

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по аграрному техническому образованию  
в качестве учебно-методического пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по специальности 6-05-0812-04 «Энергетическое обеспечение  
сельского хозяйства»*

Минск  
БГАТУ  
2025

УДК 621.313(07)  
ББК 31.261я7  
Э45

Авторы:

кандидат технических наук, доцент *В. М. Збродыга*,  
кандидат технических наук, доцент *А. И. Зеленкевич*,  
старший преподаватель *В. И. Епифанов*,  
кандидат технических наук, доцент *Н. Е. Шевчик*

Рецензенты:

кафедра электроснабжения  
Белорусского национального технического университета  
(кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой *Е. А. Дерюгина*);  
заместитель директора филиала «Минские кабельные сети»  
МРУП электроэнергетики «Минскэнерго» *Ю. И. Левкович*

Э45      **Электрические** машины. Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие / В. М. Збродыга, А. И. Зеленкевич, В. И. Епифанов, Н. Е. Шевчик. – Минск : БГАТУ, 2025. – 216 с.  
ISBN 978-985-25-0306-8.

Предназначено для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальности 6-05-0812-04 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства». Может быть рекомендовано студентам учреждений высшего образования, обучающимся по специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

УДК 621.313(07)  
ББК 31.261я7

ISBN 978-985-25-0306-8

© БГАТУ, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	5
Лабораторная работа № 1	
Исследование режимов работы однофазного трансформатора . . . . .	6
Лабораторная работа № 2	
Исследование режимов работы трехфазного трансформатора . . . . .	19
Лабораторная работа № 3	
Определение групп соединения обмоток, параллельная работа трехфазных трансформаторов . . . . .	31
Лабораторная работа № 4	
Исследование работы трехфазных трансформаторов при несимметричной нагрузке . . . . .	47
Лабораторная работа № 5	
Исследование генератора постоянного тока с независимым возбуждением . . . . .	61
Лабораторная работа № 6	
Исследование генератора постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением . . . . .	75
Лабораторная работа № 7	
Исследование двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением . . . . .	84
Лабораторная работа № 8	
Исследование двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением . . . . .	94
Лабораторная работа № 9	
Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором . . . . .	102
Лабораторная работа № 10	
Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором . . . . .	114
Лабораторная работа № 11	
Исследование трехфазного асинхронного двигателя в режиме индукционного регулятора и фазорегулятора . . . . .	126
Лабораторная работа № 12	
Исследование однофазного асинхронного двигателя . . . . .	133

Лабораторная работа № 13	
Исследование трехфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме . . . . .	142
Лабораторная работа № 14	
Исследование способов пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором . . . . .	149
Лабораторная работа № 15	
Исследование трехфазного синхронного генератора . . . . .	168
Лабораторная работа № 16	
Исследование параллельной работы синхронного генератора с сетью . . . . .	183
Лабораторная работа № 17	
Исследование трехфазного синхронного двигателя . . . . .	195
Лабораторная работа № 18	
Исследование компаундированного синхронного генератора . . . . .	209
Список литературы . . . . .	215

## ВВЕДЕНИЕ

**Целью** изучения учебной дисциплины «Электрические машины» является формирование у обучающихся системы знаний, умений, навыков и профессиональных компетенций в области преобразования механической энергии в электрическую и, наоборот, включая вопросы проектирования, монтажа, наладки, техобслуживания электрических машин и трансформаторов, применяемых в сельскохозяйственном производстве.

В результате изучения дисциплины обучающиеся должны:

***знать:***

- устройство электрических машин и трансформаторов;
- принципы работы электрических машин различного типа и трансформаторов;
- основы теории электрических машин и трансформаторов;

***уметь:***

- использовать методы расчета параметров электрических машин и трансформаторов;
- проводить экспериментальные исследования характеристик электрических машин и трансформаторов;
- выбирать рациональные режимы работы электрических машин и трансформаторов;
- работать в команде и глубоко осознавать общегражданские цели своей профессиональной деятельности;

***иметь навыки:***

- экспериментального определения параметров и характеристик электрических машин;
- анализа электрических и магнитных цепей электрических машин и трансформаторов.

