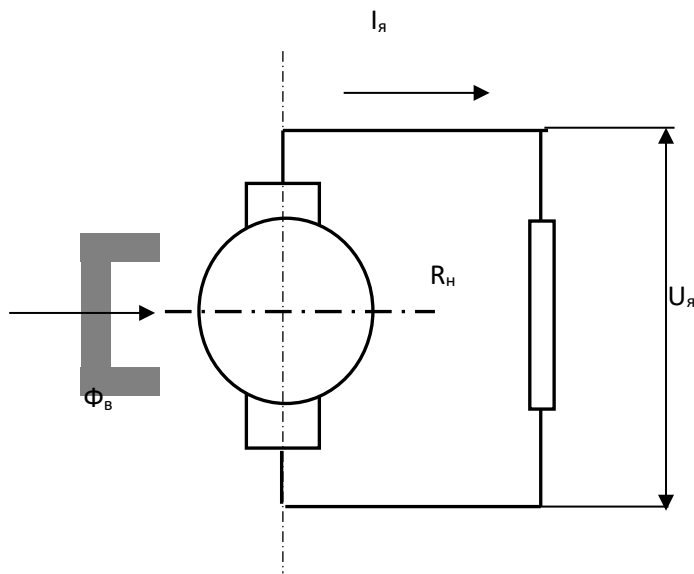


Рисунок 4.3. Тахогенератор постоянного тока

Известно, что уравнение выходной характеристики тахогенератора при нагрузке, с учетом влияния реакции якоря и изменения сопротивления щеточно–коллекторного контакта, может быть представлено в следующем виде:

$$U = \frac{C \cdot n}{1 + \frac{r_{\text{я}}}{R_{\text{н}}} + \frac{C_{\text{ф}} \cdot n}{R_{\text{н}}}} - \frac{U_{\text{щ}}}{1 + \frac{r_{\text{я}}}{R_{\text{н}}} + \frac{C_{\text{ф}} \cdot n}{R_{\text{н}}}}, \quad (4)$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности между ЭДС якорной обмотки и частотой вращения  $n$  при стабилизированном потоке возбуждения;  $R_{\text{н}}$  – сопротивление нагрузки;  $r_{\text{я}}$  – сопротивление якорной обмотки тахогенератора;  $C_{\text{ф}}$  – коэффициент пропорциональности между размагничивающим потоком и током якоря.

Анализ уравнения (4) показывает, что выходная характеристика является нелинейной (наличие частоты вращения в знаменателе) и начинается не из начала координат, так как  $U_{\text{щ}}$  имеет для реальных машин конечное значение. На рис. 4.4 приведены выходные характеристики тахогенератора постоянного тока в идеальном случае при отсутствии нагрузки на выходе ( $R_{\text{н}} = \infty, U_{\text{щ}} = 0$ ) и ( $R_{\text{н}} = \infty, U_{\text{щ}} \neq 0$ ), а также с учетом реальной нагрузки ( $R_{\text{н}} \neq \infty, U_{\text{щ}} \neq 0$ ).

Здесь явно просматривается так называемая *зона нечувствительности*, т. е. зона частот вращения, где вращающийся тахогенератор не выдает напряжения.

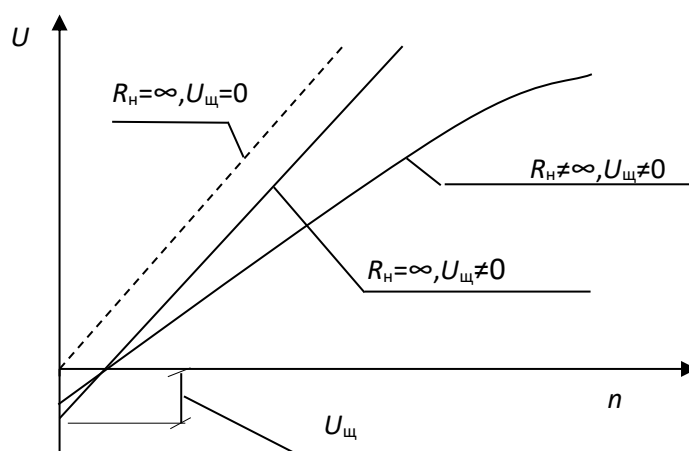


Рисунок 4.4. Характеристики тахогенератора постоянного тока

Для уменьшения этого явления в тахогенераторах специально подбирается материал трущейся пары (щетка–коллектор), обеспечивающий наименьшее падение напряжения при нагрузке. Так, в прецизионных тахогенераторах коллектор покрывается тонким слоем серебра, а щетки выполняются с серебряными напайками, либо серебрено–графитовыми. Это позволяет уменьшить зону нечувствительности до долей процента.

Также как у асинхронного тахогенератора, качество работы тахогенератора постоянного тока определяется основными техническими показателями: линейностью и крутизной выходной характеристики, а также асимметрией выходного напряжения и шириной зоны нечувствительности.

Нелинейность выходной характеристики обусловлена, главным образом, размагничивающим действием реакции якоря. Последнее возможно либо при сдвиге щеток с геометрической нейтрали, либо при насыщении полюсной системы. У современных машин отклонение от линейности при максимальной рабочей частоте вращения составляет  $\Delta U = 0,5\text{--}3\%$ .

Крутизна выходной характеристики определяется выражением

$$k_e = \frac{\Delta U}{\Delta n} \approx \frac{dU}{dn} = \frac{(1 + \frac{r_{я}}{R_H}) \cdot C + U_{щ} \frac{C\phi}{R_H}}{(1 + \frac{r_{я}}{R_H} + \frac{C\phi}{R_H} \cdot n)^2} \quad (5)$$

и зависит, в основном, от соотношения сопротивлений якоря и нагрузки. Для увеличения крутизны выходной характеристики обычно принимают  $R_H \gg r_{я}$ . Это обеспечивает современным тахогенераторам постоянного тока величину  $k_e = 3-100$  мВ/об/мин.

Важным техническим показателем качества работы тахогенератора постоянного тока является *асимметрия выходного напряжения*, которая представляет собой разность между выходными напряжениями при правом и левом вращении при одной и той же нагрузке. Выраженная в относительных единицах асимметрия выходного напряжения представляется в виде

$$\Delta U_{ас} = 2 \frac{U_{пр} - U_{лев}}{U_{пр} + U_{лев}} \cdot 100\% \quad (6)$$

и, в основном, обусловлена появлением размагничивающей реакции якоря из-за смещения щеток с геометрической нейтрали, а также рядом технологических факторов.

В современных тахогенераторах постоянного тока асимметрия выходного напряжения составляет (1-3) %.

На рис. 4.5 показана конструкция тахогенератора постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов.

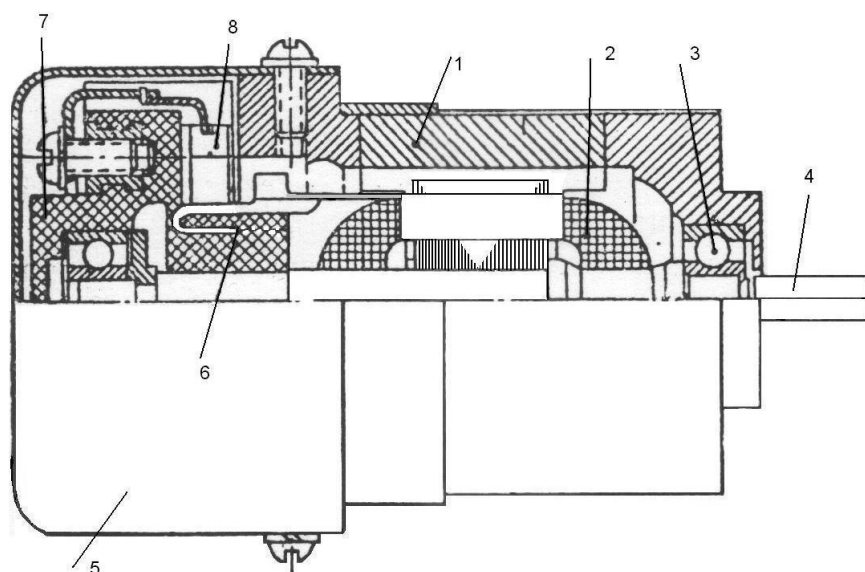


Рисунок 4.5. Конструкция тахогенератора с постоянными магнитами:

1 – корпус (постоянный магнит); 2 – якорь; 3 – подшипник; 4 – вал;

5 – кожух; 6 – коллектор; 7 – щит; 8 – щетки

### Описание экспериментальной установки

Принципиальная электрическая схема установки для исследования тахогенераторов приведена на рис. 4.6. Экспериментальная установка

состоит из электромашинного агрегата и приборного стенда. Электромашинный агрегат предназначен для осуществления вращения тахогенераторов с различными частотами, а также установки их роторов в необходимое для измерений положение. Вращение обеспечивает двухфазный асинхронный двигатель типа СМВ, управление которым производится с приборного блока. В работе используются два типа тахогенераторов.

#### Тахогенератор постоянного тока

- тип – Д-52;
- номинальное напряжение – 28 В;
- частота вращения 0–2000 об/мин;
- крутизна – 15 мВ/об/мин.

#### Асинхронный тахогенератор

- тип – ДИГ-3;
- напряжение возбуждения – 36 В;
- частота вращения 0–10000 об/мин;
- крутизна – 0.4 мВ/об/мин;
- частота возбуждения – 400 Гц.

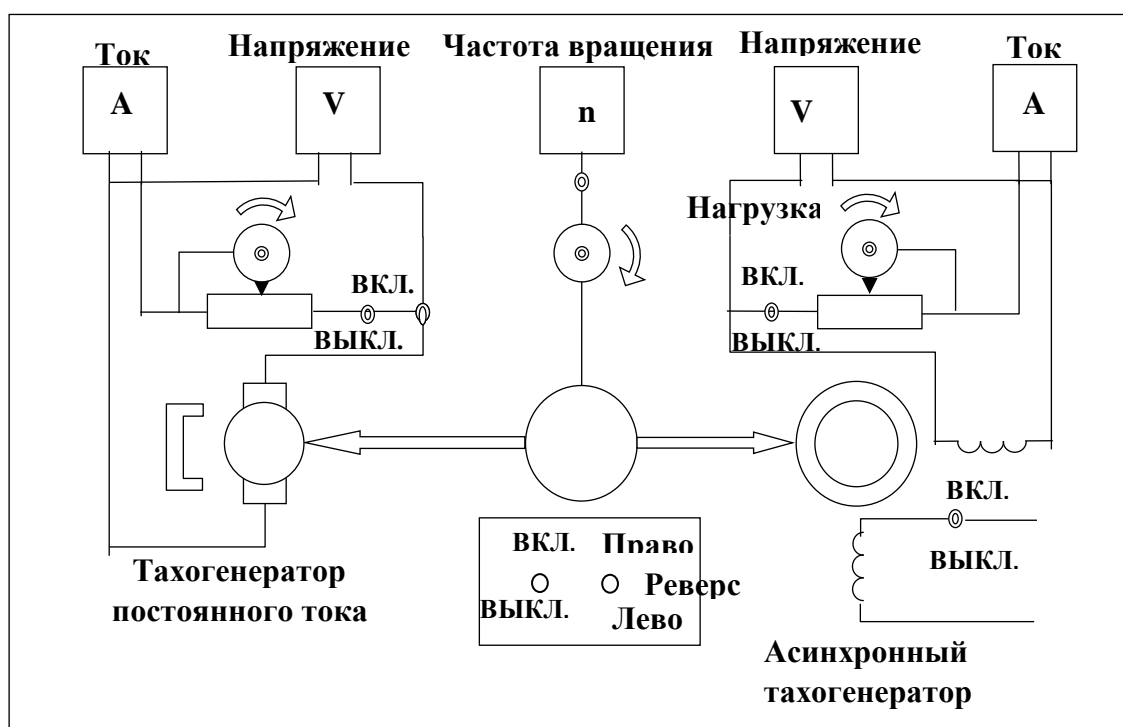


Рисунок 4.6. Схема экспериментальной установки

Измерение выходного напряжения тахогенераторов осуществляется с помощью лампового вольтметра с большим входным сопротивлением, частота выходного напряжения контролируется осциллографом. Частота вращения агрегата измеряется синхронным тахогенератором,

работающим только на тарированный измерительный прибор, вынесенный на приборный стенд.

### **Программа работы**

#### ***Исследование асинхронного тахогенератора***

1. Изучить конструкцию и принцип действия асинхронного тахогенератора.
2. Снять опытным путем:
  - 2.1. выходные характеристики тахогенератора  $U = f(n)$  для режима холостого хода и активной нагрузки;
  - 2.2. внешнюю характеристику тахогенератора  $U = f(R_H)$  при постоянной частоте вращения;
  - 2.3. величину остаточной ЭДС  $E_0$  при отсутствии частоты вращения  $n = 0$ , амплитуду ее переменной составляющей и зависимость  $E_0$  от углового положения ротора  $\alpha$ ;
  - 2.4. зависимость частоты выходного напряжения от частоты вращения  $f_{\text{ВЫХ}} = f(n)$ .
3. Рассчитать и построить по результатам эксперимента:
  - 3.1. выходные характеристики тахогенератора для режимов холостого хода и активной нагрузки с постоянным сопротивлением  $R_H = \text{const}$ ;
  - 3.2. внешнюю характеристику тахогенератора  $U = f(R_H)$  при номинальной частоте вращения;
  - 3.3. зависимость величины остаточной ЭДС от углового положения ротора  $E_0 = f(\alpha)$ ;
  - 3.4. крутизну выходной характеристики для различных сопротивлений нагрузки;
  - 3.5. зависимость частоты выходного напряжения от частоты вращения  $f_{\text{ВЫХ}} = f(n)$ .

### **Методические указания**

#### ***Асинхронный тахогенератор***

1. ***Выходные характеристики тахогенератора***  $U = f(n)$  и  $f_{\text{ВЫХ}} = f(n)$  при  $R_H = \text{const}$  снимаются одновременно. Для этого исполнительным двигателем устанавливается минимально возможная частота вращения тахогенератора. Осциллограф подключается параллельно ламповому вольтметру, по которому производится оценка величины напряжения, и измеряется период напряжения  $Lf$  (в делениях шкалы). Затем, не меняя настроек, изменяют частоту вращения тахогенератора до максимально возможной, регистрируя 5–7 точек



длительности развертки осциллографа. Эксперименты проводят для трех разных сопротивлений нагрузки, результаты заносят в табл. 4.1.

Таблица 4.1

*Выходные характеристики асинхронного тахогенератора*

№	$n$	$R_n = \infty$		$R_n =$		$R_n =$	
		$U$	$L_f$	$U$	$L_f$	$U$	$L_f$
	об/мин	В	дел	В	дел	В	дел
1							
2							
3							
4							
5							

Величина сопротивления  $R_n$  определяется по методу амперметра и вольтметра с учетом того, что нагрузка чисто резистивная. Частота выхода определяется по настройкам развертки осциллографа и длительности периода выходного напряжения.

По результатам эксперимента строятся (на одном графике) выходные характеристики  $U=f(n)$  и  $f_{\text{вых}}=f(n)$  при  $R_n=\text{const}$ .

2. **Внешняя характеристика** тахогенератора снимается при постоянной частоте вращения, равной  $n=1500$  об/мин. Поддерживая постоянную частоту вращения, изменяют сопротивление нагрузки и регистрируют величину выходных напряжения и тока в 4–6 точках. Результаты измерений заносят в табл. 4.2.

Таблица 4.2

*Внешняя характеристика асинхронного тахогенератора*

№	1	2	3	4	5	6
$U_n, \text{В}$						
$I_n, \text{А}$						

3. **Измерение остаточной ЭДС** проводится при неподвижном тахогенераторе. Поворачивая ротор тахогенератора через  $45^\circ$  от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  при включенной обмотке возбуждения, производят замеры напряжения на обмотке выхода. Результаты экспериментов заносят в табл. 4.3.

Таблица 4.3

*Измерение остаточной ЭДС*

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha$	0	45	90	135	180	225	270	315
$E_0$								

По результатам экспериментов строится зависимость  $E_0=f(\alpha)$  и рассчитывается значение остаточной ЭДС  $E_0$  и амплитуда ее переменной составляющей  $e_0$ . За величину остаточной ЭДС принимают максимальное из замеренных значений  $E_0=E_{0\max}$ , а амплитуда переменной составляющей  $e_0=E_{0\max} - E_{0\min}$ .

### **Тахогенератор постоянного тока**

1. **Выходные и внешняя характеристики** тахогенератора постоянного тока снимаются аналогично таким же асинхронного тахогенератора. Результаты экспериментов заносятся в таблицы, идентичные табл. 4.1, 4.2.

2. **Зона нечувствительности** тахогенератора постоянного тока определяется по графикам выходных характеристик  $U=f(n)$  путем их аппроксимации в зону малых частот вращения до пересечения с осью абсцисс.

3. **Асимметрия выходного напряжения** тахогенератора определяется как отношение разности между значениями напряжений при правом и левом направлении вращения к среднему значению выходного напряжения:

$$\Delta U_{\text{ас}} = 2 \cdot \frac{U_{\text{пр}} - U_{\text{лев}}}{U_{\text{пр}} + U_{\text{лев}}} \cdot 100\% .$$

Асимметрия измеряется только при номинальной частоте вращения тахогенератора, нагруженного постоянным сопротивлением.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Назовите основные причины нелинейности выходных характеристик тахогенераторов, оцените их величину для разных нагрузок.

2. Чем обусловлено появления нулевого сигнала асинхронных тахогенераторов; почему величина нулевого сигнала зависит от углового положения ротора?

3. Какова зависимость частоты выходного напряжения асинхронного тахогенератора от частоты вращения его ротора?

4. Объясните причины появления зоны нечувствительности тахогенераторов постоянного тока, дайте оценку ее величины.

5. Каковы причины появления асимметрии тахогенераторов постоянного тока, дайте оценку ее величины?

### **Литература**

1. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие / Ф. М. Юферов. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Москва: Высшая школа, 1988. – 479 с.. – ISBN 506001312-X.

## 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Цель работы:** ознакомиться с принципом действия и основным конструктивными типами поворотных трансформаторов, экспериментально определить их возможности функционального преобразования и определить их точность.

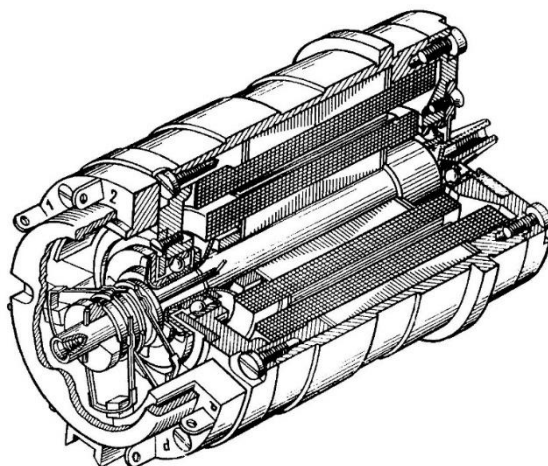
### Объект исследования

*Поворотные трансформаторы (ПТ) – это индукционные электрические машины, предназначенные для преобразования механического угла поворота в электрический сигнал – напряжение, амплитуда которого пропорциональна какой-либо функции этого угла. В соответствии с реализуемым функциональным преобразованием поворотные трансформаторы делятся на:*

- синусные  $U = U_{\max} \cdot \sin \alpha$ ,
- синус–косинусные  $U_A = U_{\max} \cdot \sin \alpha$ ,  $U_B = U_{\max} \cos \alpha$ ,
- линейные  $U = K \cdot U_{\max} \cdot \alpha$ , где  $K = \text{const}$ .

*Конструктивно поворотные трансформаторы выполняются в двух исполнениях: барабанном (двухполюсные) и дисковом (многополюсные). С точки зрения подвода энергии на вращающийся ротор поворотные трансформаторы выполняются со скользящим контактом и бесконтактные (с кольцевым трансформатором).*

Наибольшее распространение в системах автоматики получили двухполюсные поворотные трансформаторы барабанного типа, общий вид одного из которых представлен на рис. 5.1.



*Рисунок 5.1. Общий вид двухполюсного поворотного трансформатора*

В таком исполнении конструкция поворотного трансформатора аналогична двухфазным исполнительным двигателям с контактными кольцами. Пакеты статора и ротора машины выполняются

шихтованными из листовой электротехнической стали или пермаллоя. В полузакрытых пазах статора и ротора располагаются двухфазные обмотки, попарно сдвинутые друг относительно друга на  $90^\circ$  эл. (рис. 5.2). Обычно обмотки статора  $S_1 - S_2$  (главная статорная) и  $K_1 - K_2$  (компенсационная) выполняются идентично, обмотки ротора  $A_1 - A_2$  (синусная) и  $B_1 - B_2$  (косинусная) также выполняются одинаковыми.

Особенностью конструктивного выполнения магнитопроводов и обмоток поворотных трансформаторов является то, что у них взаимоиндуктивность между обмотками статора и ротора изменяется с минимальным отклонением от синусоидального закона от углового положения ротора. Это достигается тщательной штамповкой и изолировкой пластин магнитопровода, а также применением веерной шихтовки. Для обеспечения минимального влияния зубчатости статора и ротора тщательно подбираются их числа пазов, точно выполняется скос пазов. Обмотки статора и ротора выполняются как обмотки высокой точности. При выборе их типа стремятся максимально снизить амплитуды высших пространственных гармонических в кривой магнитного поля, а также исключить взаимодействия обмоток на высших гармонических. Здесь нашли применение так называемые синусные обмотки, отличающиеся от обычных распределением чисел витков в секциях по закону синуса их углового положения.

*Основным требованием*, предъявляемым к поворотным трансформаторам, является требование точности воспроизведения функциональных зависимостей.

Наиболее часто встречающиеся требования к погрешностям составляют:

– максимальная погрешность отображения синусной зависимости (для синусных и синус–косинусных поворотных трансформаторов) в процентах от максимального значения выходного напряжения –  $0,005 \div 0,2$  %;

– максимальная погрешность отображения линейной зависимости (для линейных поворотных трансформаторов) в процентах от максимального значения выходного напряжения –  $0,05 \div 0,2$  %.

### **Описание экспериментальной установки**

Экспериментальная установка (рис. 5.2) состоит из *приборного блока* и *электромеханического агрегата*, укрепленного на нем. В лаборатории испытывается синусно–косинусный малогабаритный трансформатор типа ВТМ–1, который на роторе и статоре имеет по две распределенные обмотки.

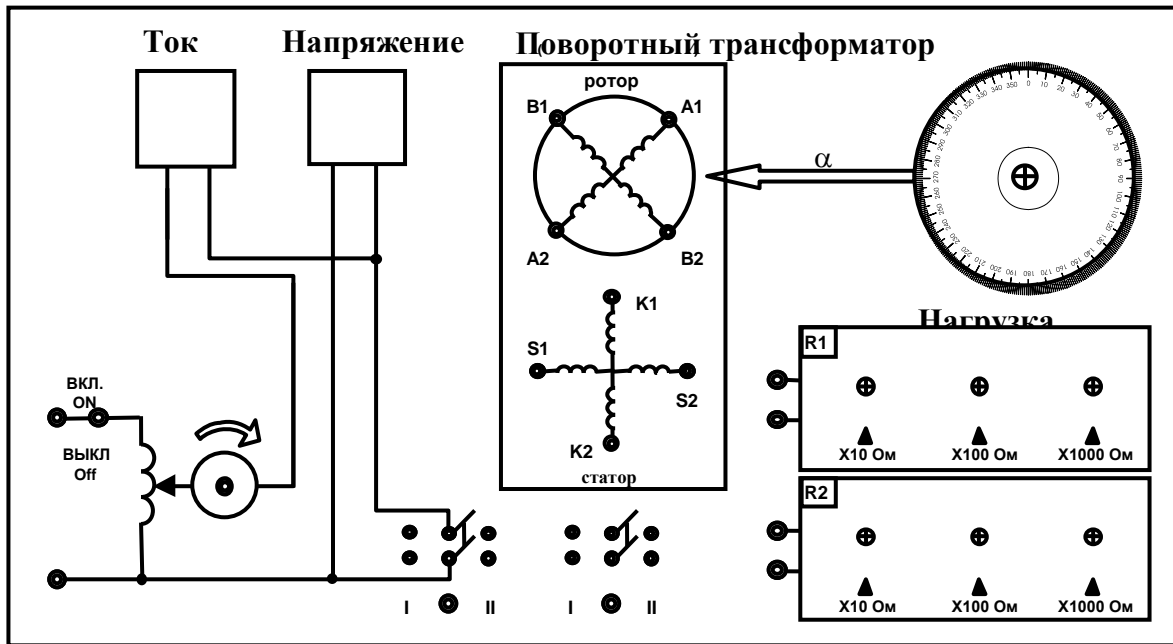


Рисунок 5.2. Схема экспериментальной установки

Номинальные данные трансформатора:

- напряжение питания  $U_s = 26$  В;
- частота питания  $f = 400$  Гц.