Лабораторный практикум включает в себя 18 лабораторных работ по разделам «Трансформаторы», «Машины постоянного тока», «Асинхронные машины» и «Синхронные машины». В каждой из работ приведены краткие теоретические сведения, изложен порядок выполнения работ, требования по содержанию отчетов, контрольные вопросы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Цель работы** – изучение конструкции, принципа действия, характеристик однофазного двухобмоточного трансформатора в различных режимах работы.

### **Задачи работы:**

1. Изучить устройство и принцип работы однофазного двухобмоточного трансформатора.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик однофазного трансформатора в различных режимах работы.

### **Общие сведения**

*Трансформатор* – это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной системы переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Трансформаторы классифицируют:

1. По назначению – силовые трансформаторы общего назначения и специальные трансформаторы (печные, выпрямительные, сварочные, автотрансформаторы, измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования числа фаз, формы кривой электродвижущей силы (ЭДС), частоты и др.).
2. По виду охлаждения – с воздушным охлаждением (сухие трансформаторы), с масляным охлаждением (масляные трансформаторы), со специальными системами охлаждения.
3. По числу фаз – одно-, трехфазные, многофазные.
4. По конфигурации магнитопровода – стержневые, броневые, тороидальные.
5. По количеству обмоток на фазу – двух-, трехобмоточные и многообмоточные (более трех обмоток).
6. По конструкции обмоток – с концентрическими и чередующимися (дисковыми) обмотками.

7. По соотношению первичного и вторичного напряжения – трансформаторы повышающие и понижающие.

Трансформаторы используются в энергетике, в промышленности, в строительстве, на транспорте, в сельскохозяйственном производстве, военном деле и в быту для различных целей.

Активная часть трансформатора состоит из двух или более электрически не связанных между собой обмоток с изоляцией, которые размещены на замкнутом магнитопроводе (рис. 1.1, а).

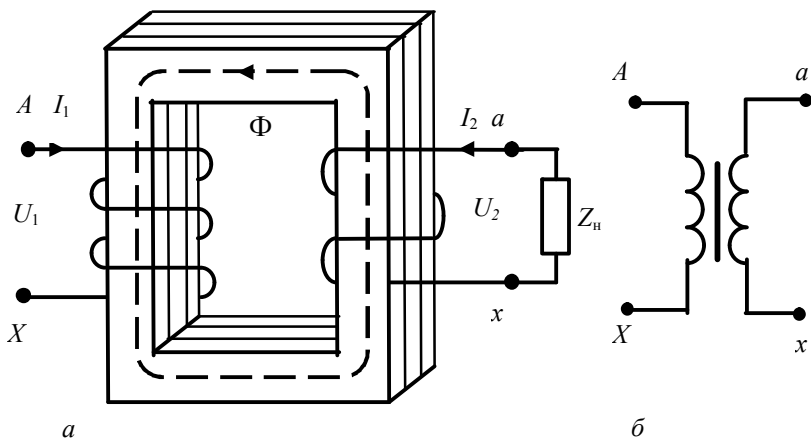


Рис. 1.1. Однофазный двухобмоточный трансформатор:  
а – электромагнитная схема; б – принципиальная электрическая схема

Магнитопровод служит контуром для прохождения основного магнитного потока и выполняется из изолированных листов холоднокатаной электротехнической стали (легированной кремнием) толщиной 0,28–0,50 мм. Изоляцией служит оксидная пленка на поверхности стали. Для стяжки листов стали применяются бандажки, стяжные шпильки и прессующие балки.