Поворотный трансформатор укреплен в специальном устройстве, позволяющем производить отсчет угла поворота ротора относительно неподвижного статора. Питание поворотного трансформатора производится через тумблер и регулятор переменного напряжения.

Вольтметр для измерения напряжения на обмотках трансформатора должен иметь большое внутреннее сопротивление. Необходимость в приборе с большим внутренним сопротивлением объясняется тем, что сопротивление обмоток ПТ соизмеримо с внутренним сопротивлением обычного электроизмерительного прибора. Поэтому такой прибор при включении в схему будет являться нагрузкой для ПТ и будет вносить искажения в функциональные преобразования поворотного трансформатора. В схеме используется ламповый вольтметр типа В7–16, питающий от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Перед началом работы прибор необходимо включить, дать прогреться в течение  $5 \div 10$  минут, а затем проверить калибровку и установку нуля.

### Программа работы

1. Ознакомиться с установкой для исследования поворотного трансформатора.

2. Экспериментально снять следующие характеристики несимметрированного ПТ:

2.1. масштабную характеристику, т.е. зависимость выходного напряжения от напряжения на входе при фиксированном угле поворота ротора и постоянной нагрузке  $U_A = f(U_s)$  при  $\alpha = \text{const}$ ;  $R_{HA} = \text{const}$ ;

2.2. синусно-косинусную характеристику  $U_A, U_B, I_S = f(\alpha)$  при  $U_s = \text{const}$ ;  $R_{HA} = \text{const}$ ,  $R_{HB} = \text{const}$ ,  $R_{HA} \neq R_{HB}$ ;

2.3. линейную характеристику  $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$  при  $R_{HA} = \text{const}$ ,  $R_{HB} = \text{const}$ ,  $R_{HA} \neq R_{HB}$ .

3. Провести симметрирование поворотного трансформатора при  $R_{HA} = \text{const}$  и снять соответствующие характеристики:

3.1. для работы по схеме sin-cos ПТ;

3.2. для работы по схеме линейного ПТ.

4. Определить класс точности ПТ при холостом ходе.

5. Построить зависимости:

5.1.  $U_A = f(U_s)$  для двух значений угла поворота ротора  $\alpha$  и двух нагрузок  $R_{HA} = \text{const}$ ;

5.2.  $U_A, U_B = f(\alpha)$  и  $I_S = f(\alpha)$  при  $R_{HA} = \text{const}$ ,  $R_{HB} = \text{const}$ ,  $R_{HA} \neq R_{HB}$  для несимметрированного ПТ и при вторичном симметрировании;

5.3. построить зависимость  $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$  для несимметрированного линейного ПТ и при симметрировании;

6. Вычислить асимметрию нулевых точек и максимальное значение остаточной ЭДС.

7. Вычислить постоянную  $E_{к=}$  и переменную  $E_{к \approx}$  составляющую ЭДС квадратурной обмотки и построить зависимость  $E_{к} = f(\alpha)$  при изменении  $\alpha = 0 \div 360^\circ$ .

8. Вычислить коэффициент трансформации ПТ с точностью до трех знаков.

9. В результате анализа полученных характеристик сделать основные выводы, при этом необходимо отметить причины погрешностей ПТ и способы их устранения.

### Методические указания

1. *Масштабной характеристикой* называется зависимость  $U_A = f(U_s)$  при  $R_{HA} = \text{const}$ . Зависимость выходного напряжения от величины напряжения обмотки возбуждения  $U_s$  при фиксированном угле поворота  $\alpha$  и постоянной нагрузке  $R_{HA} = \text{const}$  снимается по схеме

рис. 5.3. В качестве сопротивления нагрузки используется магазин сопротивлений Р-33. Подводимое напряжение  $U_s$  регулируется при помощи потенциометра П. До начала опыта необходимо установить «Нуль» отсчета. Для этого, подав на обмотку  $S_1S_2$  номинальное напряжение  $U_s$ , поворачивать ротор ПТ до тех пор, пока электронный вольтметр не покажет минимальное напряжение на обмотке  $A_1A_2$ .

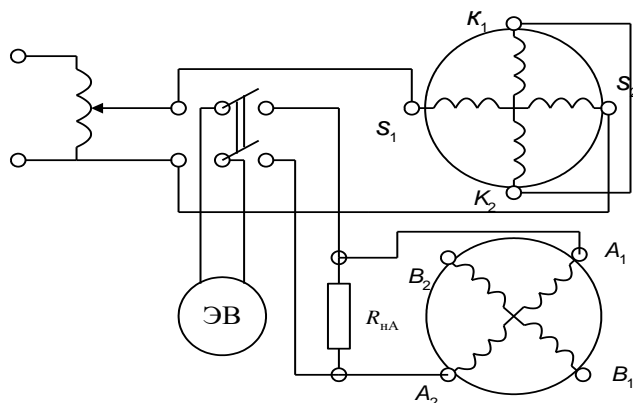


Рисунок 5.3. Схема снятия масштабной характеристики

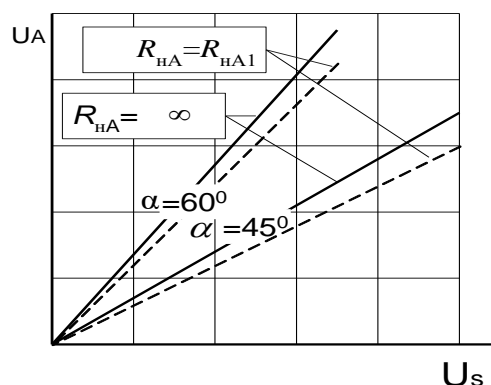


Рисунок 5.4. Масштабная характеристика

В этом положении по шкале отсчета отмечается нулевое положение. После установки нуля снимается масштабная характеристика для двух положений ротора  $\alpha=45^\circ$  и  $\alpha=60^\circ$  и для двух значений нагрузочных сопротивлений  $R_{HA}=\infty$ ;  $Z_{HA} = 1500$  Ом.

При снятии характеристики изменяют входное напряжение в пределах  $U_s / U_{SH} = 0,3 \div 1,2$ , регистрируя 6–7 точек. Данные опыта заносятся в табл. 5.1. На основании данных таблицы строятся зависимости  $U_A = f(U_s)$ , вид которых показан на рис. 5.4.

Таблица 5.1

Масштабная характеристика

№	$U_s, B$	$U_A, B$			
		$R_{HA}=\infty$		$R_{HA}=R_{HA1}$	
		$\alpha_1=45^\circ$	$\alpha_2=60^\circ$	$\alpha_1=45^\circ$	$\alpha_2=60^\circ$
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					

2. Синус– косинусная характеристика снимается по схеме рис. 5.5.

Перед началом опыта устанавливаем нуль отсчета, аналогично указанному выше. Напряжения на синусной  $U_A$  и косинусной обмотках  $U_B$  регистрируется для одного и того же положения ротора электронным вольтметром при помощи переключателя. Сначала снимаются характеристики *несимметрированного поворотного трансформатора*, для чего на обмотку возбуждения  $S_1S_2$  подается номинальное напряжение  $U_s$  и устанавливаются нагрузочные сопротивления на синусной и косинусной обмотках  $R_{HA}=1500$  Ом,  $R_{HB}=\infty$ . Поворачивая ротор, снимают характеристики  $U_A = f(\alpha)$ ;  $U_B = f(\alpha)$  через  $15^\circ$  при изменении угла в пределах  $\alpha = 0 \div 180^\circ$ . Данные опыта заносятся в табл. 5.2.

Таблица 5.2

*Синус– косинусная характеристика*

$\alpha$	град.	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	и т.д.
$U_A$	В											
$U_B$	В											
$I_A$	мА											

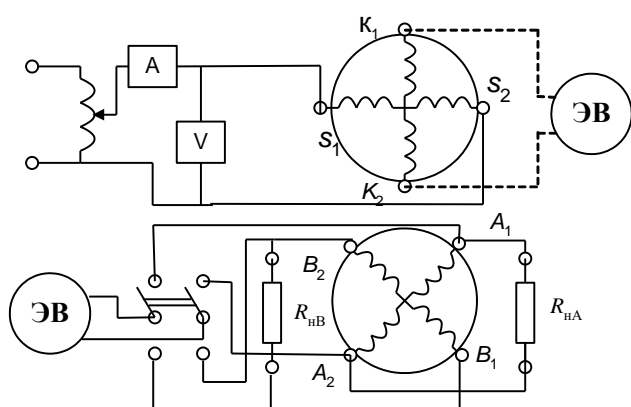


Рисунок 5.5. Схема для снятия синус–косинусных характеристик

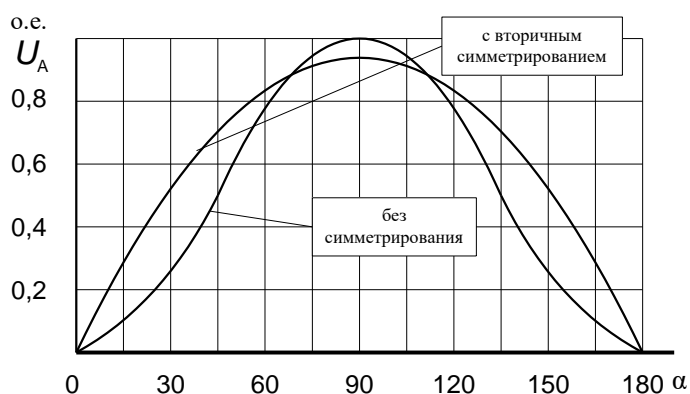


Рисунок 5.6. Синусная характеристика

На основании опытных данных табл. 5.2 строится синус–косинусная характеристика несимметрированного ПТ, вид одной из которых показан на рис.5.6.

**Симметрирование поворотного трансформатора** проводится в том случае, когда он работает на нагрузку конечной величины, и для обеспечения высокой точности функционального преобразования. Это особенно относится к тем случаям, когда ПТ работает при использовании только одной обмотки (синусной или косинусной), или с использованием обеих обмоток, но при различных нагрузках в каждой из них. В первом



случае возможно как первичное, так и вторичное симметрирование, во втором только первичное.

В настоящей работе проводится только *вторичное симметрирование*. Для этого используется схема на рис. 5.5. Первоначально, электронный вольтметр подключается к компенсационной обмотке. Для достижения вторичного симметрирования сопротивления  $R_{HA}$  и  $R_{HB}$  подбираются так, чтобы на электронном вольтметре ЭВ, включенном в цепь компенсационной обмотки  $K_1K_2$ , было бы минимальное напряжение. В этом случае наблюдается следующее равенство  $Z_A + R_{HA} = Z_B + R_{HB}$ .

Входное сопротивление ПТ со вторичной симметрией не зависит от углового положения ротора. Это обстоятельство иногда принимают во внимание при настройке симметрии ПТ. Однако метод настройки симметрии при помощи амперметра в первичной цепи менее точен, чем метод вольтметра. Опыт по симметрированию ПТ следует провести в такой последовательности: устанавливается нагрузка  $R_{HA}$ , равная нагрузке предыдущего опыта 1500 Ом. Изменяя  $R_{HB}$  при помощи потенциометра Р-33, добиваются минимального значения напряжения квадратурной обмотки при  $\alpha = 45^\circ$ . Затем, изменяя угол от 0 до  $360^\circ$  снимают синус–косинусную характеристику, занося данные в табл. 5.3, аналогичную табл. 5.2. По данным табл. 5.2 и 5.3 строят синус–косинусные характеристики ПТ. Вид синусной характеристики показан на рис. 5.6.

*Примечание:* Синус–косинусные характеристики симметризованного и несимметризованного ПТ строятся на одном графике. При этом обязательно указывается сопротивление нагрузки обмотки  $V_1V_2$  и проверяется условие вторичного симметрирования по характеру изменения тока статорной обмотки.

**3. Линейная характеристика** ПТ снимается по схемам рис. 5.7, а и б. Установив номинальное напряжение на первичной обмотке, сначала снимают линейную характеристику несимметризованного ПТ по схеме рис. 5.7, б при разомкнутой косинусной обмотке. При этом, изменяя угол от 0 до  $180^\circ$  через каждые  $15^\circ$ , регистрируют показания ЭВ и амперметра цепи питания. Все результаты заносятся в табл. 5.4.

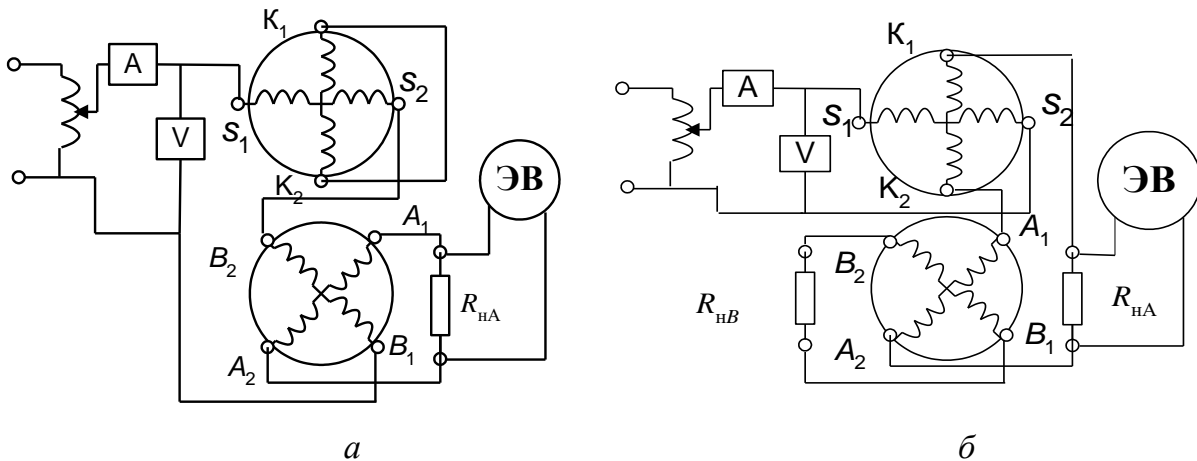


Рисунок 5.7. Схемы линейного поворотного трансформатора:  
 а – с первичным симметрированием; б – с вторичным симметрированием

Таблица 5.4

Линейная характеристика

$\alpha^\circ$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	и т.д.
$U_{\text{вых}}, \text{В}$											
$I_s, \text{мА}$											

Затем производится вторичное симметрирование ЛПТ. Для этого в цепь косинусной обмотки включается сопротивление  $R_{\text{НВ}}$  (рис. 5.7, б). Симметрирование производится следующим образом: изменяя  $R_{\text{НВ}}$  и угловое положение ротора  $\alpha$  добиваются такого значения  $R_{\text{НВ}}$ , когда при изменении  $\alpha$  ток в первичной обмотке  $I_s$  остается постоянным. По окончании настройки необходимо проверить условия вторичного симметрирования ЛПТ.

После симметрирования ЛПТ вновь снимается линейная характеристика  $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$ ;  $I_s = f(\alpha)$ . Результаты заносятся в таблицу, аналогичную табл. 5.4, на основании которой строятся зависимости несимметрированного и симметрированного ЛПТ.

Аналогичные зависимости  $U_{\text{вых}} = f(\alpha)$ ;  $I_s = f(\alpha)$  снимаются для линейного поворотного трансформатора с первичным симметрированием (рис. 5.7, а). Для этого собирается схема рис. 5.7, а. Компенсационная обмотка замыкается накоротко, а косинусная обмотка включается последовательно с главной статорной обмоткой. Данные эксперимента заносятся в табл. 5.5.

Таблица 5.5

## Вторичное симметрирование ЛПТ

$\alpha$ , град.	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150 и т.д.
$U_{\text{вых}}$ , В											
$I_s$ , мА											

Примечание: Линейные характеристики несимметрированного и симметрированного ЛПТ строятся на одном графике.

Примерный вид линейных характеристик показан на рис. 5.8.

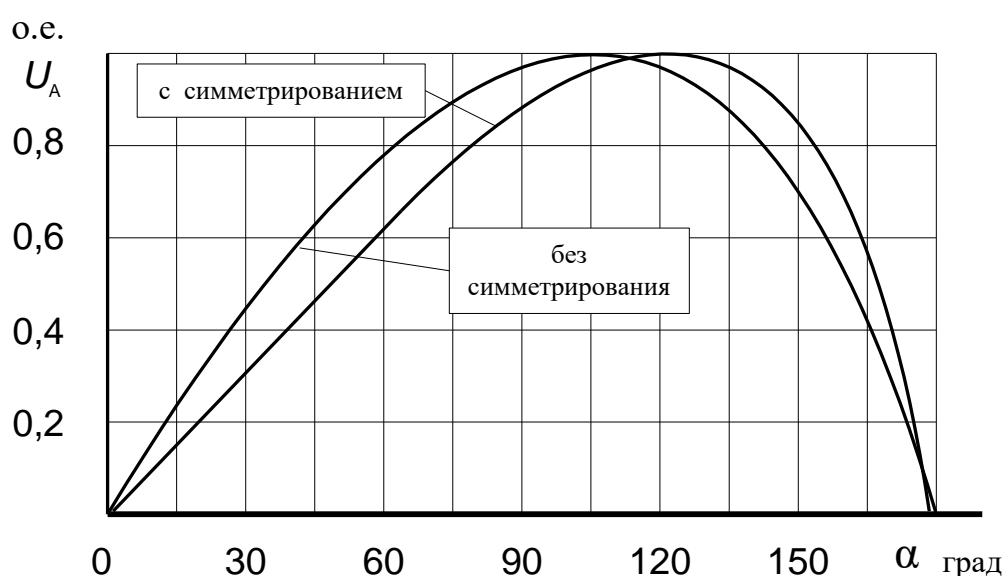


Рисунок 5.8. Характеристики линейного поворотного трансформатора

#### 4. Определение класса точности поворотного трансформатора.

4.1. Определение асимметрии нулевых точек, остаточной ЭДС и ЭДС квадратурной обмотки.

Асимметрию нулевых точек и остаточную ЭДС определяют, пользуясь схемой рис. 5.9. Напряжение возбуждения подается на средние клеммы двухполюсного переключателя ПР<sub>1</sub>, устанавливается номинальным и поддерживается в течении всего опыта постоянным. Обмотки ротора подключаются к крайним зажимам переключателя ПР<sub>2</sub>, к средним зажимам которого подключен ЭВ. Перед началом эксперимента устанавливается нуль отсчета, аналогично описанному ранее. Переключатели ПР<sub>1</sub> и ПР<sub>2</sub> ставятся в положение 1, поскольку при нуле отсчета первое измерение углового положения ротора  $\alpha_1=0$ , то равна нулю и угловая ошибка  $\Delta\alpha=0$ . После этого перебрасывают оба

переключателя в положение 2 и определяют угловое положение ротора, при котором ЭВ покажет минимальное напряжение. При этом регистрируется угловое положение ротора  $\alpha_2$  и его отклонение от нуля отсчета  $\Delta\alpha_2$ . Затем переключатель ПР<sub>1</sub> ставится в положение 1, а ПР<sub>2</sub> в положение 2. Ротор поворачивают на угол  $\alpha=90^\circ$  и добиваются такого положения, где напряжение на ЭВ будет минимальным. При этом регистрируется третье значение угла  $\alpha_3$  и его отклонение от теоретического  $\Delta\alpha_3=90-\alpha_3$ .

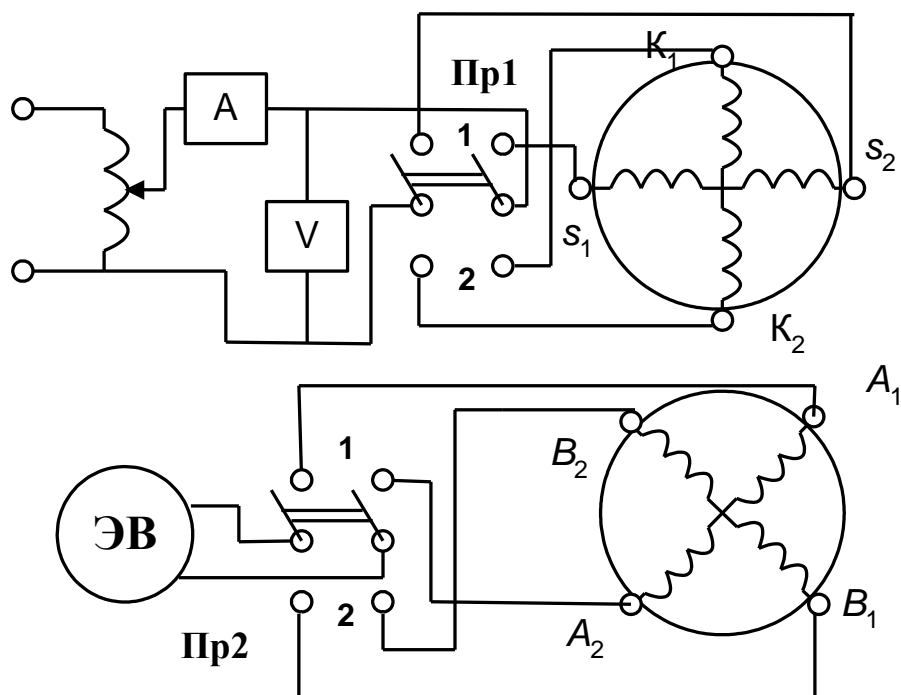


Рисунок 5.9. Схема для определения асимметрии нулевых точек

Переключив ПР<sub>1</sub> в положение 2, а ПР<sub>2</sub> в положение 1 проводят четвертое измерение угла  $\alpha_4$ , соответствующее минимальному напряжению на обмотке. Затем ротор поворачивается на  $\alpha=180$  относительно нуля отсчета, и опыт повторяется так, чтобы получить в конечном итоге 8 измерений в четырех различных положениях ротора. Для каждого нулевого положения по ЭВ определяется минимальное напряжение  $U_0$ . Асимметрия нулевых точек для каждого положения ротора определяется как разность между расчетными и действительными положениями ротора:  $\Delta\alpha_1=0-\alpha_1=0$ ,  $\Delta\alpha_2=0-\alpha_2$ ,  $\Delta\alpha_3=90-\alpha_3$ ,  $\Delta\alpha_4=90-\alpha_4$ ,  $\Delta\alpha_5=180-\alpha_5$ ,  $\Delta\alpha_6=180-\alpha_6$ ,  $\Delta\alpha_7=270-\alpha_7$ ,  $\Delta\alpha_8=270-\alpha_8$ .

За величину остаточной ЭДС ПТ и асимметрию нулевых точек принимают наибольшие значения из измеренных величин  $E_0 = U_{0 \max}$ .  $\Delta\alpha_i = \Delta\alpha_{i \max}$ . Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Определение асимметрии нулевых точек

Положение ротора	Измерено						Вычислено	
	1 измерение			2 измерение			$\Delta\alpha_i$	$E_0$
	$\alpha$	$\alpha_i$	$U_0$	$\alpha$	$\alpha_i$	$U_0$		
1	0			0				
2	90			90				
3	180			180				
4	270			270				

Примечание:

1. При проведении опыта нужно следить за тем, чтобы обмотка статора, к которой в данный момент не подводится напряжение сети, была закорочена.

2. Ввиду недостаточной точности шкал отсчета, опыт необходимо проделать особенно внимательно.

ЭДС квадратурной обмотки определяют по схеме рис. 5.10. Напряжение сети подается на главную статорную обмотку, а в квадратурной измеряют остаточную ЭДС. Обмотки ротора разомкнуты. При повороте ротора определяют зависимость  $e_k$  от углового положения ротора. При этом зависимость  $e_k = f(\alpha)$  носит периодический характер, показанный на рис. 5.11. Как следует из рисунка, ЭДС  $e_k$  можно разложить на переменную и постоянную составляющие.