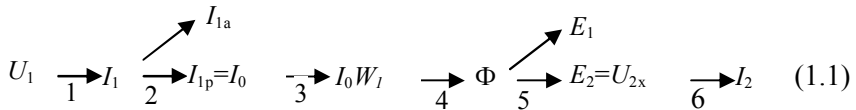
Обмотки выполнены изолированным обмоточным проводом. На первичную обмотку подается напряжение сети, к зажимам вторичной присоединяется нагрузка.

В зависимости от назначения и способа охлаждения трансформаторы имеют конструктивные особенности и могут содержать вспомогательные части: корпус или бак, выводные изоляторы обмоток высшего и низшего напряжения, маслорасширитель,

выхлопную трубу, газовое реле, переключатель числа витков обмотки с приводом для регулирования напряжения, вентиляторы для охлаждения, устройство контроля температуры и другие элементы.

В трансформаторах между первичной и вторичной обмоткой отсутствует электрическая связь (рис. 1.1, б). Передача энергии переменного тока из первичного во вторичный контур трансформатора осуществляется электромагнитным полем.

Принцип действия трансформатора можно описать следующей схемой:



1. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока напряжением  $U_1$  и частотой  $f_1$  по ней протекает ток  $I_1$  (рис. 1.1, а).

2. Ток  $I_1$  содержит активную  $I_{1a}$  и реактивную  $I_{1p}$  составляющие. Реактивная составляющая создает магнитное поле и является *намагничивающим током*  $I_0$ .

3. Намагничивающий ток создает МДС  $I_0 W_1$ .

4. Под действием МДС возникает переменный магнитный поток. Основная составляющая потока  $\Phi$  замыкается по магнитопроводу.

5. Магнитный поток, пронизывая витки первичной и вторичной обмоток, согласно закону электромагнитной индукции, наводит в них ЭДС. ЭДС первичной и вторичной обмоток пропорциональны количеству их витков:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (1.2)$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.3)$$

где  $W_1$  и  $W_2$  – количество витков первичной и вторичной обмоток, шт.;  
 $t$  – время, с.

При этом ЭДС одного витка первичной и вторичной обмоток одинакова:

$$e_s = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.4)$$

Действующие значения ЭДС:

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi, \quad (1.5)$$

$$E_2 = 4,44 f_1 W_2 \Phi. \quad (1.6)$$

ЭДС первичной обмотки уравнивает приложенное к ней напряжение. При отсутствии нагрузки напряжение на выводах вторичной обмотки равно наведенной в ней ЭДС.

6. При подключении нагрузки под действием ЭДС  $E_2$  по вторичной обмотке через нагрузку потечет переменный ток  $I_2$ .

Отношение ЭДС обмоток называется *коэффициентом трансформации*:

$$k_T = \frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (1.7)$$

В режиме холостого хода напряжения первичной и вторичной обмоток практически равны ЭДС их обмоток:  $U_{2x} = E_2$ ,  $U_{1x} \approx E_1$ . Тогда

$$k_T = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1x}}{U_{2x}}. \quad (1.8)$$

Изменяя соотношение витков первичной и вторичной обмоток, можно получить любое вторичное напряжение

$$U_2 = U_1 \frac{W_2}{W_1} = \frac{U_1}{k_T}. \quad (1.9)$$

Если  $W_2 > W_1$  ( $k_T < 1$ ), то  $U_2 > U_1$ , а трансформатор будет *повышающим*. Если  $W_2 < W_1$  ( $k_T > 1$ ), то  $U_2 < U_1$ , а трансформатор будет *понижающим*.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. При уменьшении вторичного напряжения в  $k_T$  раз ток во вторичной обмотке увеличится в  $k_T$  раз, и наоборот:

$$k_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (1.10)$$

Различают следующие режимы работы трансформатора:

- 1) режим холостого хода;
- 2) режим короткого замыкания;
- 3) режим нагрузки.

*В режиме холостого хода* на первичную обмотку трансформатора подается номинальное напряжение  $U_{1н}$  при номинальной частоте тока, а вторичная обмотка разомкнута ( $I_2 = 0$ ). Магнитное поле создается только первичной обмоткой, по которой протекает ток холостого хода  $I_{1х}$ .

Ток холостого хода мал ( $I_{1х} = 0,01 - 0,1 I_{1н}$ ). Его реактивная составляющая создает магнитный поток и является намагничивающим током  $I_{1р} = I_0$ . Активная составляющая  $I_{1а}$  не превышает 10 % от тока холостого хода и компенсирует потери мощности трансформатора.

При холостом ходе трансформатор не совершает полезной работы. Потребляемая из сети активная мощность холостого хода  $P_x$  тратится на компенсацию электрических потерь в первичной обмотке  $\Delta P_{\text{эл}1х}$  и магнитных потерь в стали магнитопровода  $\Delta P_c$ :

$$P_x = \Delta P_c + \Delta P_{\text{эл}1х}. \quad (1.11)$$

Электрические потери в первичной обмотке  $\Delta P_{\text{эл}1х} = m I_{1х}^2 r_1$  даже в трансформаторах малой мощности не превышают 2 % мощности холостого хода, поэтому ими можно пренебречь и считать, что мощность холостого хода расходуется только на потери в стали:

$$P_x \approx \Delta P_c. \quad (1.12)$$

Потери в стали не зависят от нагрузки трансформатора и вызывают нагрев магнитопровода.

Различают аварийный и испытательный *режимы короткого замыкания*. В аварийном режиме вторичная обмотка замкнута накоротко при номинальном первичном напряжении, что приводит к увеличению токов в 15–20 раз по отношению к номинальному значению. Трансформатор при этом должен быть отключен от источника питания во избежание выхода из строя.

В испытательном режиме вторичная обмотка замкнута накоротко, а на первичную подано напряжение короткого замыкания  $U_{1к} < U_{1н}$ , при котором  $I_{1к} = I_{1н}$ , а  $I_{2к} = I_{2н}$ .

Напряжение короткого замыкания выражается в процентах от номинального:

$$u_{1к} = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} 100 \% . \quad (1.13)$$

Оно составляет от 3 % в силовых трансформаторах большой мощности до 10 % и более в трансформаторах малой мощности. Напряжение короткого замыкания – это потеря напряжения в обмотках трансформатора.

Так как напряжения в опыте короткого замыкания мало, то магнитный поток в 10–20 раз меньше, чем при номинальном напряжении, поэтому потери в стали  $\Delta P_c$ , будут незначительны по сравнению с потерями в обмотках. Можно считать, что потери короткого замыкания трансформатора равны потерям в обмотках:

$$P_k \approx \Delta P_s = \Delta P_{s1} + \Delta P_{s2} = mI_1^2 r_1 + mI_1'^2 r_1' = mI_1^2 r_k, \quad (1.14)$$

где  $m$  – количество фаз трансформатора, шт.

По потерям короткого замыкания можно судить об оптимальной плотности тока и сечениях проводов в обмотках.

В *режиме нагрузки* трансформатор нагружается в пределах от нуля до номинального тока активной, активно-индуктивной или емкостной нагрузкой.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки зависит как от величины нагрузки, так и от ее характера:

$$U_2 = U_{2н} [1 - \beta (u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2)], \quad (1.15)$$

где  $\beta = \frac{I_2}{I_{2н}} = \frac{I_1}{I_{1н}}$  – коэффициент загрузки трансформатор, о. е.;

$I_1, I_2$  – действительные значения токов первичной и вторичной обмотки, А.

Относительные значения активной и реактивной составляющей напряжения короткого замыкания:

$$u_{ка} = \frac{I_{1н} r_k}{U_{1н}} 100 \% ; \quad (1.16)$$

$$u_{кр} = \frac{I_{1н} x_k}{U_{1н}} 100 \% . \quad (1.17)$$

Зависимость  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = \text{const}$ ;  $f_1 = \text{const}$ ;  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  называется *внешней характеристикой трансформатора* (рис. 1.2).