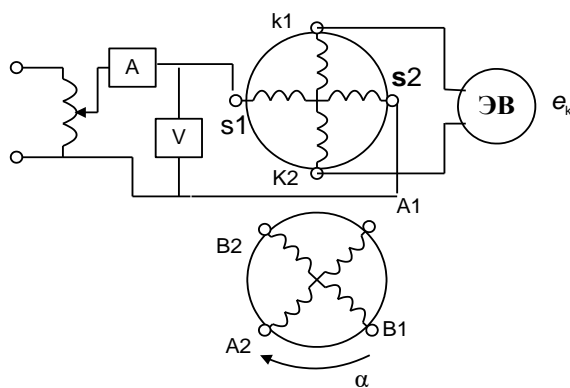


Рисунок 5.10. Схема для определения ЭДС квадратурной обмотки

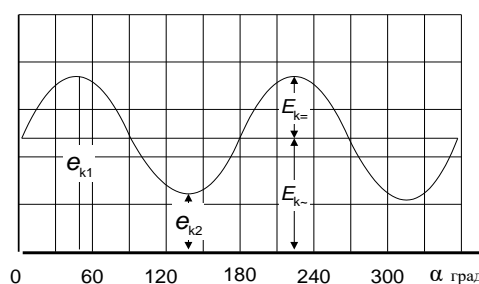


Рисунок 5.11. ЭДС квадратурной обмотки

Определив значения  $e_{k1}$  и  $e_{k2}$  по кривой  $e_k = f(\alpha)$ , рассчитывают составляющие ЭДС по выражениям

$$E_{K=} = \frac{e_{K1} + e_{K2}}{2}, \text{ В} \qquad E_{K\approx} = \frac{e_{K1} - e_{K2}}{2}, \text{ В.}$$

Расчеты и измерения сводятся в табл. 5.7, на основании которой строится зависимость  $e_K=f(\alpha)$ .

Таблица 5.7

Определение ЭДС квадратурной обмотки

Измерения		Вычисления	
$\alpha$	$e_K$	$E_K$	$E_{K\sim}$

Примечание: Изменение  $\alpha$  необходимо производить от 0 до 360° через 30°.

#### 4.2. Определение коэффициента трансформации ПТ.

Коэффициент трансформации ПТ определяется по схеме рис. 5.12 компенсационным методом. Напряжение на компенсационной обмотке устанавливается равным номинальному и поддерживается постоянным в течение опыта.

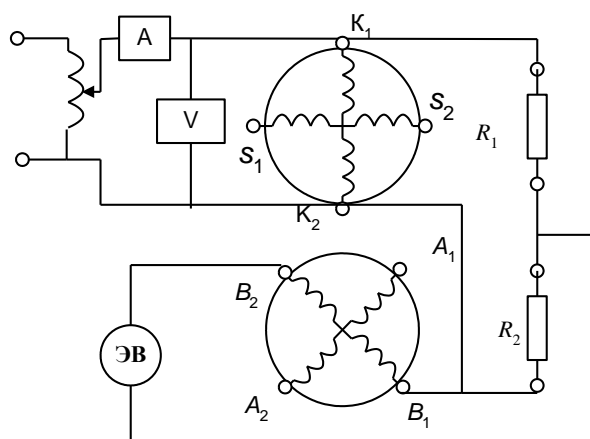


Рисунок 5.12. Схема для определения коэффициента трансформации

Устанавливают значения  $R_1=0$  и  $R_2= 500$  Ом и поворотом ротора определяют положение, соответствующее номинальному напряжению на ЭВ. Затем определяется новое положение ротора  $\alpha$ , при котором компенсируется падение напряжения на сопротивлении  $R_1$ . Для этого устанавливаются  $R_1=R_2=500$  Ом и поворачивают ротор до тех пор, пока ЭВ не покажет минимальное напряжение.

$$U_s = E_{bt} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_H = \gamma^* U_H, \gamma^* = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,5$$

Коэффициент трансформации необходимо вычислить с точностью до трех знаков

$$K_{TP} = \frac{E_{2m}}{U_H} = \frac{\gamma^*}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}; \quad K_{TP} = \frac{0.5}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}.$$

**В выводах к работе** необходимо указать следующее:

- оценку линейности масштабной характеристики;
- точность функционального преобразования в синус–косинусном режиме;
- точность линеаризации характеристик линейного поворотного трансформатора;
- оценить величины, характеризующие точность поворотного трансформатора и его коэффициент трансформации.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Как устроен поворотный трансформатор?
2. Какие требования предъявляются к магнитопроводу и обмоткам ПТ?
3. Как осуществляются в ПТ электрическое соединение неподвижной части схемы с роторными обмотками?
4. Каким образом достигается в ПТ высокая точность функциональных зависимостей выходных напряжений от угла поворота ротора?
5. Что понимается под первичным симметрированием, как оно осуществляется и с какой целью?
6. Что понимается под вторым симметрированием, как оно осуществляется и с какой целью?
7. Как можно проверить в ПТ выполнение первичной и вторичной компенсации?
8. Укажите погрешности, связанные с принципом действия ПТ и технологией изготовления.
9. Укажите область применения ПТ.

### **Литература**

1. Арменский Е. В. Электромашинные устройства автоматики: учебное пособие для вузов / Е. В. Арменский, И. В. Кузина, Г. Б. Фалк. – Москва: Высшая школа, 1986. – 247 с.: ил.
2. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики: учебное пособие / В. В. Хрущев. – 2-е изд., перераб. и доп.. Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 368 с.
3. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие / Ф. М. Юферов. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Москва: Высшая школа, 1988. – 479 с.. – ISBN 506001312-X.

## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ПЕРЕДАЧИ УГЛА НА ОДНОФАЗНЫХ СЕЛЬСИНАХ

**Цель работы:** ознакомиться с конструкциями контактных и бесконтактных однофазных сельсинов, исследовать работу сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах, оценить точность работы в разных режимах передачи угла, определить класс точности сельсинов и их параметры.

### **Объект исследований.**

В современной технике очень часто возникает необходимость синхронизации вращения или поворота различных осей механизмов, находящихся на значительном расстоянии друг от друга и механически между собой не связанных. Эта задача чаще всего решается с помощью электрических систем синхронной связи. *Синхронной связью* называется такая, которая обеспечивает *синхронное и синфазное* вращение или одновременный поворот двух или нескольких механически не связанных осей механизмов, находящихся на расстоянии друг от друга

В технике получили распространение два основных вида систем синхронной связи: система «электрического вала» (синхронного вращения) и система «передачи угла» (синхронного поворота).

*Системы синхронного вращения (электрического вала)* применяются там, где требуется осуществить синхронное вращение двух или нескольких находящихся на расстоянии друг от друга осей механизмов, имеющих значительные моменты сопротивления. Они реализуются с помощью обычных электрических машин, чаще всего трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором. *Системы синхронного поворота (передачи угла)* применяются для целей дистанционного управления, регулирования или контроля. Чаще всего они осуществляются с помощью индукционных электрических машин – трехфазных и однофазных сельсинов, которые могут включаться в сеть переменного тока. Однофазные сельсины – это обычно небольшие индукционные машины, которые имеют однофазную обмотку возбуждения и трехфазную обмотку синхронизации. В схемах автоматики используются две принципиально отличные друг от друга системы синхронной передачи угла – индикаторная и трансформаторная.

*Индикаторная система* синхронной передачи применяется там, где момент сопротивления на ведомой оси мал по величине или совсем отсутствует (ось нагружена стрелкой или шкалой). В индикаторной системе сельсин–приемник самостоятельно обрабатывает угол, задаваемый сельсином–датчиком.



Трансформаторная система синхронной связи применяется там, где на ведомой оси имеется значительный момент сопротивления. В трансформаторной системе принимающий сельсин-приемник обрабатывает задаваемый сельсином-датчиком угол не самостоятельно, а с помощью механически и электрически связанного с ним исполнительного двигателя. Однофазные сельсины делятся на индикаторные и трансформаторные в зависимости от систем, для работы в которых они предназначены, хотя принципиально любой сельсин может работать в обеих системах. Конструкции бесконтактного сельсина типа БС и контактного сельсинов типа СС представлены на рис. 6.1 и 6.2.

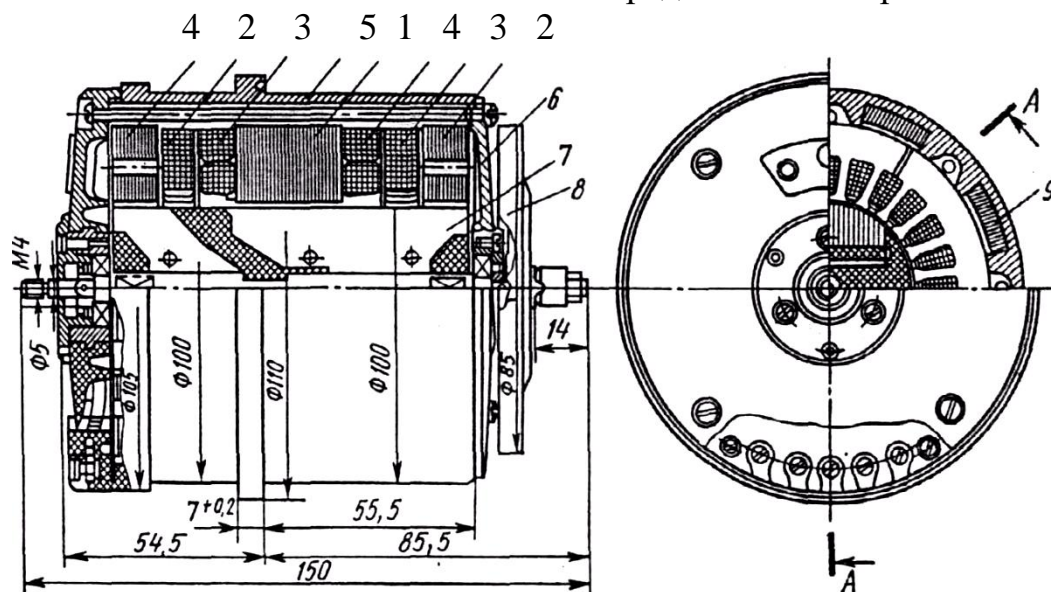


Рисунок 6.1. Конструкция бесконтактного сельсина типа БС  
 1 – статор; 2 – обмотка возбуждения; 3 – обмотка синхронизации;  
 4 – кольцевые сердечники; 5 – ; 6 – подшипниковые щиты; 7 – ротор;  
 8 – механический демпфер; 9 – стержни внешнего магнитопровода

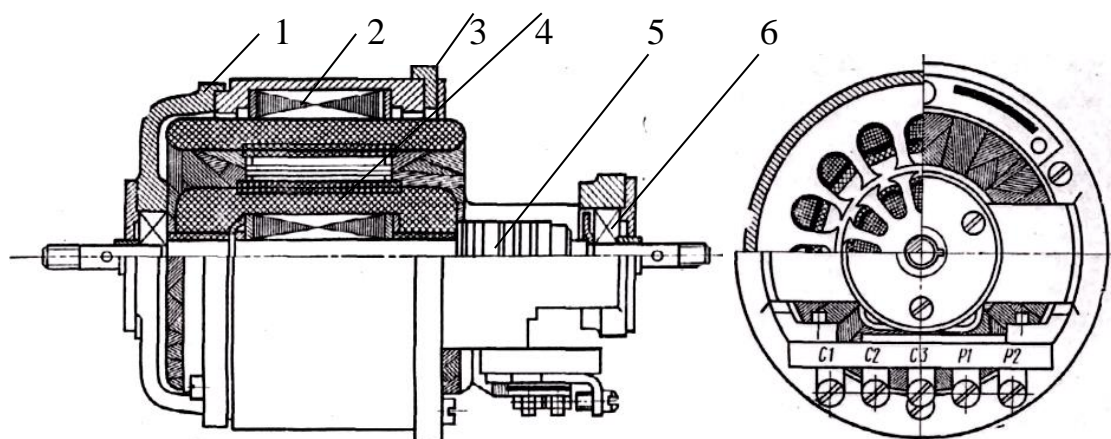


Рисунок 6.2. Конструкция контактного сельсина типа СС  
 1 – подшипниковый щит; 2 – статор; 3 – передний подшипниковый щит;  
 4 – ротор; 5 – контактные кольца; 6 – подшипник

*Основным требованием, которое предъявляется к сельсином, работающим в схемах синхронной связи, является требование точности отработки сельсином–приемником заданного сельсином–датчиком угла. Точность работы сельсинов в схеме синхронной связи зависит как от качества работы (точности) сельсинов–приемников, так и от качества работы (точности) сельсина–датчика.*

*Точность работы сельсинов–приемников в индикаторном режиме определяется рядом факторов. Основными из них являются:*

- удельный синхронизирующий момент  $M_{уд}$  – момент, приходящийся на  $1^\circ$  угла рассогласования;
- момент сопротивления на валу приемника  $M_c$  (обычно это момент трения самого приемника  $M_c=M_T$ );
- добротность сельсина  $D=M_{уд}/M_T$  – отношение удельного синхронизирующего момента к моменту трения;
- магнитная и электрическая несимметрия;
- небаланс ротора;
- время успокоения – время, в течение которого успокаивается (останавливается) ротор приемника после рассогласования на  $\pm 179^\circ$ .

*Качество работы сельсинов в трансформаторной системе синхронной связи зависит от целого ряда факторов. Важнейшими из них являются следующие:*

- значение остаточного напряжения на выходной обмотке сельсина–приемника в согласованном положении, когда магнитный поток приемника  $\Phi_n$  перпендикулярен оси выходной обмотки;
- удельное выходное напряжение  $U_{уд}$  – выходное напряжение при угле рассогласования в  $1^\circ$ ;
- удельная выходная мощность  $P_{уд}$  – максимальная мощность, которую может отдать выходная обмотка приемника при угле рассогласования в  $1^\circ$ ;
- электрическая и магнитная несимметрия;
- сопротивление линии связи;
- количество приемников, работающих от одного датчика;
- частота вращения роторов.

### **Описание экспериментальной установки**

Лабораторный стенд состоит из *приборного блока* и вынесенного отдельно *сельсина–приемника с нагрузочным и измерительным устройствами*. На лицевой панели приборного блока (рис. 6.3) расположены: сельсин–датчик, обеспечивающий экспериментирование во всех режимах работы системы синхронной связи, и сельсин–приемник, предназначенный для работы в трансформаторном режиме. Задание угловых положений роторов обеспечивается

соответствующими шкальными устройствами. Вынесенный отдельно сельсин–приемник обеспечивает поворот стрелочного устройства в индикаторном режиме. Здесь же смонтировано приспособление для измерения момента, развиваемого приемником.

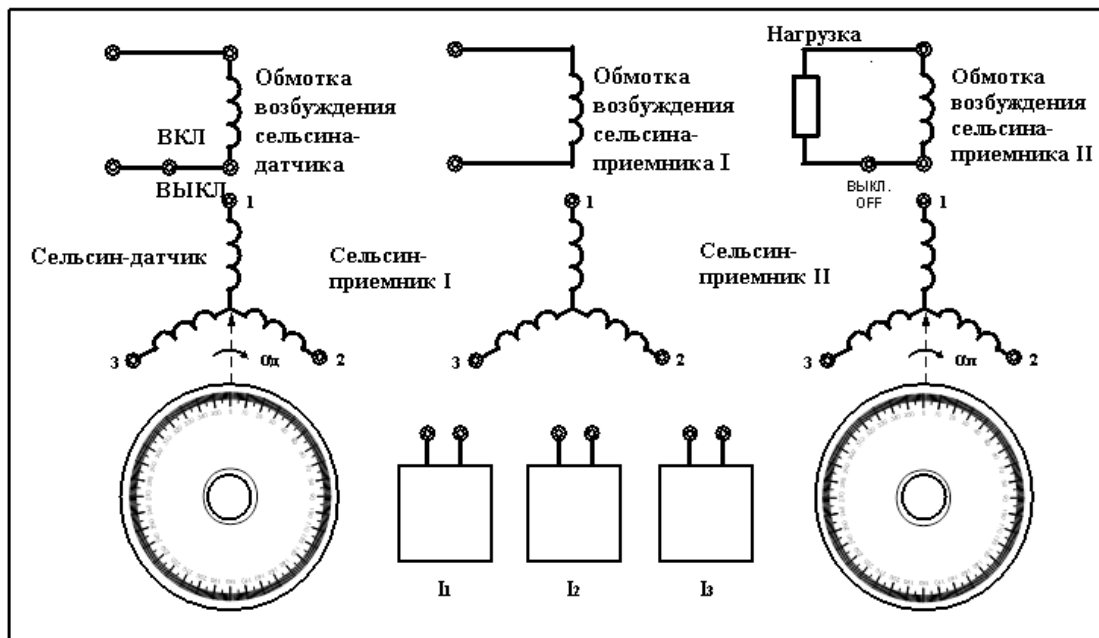


Рисунок 6.3. Схема экспериментальной установки

Величина момента определяется по формуле  $M_{вр} = R \cdot F$ , где  $R$  – радиус шкива,  $F$ – показания динамометра (значения величин указаны на стенде).

### Программа работы

1. По рисункам и на макетных образцах изучить конструкцию контактных и бесконтактных однофазных сельсинов.
2. Экспериментально определить параметры сельсина– приемника.
3. Провести экспериментальные исследования работы сельсинной пары «один датчик – один приемник» в индикаторном и трансформаторном режимах.
4. Построить по экспериментальным данным:
  - 4.1. кривую ошибок работы сельсинов в индикаторном режиме;
  - 4.2. кривую ошибок работы сельсинов в трансформаторном режиме;
  - 4.3. выходную характеристику системы синхронной связи в трансформаторном режиме, т.е.  $U_{вых} = f(\theta)$  при  $R_n = \text{const}$ ;
  - 4.4. зависимость синхронизирующего момента от угла рассогласования  $M_c = f(\theta)$  для индикаторного режима работы сельсинов;

4.5. зависимость выходного сопротивления сельсина–приемника от угла рассогласования  $Z_{\text{вых}} = f(\theta)$ .

5. Определить классы точности сельсинов–приемников в исследуемых схемах.

### Методические указания

#### 1. Определение параметров сельсина–приемника.

Параметры определяются для сельсина–приемника 2 с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра по схеме (рис. 6.4). Собрав схему (рис. 6.4), поворачивают ротор сельсина до тех пор, пока напряжение  $U_{\text{в}}$  обмотки возбуждения не станет минимальным. В этом положении ротор закрепляется, обмотка возбуждения замыкается накоротко, и записываются показания всех приборов (табл. 6.1).

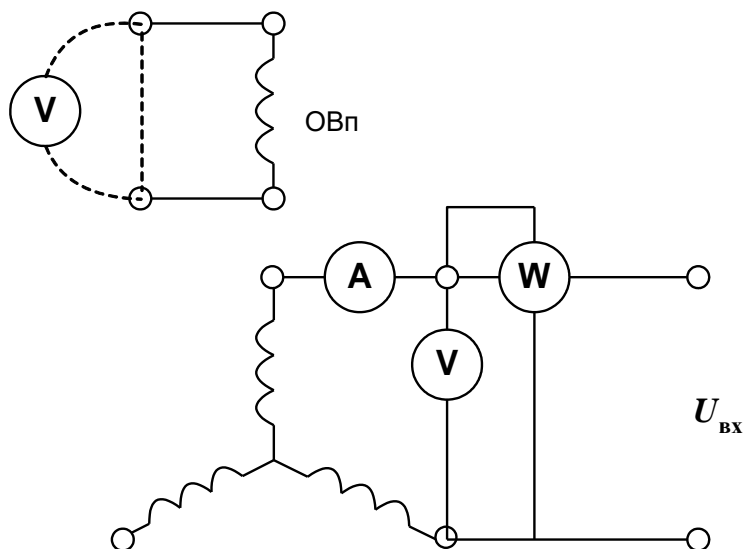


Рисунок 6.4. Схема для определения параметров сельсина–приемника

Таблица 6.1

#### Определение параметров сельсина–приемника

$U$	$I$	$P$	Расчетные значения		
			$Z_q$	$R_q$	$X_q$
В	А	Вт	Ом	Ом	Ом

По результатам всех измерений определяются параметры сельсина:

$$Z_q = \frac{U}{2 \cdot I}, \quad X_q = \sqrt{(Z_q^2 - R_q^2)}, \quad R_q = \frac{P}{2 \cdot I^2}.$$

Здесь  $Z_q$ ,  $R_q$ ,  $X_q$  – полное, активное и индуктивное сопротивления одной фазы обмотки синхронизации при совпадении оси этой фазы с поперечной осью сельсина.

## 2. Исследование работы сельсинов в индикаторном режиме.

Для снятия кривой ошибок  $\Delta\alpha=f(\alpha)$  в работе используется схема, представленная на рис. 6.5. Датчиком и приемником служат однотипные машины.

До начала работы необходимо проверить совпадение нуля шкалы датчика с нулевым положением шкалы приемника. При несовпадении добиваются установки нуля приемника поворотом корпуса приемника в стойке. После установки нуля корпус машины закрепляется винтом.

Для снятия кривой ошибок  $\Delta\alpha=f(\alpha)$  на обмотки возбуждения датчика и приемника подается номинальное напряжение 110В при частоте 50 Гц, которое во время опыта необходимо поддерживать постоянным.

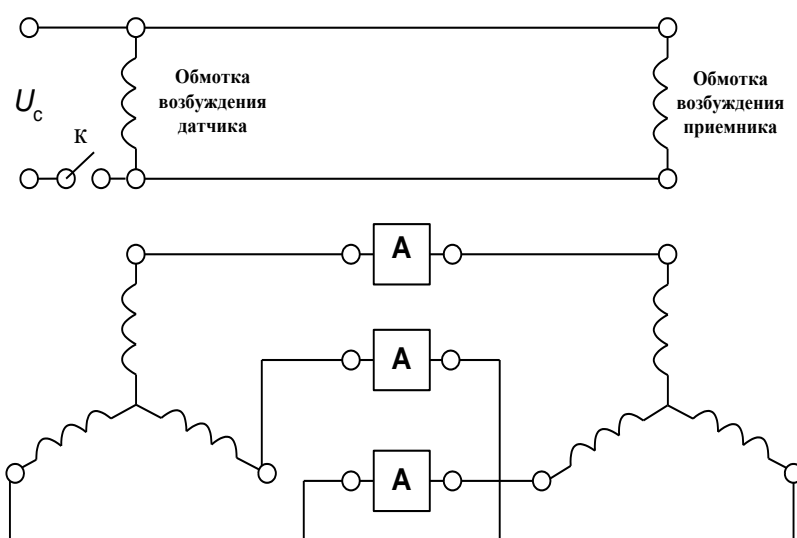


Рисунок 6.5. Схема работы сельсинов в индикаторном режиме

Затем ротор датчика постепенно поворачивается на угол  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , при этом ведется запись углов через каждые  $10^\circ$ . Также записываются углы, отработанные приемником.

Погрешность (ошибка) системы определяется как разность между показаниями приемника и датчика, выраженная в градусах. Погрешность положительна, если показания на шкале приемника больше показаний на шкале датчика, и отрицательна, если меньше.

Чтобы учесть различие моментов трения при вращении в разные стороны, кривую погрешности снимают дважды: при вращении ротора датчика по часовой стрелке и против часовой стрелки.

Результаты измерений заносятся в табл. 6.2.

Таблица 6.2

*Определение погрешности*

По часовой стрелке			Против часовой стрелки		
$\alpha_d$	$\alpha_n$	$\Delta\alpha$	$\alpha_d$	$\alpha_n$	$\Delta\alpha$
град	град	град	град	град	град

По данным табл. 6.2 строятся кривые ошибок  $\Delta\alpha=f(\alpha)$ . Точность сельсина определяется как полусумма абсолютных значений максимальных отклонений положительной и отрицательной погрешностей:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\alpha_{\max+} + \Delta\alpha_{\max-}}{2}, \text{ град.}$$

По данным опыта определяется к какому классу точности относится исследуемый сельсин–приемник.

**3. Определение зависимости синхронизирующего момента от угла рассогласования  $M_c=f(\theta)$  и удельного синхронизирующего момента  $M_{уд}$ .**

Удельным синхронизирующим моментом сельсина–приемника называется синхронизирующий момент, приходящийся на  $1^\circ$  угла рассогласования.

Определяется  $M_{уд}$  по схеме, изображенной на рис. 6.5. К уравновешенному шкиву на оси сельсина–приемника крепится динамометр для создания противодействующего момента. Развиваемый сельсином приемником момент  $M$  равен произведению силы натяжения динамометра на плечо, а соответствующий угол рассогласования  $\theta$  определяется по шкале сельсина–приемника. Удельный синхронизирующий момент определяется как  $M_{уд} = M/\theta$ . Удельный синхронизирующий момент определяется при малых углах рассогласования  $\theta < (5-10)^\circ$  или как тангенс угла наклона к оси абсцисс касательной к кривой  $M_c=f(\theta)$  в точке  $\theta=0$ .