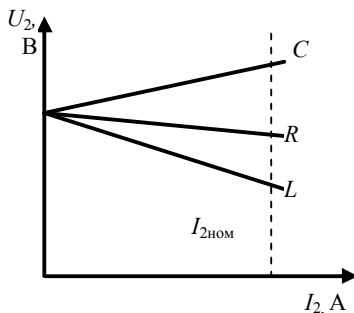


Рис. 1.2. Внешние характеристики трансформатора

При активно-индуктивной нагрузке с увеличением тока напряжение  $U_2$  уменьшается в большей степени, чем при активной, а при емкостной может даже увеличиваться.

В практических расчетах КПД трансформатора определяется из выражения:

$$\eta = \frac{\beta m I_{2H} U_{2H} \cos \varphi_2}{\beta m I_{2H} U_{2H} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_x} . \quad (1.18)$$

Зависимость КПД трансформатора от коэффициента его загрузки приведена на рис. 1.3.

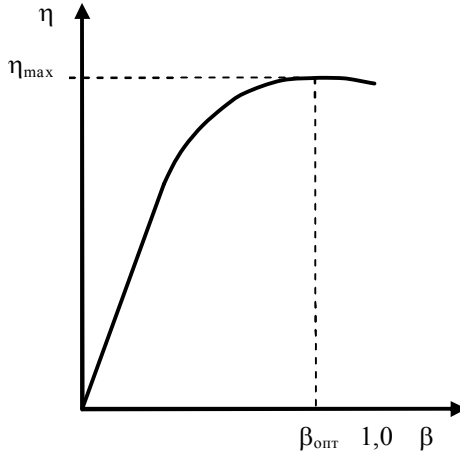


Рис. 1.3. Зависимость КПД от загрузки трансформатора

КПД трансформатора будет максимальным при равенстве электрических и магнитных потерь

$$P_x = \beta_{\text{опт}}^2 P_k , \quad (1.19)$$

откуда

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_x}{P_k}} . \quad (1.20)$$

Для большинства трансформаторов  $\beta_{\text{опт}} = 0,5-0,7$ .

В мощных трансформаторах максимальный КПД может достигать 98 %–99 %, в трансформаторах малой мощности он меньше.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия исследуемого трансформатора. Записать его паспортные данные:  $S_n = 100 \text{ В} \cdot \text{А}$ ;  $U_{1н} = 220 \text{ В}$ .

2. Исследовать трансформатор в режиме холостого хода.

Собрать электрическую схему на стенде НТЦ-03 согласно рис. 1.4.

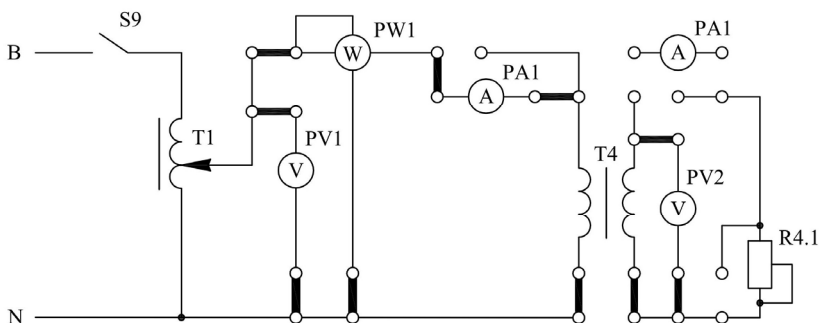


Рис. 1.4. Схема проведения опыта холостого хода

Включить стенд тумблером «Сеть». Включить собранную схему тумблером  $S9$  в верхнее положение и пакетным переключателем.

С помощью ЛАТРа  $T1$  установить на первичной обмотке исследуемого трансформатора напряжение  $U_{1x} = U_{1н} = 220 \text{ В}$ . Снять показания приборов, данные занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Исследование трансформатора в режиме холостого хода

Опыт				Расчет		
$U_{1x}, \text{В}$	$U_{2x}, \text{В}$	$I_{1x}, \text{А}$	$P_x, \text{Вт}$	$k_T, \text{о. е.}$	$I_{1н}, \text{А}$	$i_{1x}, \%$

Определить коэффициент трансформации:  $k_T = \frac{U_{1x}}{U_{2x}}$ .

Рассчитать ток холостого хода в процентах от номинального:

$$i_{1x} = \frac{I_{1x}}{I_{1н}} 100\%; I_{1н} = \frac{S_{н}}{U_{1н}}$$

3. Исследовать трансформатор в режиме короткого замыкания. Собрать схему на стенде НТЦ-03, согласно рис. 1.5.

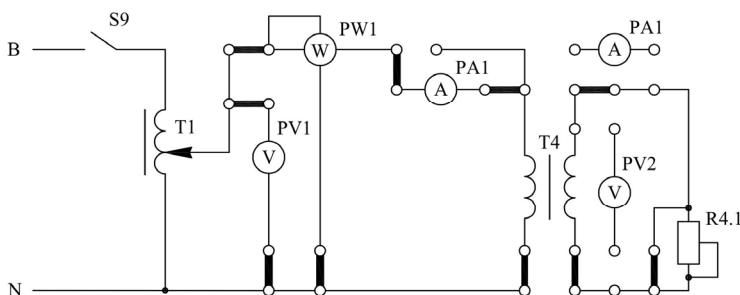


Рис. 1.5. Схема проведения опыта короткого замыкания

**ВНИМАНИЕ!** Перед проведением работы убедитесь, что все галетные переключатели ЛАТРов (Т1, Т1.1, Т1.3) установлены в поз. «0». При работе с трехфазным ЛАТРом Т1 не допускается одновременное использование однофазных ЛАТРов Т1.1 и Т1.3.

Включить стенд тумблером «Сеть». Установить первичное напряжение переключателем Т1,  $U = 20$  В (ручку переключателя ЛАТРа Т1 устанавливать только в пределах 0–20 В, во избежание выхода из строя элементов схемы!). Включить питание схемы тумблером S9.

Снять показания приборов, данные занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Исследование трансформатора в режиме короткого замыкания

Опыт			Расчет						
$U_{1к},$ В	$I_{1к},$ А	$P_{к},$ Вт	$z_{к},$ Ом	$r_{к},$ Ом	$x_{к},$ Ом	$u_{1к},$ Т%/о	$u_{1ка},$ %/о	$u_{1кр},$ %/о	

Рассчитать полное, активное и реактивное сопротивления короткого замыкания трансформатора:

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; r_k = \frac{P_k}{I_{1к}^2}; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Определить напряжение короткого замыкания в процентах от номинального по формуле (1.13). По формулам (1.16) и (1.17) найти его активную и реактивную составляющие.

4. Исследовать трансформатор в режиме нагрузки.

Собрать схему на стенде НТЦ-03 согласно рис. 1.6.

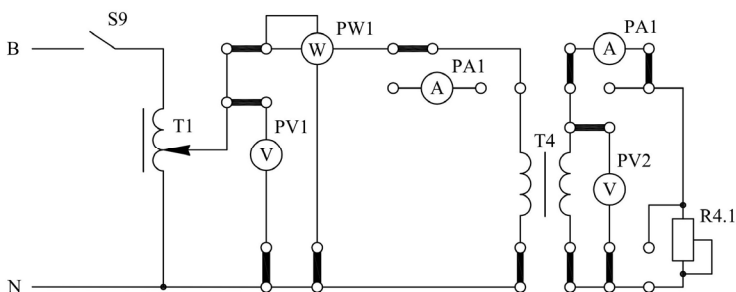


Рис. 1.6. Схема исследования трансформатора в режиме нагрузки

Включить стенд тумблером «Сеть». Включить схему тумблером *S9*. Переключателем ЛАТРа *T1* установить напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_1 = U_{1н} = 220$  В. Нагружать трансформатор активной нагрузкой ( $\cos\varphi_2 = 1,0$ ), изменяя величину ее сопротивления переключателем *R4* (положения 1–6). Снять показания приборов и данные занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Исследование трансформатора в режиме нагрузки