Опыт проводится следующим образом: устанавливается нулевое положение сельсинов, работающих в индикаторном режиме, и присоединяют динамометр к шкиву. Затем, устанавливают выбранный угол шкальным устройством сельсина–датчика (через  $5^\circ$  от  $0^\circ$  до  $15^\circ$ ), и, изменяя силу натяжения динамометра, устанавливают стрелку сельсина приемника в нулевое положение. При этом фиксируются показания динамометра и определяется момент. Для увеличения точности измерения проводят 2 раза. Данные экспериментов заносят в табл. 6.3, по

которой определяется значение удельного синхронизирующего момента как среднее расчетных величин и строится зависимость  $M_c=f(\theta)$ .

Таблица 6.3

Определение зависимости синхронизирующего момента от угла рассогласования  $M_c=f(\theta)$  и удельного синхронизирующего момента  $M_{уд}$

$\theta$	$F$	$M$	$M_{уд}$	$M_{уд} =$
град.	г	гсм	гсм/град	

### 3. Исследование работы сельсинов в трансформаторном режиме.

Определение остаточной ЭДС  $E_{ост}$ .

Опыт проводится по схеме, изображенной на рис. 6.6. К обмотке возбуждения сельсина–приемника подключен электронный вольтметр. С нее снимается выходной сигнал.

Для определения остаточной ЭДС  $E_{ост}$  ротор сельсина–приемника поворачивают до тех пор, пока вольтметр, подключенный к выходной обмотке, не покажет минимальное значение ЭДС, которое и является остаточным. Сопротивление нагрузки  $R_H$  не включают.

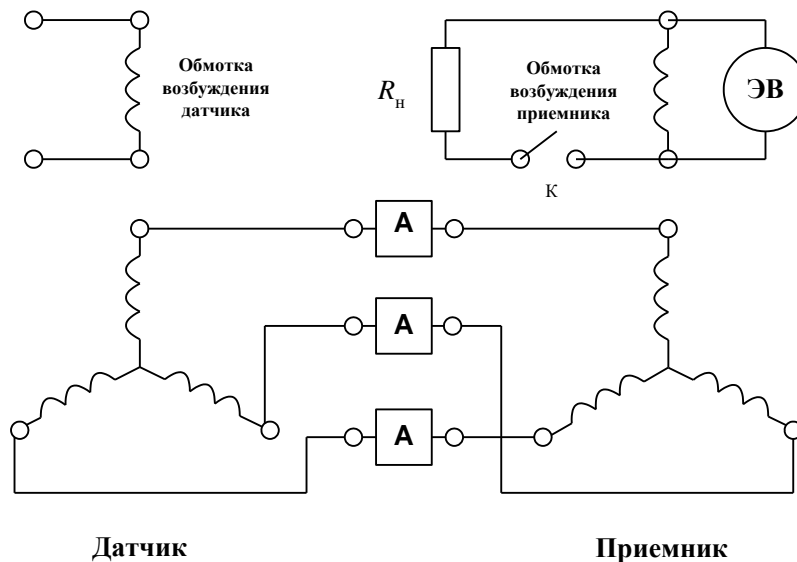


Рисунок 6.6. Схема работы сельсинов в трансформаторном режиме

Определение ошибки асимметрии  $\Delta\alpha_{ас}$ .

Для определения этой ошибки корпус сельсина–приемника поворачивают и закрепляют в стойке так, чтобы нуль шкалы датчика и нуль шкалы приемника соответствовали минимуму выходного

напряжения. После этого ротор приемника поворачивается на  $180^\circ$ . Если сельсины не имеют асимметрии, то в этом положении ротора выходное напряжение сельсина–приемника будет тоже минимальным. Если асимметрия есть, то ротор приемника необходимо повернуть на некоторый угол в ту или другую сторону от  $180^\circ$ , чтобы напряжение стало минимальным. Величина этого угла  $\Delta\alpha_{ас}$ , выраженная в градусах, и представляет ошибку асимметрии.

*Определение точности (погрешности) трансформаторной системы (кривая ошибок в трансформаторном режиме).*

Сельсины устанавливаются в начальное согласованное положение (нуль на шкале датчика), аналогично приведенному выше. То есть, сельсин–приемник поворачивают и закрепляют так, чтобы нулевому положению на шкале приемника соответствовало минимальное выходное напряжение. Затем ротор датчика поворачивают на  $10^\circ$ . Ротор приемника также поворачивают в том же направлении на угол  $\alpha$  (близкий к  $10^\circ$ ) до тех пор, пока на выходе системы не будет минимальное выходное напряжение. Отклонение указателя от  $10^\circ$  определяет величину погрешности системы для данного углового положения. Знак погрешности определяется также, как и в индикаторном режиме. Проводя измерения через каждые  $10^\circ$  в диапазоне от 0 до  $360^\circ$ , получают зависимость погрешности от угла поворота  $\Delta\alpha=f(\alpha)$ , т.е. кривую ошибок сельсина–приемника в трансформаторном режиме. Данные экспериментов заносятся в табл. 6.4.

Таблица 6.4

*Определение ошибки асимметрии*

По часовой стрелке			Против часовой стрелки		
$\alpha_{д}$	$\alpha_{п}$	$\Delta\alpha$	$\alpha_{д}$	$\alpha_{п}$	$\Delta\alpha$
град	град	град	град	град	Град

Точность системы определяется как полусумма абсолютных значений максимальных положительной и отрицательной погрешностей

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\alpha_{\max+} + \Delta\alpha_{\max-}}{2}, \text{ град.}$$

По данным опыта строится кривая ошибок и определяется, к какому классу точности относится данная система.

*Определение зависимости выходного напряжения приемника от угла рассогласования  $U_{\text{вых}}=f(\theta)$  при различных сопротивлениях нагрузки.*

Опыт проводится по схеме, представленной на рис. 6.6. Ротор сельсина–датчика закрепляется в нулевом положении. Ротор



сельсина– приемника устанавливают в положение, при котором выходное напряжение минимально. В этом положении записывается первое показание вольтметра. Затем ротор приемника поворачивают на 5, 10, 20 и т.д. градусов до  $180^\circ$  через каждые  $20^\circ$  и записывают показания вольтметра. Проводится 2 опыта: при сопротивлении нагрузки  $R_H=\infty$  и  $R_H=500$  Ом. Данные заносятся в табл. 6.5, а затем строится зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}=f(\theta)$ .

Таблица 6.5

*Определение зависимости выходного напряжения приемника от угла рассогласования  $U_{\text{ВЫХ}}=f(\theta)$*

$R_H=\infty$		$R_H=500$ Ом	
$\theta$ , град	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$\theta$ , град	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В

По результатам определяется удельное выходное напряжение  $U_{\text{уд.ВЫХ}}$  и удельная выходная мощность.

$$U_{\text{уд. Вых}}=U_{\text{ВЫХ}}/\theta; \quad P_{\text{уд.ВЫХ}}=U_{\text{уд. Вых}}^2 \cdot \theta/R_H,$$

где  $\theta$  – угол рассогласования, который берется в пределах  $0,08-0,16$  рад.

*Определение выходного сопротивления трансформаторного сельсина– приемника.*

Опыт проводится по схеме рис. 6.6, но при отключенном сопротивлении нагрузки. После включения схемы в сеть приемник рассогласовывается относительно датчика на угол  $\theta=5-10^\circ$ , после чего измеряется ЭДС управляющей обмотки  $E_y$  и ток короткого замыкания  $I_k$  (при замыкании управляющей обмотки на амперметр). Затем угол рассогласования постепенно доводится до  $30-40^\circ$ , при этом через каждые  $5-10^\circ$  измеряются  $E_y$  и  $I_k$ . Данные испытаний заносятся в табл. 6.6.

Таблица 6.6

*Определение выходного сопротивления трансформаторного сельсина– приемника*

$\theta$	$E_y$	$I_k$	$Z_{\text{ВЫХ}}$
град	В	А	Ом

По полученным данным  $E_y$  и  $I_k$  подсчитываются величины выходного сопротивления  $Z_{\text{ВЫХ}}=E_y/I_k$  и строится зависимость  $Z_{\text{ВЫХ}}=f(\theta)$ .

### Контрольные вопросы и задания

1. Что называется электрической системой синхронной связи?
2. Какие системы синхронной связи применяются на практике и с помощью каких электрических машин они осуществляются?

3. Укажите недостатки контактных сельсинов.
4. Назовите положительные и отрицательные качества бесконтактных сельсинов.
5. Каков принцип действия индикаторной системы синхронной связи?
6. Назовите факторы, определяющие точность работы трансформаторной системы синхронной связи.
7. Как определяется погрешность сельсинов датчиков и сельсинов приемников в индикаторном и трансформаторном режимах?

#### **Литература**

1. Арменский Е. В. Электромашинные устройства автоматики: учебное пособие для вузов / Е. В. Арменский, И. В. Кузина, Г. Б. Фалк. – Москва: Высшая школа, 1986. – 247 с.: ил.
2. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие / Ф. М. Юферов. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Москва: Высшая школа, 1988. – 479 с.. – ISBN 506001312-X.

## 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** изучение принципа действия шагового двигателя, его системы управления, и экспериментальное снятие характеристик двигателя.

### Объект исследований

*Шаговые двигатели* (ШД) – электромеханические устройства, которые преобразуют электрические импульсы напряжения управления в дискретные угловые или линейные перемещения ротора.

Объектом исследований является шаговый двигатель, выполненный на основе синхронного реактивного редукторного микродвигателя. Якорная обмотка, соединенная по схеме шестифазной звезды с нулевым проводом, располагается в пазах статора с гребенчатой зубцовой зоной. Пассивный ротор из ферромагнитного материала имеет исполнение с 20-ю зубцами.

*Принцип действия* шагового реактивного редукторного двигателя заключается в следующем: система управления обеспечивает периодическое включение обмоток статора так, чтобы магнитное поле дискретно перемещалось по угловому направлению. За одно переключение магнитное поле, созданное статорной обмоткой,

перемещается на угол  $\gamma_c = \frac{2\pi}{m \cdot n}$  рад, где  $m$  – число фаз обмотки статора,

$n$  – способ включения обмоток статора (при симметричной коммутации  $n=1$ , при несимметричной  $n=2$ ). Ротор, имеющий число зубцов  $Z_p$ , занимает относительно оси магнитного потока такое положение, которое соответствует максимальной проводимости воздушного зазора (рис. 7.1, а, положение оси потока А). Энергия магнитного поля в воздушном зазоре ( $W$ ) в этом положении ротора минимальна, и момент вращения равен нулю  $M = \frac{dW}{d\gamma} = 0$ . При повороте оси магнитного потока

на один шаг  $\gamma_c$  (рис. 6.1, б, положение оси потока Б), проводимость воздушного зазора для нового положения оказывается не максимальной, происходит изменение энергии магнитного поля в воздушном зазоре, и, как результат последнего, появляется реактивный вращающий момент

$M = \frac{dW}{d\gamma} \neq 0$ . Под действием этого момента ротор поворачивается на

такой угол, чтобы вновь обеспечить максимальную величину проводимости воздушного зазора (7.1, в). Если учесть, что на роторе выполнено  $Z_p$  зубцов, и магнитный поток проходит преимущественно по зубцам статора и ротора, а поток статора повернется на один зубец

статора, то максимальная проводимость будет тогда, когда ротор повернется на угол

$$\gamma = \frac{2\pi}{Z_c} - \frac{2\pi}{Z_p} = 2\pi \cdot \frac{Z_p - Z_c}{Z_p \cdot Z_c}, \text{ рад.}$$

При единичном сигнале поток статора поворачивается на угол  $\gamma_c$ , а ротор будет поворачиваться на угол в  $i$  раз меньший, где  $i$  – коэффициент редукции

$$i = \frac{\gamma_c}{\gamma_p} = \frac{\frac{2\pi}{Z_c}}{\frac{2\pi}{Z_p} \cdot \frac{Z_p - Z_c}{Z_p}} = \frac{Z_p}{(Z_p - Z_c)}.$$

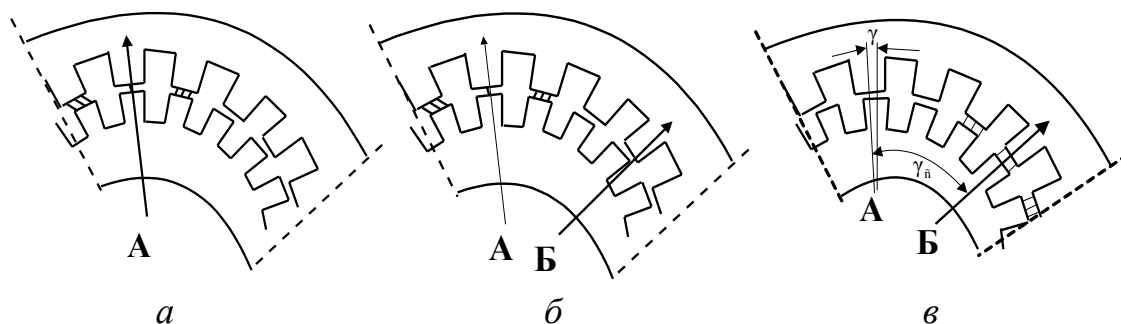


Рисунок 7.1. Принцип действия шагового двигателя

Редукторное исполнение двигателя позволяет получить малые единичные шаги ротора, если числа зубцов ротора и статора близки к друг другу.

За один цикл переключений статорных обмоток ротор шагового двигателя поворачивается на угол (шаг двигателя)

$$\gamma_{\text{ш}} = \frac{2\pi}{i} = \frac{2\pi}{Z_p \cdot m \cdot n} \cdot (Z_p - Z_c),$$

или при минимальной разнице чисел пазов ротора и статора  $Z_p - Z_c = 1$

$$\gamma_{\text{ш}} = \frac{2\pi}{Z_p \cdot m \cdot n}.$$

Для увеличения вращающего момента на валу шагового двигателя осуществляют одновременную коммутацию нескольких последовательно расположенных обмоток. Так, при групповой симметричной коммутации обмоток 1, 2, 3 – 2, 3, 4 – 3, 4, 5 – ... намагничивающая сила увеличивается почти в два раза по сравнению с

последовательной коммутацией только одной обмотки. Это приводит к существенному увеличению момента вращения шагового двигателя.

Как правило, у ШД выделяются следующие *режимы работы*: статический (протекание тока по одной или группе фазных обмоток), квазистатический (отработка единичных шагов), установившийся (постоянная частота управляющих импульсов) и переходный (пуск, торможение, реверс).

*Основными рабочими характеристиками ШД* являются: предельная механическая характеристика в установившемся режиме  $M_c = \varphi(f)$  и предельная динамическая характеристика приемистости в переходных режимах  $f = \varphi(M_c)$ .

Предельная механическая характеристика в установившемся режиме  $M_c = \varphi(f)$  – это зависимость момента на валу двигателя от частоты управляющих импульсов (рис. 7.2).

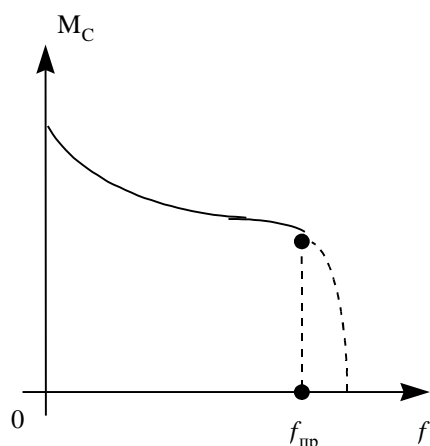


Рисунок 7.2. Предельная механическая характеристика

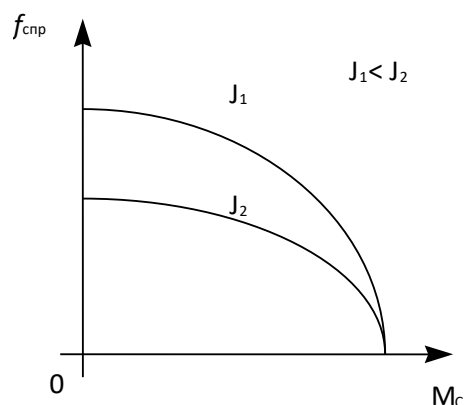


Рисунок 7.3. Предельные динамические характеристики приемистости

С ростом частоты увеличивается индуктивное сопротивление обмотки якоря, нарастание тока происходит медленнее, и при предельной частоте  $f_{пр}$  двигатель выпадает из синхронизма (теряет шаг), поскольку недостаточная величина тока в обмотке не обеспечивает необходимого момента вращения.

Основное требование к ШД в переходных режимах (пуск, торможение, реверс, переход с одной частоты на другую) – это сохранение синхронизации (отсутствие потери шага) при изменении частоты управляющих импульсов.

На рис. 7.3 показаны 2 предельные динамические характеристики приемистости для двух моментов инерции установки, приведенных к валу двигателя. Частота приемистости  $f_{прс}$  управляющих импульсов – это

максимальная частота, при которой возможен пуск без выпадения из синхронизма. У современных ШД  $f_{\text{ПРС}}=100\div 1000$  Гц при пуске. При реверсе частота приемистости снижается до  $(0,2\div 0,5)f_{\text{ПРС}}$ .

### Схема управления шаговым двигателем

Периодически повторяющиеся управляющие импульсы напряжения прямоугольной формы вырабатываются генератором частоты и через асинхронные RS–триггеры, исключающие потерю импульсов вследствие дребезга контактов переключателей S1–S4, поступают на прямой «+1» (ШД вращается по часовой стрелке) или инверсный «–1» (ШД вращается против часовой стрелки) входы счетчика СТ в зависимости от положения переключателя S3 (рис. 7.4). Изменение частоты генератора осуществляется потенциометрами R1 и R2.

Переключатель S1 устанавливает режим импульсов напряжения: периодически повторяющиеся или одиночные, подаваемые нажатием кнопки S2. Переключателем S4 разрешается («START») или блокируется («STOP») прохождение импульсов на вход счетчика СТ.

Кнопкой S5 осуществляется сброс («RESET») системы управления ШД в исходное состояние. Реверсивный 4–х разрядный счетчик СТ выполнен на основе триггеров (микросхема K155ИЕ7) и подсчитывает количество поступающих на вход импульсов в двоичном коде. Максимальное число импульсов, которое может быть записано в счетчике, равно  $N_M=2^n-1=2^4-1=15$ , где  $n$  – число разрядов.

В исходном состоянии счетчик обнулен. С приходом первого импульса он начинает суммирование (если импульс напряжения от генератора поступает на вход «+1» счетчика) или вычитание (если импульс напряжения поступает на вход «–1» счетчика); в последнем случае в начале счета все разряды счетчика находятся в состоянии «1». На выходе счетчика появляются сигналы, отображающие количество входных сигналов, записанных в двоичном коде. Например, при 10 входных сигналах состояние счетчика будет (табл. 7.1): Q4=1; Q3=0; Q2=1; Q1=0, то есть в двоичном коде записано число  $1010=1\times 2^3+0\times 2^2+1\times 2^1+0\times 2^0=8+0+2+0=10$ .

С помощью мультиплексора MS (микросхема K555КП11) и переключателя S7 выбирается 12–тактная или 6–тактная схема управления. Для 6–тактной схемы младший разряд мультиплексора Q1 и тем самым вход «1» дешифратора ДС принудительно устанавливается в «0», вследствие чего все четные состояния дешифратора Q2, Q4, Q6, Q8, Q10, Q12 исключаются (табл. 7.2).

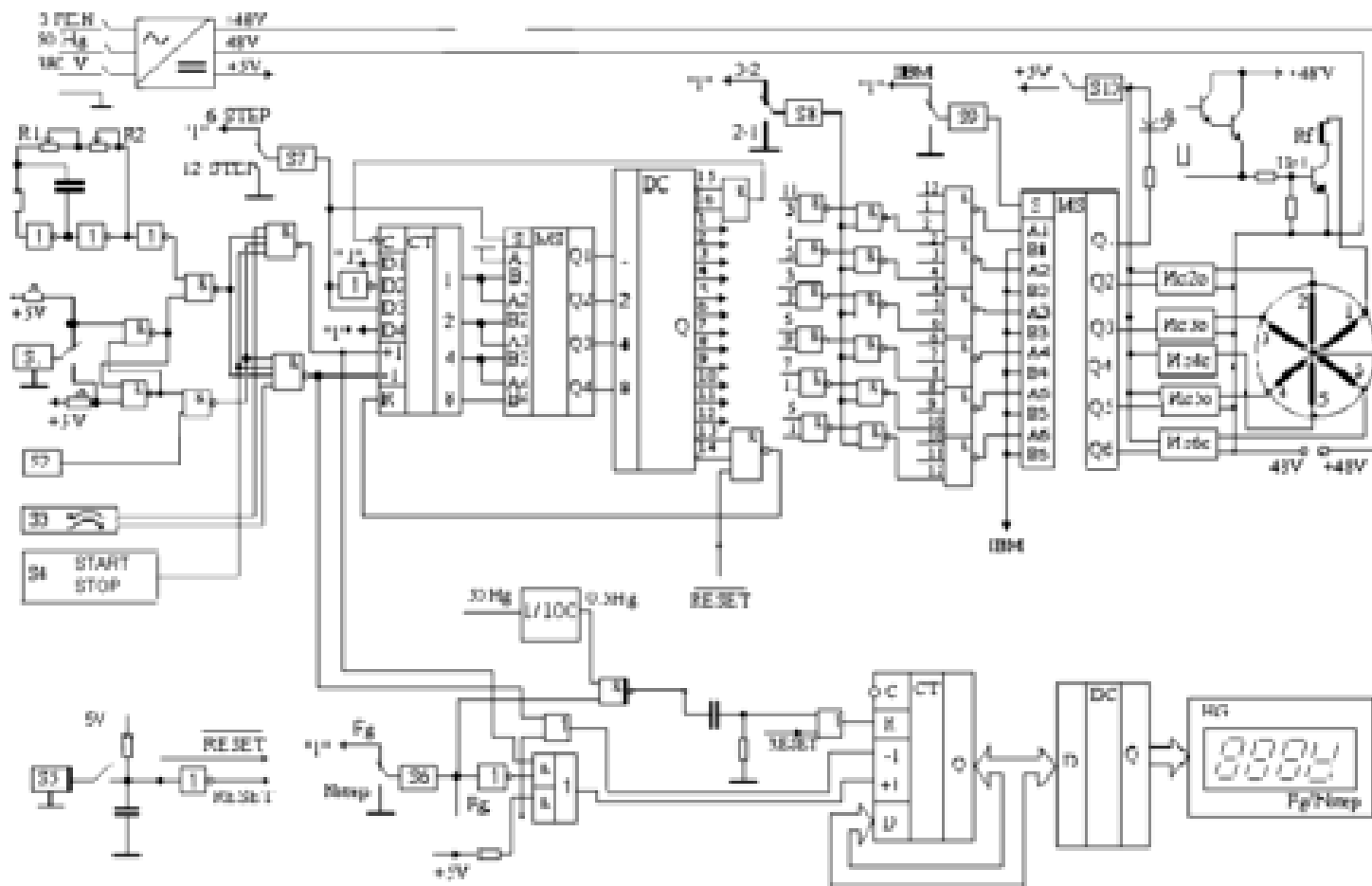


Рисунок 7.4. Схема управления шаговым двигателем

Таблица 7.1

Таблица состояний четырехразрядного счетчика СТ на сложение

№ импульса	Выходы счетчика			
	Q4(8)	Q3(4)	Q2(2)	Q1(1)
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Дешифратор ДС (микросхема К155ИД3) преобразует 4–разрядный двоичный код выхода MS в код «1 из 16–ти», то есть при каждой комбинации входных в ДС сигналов формируется единичный сигнал только на том выходе ДС, номер которого соответствует десятичной записи того же числа. Например, если на вход ДС подана комбинация сигналов в двоичном коде 1001 (в десятичном коде число 9), то сигнал «1» появится лишь на выходе Q9 дешифратора (табл. 7.2).

Шаговый двигатель работает по 12–тактной или 6–тактной схемам, поэтому для обеспечения этого условия выходы Q13 и Q14 дешифратора через элемент И–НЕ (микросхема К155ЛА4) подаются на вход R (сброс) счетчика СТ: с приходом 12–ого импульса (для 12–тактной схемы) и 6–го (для 6–тактной схемы) на выходе Q13 или Q14 дешифратора устанавливается «1» и цикл счета импульсов начинается снова (табл. 7.3). Выходы Q15, Q16 дешифратора и элемент И используются для



повторения циклов счета при поступлении импульсов напряжения генератора на вход «-1» счетчика СТ (реверс ШД).

Таблица 7.2

Таблица истинности дешифратора ДС при 12-тактной схеме управления

Число импульсов	Входы				Выходы													
	8	4	2	1	Q1 3	Q 1	Q 2	Q 3	Q 4	Q 5	Q 6	Q 7	Q 8	Q 9	Q10	Q1 1	Q1 2	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
11	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Табл. 7.3 характеризует работу дешифратора при 6-тактной и 12-тактной схемах коммутации обмотки возбуждения ШД с алгоритмами управления 1-2 и 2-3 (порядок включения фаз и одновременной их работы).

Изменение алгоритма управления можно наблюдать по переключению светодиодов на верхней панели. Каждый светодиод включен в цепь одной фазы ШД и показывает какая фаза находится во включенном состоянии.

Таблица 7.3

Алгоритм работы дешифратора при 6-тактной и 12-тактной схемах коммутации обмотки возбуждения

S7	S8	Состояние дешифратора											
режим коммутации	а-горитм	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
6step	1-2	1		2		3		4		5		6	
6step	2-3	6, 1, 2		1, 2, 3		2, 3, 4		3, 4, 5		4, 5, 6		5, 6, 1	
12step	1-2	1	1, 2	2	2, 3	3	3, 4	4	4, 5	5	5, 6	6	6, 1
12step	2-3	6, 1, 2	1, 2	1, 2, 3	2, 3	2, 3, 4	3, 4	3, 4, 5	4, 5	4, 5, 6	5, 6	5, 6, 1	6, 1

Сигналы Q1–Q12 с выхода дешифратора поступают на комбинационную схему из элементов 2И–НЕ (К155ЛА3) и 4И–НЕ (К155ЛА1), управляемую от переключателя S8. Эта схема представляет собой шифратор униполярного кода дешифратора «1 из 12–ти» в шестипозиционный код управления фазами ШД. Выходные сигналы логических элементов 4И–НЕ в виде шестипозиционного кода поступают на вход мультиплексора MS, режим которого (логический блок «1» или компьютер) выбирается переключателем S9.

Выходные сигналы мультиплексора Q1–Q6 в установленном ранее режиме коммутации управляют усилителями мощности Uс1–Uс6 в цепи обмоток возбуждения ШД.

Обмотки возбуждения ШД питаются от диодного выпрямителя напряжением  $U_{п}=48$  В, цепи управления работают на напряжении 5 В. Гальваническая развязка цепей управления и силовой выполнена с помощью транзисторной оптопары АОТ100Б (рис. 7.4). Блокировка коммутации фаз ШД выполняется переключателем S10.

Индикация частоты импульсов или их числа осуществляется индикатором НГ следующим образом (рис. 7.4). На вход делителя частоты 1/100 подается частота сети 50 Гц, а с выхода снимается частота 0,5 Гц, задающая интервал измерения (2 с). Схемой управления на элементах И, И–НЕ, ИЛИ, ИЛИ–НЕ и переключателем S6 выбирается режим измерения частоты (положение «1») или числа импульсов (положение «Nstep»). На входы «+1» и «-1» двоично–десятичного реверсивного счетчика СТ (реализован на 4–х микросхемах К155ИЕ6) подаются те же сигналы, что и на входы счетчика СТ логического блока (рис. 7.4). Дешифратор ДС преобразует 4–х разрядный десятичный код сигналов генератора в код, необходимый для управления 4–мя семисегментными индикаторами НГ.

### **Описание экспериментальной установки**

Лабораторный стенд состоит из *электромеханического агрегата*, включающего шаговый двигатель и нагрузочное устройство, и *приборного блока*.

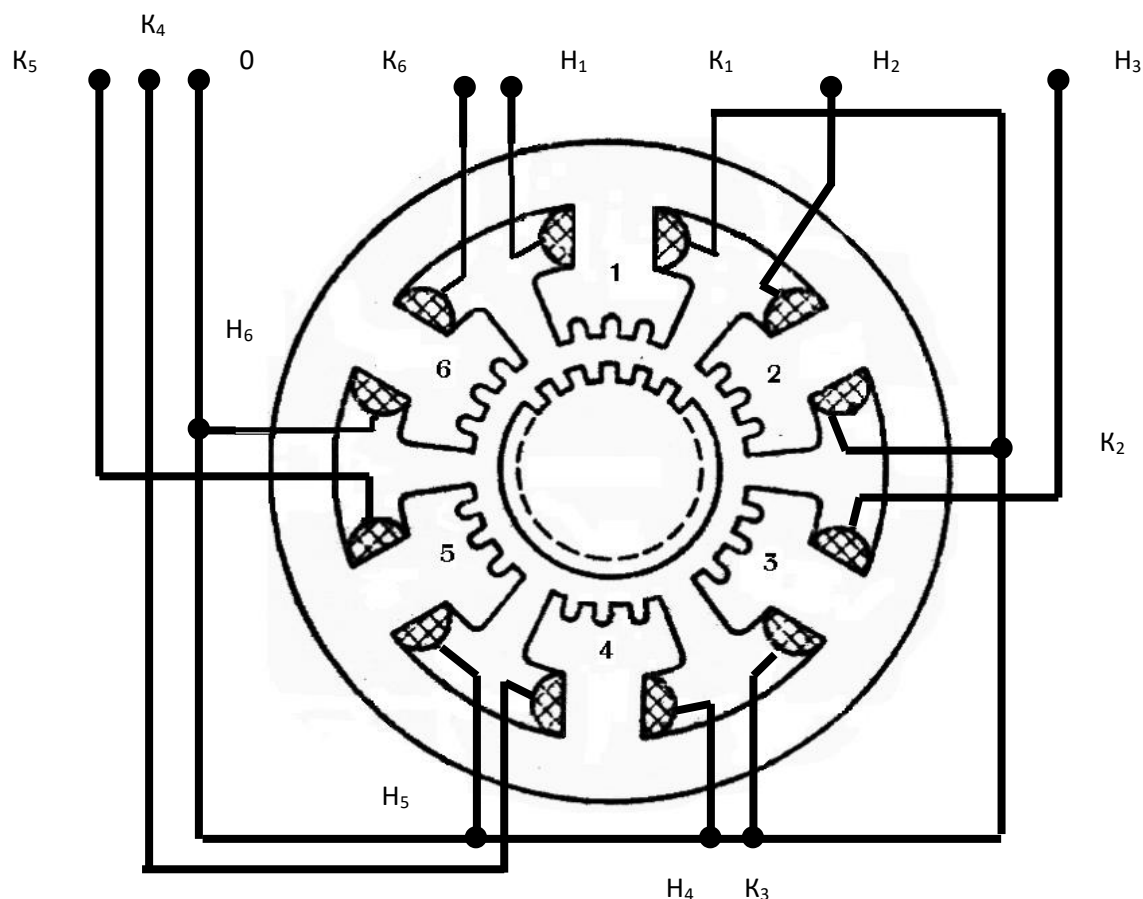
На стенде установлен шаговый двигатель, выполненный на основе синхронного реактивного редукторного микродвигателя.

#### **Шаговый двигатель**

Тип ШД – 5Д1М;

- номинальная мощность  $P_{н}=36$  Вт;
- номинальный ток фазы  $I_{н}=3,0$  А;
- максимальная скорость  $n_{м}=4$  об/с;
- число фаз  $m=6$ ;
- основной шаг  $\alpha_{ш}=1,5^{\circ}$ ;

- максимальный синхронизирующий момент:  
0,3 Нм при 10 Гц, 0,2 Нм при пм;
  - момент инерции  $J=10^{-5}$  кг·м<sup>2</sup>;
  - сопротивление фазы  $R_1=3,0$  Ом;
  - индуктивность фазы  $L_1=2,1$  мГн;
  - число зубцов ротора  $Z_P=20$ .
- Схема двигателя показана на рис. 7.5.



*Рисунок 7.5. Схема реактивного редукторного шагового двигателя*  
*Нагрузочное устройство* нагружает двигатель и измеряет вращающий момент. На валу ШД расположен фрикционный тормоз, содержащий шкив и 2 динамометра. Измерение выполняют по шкалам двух динамометров, замеряя силы натяжения нитей, соответственно  $F_1$  и  $F_2$ . Величина момента вращения определяется по выражению:

$$M=0,243(F_1-F_2), \text{ Нм,}$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – показания динамометров, кгс.

Приборный блок подключается к сети 380 В автоматическим выключателем, установленным на левой боковой панели стенда и соединенным с электромеханическим агрегатом кабелем.

Перевод обозначений на панели приборного блока представлен в табл. 7.4.

Таблица 7.4

*Перевод обозначений на панели приборного блока*

FREQUENCY	частота
STEP	шаг
APPROXIMATELY	приближенно
PRECISELY	точно
START	пуск
STOP	останов
RESET	сброс
HG	индикатор частоты или числа импульсов

Функции переключателей на панели приборного блока:

S1 – переключатели режима подачи импульсов от генератора или одиночного импульса;

S2 – кнопка подачи одиночного импульса;

S3 – переключатель направления вращения вала ШД;

S4 – переключатель пуска или принудительного останова двигателя;

S5 – кнопка начального сброса;

S6 – переключатель режима индикации – счет частоты или импульсов;

S7 – переключатель режима коммутации обмотки возбуждения ШД – 6–тактный или 12–тактный;

S8 – переключатель режима коммутации обмотки возбуждения ШД по фазам – алгоритм управления;

S9 – переключатель вида задающего устройства – логический блок или компьютер;

S10 – переключатель блокировки коммутации фаз двигателя.

**Программа работы**

1. Изучить принцип действия и конструкцию шагового двигателя.

2. Провести проверку работоспособности стенда.

3. Экспериментально снять:

3.1. величину единичного шага отработки угла;

3.2. предельные механические характеристики;

3.3. предельные динамические характеристики двигателя;

4. Построить по результатам эксперимента:

4.1. предельные механические характеристики двигателя;

4.2. предельные динамические характеристики.

## Методические указания

**1. Проверка работоспособности стенда** производится в следующей последовательности. Перед включением убедиться, что переключатели S1, S3, S4, S6–S10 установлены в верхнее положение; винт регулировки нагрузки на электромеханическом агрегате завернут по часовой стрелке до упора.

Включить сетевой автомат на левой боковой панели, при этом должен загореться красный светодиод на верхней панели.

На индикаторе НГ должна отображаться частота генератора; поворачивая ручки потенциометров R1 и R2 убедиться, что происходит изменение частоты.

Переключить S1, S6, S8, S9, S10 в нижнее положение, затем нажать кнопку S5; при этом должен загореться светодиод фазы «1».

Нажимая кнопку S2 убедиться, что происходит вращение лимба на ШД, переключение светодиодов на верхней панели, на индикаторе НГ отображается количество нажатий кнопки S2.

Перевести переключатель S3 в нижнее положение и, нажимая S2, убедиться, что лимб ШД вращается в обратном направлении и отсчет на индикаторе НГ происходит также в обратном направлении. Установить S3 в верхнее положение.

Установить переключатель S7 в нижнее положение и нажать кнопку S5.

Нажимая кнопку S2, убедиться, что переключение светодиодов происходит в следующем порядке:

1, 1–2, 2, 2–3, 3, 3–4, 4, 4–5, 5, 5–6, 6, 6–1, 1 и т. д.; затем переключить S8 в положение «2–3» и наблюдать переключение светодиодов:

6–1–2, 1–2, 1–2–3, 2–3, 2–3–4, 3–4, 3–4–5, 4–5, 4–5–6, 5–6, 5–6–1, 6–1, 6–1–2 и т. д.

Переключатель S4 установить в положение «STOP» и, нажимая кнопку 2, убедиться, что вращение лимба ШД не происходит.

**2. Определение величины единичного шага** проводится в следующем порядке.

Переключатели S3 и S4 установить в верхнее положение, а S1, S6, S7, S8, S9 и S10 – в нижнее. В начале эксперимента произвести начальный сброс (кнопка S5). При помощи нагрузочного устройства снять нагрузку с вала ШД.

Записать начальное значение угла поворота лимба.

Нажимая многократно кнопку S2, повернуть лимб на некоторый угол.

Величина единичного шага:

$$\alpha_{\text{ш}} = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{n},$$

где  $\varphi_1$  – начальный угол поворота лимба;  $\varphi_2$  – конечный угол поворота лимба;  $n$  – число нажатий кнопки S2 (считать и контролировать по индикатору HG); для повышения достоверности число  $n$  должно быть достаточно большим (более 25).

Те же действия произвести для шеститактной схемы коммутации, для чего переключатель S7 установить в положение «6 step».

Сравнить полученные значения единичного шага для 12–тактной и 6–тактной схем коммутации.

**3. Предельные механические характеристики  $M_c=f(f)$**  вначале снимаются для 12–тактной системы коммутации с алгоритмом 1–2. Для этого переключатели S1, S3, S4, S6 установить в верхнее положение, а S7, S8, S9 и S10 – в нижнее. Произвести начальный сброс (кнопка S5).

Снять нагрузку с вала ШД поворотом винта на правом динамометре.

Пуск двигателя производить плавно, повышая частоту импульсов с помощью потенциометров R1 и R2 (*при частотах свыше 1000 Гц пуск из неподвижного состояния невозможен*).

Нагружая ШД при помощи фрикционного тормоза, занести в табл. 7.5 значения частоты импульсов генератора  $f$  (показания индикатора HG) и показания динамометров  $F_1$ ,  $F_2$ . Опыт следует проводить до значений момента, соответствующего началу пропуска шагов (выпадение из синхронизма), наблюдаемого визуально. Частота импульсов, соответствующая этому режиму и есть предельная частота  $f_{\text{пр}}$ . Провести аналогичные исследования для 6–ти тактной системы коммутации с алгоритмом 1–2.

Таблица 7.5

$f$	Гц							Примечание
$F_1$	кгс							$M=9,81(F_1-F_2)R$ $R$ – радиус шкива тормоза  $R=\dots m$
$F_2$	кгс							
$F_1-F_2$	кгс							
$M_c$	Нм							

Выполнить аналогичные опыты для 12–тактной схемы коммутации с алгоритмом 2–3 (переключатель S8 поставить в верхнее положение) и для 6–тактной схемы коммутации с алгоритмом 2–3 при верхнем положении переключателя S7.

По полученным данным построить графики  $M_c=f(f)$  для разных схем коммутации.

**4. Исследование предельной динамической характеристики приемистости** проводят в следующей последовательности.

Переключатели S1, S3, S6 установить в верхнее положение, а S4, S7, S8, S9, S10 – в нижнее. Провести первоначальный сброс.

Установить определенную частоту импульсов потенциометрами R1 и R2.

Нагрузить вал двигателя некоторым моментом  $M_c$ .

Переключить S4 в положение «START», если вал ШД начнет вращаться без пропуска шагов (алгоритм 1–2 для 12–тактной схемы, табл. 7.3), то опыт продолжать, увеличивая частоту при той же нагрузке до тех пор, пока при какой-то последующей частоте пуск не произойдет. Полученная частота и будет частотой приемистости  $f_{пр}$ .

Аналогично установить другие точки характеристики  $f_{пр} = f(M_c)$ , меняя момент нагрузки двигателя. Данные опыта заносятся в таблицу, аналогичную табл. 7.1, в которой  $f = f_{пр}$ .

Аналогично провести исследования для других схем коммутации: 12–тактная схема, алгоритм 2–3; 6–тактная схема, алгоритмы 1–2 и 2–3. По данным экспериментов построить зависимости частоты приемистости от момента нагрузки на валу двигателя  $f_{пр} = f(M_c)$ .

#### **Контрольные вопросы и задания**

1. Объясните принцип действия реактивного редукторного шагового двигателя.

2. Что такое симметричная и несимметричная коммутация обмоток возбуждения ШД?

3. Почему при несимметричной коммутации обмоток ШД может быть получен меньший шаг ротора?

4. Как выполнить реверс ШД?

2. Каким образом обеспечивается 12–тактная и 6–тактная схемы работы ШД?

3. Каким образом регулируют частоту вращения ШД?

4. Почему при предельной частоте  $f_{пр}$  ШД выпадает из синхронизма?

5. Почему при уменьшении момента инерции установки частота приемистости увеличивается?

#### **Литература**

1. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

2. Штелтинг Г., Байсе А. Электрические микромашины. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 227 с.

3. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики: учебное пособие / В. В. Хрущев. – 2-е изд., перераб. и доп.. Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 368 с.

## 8. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** изучение конструкции, принципа действия, основных характеристик и способов регулирования частоты вращения бесконтактного двигателя постоянного тока в разомкнутых и замкнутых системах регулирования.

### Объект исследований

*Бесконтактный двигатель* постоянного тока представляет собой *машинно–вентильную систему*, объединяющую синхронный электродвигатель с полупроводниковым устройством, управляющим им. У таких двигателей щеточно–коллекторный узел отсутствует, его роль выполняет транзисторный коммутатор, управляемый датчиками углового положения ротора. Благодаря этому бесконтактный двигатель, сохраняя основные характеристики коллекторного двигателя, более надежен в работе, создает меньшие радиопомехи.

Исследуемый бесконтактный двигатель состоит из трех частей: синхронного двигателя, датчиков углового положения ротора и полупроводникового коммутатора. Датчики положения размещаются в специальных пазах по центрам полюсов обмотки якоря, коммутатор может быть встроен в двигатель.

В пазах статора двигателя размещается четырехфазная обмотка якоря: Н1–К1, К2–Н2, Н3–К3, К4–Н4 (рис. 8.1). Каждая фаза состоит из двух секций, соединенных последовательно. Фазы Н1–К1, Н3–К3 и К2–Н2, К4–Н4 запитываются от однополярного источника так, чтобы при вращении двухполюсного магнитоэлектрического ротора, выполненного из постоянного магнита, создавать однополярный электромагнитный момент двигателя.

В каждый момент времени ток протекает лишь по одной фазе обмотки якоря, остальные обесточены (табл. 8.1), благодаря чему осуществляется поворот магнитного поля на  $90^\circ$ . Управление токораспределением по секциям выполняют транзисторы по сигналам датчиков углового положения ротора.

В исследуемом двигателе в качестве датчиков углового положения ротора использованы два датчика ЭДС Холла. Датчик Холла выполняется на кремниевой пластинке (рис. 8.2) или стеклянной (слодяной) пленке с напыленным полупроводником.



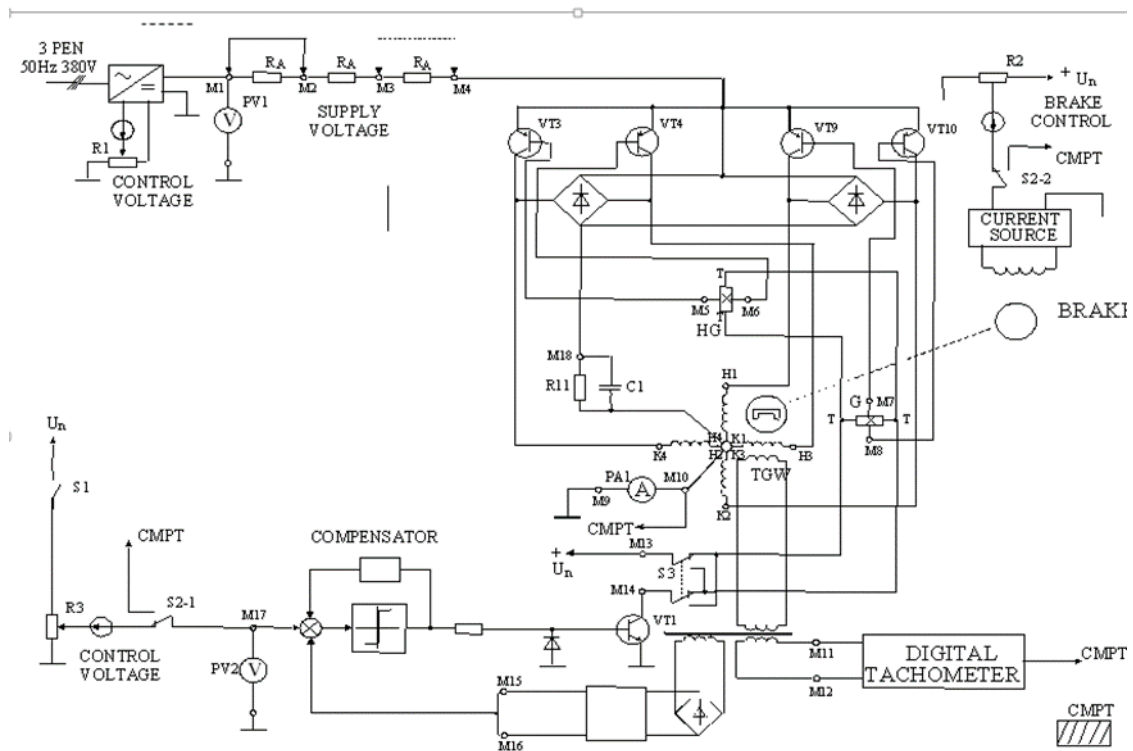


Рисунок 8.1. Схема управления бесконтактного двигателя

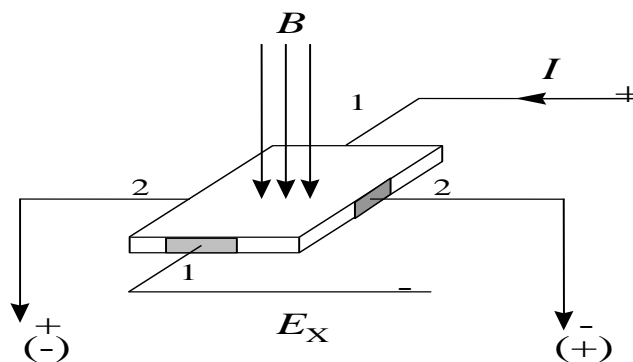


Рисунок 8.2. Датчик Холла

К противоположным торцам 1–1 припаяны токовые выводы, через которые датчик подключается к источнику питания.

При подаче на токовые выводы напряжения питания по кремневой пластинке протекает ток. При воздействии на датчик магнитного поля нормальная к плоскости пластины составляющая индукции вызывает на гранях 2–2 поперечное электрическое поле, ЭДС которого (ЭДС Холла)

$$E_x = K \cdot \frac{I \cdot H}{d},$$

где  $K$  – константа Холла;  $I$  – величина тока;  $H$  – нормальная составляющая напряженности магнитного поля (перпендикулярная линии тока в пластине);  $d$  – толщина пластины.

Если изменять направление индукции или питающего тока, меняется знак ЭДС Холла.

В двигателе два датчика размещаются в специальных пазах в расточке статора и сдвинуты относительно друг друга на  $90^\circ$  (в табл. 8.1 и на рис. 8.1 обозначены  $G=X1$ ,  $HG=X2$ ). При вращении ротора (постоянного магнита) датчики вырабатывают на выходах М5–М6 и М7–М8 (рис. 8.1) напряжения, величина и знак которых соответствуют величине и знаку магнитной индукции поля, создаваемого ротором–индуктором. Эти напряжения являются управляющими для транзисторов VT3, VT4, VT9, VT10.

Датчики X1 или X2 управляют коммутацией двух частей обмотки якоря: датчик X1 коммутирует секции Н1–К1 и К2–Н2; датчик X2 коммутирует секции Н3–К3 и К4–Н4.

Например, отрицательный потенциал одного из полюсов ЭДС Холла на датчике X1 вызывает отпирание транзистора VT9 и включение секции Н1–К1, в это же время положительный потенциал другого полюса ЭДС Холла запирает транзистор VT10 и секция К2–Н2 отключается, то есть секции Н1–К1 и К2–Н2 работают строго в противофазе. Аналогично коммутируются и секции Н3–К3, К4–Н4.

Знак ЭДС Холла каждого датчика зависит от того, какой полюс ротора находится под датчиком (табл. 8.1).

*Транзисторный коммутатор* управляет частотой вращения магнитного поля синхронного двигателя. Упрощенная электрическая схема коммутатора приведена на передней панели стенда (рис. 8.1).

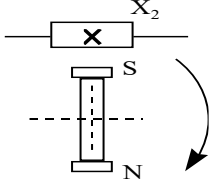
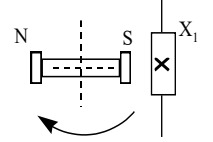
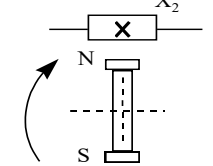
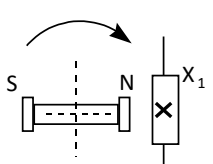
Каждая секция обмотки якоря коммутируется транзисторным ключом: секция Н1–К1 – VT9, К2–Н2 – VT10, Н3–К3 – VT4 и К4–Н4 – VT3. База каждого транзистора подключена к выводам датчиков ЭДС Холла (гнезда М5, М6 и М7, М8). На токовые выводы датчиков Холла подается напряжение питания  $+U_{\text{п}}$  (гнездо М13), которое формируется специальной схемой. Если транзистор VT1 закрыт, закрываются транзисторы VT9, VT10, VT3, VT4. Если VT1 открыт, ток через датчики Холла протекает под действием напряжения  $U_{\text{п}} \geq 5 \text{ В}$ .