Положение переключателя <i>R4</i>	Опыт						Расчет	
	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$\cos\varphi_2, \text{о. е.}$	$\beta, \text{о. е.}$	$\eta, \text{о. е.}$
1								
2								

Положение переключателя R4	Опыт					Расчет	
	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$U_2$ , В	$I_2$ , А $\cos\varphi_2$ , о. е.	$\beta$ , о. е.	$\eta$ , о. е.
3							
4							
5							
6							

Определить коэффициенты загрузки трансформатора  $\beta = \frac{I_1}{I_{1н}}$ ,

где  $I_{1н} = \frac{S_n}{U_{1н}}$ .

Рассчитать КПД трансформатора по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos\varphi_2}{\beta S_n \cos\varphi_2 + \beta^2 P_k + P_x}.$$

Построить внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(I_2)$  и зависимость  $\eta = f(\beta)$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов;
4. Выводы по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. Как устроен однофазный трансформатор?
2. От чего зависят ЭДС обмоток трансформатора?

3. В каких случаях трансформатор называется повышающим и когда понижающим?
4. Что называется коэффициентом трансформации?
5. Как определить номинальные токи обмоток трансформатора, если известны его номинальная мощность и напряжения?
6. Что называется внешней характеристикой трансформатора?
7. Какие потери энергии имеют место в трансформаторе и от чего они зависят?
8. Что называют схемой замещения трансформатора и как определить ее параметры?
9. Как выполняют опыты холостого хода и короткого замыкания?
10. Для чего магнитопровод трансформатора собирают из отдельных листов электротехнической стали?
11. Почему ваттметр в цепи первичной обмотки трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке практически измеряет мощность магнитных потерь?
12. Почему в режиме холостого хода трансформатора его сердечник нагревается, а обмотки остаются холодными?
13. Почему в опыте короткого замыкания значительно снижают напряжение на первичной обмотке трансформатора?
14. Почему в режиме короткого замыкания трансформатора его обе обмотки нагреваются, а магнитопровод остается холодным?
15. Почему уменьшается напряжение на зажимах вторичной обмотки при увеличении тока нагрузки при активной и активно-индуктивной нагрузке?

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Цель работы** – изучение конструкции, принципа действия и характеристик трехфазного двухобмоточного трансформатора в различных режимах работы.

### **Задачи работы:**

1. Изучить устройство и принцип работы трехфазного двухобмоточного трансформатора.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятия характеристик трехфазного трансформатора в режимах холостого хода, короткого замыкания и в нагрузочном режиме.
3. Определить параметры и построить схему замещения трансформатора.

### **Общие сведения**

Электроэнергетические системы для производства и передачи электроэнергии выполняются трехфазными. Трансформирование трехфазной системы напряжений осуществляют трехфазными трансформаторами, которые являются соединением трех однофазных. Поэтому вся теория однофазного трансформатора относится и к одной фазе трехфазного трансформатора.

По конструкции магнитные системы трехфазных трансформаторов бывают *зависимые* и *независимые*.

В трансформаторах с независимой магнитной системой каждая фаза трансформируется однофазным трансформатором со своим отдельным магнитопроводом. А их обмотки соединены соответственно в общую первичную и вторичную обмотки, образуя общую группу (*групповой трансформатор*). Недостатки трансформаторной группы – громоздкость, повышенная стоимость, меньший КПД. Поэтому ее применение целесообразно в установках большой мощности (более 60 МВ·А) с целью уменьшения веса и габаритов единицы оборудования, что важно при его транспортировке и монтаже.