Диодные мосты VD1 и VD2, резистор R11 и конденсатор C1 защищают транзисторы от перенапряжений.

*Угловая частота вращения двигателя* измеряется цифровым тахометром, на вход которого через разделительный трансформатор TV (рис. 8.1) подается напряжение, пропорциональное частоте вращения, от тахометрической обмотки TGW, расположенной в пазах статорного пакета вместе с обмоткой якоря.

Таблица 8.1

Схема управления работой двигателя

Положение ротора	Сигнал датчика Холла	Открыт транзистор	Закрываются транзисторы	Включена секция	Поворот ротора
	+M5 -M6	VT4	VT3, VT9, VT10	Н3-К3	0°-90°
	+M7 -M8	VT10	VT3, VT4, VT9	К2-Н2	90°-180°
	-M5 +M6	VT3	VT4, VT9, VT10	К4-Н4	180°-270°
	-M7 +M8	VT9	VT3, VT4, VT10	Н1-К1	270°-360°

На стенде частота вращения двигателя может регулироваться изменением напряжения источника питания (потенциометром R1) или трехсекционным реостатом в цепи якоря (гнезда M1...M4). Сопротивление каждой секции  $R_A=3,0$  Ом.

Стабилизация частоты вращения двигателя в замкнутой системе регулирования выполняется введением в схему управления отрицательной обратной связи по скорости. Для этого в компараторе («COMPENSATOR») на входе транзистора VT1 (рис. 8.1) сравниваются по величине два напряжения: напряжение управления  $U_y$ , снимаемое с потенциометра R3, и напряжение обратной связи по скорости  $U_{oc}$ , подведенное от тахометрической обмотки TGW двигателя через разделительный трансформатор TV, диодный выпрямитель VD3 и фильтр низких частот EC. При  $U_y > U_{oc}$ , транзистор VT1 открыт, двигатель включен, и его скорость увеличивается до тех пор, пока  $U_{oc} \leq U_y$ ; при  $U_{oc} > U_y$  транзистор VT1 закрывается, и двигатель переходит в кратковременный режим свободного выбега. При

достижении  $U_y = U_{OC}$  VT1 открывается, двигатель ускоряется и т.д. Средняя частота вращения двигателя стабилизируется на уровне, соответствующем величине управляющего напряжения  $U_y$ . Таким образом, изменение величины напряжения управления  $U_y$  приводит к изменению частоты и скважности подключения транзисторного преобразователя к фазам двигателя и, следовательно, его частоты вращения.

### Описание экспериментальной установки

Лабораторный стенд состоит из *приборного блока* и *электромеханического агрегата* на базе бесконтактного двигателя постоянного тока с встроенным синхронным тахогенератором и электромагнитного тормоза с моментомером. Электромеханический агрегат соединяется с приборным блоком тремя кабелями на передней стороне стенда.

Основные технические данные бесконтактного двигателя:

- тип БК–1424;
- $P_H = 6$  Вт;  $U_H = 27$  В;  $I_H = 0.44$  А;
- $n_H = (4000 \pm 10 \%)$  об/мин;
- $M_H = 0.0147$  Нм;  $M_{П}/M_H = 1.5$ ;  $\eta_H = 51\%$ ;
- режим работы S1, S2, S3.

Электромеханический тормоз питается от источника постоянного тока и позволяет измерять вращающий момент на валу. Величина момента вращения  $M = 2,4 \times 10^{-3} Z$ , Нм ( $Z$  – число делений по лимбу моментомера). Сопротивление обмотки возбуждения моментомера  $R_B = 80$  Ом.

Перевод обозначений на панели представлен в табл. 8.2.

Таблица 8.2

#### Перевод обозначений на панели

POWER	энергия
ARMATURE VOLTAGE	напряжение якоря
CURRENT SOURCE	источник тока
ARMATURE CURRENT	ток якоря
BRAKE	тормоз
EXCITING CURRENT	ток возбуждения
CONTROL VOLTAGE	управляющее напряжение
POWER SUPPLY	источник энергии
TEST MOTOR	исследуемый двигатель
BRAKE CONTROL	задатчик нагрузки
DIGITAL TACHOMETER	цифровой тахометр
SPEED, rad/s	скорость, рад/с
HG	датчик Холла
TGW	измерительная обмотка тахогенератора
CMPT	компьютер

## Программа работы

1. Провести проверку работоспособности стенда.
2. Экспериментально снять:
  - 2.1. механические характеристики двигателя  $\omega=f(M)$  при постоянном напряжении якоря  $U=\text{const}$ ,  $R_{\text{доб}}=0$ ;
  - 2.2. регулировочные характеристики двигателя  $\omega=f(U)$  при постоянном моменте нагрузки  $M=\text{const}$ ,  $R_{\text{доб}}=0$ ;
  - 2.3. искусственные механические характеристики двигателя  $\omega=f(M)$  при постоянном напряжении якоря  $U=\text{const}$  и наличии дополнительного сопротивления в его цепи  $R_{\text{доб}} \neq 0$ ;
  - 2.4. характеристики  $\omega=f(I)$  и  $\omega=f(M)$  в замкнутой системе регулирования;
  - 2.5. регулировочную характеристику  $\omega=f(U_y)$  в замкнутой системе регулирования.
3. Построить по результатам эксперимента:
  - 3.1. механические  $\omega=f(M)$  и регулировочные  $\omega=f(U)$  характеристики двигателя при  $R_{\text{доб}}=0$ ;
  - 3.2. искусственные механические характеристики двигателя  $\omega=f(M)$  для трех значений дополнительного сопротивления в цепи якоря;
  - 3.3. зависимость частоты вращения от дополнительного сопротивления в цепи якоря  $\omega=f(R_{\text{доб}})$  при постоянном моменте нагрузки  $M=\text{const}$ ;
  - 3.4. механические  $\omega=f(I)$  и  $\omega=f(M)$  при  $U_y=\text{const}$  и регулировочную характеристику  $\omega=f(U_y)$  в замкнутой системе регулирования;
  - 3.5. осциллограммы: эпюр напряжений на секциях обмотки якоря; сигналов с датчиков Холла; тока якоря.

## Методические указания

1. **Проверка работоспособности стенда** производится в следующей последовательности:
  - поставить тумблеры S1 и S2 в крайнее левое положение;
  - повернуть ручки потенциометров R2 и R3 влево до упора, а потенциометра R1 – вправо до упора;
  - включить автомат на левой боковой панели, при этом должна загореться лампочка «POWER»;
  - повернуть по часовой стрелке потенциометр R3 и убедиться, что двигатель вращается;
  - переключить тумблер S3: двигатель должен изменить направление вращения;

– повернуть ручку потенциометра R1 против часовой стрелки и с помощью тахометра убедиться в том, что скорость двигателя уменьшается;

– повернуть ручку потенциометра R2 по часовой стрелке и убедиться в том, что тормоз реагирует на увеличение тока возбуждения в его катушке;

– повернуть ручки потенциометров R2 и R3 против часовой стрелки до упора, а R1 – по часовой стрелке.

## 2. Снятие естественных механических характеристик двигателя.

Опыт проводится при выведенных из цепи якоря сопротивлениях  $R_{доб}$ . (шунтированы проводником) и при трех значениях напряжения питания ( $U=16$  В,  $U=20$  В,  $U=24$  В).

Для осуществления эксперимента необходимо:

– разомкнуть обратную связь по скорости, повернув ручку потенциометра R3 по часовой стрелке до упора – при этом частота вращения двигателя максимальная;

– установить величину напряжения на якоре двигателя по вольтметру PV1 ручкой потенциометра R1;

– поворачивая ручку потенциометра R2, увеличивать нагрузку двигателя, поддерживая потенциометром R1 значение напряжения питания постоянным, и записывать по 4–5 значений частоты вращения, тока якоря и момента на валу (в делениях Z по лимбу моментомера) в табл. 8.3.

Таблица 8.3

*Естественные механические характеристики двигателя*

$\omega$	$c^{-1}$							Примечания
$I$	мА							$U=... В$
$Z$	дел							$R_{доб}=0$
$M$	Н×м							$M=2,4 \times Z \times 10^{-3}$

**Внимание! Ток якоря не должен превышать 550 мА!**

Повторить опыт, изменив напряжение на якоре с помощью потенциометра R1; полученные данные записать в дополнительные таблицы, аналогичные табл. 8.3.

**3. Регулировочные характеристики** двигателя следует снимать при отключенной обратной связи (см. выше) для 3–4 значений момента нагрузки. Опыт проводят следующим образом: устанавливают минимально возможное напряжение питания  $U$  потенциометром R1, нагружают двигатель максимально возможным моментом

(потенциометр  $R_2$  повернуть по часовой стрелке до упора) и фиксируют его значение. Этот момент является наибольшим из тех, которые можно поддерживать постоянным при снятии регулировочных характеристик.

**Внимание! При установке момента не допускать полной остановки двигателя!**

Выбирают значение момента нагрузки (менее максимального) и, поддерживая его постоянным (потенциометр  $R_2$ ), изменяют величину напряжения питания (потенциометр  $R_1$ ), фиксируя при этом значения тока и частоты вращения. Данные экспериментов заносят в табл. 8.4.

Таблица 8.4

*Регулировочные характеристики двигателя*

$\omega$	$c^{-1}$									Примечания
$I$	мА									$Z = \dots$ дел. $M = 2,4 \cdot Z \cdot 10^{-3}$
$U$	В									$R_{доб} = 0$

**4. Механические характеристики при реостатном регулировании частоты вращения** снимаются при полном напряжении якоря (ручка потенциометра  $R_1$  повернута по часовой стрелке до упора). Для проведения опытов необходимо:

- отключить добавочные резисторы  $R_A$ , соединив гнезда  $M_1$  и  $M_4$  с помощью специальной перемычки;
- разомкнуть обратную связь по скорости, повернув ручку потенциометра  $R_3$  по часовой стрелке до упора, при этом скорость двигателя максимальная;
- увеличивать нагрузку двигателя, поворачивая ручку потенциометра  $R_2$  и записывать по 5–6 значений частоты вращения, тока якоря и делений лимба моментомера в табл. 8.5.

Таблица 8.5

*Механические характеристики при реостатном регулировании частоты вращения*

$\omega$	$c^{-1}$									Примечания
$I$	мА									$U = \dots$ В
$Z$	дел									$R_{доб} =$
$M$	Нм									$M = 2,4 \times Z \times 10^{-3}$

Повторить опыт, вводя последовательные добавочные сопротивление  $R_A$  в цепь якоря, путем коммутации гнезд  $M_1..M_4$ . Данные занести в дополнительные табл. 8.5.

При обработке результатов экспериментов следует механические характеристики для разных дополнительных сопротивлений построить на одном графике. Обработать результаты этого графика и построить отдельно для номинального момента нагрузки зависимость  $\omega = f(R_{доб})$ .

**5. Механические характеристики в системе с обратной связью** по скорости следует снимать в следующем порядке: задать напряжение управления  $U_y=3$  В по вольтметру PV2 («CONTROL VOLTAGE»). Поворачивать ручку потенциометра R2 вправо и записывать 5–6 значений частоты вращения, тока якоря и делений лимба моментомера в табл. 8.6.

Таблица 8.6

*Механические характеристики  
в системе с обратной связью по скорости*

$\omega$	$c^{-1}$							Примечания
$I$	мА							$U_y=3$ В
$Z$	дел							
$M$	Нм							

Повторить опыт для значений управляющего напряжения  $U_y=4; 5; 6$  В, заполнить дополнительные табл. 8.6.

**6. Регулировочная характеристика  $\omega=f(U_y)$  в замкнутой системе регулирования** снимается в режиме холостого хода двигателя (ручка потенциометра R2 повернута против часовой стрелки до упора):

– установить последовательно управляющее напряжение  $U_y=0; 1; 2 \dots 6$  В, поворачивая ручку потенциометра R3 по часовой стрелке; для каждого значения  $U_y$  записать значение частоты вращения  $\omega$ ; данные занести в табл. 8.7.

Таблица 8.7

*Регулировочная характеристика  $\omega=f(U_y)$  в замкнутой системе  
регулирования*

$U_y$	В	1	2	3	4	6
$\Omega$	$c^{-1}$					

### **7. Снятие осциллограмм.**

С помощью дуолучевого осциллографа рассмотреть и зарисовать:

– эюры напряжений на секциях обмотки якоря Н1–К1, К2–Н2, Н3–К3, К4–Н4, для чего общие концы обоих входов осциллографа соединить с общим гнездом «L» в центре звезды обмотки якоря (гнездо M9);

– сигналы датчиков Холла (гнезда M5–M6, M7–M8) при  $U_{y_{max}}=6$  В и вращении вала по часовой стрелке и против часовой стрелки (реверс – тумблером S3);

– осциллограммы тока якоря (гнездо M10) и напряжения на гасящей цепочке R11–C1 (гнездо M18).



### **Контрольные вопросы и задания**

1. Поясните конструкцию и назначение отдельных частей бесконтактного двигателя постоянного тока.
2. Поясните принцип действия бесконтактного двигателя постоянного тока.
3. Чем обеспечивается однополярность электромагнитного момента двигателя?
4. Поясните назначение транзисторного коммутатора.
5. Поясните необходимость применения датчиков ЭДС Холла.
6. В чем отличие механических характеристик бесколлекторного двигателя постоянного тока от коллекторного?
7. Сравните регулировочные характеристики испытуемого двигателя с аналогичным коллекторным.
8. Поясните работу электропривода в замкнутой системе стабилизации скорости.
9. Как можно регулировать частоту вращения бесколлекторных двигателей постоянного тока.

### **Литература**

1. Арменский Е. В. Электромашинные устройства автоматики: учебное пособие для вузов / Е. В. Арменский, И. В. Кузина, Г. Б. Фалк. – Москва: Высшая школа, 1986. – 247 с.: ил.
2. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики: учебное пособие / В. В. Хрущев. – 2-е изд., перераб. и доп.. Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 368 с.
3. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие / Ф. М. Юферов. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Москва: Высшая школа, 1988. – 479 с.. – ISBN 506001312-X.
4. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций: учебное пособие / И. Е. Овчинников. – СПб.: Корона-Век, 2007. – 336 с.
5. Овчинников И. Е. Электромеханические и мехатронные системы: учебное пособие / И. Е. Овчинников. – Санкт-Петербург: Корона-Век, 2015. Ч. 1. Полупроводниковые устройства в цепи электрических машин. Коллекторные и бесконтактные двигатели постоянного тока. Конструкции, характеристики, регулирование, динамика разомкнутых систем. – 2015. – 397 с.

## 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

**Цель работы:** ознакомиться с особенностями характеристик неуправляемых выпрямителей, изучить их схемы, собрать имитационную схему и снять опытным путем основные характеристики трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя.

### Объект исследования

На летательных аппаратах с первичной системой электроснабжения переменного тока 200/115В постоянной частоты 400 Гц в качестве вторичной системы используется система электроснабжения постоянного тока с номинальным напряжением 27 В, которая получает энергию от статических преобразователей переменного тока в постоянный. Для этой цели используют трансформаторно-выпрямительные блоки (ТВБ) или выпрямительные установки (ВУ).

Выпрямительные установки применяют не только в качестве источников питания вторичной системы электроснабжения, но и для получения различных напряжений постоянного тока, необходимых для питания отдельных внутренних цепей потребителей электрической энергии. Так как в этом случае этот источник питания является неотъемлемой частью потребителя, то его называют вторичным источником питания (ВИП). ТВБ и ВУ состоят из следующих основных элементов: выпрямителя, трансформатора, сглаживающего фильтра, а в отдельных случаях регулятора напряжения и вентилятора, предназначенного для охлаждения блока.

Наибольшее распространение в ВУ получили двухполупериодные мостовые схемы выпрямления, для вторичных источников питания используются и другие виды схем.

*Полупроводниковые выпрямители можно классифицировать по следующим признакам:*

- по выходной мощности (маломощные – до 600 Вт, средней мощности – до 100 кВт, и большой мощности – более 100 кВт);
- по числу фаз источника (однофазные, многофазные);
- по пульсности выпрямителя, определяемой числом полупериодов протекания тока во вторичной обмотке трансформатора за полный период напряжения;
- по числу знакопостоянных импульсов в кривой выпрямленного напряжения за период питающего напряжения: однополупериодные, двухполупериодные,  $m$ -полупериодные.

Выпрямители могут быть построены на управляемых вентилях (тиристорах, транзисторах) – управляемые выпрямители и на неуправляемых вентилях (диодах) – неуправляемые выпрямители.

Объектом экспериментального исследования в данной работе является мостовая схема выпрямления трехфазного напряжения (схема Ларионова), состоящая из шести полупроводниковых диодов, на которые подается линейное трехфазное напряжение (рис. 9.1).

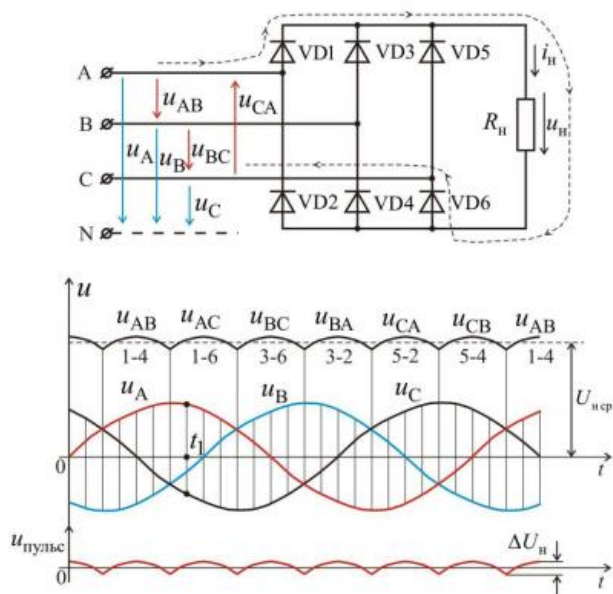


Рисунок 9.1. Схема Ларионова и временные диаграммы напряжений:  $u_A, u_B, u_C$  – кривые фазных напряжений источника питания,  $u_H(t)$  – кривая выпрямленного напряжения (образована отрезками линейных напряжений)

В произвольный момент времени ток через нагрузку протекает от фазы с наибольшим значением напряжения к фазе с наименьшим значением напряжения. Например, в момент времени  $t_1$  наибольшее напряжение в фазе А, наименьшее – в фазе С. Наибольшее напряжение приложено к аноду диода VD1, поэтому этот диод открыт.

По той же причине, наименьшее напряжение, приложенное к катоду диода VD6, открывает этот диод. В результате ток протекает от точки А через открытый диод VD1, нагрузку, открытый диод VD6 к точке С (путь тока показан пунктиром). К нагрузке приложена разность напряжений фаз А и С, то есть линейное напряжение  $u_{AC}$ . Каждый диод при этом открыт одну треть периода.

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{\text{нсп}} = \frac{3U_{\text{лмакс}}}{\pi} \approx 1,35U_{\text{л}} = 2,34U_{\text{ф}},$$

где  $U_{\text{л}}, U_{\text{ф}}$  – действующие значения линейного и фазного напряжений сети.

Если разложить мгновенное значение напряжения на нагрузке в ряд Фурье, получим

$$u_{\text{н}}(t) = U_{\text{нсп}} \left( 1 + \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \frac{2}{143} \cos 12\omega t + \dots \right).$$

Отсюда следует, что пульсации имеют частоту в шесть раз выше частоты сети. Это облегчает фильтрацию пульсаций выпрямленного напряжения. Коэффициент пульсаций  $K_{\text{п}} = \frac{2}{35} \approx 0,057$ .

Так как коэффициент пульсаций мал, сглаживающие фильтры в трехфазной мостовой схеме достаточно часто не применяются.

### Описание виртуальной экспериментальной установки

Виртуальное моделирование осуществляется с помощью пакета расширения Simulink, входящего в комплекс математического пакета MatLab. Имитационная модель представляет собой набор взаимосвязанных блоков, включающих электрические элементы и измерительные приборы. Виртуальная лабораторная установка для исследования неуправляемого выпрямителя (рис. 9.2) содержит элементы, представленные в табл. 9.1. Описание и значения параметров блоков приведены в таблице 9.2.

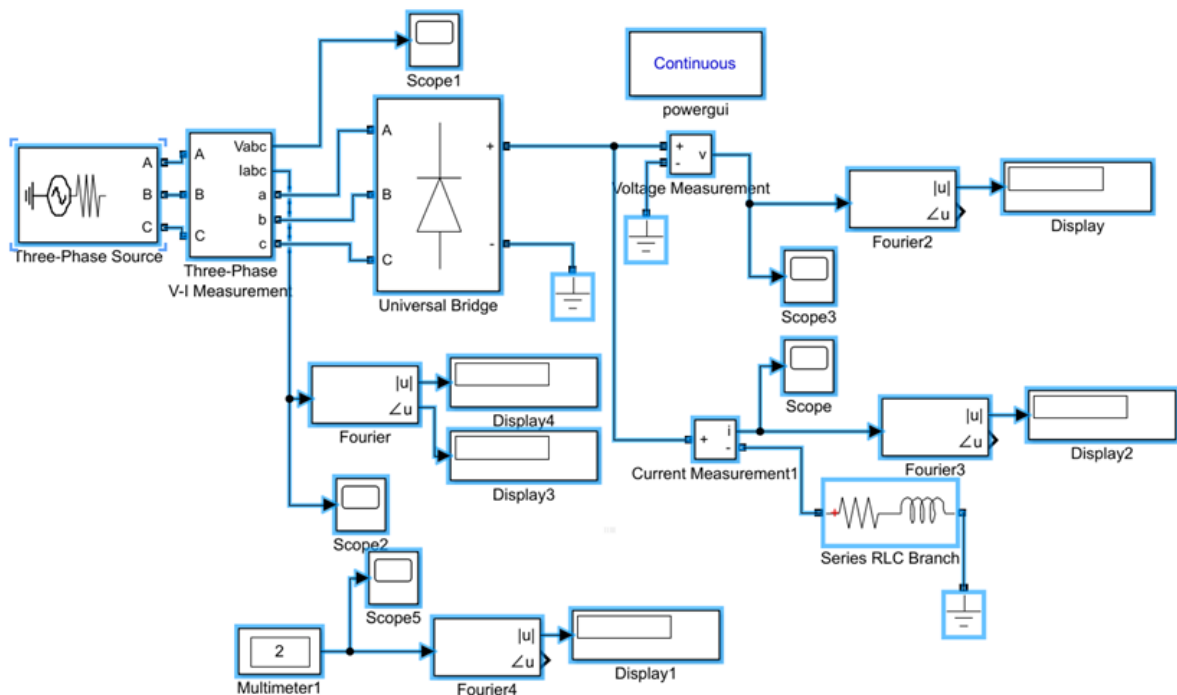


Рисунок 9.2. Модель трехфазного неуправляемого выпрямителя

Таблица 9.1

## Состав модели неуправляемого выпрямителя

Название Блока	Назначение	Библиотека MatLab / Simulink
Three-Phase Source	Источник трехфазного синусоидального напряжения	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Electrical Sources
Universal Bridge	Универсальный мост	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Power Electronic
Series RLC Branch	RLC ветвь (имитации нагрузки)	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Elements
Ground	Заземление	
Three-Phase V-I Measurement	Измеряет трехфазные токи и напряжения	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Measurements
Voltage Measurement	Измеряет мгновенное значение напряжения	
Current Measurement	Измеряет мгновенное значение тока	
Multimeter	Мультиметр (измерение переменных, выбранных в окне Measurement)	
Fourier	Блок для Фурье анализа входной величины (измерение гармонических составляющих тока питания; постоянной составляющей тока нагрузки; среднего значения напряжения на нагрузке; среднего значения тока в диоде)	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Measurements / Additional Measurements
Scope	Осциллограф (визуализация процессов)	Simulation / Sinks
Display	Дисплей (визуализация численного результата)	
Powergui	Блок вычисления начальных условий	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks

Таблица 9.2

*Параметры блоков модели неуправляемого выпрямителя*

Параметры	Значения
<b>Источник трехфазного синусоидального напряжения</b>	
Configuration – схема соединения	«Звезда»с нейтралью
Phase-to-phase voltage – линейное напряжение, В	20
Phase angle of phase A – начальная фаза напряжения, град	0
Frequency – частота напряжения, Гц	400
Source resistance and inductance – внутренние параметры источника:	
сопротивление, Ом	По метод.
индуктивность, Гн	указаниям
<b>Универсальный мост</b>	
Number of bridge arms – количество плеч	3
Параметры схем формирования динамических процессов:	
Snubber resistance R – сопротивление, Ом	100000
Snubber capacitance Cs –емкость, Ф	inf
Power electronic device – тип полупроводникового прибора	Diodes
Параметры полупроводникового прибора:	
Ron– сопротивление, Ом	0,001
Lon– индуктивность, Гн	0
Forward voltage – пороговое напряжение, В	0
<b>RLC ветвь</b>	
Resistance – активное сопротивление, Ом	По метод.
Inductance – индуктивность, Гн	указаниям

**Программа работы**

1. Провести сравнительный анализ схем полупроводниковых выпрямителей, представленных на рис. 9.3, с точки зрения предъявляемых к ним требований на летательных аппаратах.
2. Построить модель мостовой схемы Ларионова.
3. Снять выходную и энергетические характеристики выпрямителя при работе на активно-индуктивную нагрузку без учета коммутации.
4. Снять выходную и энергетические характеристики выпрямителя с учетом коммутации.
5. Снять осциллограммы напряжения и тока на нагрузке и на стороне переменного тока.
6. Снять осциллограммы напряжения и тока одного из диодов моста.

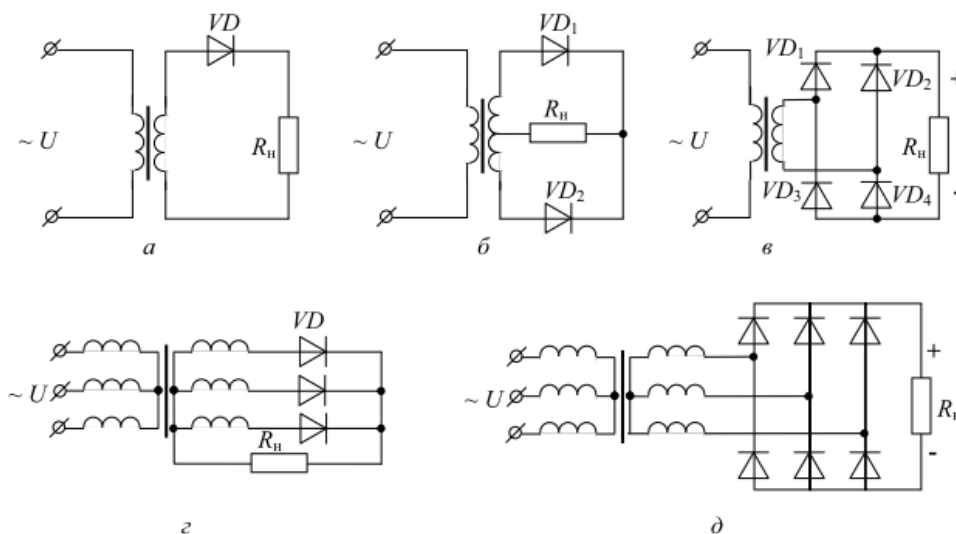


Рисунок 9.3. Схемы неуправляемых выпрямителей:  
 а – однофазная однополупериодная; б – однофазная с нулевым выводом;  
 в – однофазная мостовая; г – трехфазная нулевая; д – трехфазная мостовая

### Методические указания

1. **Собрать модель** неуправляемого выпрямителя (рис. 9.2), используя данные таблиц 9.1, 9.2 и описание работы с MatLab (раздел 12).

2. **Задать постоянные параметры** блоков (табл. 9.2).

3. **При снятии внешней характеристики** (без учета коммутации) активное сопротивление нагрузки меняется от 0,1 до 1 Ом. Для каждого сопротивления нагрузки рассчитывается величина индуктивности так, чтобы индуктивное сопротивление было равно активному сопротивлению.

Внутренние параметры источника (сопротивление и индуктивность) задать равными 0.

Результаты заносятся в таблицу 9.3.

Таблица 9.3

Внешняя характеристика неуправляемого выпрямителя

Данные				Измерения						
$U_{1\max}$	$f_1$	$L_{\text{н}}$	$R_{\text{н}}$	$I_{\text{н}}$	$U_{\text{н}}$	$I_{1(1)\max}$	$\varphi_1$	$I_{\text{Dcp}}$	$U_{\text{Dmax}}$	$I_{\text{Dmax}}$
В	Гц	Гн	Ом	А	В	А	град	А	В	А

Амплитуда первой гармоники тока источника питания  $I_{1(1)\max}$  и начальная фаза этого тока  $\varphi_1$  определяются по показаниям дисплеев 4 и 3. Также по показаниям дисплеев определяются средний ток диода  $I_{\text{Dcp}}$

(дисплей 1), напряжение  $U_H$  (дисплей) и ток нагрузки  $I_H$  (дисплей 2). Мгновенные значения токов можно наблюдать на экране осциллографа.

Полная, активная мощности, потребляемые выпрямителем от источника по первой гармонике, а также мощность нагрузки определяются по формулам:

$$S_1(1) = 3U_{1\max} \cdot I_1(1)_{\max} / 2; \quad P_1(1) = S_1(1) \cdot \cos \varphi_1; \quad P_H = U_H \cdot I_H.$$

4. **Исследование неуправляемого выпрямителя с учетом коммутации** проводится аналогично предыдущему пункту. При снятии внешней характеристики в этом случае необходимо задать в окне параметров источника величину индуктивности порядка 0,000001 Гн.

5. По результатам вычислительных экспериментов и расчетов **строят характеристики:**

5.1. внешние  $U_H = f(I_H)$ ;

5.2. энергетические характеристики выпрямителя  
 $I_{Dcp}, I_{Dmax}, I_1(1)_{max} = f(I_H); S_1(1), P_1(1) = f(P_H)$ .

### Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличается неуправляемый выпрямитель от управляемого?
2. Назовите основные характеристики выпрямительных устройств.
3. Назовите основные элементы выпрямительных устройств и поясните их назначение.
4. Изобразите принципиальную схему трёхфазного мостового неуправляемого выпрямителя.
5. Дайте определение внешней характеристики. Объясните характер полученных в опытах внешних характеристик.
6. Что подразумевается под пульсациями выпрямленного напряжения? Какие существуют меры борьбы с пульсациями?
7. Почему трёхфазный мостовой выпрямитель называют шестипульсным?
8. Объясните причину роста пульсаций при возрастании тока нагрузки.

### Литература

1. Васюков С. А. Исследование неуправляемых и управляемых выпрямительных устройств: Метод. указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / Васюков С. А., Лаврентьев В. В., Мисеюк О. И., Красовский А. Б. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 24 с. – Книга из коллекции МГТУ им. Н.Э. Баумана – Инженерно-технические науки.



2. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink: учебник / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 443 с.

3. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink [Электронный ресурс] / Герман-Галкин С. Г. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 448 с. – Книга из коллекции Лань – Инженерно-технические науки. – ISBN 978- 5-8114-1520-5.

Схема доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=36998](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=36998)  
(контент)

4. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2010. – 320 с.

5. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2009. – 304 с.

6. Лукутин Б. В. Силовые преобразователи в электроснабжении: учебное пособие [Электронный ресурс] / Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИИ), Кафедра электроснабжения промышленных предприятий (ЭПП). – 1 компьютерный файл (pdf; 1.7 МВ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – Заглавие с титульного экрана. – Электронная версия печатной публикации.

## 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

**Цель работы:** Ознакомиться с особенностями работы и характеристиками управляемого выпрямителя, собрать имитационную схему и снять опытным путем основные характеристики управляемого трехфазного мостового выпрямителя.

### Объект исследования

*Принцип действия управляемого выпрямителя* основан на свойствах управляемых вентилях переключаться в проводящее состояние после подачи управляющего воздействия (если позволяют потенциальные условия его питания) и обеспечивать прохождение тока в нагрузке в заданные промежутки времени, регулируя тем самым величину напряжения на выходе. В управляемых выпрямителях в зависимости от мощности могут быть применены полностью управляемые вентили (*транзисторы*), либо полууправляемые вентили (*тиристоры*).

В зависимости от величины угла управления и типа нагрузки различают *два режима работы* управляемого выпрямителя: режим непрерывного тока и режим прерывистого тока нагрузки. *Режим прерывистого тока* характерен для емкостного характера нагрузки практически при любых углах управления и при активной нагрузке при мостовой схеме и угле управления  $\alpha > 60^\circ$ . При активно–индуктивном характере нагрузки нулевая м мостовая схемы выпрямления имеют *непрерывный ток нагрузки*. В этом режиме работы, то есть при условии, что выпрямленный ток идеально сглажен, выходное напряжение выпрямителя без учета активного сопротивления трансформатора может быть подсчитано в зависимости от схемы следующим образом

$$U_n = U_{n0} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)], \quad (1)$$

где  $U_{n0}$  – напряжение на нагрузке при холостом ходе и  $\alpha = 0$ , определяемое по выражениям для схем:

нулевого выпрямителя

$$U_{n0} = \frac{m}{2\pi} \cdot E_m \cdot \sin \frac{\pi}{m}, \quad (2)$$

мостового выпрямителя

$$U_{n0} = \frac{m}{\pi} \cdot E_m \cdot \sin \frac{\pi}{m}. \quad (3)$$

Поэтому основные соотношения для управляемых выпрямителей по напряжению  $k_U$  и, соответственно, по мощности  $k_P$  определяются глубиной регулирования. Соотношения по току  $k_I$ , как показывает анализ различных схем выпрямления, зависят только от величины угла коммутации вентилях, числа фаз и схемы выпрямления, и для регулируемых выпрямителей рассчитывается по тем же зависимостям, что и для неуправляемых:

нулевая схема выпрямления

мостовая схема выпрямления

$$k_I = \sqrt{\frac{1}{m} - \frac{\gamma}{6\pi}}, \quad (4) \quad k_I = \sqrt{\frac{2}{m} - \frac{\gamma}{3\pi}}, \quad (5)$$

$$k_U = k_{U0} \cdot \frac{2}{\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)}, \quad (6) \quad k_U = k_{U0} \cdot \frac{1}{\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)}, \quad (7)$$

где  $\gamma$  – угол коммутации вентилей зависит не только от параметров генератора и величины нагрузки, но и от угла управления

$$\gamma = \arccos\left(\cos\alpha - \frac{I_N x_\Gamma}{E_m \cdot \sin \frac{\pi}{m}}\right) - \alpha, \quad (8) \quad k_{U0} = \frac{2}{\sqrt{2}} \frac{\frac{\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}}. \quad (9)$$

Величина ЭДС  $E_m$  представляет собой амплитудное значение электродвижущей силы. Значение коэффициента мощности по основной гармонической фазного тока зависит от угла регулирования  $\alpha$  и параметров трансформатора и может быть определено как

$$\cos \varphi_1 = \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right). \quad (10)$$

Таким образом, изменение угла управления  $\alpha$  приводит при постоянстве фазного тока к изменению выходного напряжения.

### Описание виртуальной экспериментальной установки

Виртуальная лабораторная установка для исследования управляемого выпрямителя (рис. 10.1) содержит основные блоки, представленные в табл. 10.1 (часть блоков схемы была описана в предыдущей работе).

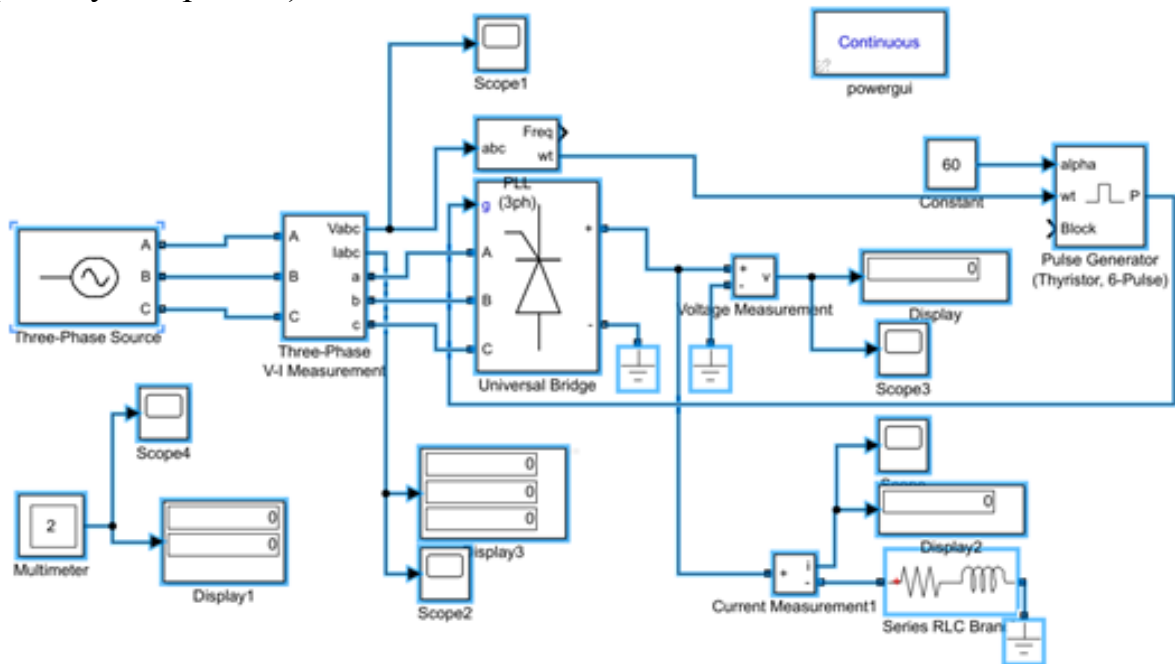


Рисунок 10.1. Модель трехфазного управляемого выпрямителя

Нагрузка выпрямителя активно-индуктивная. На рис. 10.1 представлена модель трехфазного управляемого выпрямителя, собранного на тиристорах. Управление тиристорами осуществляется системой импульсно-фазового управления. Нагрузкой выпрямителя является переменный резистор  $R_d$  и индуктивная катушка  $L_d$ .

Таблица 10.1

*Основные блоки модели управляемого выпрямителя*

Название Блока	Назначение	Библиотека MatLab
Three-Phase Source	Источник трехфазного синусоидального напряжения	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Electrical Sources
Series RLC Branch	RLC ветвь (имитации нагрузки)	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Elements
Ground	Заземление	
Universal Bridge	Универсальный мост	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Power Electronic /
Pulse Generator	Система импульсно-фазового управления (SIFU)	Measurements/Pulse & Signal Generators
PLL (3ph)	Блок задания частоты и фазы основной гармоники трехфазного сигнала	Control and Measurements/PLL
Constant	Блок задания угла управления	Simulink / Sources
Three-Phase V-I Measurement	Измеряет трехфазные токи и напряжения	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Measurements
Voltage Measurement	Измеряет мгновенное значение напряжения	
Current Measurement	Измеряет мгновенное значение тока	
Multimeter	Мультиметр (измерение переменных, выбранных в окне Measurement)	
Scope	Осциллограф (визуализация процессов)	Simulink / Sinks
Display	Дисплей (визуализация численного результата)	
Powergui	Блок вычисления начальных условий	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks

Таблица 10.2

*Параметры блоков модели управляемого выпрямителя*

Параметры	Значения
<b>Источник трехфазного синусоидального напряжения</b>	
Configuration – схема соединения	«Звезда»
Phase-to-phase voltage – линейное напряжение, В	20
Phase angle of phase A – начальная фаза напряжения, град	0
Frequency – частота напряжения, Гц	400
Source resistance and inductance – внутренние параметры источника:	
сопротивление, Ом	0
индуктивность, Гн	0
<b>Универсальный мост</b>	
Number of bridge arms – количество плеч	3
Параметры схем формирования динамических процессов	
Snubber resistance R – сопротивление, Ом	100000
Snubber capacitance Cs –емкость, Ф	inf
Power electronic device – тип полупроводникового прибора	Thyristors
Параметры полупроводникового прибора	
Ron– сопротивление, Ом	1e-3
Lon– индуктивность, Гн	0
Forward voltage – пороговое напряжение, В	0
<b>RLC ветвь</b>	
Resistance – активное сопротивление, Ом	По метод.
Inductance – индуктивность, Гн	указаниям
<b>Pulse Generator PWM Generator</b>	
Generator type – тип генератора	6 импульсный
Pulse width – ширина импульсов, град.	10
Sample time – задает дискретность вывода данных в окно дисплея	0
Alpha – угол управления, град.	По метод.
	указаниям
<b>PLL (3ph)</b>	
Minimum frequency – минимальная ожидаемая частота входного сигнала, Гц	380
Initial inputs (Phase, Frequency) – начальные значения входного сигнала:	
Фаза, град.	0
Частота, Гц	400
Regulator gains – коэффициенты PID-контроллера	По
Time constant for derivative action – постоянная интегрирования, с	умолчанию
Maximum rate of change of frequency – максимальный диапазон изменения частоты, Гц/с	20
Filter cut-off frequency for frequency measurement – фильтр для измерения частоты, Гц	По
Wt – угол синхронизации, рад.	умолчанию
	0–2*pi

### Программа работы

1. Построить модель управляемого выпрямителя.
2. Снять выходную характеристику выпрямителя при разных углах управления выпрямителем (0, 40, 60 град.).
3. Снять осциллограммы напряжения и тока на нагрузке и на стороне переменного тока.
4. Снять осциллограммы напряжения и тока одного из тиристорov моста.
5. Рассчитать коэффициенты преобразования по току и напряжению и сравнить их с теоретическими.
6. Снять регулировочную характеристику выпрямителя (в пределах угла управления от 0 до 110 градусов).

### Методические указания

**1. Собрать модель управляемого выпрямителя** (рис. 10.1), используя данные таблиц 10.1, 10.2 и описание работы с MatLab (раздел 12).

**2. Задать постоянные параметры** блоков (табл. 10.2).

**3. При снятии внешней характеристики** активное сопротивление нагрузки меняется от 0,1 до 1 Ом. Для каждого сопротивления нагрузки рассчитывается величина индуктивности так, чтобы индуктивное сопротивление было равно активному сопротивлению.

Внешние характеристики снимаются для трех значений угла управления (0, 40, 60 град.).

Результаты моделирования занести в табл. 10.3.

Таблица 10.3

*Внешняя характеристика управляемого выпрямителя*

№	$R$	$L$	$U$	$I$
1				
2				
3				
4				
5				

**4. Исследование регулировочной характеристики** управляемого выпрямителя осуществляется при одном значении нагрузки и изменении угла управления от 0 до 110 градусов с шагом 20 градусов.

Результаты моделирования занести в табл. 10.4.

Таблица 10.4

*Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя*

№	$\alpha$	$U$
1		
2		
3		
4		
5		

**Контрольные вопросы и задания**

1. Каково назначение управляемых выпрямителей?
2. Какие полупроводниковые приборы применяются в управляемых выпрямителях?
3. Каковы преимущества мостовой схемы управляемого выпрямителя на тиристорах по сравнению с мостовой схемой на обычных вентилях?
4. Что такое регулировочная характеристика управляемого выпрямителя?
5. Изобразите принципиальную схему трёхфазного мостового управляемого выпрямителя.
6. Дайте определение внешней характеристики. Объясните характер полученных в опытах внешних характеристик.

**Литература**

1. Васюков С. А. Исследование неуправляемых и управляемых выпрямительных устройств: Метод. указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / Васюков С. А., Лаврентьев В. В., Мисеюк О. И., Красовский А. Б. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 24 с.. – Книга из коллекции МГТУ им. Н.Э. Баумана - Инженерно-технические науки.
2. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink: учебник / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 443 с.
3. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink [Электронный ресурс] / Герман-Галкин С. Г. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 448 с.. – Книга из коллекции Лань – Инженерно-технические науки. – ISBN 978-5-8114-1520-5.

Схема доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?p11\\_id=36998](http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=36998)  
(контент)

4. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2010. – 320 с.

5. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2009. – 304 с.

6. Лукутин Б. В. Силовые преобразователи в электроснабжении: учебное пособие [Электронный ресурс] / Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИИ), Кафедра электроснабжения промышленных предприятий (ЭПП). – 1 компьютерный файл (pdf; 1.7 МВ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – Заглавие с титульного экрана. – Электронная версия печатной публикации.



## 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНВЕРТОРА

**Цель работы:** Ознакомиться с особенностями характеристик автономного инвертора напряжения (АИН), выполненного по трехфазной мостовой схеме, собрать имитационную схему и снять опытным путем характеристики инвертора с широтно-импульсной модуляцией при работе на активно-индуктивную нагрузку.

### Объект исследования

На летательных аппаратах с первичное системой электроснабжения постоянного тока для получения переменного тока постоянной частоты ранее использовались электромашинные преобразователи, обладающие рядом существенных недостатков: большая полетная масса, низкий КПД, недостаточно высокая надежность, большие затраты времени на обслуживание.

Достижения в области силовой полупроводниковой техники позволили создать *надежные статические преобразователи* постоянного тока в однофазный или трехфазный переменный ток (*инверторы*) мощностью до нескольких киловатт, превосходящие по основным параметрам электромашинные преобразователи. КПД транзисторных преобразователей при мощности  $0,1 \div 10$  кВА и  $\cos\varphi=1$  составляет  $0,7 \div 0,95$ . Отсутствие трущихся и подвижных частей обеспечивает большие сроки службы, существенно упрощает их техническое обслуживание. По сравнению с электромашинными статические преобразователи обладают следующими преимуществами: время выхода на рабочий режим меньше в 5–10 раз и составляет доли секунды; в несколько раз меньше пусковые токи; лучше качество переходных процессов; нет акустических шумов, создаваемых при работе преобразователя.

Различают два типа инверторов: зависимые инверторы (или *инверторы, ведомые сетью*) и независимые (или *автономные инверторы*). Автономные инверторы (АИ) – устройства, преобразующие постоянный ток в переменный с неизменной или регулируемой частотой и работающие на автономную (не связанную с сетью переменного тока) нагрузку. В этом главное отличие автономных инверторов от ведомых, также преобразующих постоянный ток в переменный, но работающих на сеть переменного тока.

Частота выходного напряжения автономного инвертора определяется частотой импульсов управления вентилями инвертора, а форма и величина выходного напряжения – характером, величиной нагрузки и его схемой.

Различают *три типа автономных инверторов:*

- автономный инвертор напряжения (АИН);
- автономный инвертор тока (АИТ);
- автономный резонансный инвертор (АИР).

Основой АИ является *вентильное переключающее устройство*, которое может выполняться по однофазным и трехфазным схемам (с нулевым выводом или мостовым схемам). В качестве ключей в АИ используются *транзисторы и тиристоры*. При использовании однооперационных тиристоров (ООТ), схему дополняют элементами, предназначенными для их коммутации.

*Основные области применения автономных инверторов:*

- питание потребителей переменного тока (АИН, АИТ) в устройствах, у которых одним из источников энергии является аккумуляторная батарея (бортовые вторичные источники питания, резервные бытовые источники питания и др.), а также резервное питание ответственных потребителей при возможном отключении сети переменного тока;

- электротранспорт (АИН, АИТ), питающийся от контактной сети или какого-либо источника постоянного тока, у которого в качестве тяговых электродвигателей желательно иметь простые, надежные и дешевые короткозамкнутые асинхронные двигатели;

- электропривод с асинхронными и синхронными двигателями (АИН, АИТ), у которого схема АИ служит источником регулируемых напряжения и частоты.

*Классификация АИ* производится по различным признакам, среди которых можно выделить следующие:

- по виду схем включения управляемых приборов (полумостовые, мостовые, со средней точкой трансформатора и др.);

- по принципу коммутации (выключения) управляемых приборов (индивидуальная, пофазная, групповая, общая; естественная и принудительная; параллельная, последовательная, последовательно-параллельная; при нулевом значении тока и напряжения и др.);

- по принципу управления ключами – с независимым или с самовозбуждением;

- по типу используемых приборов с полууправляемыми приборами (ООТ); с полностью управляемыми приборами (двухоперационный тиристор (ДОТ), IGBT, MOSFET и др.);

- по характеру протекающих в них электромагнитных процессов – автономные инверторы тока; автономные инверторы напряжения, автономные резонансные инверторы;

– по виду переходного процесса в цепи нагрузки (цепи переменного тока) – апериодические и колебательные.

Общие требования к АИ как функциональному элементу системы электропитания можно свести к следующим:

- высокий КПД в различных режимах;
- минимальные размеры;
- по возможности минимальная масса и стоимость;
- максимальная надежность;
- простота обслуживания;
- минимальное влияние на питающую сеть.

### Описание виртуальной экспериментальной установки

Виртуальная лабораторная установка для исследования АИН представлена на рис. 11.1. Модель состоит из блоков, описание которых дано в табл. 11.1 и 11.2. Часть блоков была описана ранее.

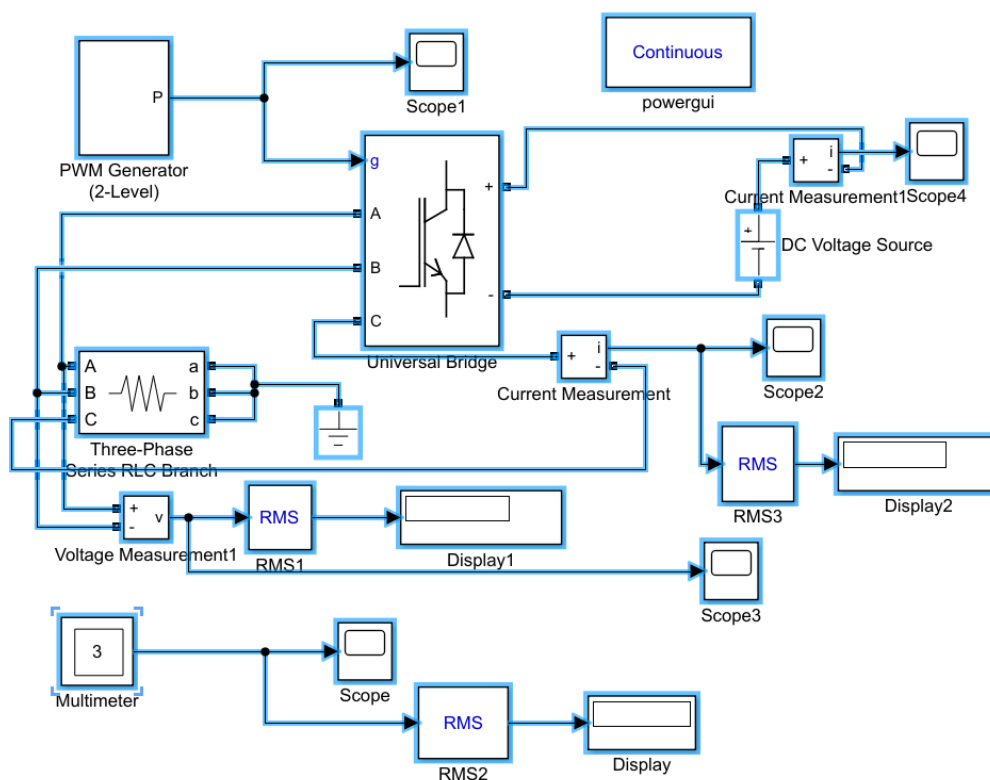


Рисунок 11.1. Модель инвертора напряжения

Таблица 11.1

*Основные блоки модели инвертора*

Название блока	Назначение	Библиотека MatLab
DC Voltage Source	Источник постоянного напряжения	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks/Electrical Sources
Universal Bridge	Универсальный мост	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks/Power Electronic
Three-Phase Series RLC Branch	Трехфазная RLC ветвь (имитации фильтра и нагрузки)	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks/Elements
Ground	Заземление	
PWM Generator (2-Level)	Двухуровневый генератор импульсов (управление автономным инвертором)	Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Control and Measurements /Pulse & Signal Generators

Таблица 11.2

*Параметры блоков модели инвертора*

Параметры	Значения
<b>Источник постоянного напряжения</b>	
Amplitude – амплитуда напряжения, В	28
<b>Универсальный мост</b>	
Number of bridge arms – количество плеч	3
Параметры схем формирования динамических процессов	
Snubber resistance R – сопротивление, Ом	100000
Snubber capacitance Cs –емкость, Ф	inf
Power electronic device – тип полупроводникового прибора	IGBT/
Параметры полупроводникового прибора	
Ron– сопротивление, Ом	1e-4
Lon– индуктивность, Гн	0
Forward voltage – пороговое напряжение, В	0
Diode voltage – пороговое напряжение диода, В	0
<b>Трехфазная RLC ветвь</b>	
Resistance – активное сопротивление, Ом	По метод.
Inductance – индуктивность, Гн	указаниям
<b>RMS</b>	

Fundamental frequency – базовая частота, Гц	400
---	-----

Окончание табл. 11.2

PWM Generator	
Generator type – тип модулирующего генератора	3 фазный 6-пульсный
Mode of operation – режим работы	Несинхр.
Carrier frequency Frequency – несущая частота, Гц	4000
Initial phase – начальная фаза моделирующего напряжения, град.	90
Minimum and maximum values – минимальная и максимальная величина сигнала	[-1 1]
Sampling technique	Нейтральная
Internal generation of reference signal – внутренняя генерация сигнала	Да
Modulation index – коэффициент модуляции	$0 < m < 1$
Frequency – выходная частота, Гц	400
Phase – фаза выходного напряжения, град.	0
Sample time – задает дискретность вывода данных в окно дисплея	0
Show measurement port – показывать измерительный порт	

### Программа работы

1. Построить модель инвертора с широтно-импульсной модуляцией при работе на активно-индуктивную нагрузку.
2. Снять и построить внешнюю характеристику инвертора.
3. Снять и построить регулировочную характеристику инвертора при одном значении нагрузки и изменении коэффициента модуляции от 0 до 1 с шагом 0,2.

### Методические указания

1. **Собрать модель инвертора** (рис. 11.1), используя данные таблиц 11.1, 11.2 и описание работы с MatLab (раздел 12).

2. **Задать параметры** блоков (табл. 11.2).

3. **При снятии внешней характеристики** активное сопротивление нагрузки меняется от 1 до 10 Ом. Для каждого сопротивления нагрузки рассчитывается величина индуктивности так, чтобы постоянная времени оставалась неизменной и равной 0,025 с.

Коэффициент модуляции установить равным 0,9.

Результаты моделирования занести в табл. 11.3.

Таблица 11.3

### Внешняя характеристика инвертора

№	$R$	$L$	$U$	$I$
1				
2				
3				

4				
5				

**4. Исследование регулировочной характеристики инвертора** осуществляется при одном значении нагрузки и изменении коэффициента модуляции от 0 до 1 с шагом 0,2.

Результаты моделирования занести в табл. 11.4.

Таблица 11.4

*Регулировочная характеристика инвертора*

№	Коэффициент модуляции <i>m</i>	<i>U</i>
1		
2		
3		
4		
5		

### Контрольные вопросы и задания

1. В чем состоит различие ведомого и автономного инвертора?
2. Чем отличается автономный инвертор напряжения от автономного инвертора тока?
3. Зачем в инверторах напряжения включаются обратные диоды?
4. Для чего на входе АИН стоит конденсатор?
5. Как изменить частоту выходного напряжения автономного инвертора?
6. На что влияет несущая частота?
7. Как регулируется форма и величина напряжения в АИН?
8. Какие автономные инверторы наиболее перспективны в электроприводе летательных аппаратов?
9. От чего зависит вид внешней характеристики АИН?
10. Что такое регулировочная характеристика автономного инвертора?

### Литература

1. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink: учебник / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 443 с.
2. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink [Электронный ресурс] / Герман-Галкин С. Г. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 448 с.. –

Книга из коллекции Лань – Инженерно-технические науки. – ISBN 978-5-8114-1520-5. Схема доступа:

[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=36998](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=36998) (контент)

3. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2010. – 320 с.

4. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2009. – 304 с.

5. Лукутин Б. В. Силовые преобразователи в электроснабжении: учебное пособие [Электронный ресурс] / Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИН), Кафедра электроснабжения промышленных предприятий (ЭПП). – 1 компьютерный файл (pdf; 1.7 МВ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – Заглавие с титульного экрана. – Электронная версия печатной публикации.

6. Шадрин Г. А. Транзисторные инверторы: учебное пособие [Электронный ресурс] / Г. А. Шадрин, В. П. Петрович; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИН), Кафедра электропривода и электрооборудования (ЭПЭО). – 1 компьютерный файл (pdf; 2.0 МВ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – Заглавие с титульного экрана. – Электронная версия печатной публикации. – Доступ из корпоративной сети ТПУ. – Системные требования: Adobe Reader. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2013/m101.pdf> (контент)





## 12. ОСНОВЫ РАБОТЫ С ВИРТУАЛЬНЫМИ МОДЕЛЯМИ В MATLAB+SIMULINK

Перед выполнением виртуальных работ студенты должны изучить правила техники безопасности применительно к компьютерной лаборатории, для чего преподавателем проводится инструктаж.

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

1. Ознакомиться с ее содержанием и, пользуясь рекомендованной литературой и конспектом лекций, изучить теоретические положения, на которых базируется работа.

2. Изучить схему виртуальной модели и продумать методику выполнения лабораторной работы.

3. Ответить на контрольные вопросы.

Перед выполнением каждой лабораторной работы необходимо представить отчет по предыдущей работе.


### Возможности MatLab+Simulink

MatLab позволяет проводить визуальные исследования во времени (визуальное программирование) характеристик различных систем с помощью программного модуля Simulink. При этом модель исследуемой системы создается в виде структурной модели и сохраняется в файле с расширением .slx или с расширением .mdl (для более ранних версий MatLab).

Модели создаются из отдельных блоков (модулей) по технологии Drag-and-Drop (перетяни и оставь).


### Методические рекомендации по работе с математическим пакетом MatLab+Simulink

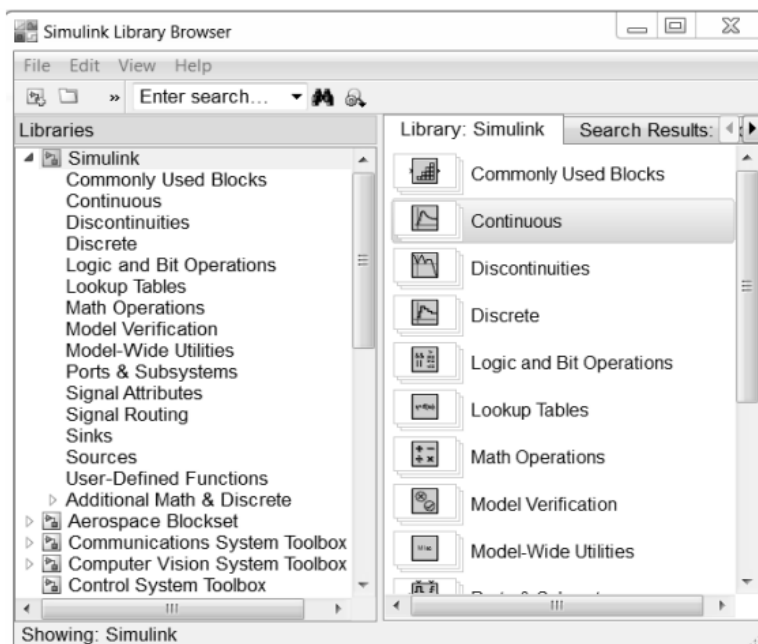
#### *Запуск MatLab и создание файла.*

Для *запуска программы*, необходимо щелкнуть два раза правой клавишей мыши на пиктограмму «MatLab» , расположенную на рабочем столе.

Для *создания нового файла* используются кнопки Home – New – Simulink Model. Открывшееся окно untitled используется для создания модели. Команды File – Save As позволяют сохранить файл (для имени используется латинский алфавит).

Для *открытия файла* используется пункт «Open» (открыть).

Кнопка  открывает окно библиотеки Simulink Library Browser (рисунок 12.1), в левой части которого представлен перечень библиотек Simulink.



*Рисунок 12.1. Библиотеки Simulink*

В лабораторных работах используются библиотеки Sinks с блоками Score (осциллограф) и Display (предназначен для отображения численных значений входной величины), Sources (источники), а также блоки библиотеки SimPowerSystems, которая представляет собой набор визуальных объектов, предназначенных для имитационного моделирования типовых электротехнических устройств (устройств силовой электроэнергетики, таких как электрические двигатели, генераторы, трансформаторы, преобразователи, а также линии электропередач, элементы силовой электроники и т.д.). Например элементы из раздела Electrical Sources библиотеки SimPowerSystems включают в себя различные источники энергии, такие как:

- DC Voltage Source и AC Voltage Source – идеальный источник постоянного и переменного напряжения;
- AC Current Source – идеальный источник переменного тока;
- 3 Phase Source – трехфазный источник напряжения и другие.

Элементы из раздела Elements библиотеки SimPowerSystems включают различные электротехнические элементы; в том числе блок Series RLC Branch (последовательная RLC цепь, параметры которой задаются через сопротивление в омах, индуктивность в генри и емкость в фарадах).

В разделе Measurements размещаются блоки-измерители, имеющие p-входы и m-выходы (амперметры Current Measurement, вольтметры Voltage Measurement и т.д.). Эти блоки имеют p-входы для подключения

измерителя к электрической цепи, а также по одному m-выходу (в блоке амперметра он обозначен «i», а в блоке вольтметра – «v»).

Кроме того, для работы SimPowerSystems-модели необходим блок Powergui, который размещается в разделе библиотеки SimPowerSystems. Блок Powergui помещается в модель в любое место и не подключается к другим элементам. Он позволяет задать начальные значения переменных модели, выполнить расчет установившегося режима, осуществить инициализацию схемы, содержащей электрические машины, найти полное сопротивление (импеданс) цепи и т.д.

### ***Ввод и изменение параметров блоков Simulink и SimPowerSystems.***

Функции, которые выполняет любой блок из библиотек MatLab, зависят как непосредственно от назначения блока, так и от установленных значений в окне параметров этого блока. Установка этих значений осуществляется в *окне настройки*, которое вызывается после двойного щелчка левой кнопки мыши на изображении блока в блок-схеме.


У каждого блока есть имя, соответствующее его функциональному назначению. С учетом возможностей математического пакета Matlab имена блоков рекомендуется давать на английском языке или латинскими буквами.

При вводе численных параметров в блоках MatLab дробная часть от числа отделяется точкой.

Для каждого блока имеется раздел Help (помощь), расположенный в нижней строке окна, с подробным описанием блока и рекомендациями по заданию параметров.

Часть параметров повторяется в разных блоках. Например, Sample time (значение шага модельного времени). Для Sample time задается 0, если моделируется непрерывная система. При моделировании дискретных систем Sample time > 0. При Sample time = -1 значение шага модельного времени устанавливается таким же, как в предыдущем блоке.

### ***Запуск расчета модели.***

Перед запуском полученной блок-схемы на моделирование сначала необходимо установить требуемые параметры моделирования, выбрав команду Simulation – Model – Configuration – Parameters или нажав на панели инструментов клавишу . В результате откроется окно настройки параметров, группа Solver которого показана на рисунке 12.2.

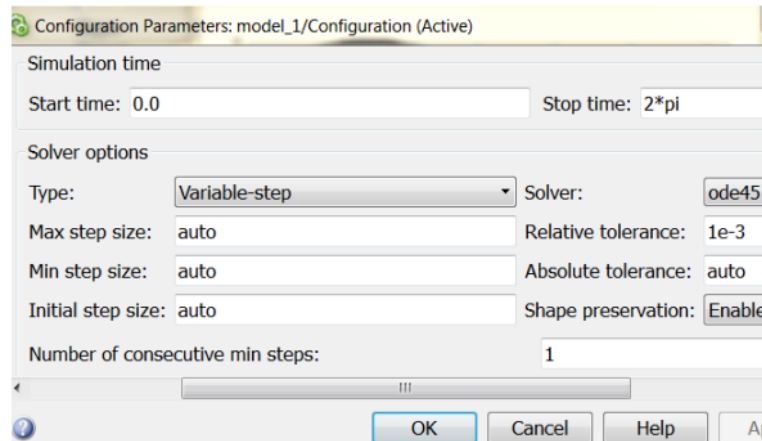


Рисунок 12.2. Окно настройки параметров Solver

В области Simulation time задаются значения начального времени моделирования Start time (обычно 0.0) и конечного времени моделирования Stop time (например  $2\pi$ ). Время решения задачи зависит от сложности модели, метода решения и быстродействия компьютера.

Выбор метода моделирования и его параметров осуществляется в области Solver options.

Опция Type: задает тип решения:

- с переменным шагом (Variable-step), который рекомендуется при расчете непрерывных систем;
- с фиксированным шагом (Fixed-step), который рекомендуется при расчете дискретных систем.

Лучшие результаты чаще всего дает решение с переменным шагом.

Опция Solver задает несколько вариантов методов моделирования. Первый вариант (discrete) используется для расчета дискретных систем. Остальные методы используются для расчета непрерывных систем. При моделировании с переменным шагом по умолчанию устанавливается метод общего назначения ode45 (одношаговый явный метод Рунге – Кутты 4-го и 5-го порядков точности).

Начинают моделирование с помощью команды Simulation – Run .

После запуска процесса моделирования кнопка Run преобразуется в кнопку – «Пауза», а кнопка «Стоп», расположенная рядом, становится активной. В нижней части окна моделирования при этом можно увидеть индикаторы хода расчета – секундный и графический (рис. 12.3). Здесь же отображается метод расчета. Например, ode23tb соответствует методу Рунге-Кутты 2 порядка.



Рисунок 12.3. Индикатор хода расчета

### ***Редактирование осциллограмм в среде MatLab+ Simulink.***

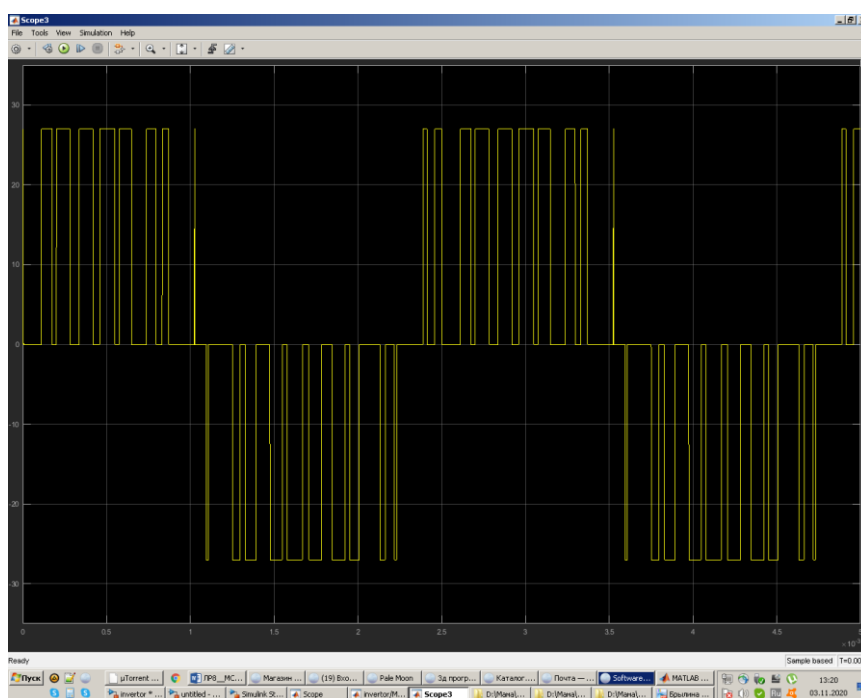
Электронный осциллограф (блок Scope) предназначен для вывода на экран компьютера графика входного сигнала в функции времени. Если на вход прибора подается сигнал  $X$ , то на экране представляется зависимость  $X=f(t)$ .

Открывается окно Scope двойным щелчком левой клавиши мыши по его изображению (по аналогии с любым другим блоком). Виртуальный экран осциллографа имеет вид показанный на рис. 12.4.

Размер и пропорции окна можно изменять произвольно, используя курсор мыши. По оси ординат шкалы измерений откладываются значения наблюдаемой (входной) величины, по оси абсцисс – значения модельного времени.

Если входная величина блока Scope является вектором, то в окне строятся графики изменения всех элементов этого вектора. В этом случае для каждого элемента вектора в окне строится отдельная кривая, отражающая динамику его изменения. Выводимые кривые различаются цветом, который устанавливается автоматически. Одновременно в окне Scope может отображаться до 30 кривых.

Для управления параметрами окна Scope в нем имеется панель меню, содержащая ряд кнопок (рис. 12.5).



*Рисунок 12.4. Внешний вид экрана виртуального осциллографа*



*Рисунок 12.5. Панель инструментов управления осциллографом*

С помощью кнопок можно настроить свойства этого блока.

Например установить количество графиков, указать параметры дискретизации, оформить надписи, задать цвет для фигуры, фона и осей, тип, толщину и цвет линии, тип маркера в точках дискретизации, используемых для построения графиков, изменить масштаб и т.д.

Так как в разных версиях пакета MatLab кнопки имеют различное положение и заполнение, а параметры в большинстве случаев понятны из англоязычных названий, в данном разделе подробное описание не представлено.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арменияский Е. В., Фалк Г. В. Электрические микромашины. – М., Высш. шк., 1985. – 230 с.
2. Брылина О. Г. Силовая электроника: учебное пособие к виртуальным лабораторным работам / О. Г. Брылина, М. В. Гельман, М. М. Дудкин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 144 с.
3. Васюков С. А. Исследование неуправляемых и управляемых выпрямительных устройств: Метод. указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / Васюков С. А., Лаврентьев В. В., Мисеюк О. И., Красовский А. Б. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 24 с.. – Книга из коллекции МГТУ им. Н. Э. Баумана - Инженерно-технические науки.
4. Васюков С. А., Мисеюк О. И. Исследование неуправляемых и управляемых выпрямителей: методические указания к выполнению лабораторной работы по курсам «Электротехника», «Электротехника и электроника». – М.: Изд – во МГТУ им. Н. Э.Баумана, 2020 – 36 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink: учебник / С. Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 443 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink [Электронный ресурс] / Герман-Галкин С. Г. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 448 с.. – Книга из коллекции Лань – Инженерно-технические науки. – ISBN 978-5-8114-1520-5.  
Схема доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=36998](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=36998)
7. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2010. – 320 с.
8. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2009. – 304 с.
9. Конспект лекций по дисциплине «Потребители электрической энергии. Ч.1. Преобразовательные устройства (силовые преобразователи)» для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 6.090603 – Электротехнические системы электропотребления /Составитель Л. И. Коляда. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – 100 с.
10. Лифанов В. А. Электрические машины систем автоматики и бытовой технике/ В. А. Лифанов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.

6. Лукутин Б. В. Силовые преобразователи в электроснабжении: учебное пособие [Электронный ресурс] / Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИИ), Кафедра электроснабжения промышленных предприятий (ЭПП). – 1 компьютерный файл (pdf; 1.7 МВ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – Заглавие с титульного экрана. – Электронная версия печатной публикации.
7. Лурье М. С., Лурье О. М. Имитационное моделирование схем преобразовательной техники: учебное пособие. – Красноярск: СибГТУ, 2007. – 145 с.
8. Моделирование в среде MATLAB-Simulink: метод. указания к лабораторным работам / сост.: А. И. Герасимов, В. В. Регода, О. Н. Регода. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. – 104 с.
9. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций: учебное пособие / И. Е. Овчинников. – СПб.: Корона-Век, 2007. – 336 с.
10. Овчинников И. Е. Электромеханические и мехатронные системы: учебное пособие / И. Е. Овчинников. – Санкт-Петербург: Корона-Век, 2015. Ч. 1. Полупроводниковые устройства в цепи электрических машин. Коллекторные и бесконтактные двигатели постоянного тока. Конструкции, характеристики, регулирование, динамика разомкнутых систем. – 2015. – 397 с.
11. Расчет неуправляемого выпрямителя с фильтром и управляемого выпрямителя в режиме стабилизации выходного напряжения: метод. указания к выполнению расчет.-граф. задания и контрол. работы / сост. И. А. Патракова, С. В. Бутаков. – Архангельск: Изд-во ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – 2011. – 43 с.
12. Расчет основных параметров и выбор элементов управляемых выпрямителей: методические указания / Е. В. Тумаева, Д. В. Горбунова. – Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2014. – 16 с.
13. Томашевский Д. Н. Автономные инверторы: учебное пособие / Д. Н. Томашевский. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2019. – 120 с.
14. Усольцев А. А. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие / А. А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 213 с.



15. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики. – Л., Энергоатомиздат, 1985 – 363 с.

16. Цукублин А. Б. Специальные электрические машины (Лабораторный практикум): Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 124 с.

17. Шадрин Г. А. Транзисторные инверторы: учебное пособие [Электронный ресурс] / Г. А. Шадрин, В. П. Петрович; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИИ), Кафедра электропривода и электрооборудования (ЭПЭО). – 1 компьютерный файл (pdf; 2.0 МВ). – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – Заглавие с титульного экрана. – Электронная версия печатной публикации. – Доступ из корпоративной сети ТПУ. – Системные требования: Adobe Reader. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2013/m101.pdf> (контент)

18. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств / Ф. М. Юферов. – М.: Высшая школа, 1988. – 480 с.

Учебное издание

## **МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Мехатронные системы летательных аппаратов»  
для студентов IV курса, обучающихся по направлению  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

*Составители*

ЦУКУБЛИН Анатолий Борисович  
СИПАЙЛОВА Надежда Юрьевна