В остальных случаях обычно применяют трехфазные трансформаторы с зависимой магнитной системой, у которых обмотки

расположены на стержнях, объединенных в общий магнитопровод с ярмами. Чаще всего применяются плоские магнитопроводы, у которых все стержни и ярма расположены в одной плоскости (рис. 2.1).

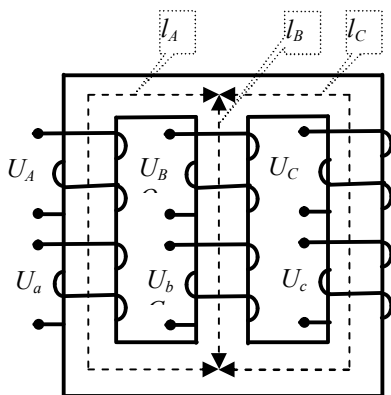


Рис. 2.1. Плоский магнитопровод трехфазного трансформатора

Такая магнитная система несимметрична. Магнитный поток в среднем стержне проходит путь меньший, чем в крайних. Магнитное сопротивление средней фазы меньше, и для нее требуется меньшая магнитодвижущая сила (МДС), поэтому намагничивающие токи фаз несимметричны. Для уменьшения несимметрии сечение ярм делают на 10 %–15 % больше сечения стержней.

Несимметрия токов холостого хода трехстержневого трансформатора практически не отражается на его работе, так как даже при небольшой нагрузке малозаметно различие в величинах токов фаз.

Обмотка в трехфазном трансформаторе – это совокупность обмоток одного напряжения трех фаз, соединяемых между собой. Первичную обмотку трансформатора подключают к электрической сети, к вторичной обмотке присоединяют нагрузку. Начала трех фаз первичной обмотки маркируют прописными буквами  $A, B, C$ , концы –  $X, Y, Z$ . Начала и концы вторичной обмотки – строчными буквами  $a, b, c, x, y, z$  соответственно.

Обмотки изготавливают из изолированного обмоточного провода круглого или прямоугольного сечения. В силовых трансформаторах общего назначения мощностью до 16 000 кВ·А применяется алюминиевый провод. В трансформаторах больших

мощностей и в трансформаторах специального назначения обмотки выполняются из медного провода.

Обмотки изолированы друг от друга и от всех заземленных частей трансформатора (магнитной системы, деталей крепления, защитного кожуха или бака) главной изоляцией. Она создается сочетанием изоляционных деталей из твердых диэлектриков, с воздушными или заполненными трансформаторным маслом изоляционными промежутками. Изоляция между различными точками одной обмотки является продольной и включает в себя изоляцию между витками, слоями обмотки, катушками.

По направлению намотки различают правые и левые обмотки, по способу расположения на стержне – концентрические и чередующиеся (рис. 2.2).

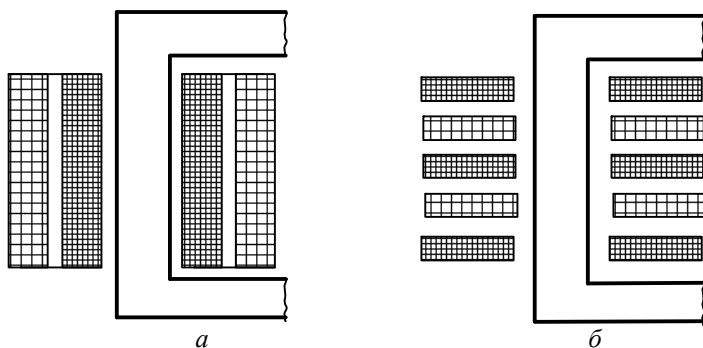




Рис. 2.2. Способы расположения обмоток на стержне:

*a* – концентрические; *б* – чередующиеся обмотки:

 — высшего напряжения  — низшего напряжения

В концентрических обмотках катушки высшего и низшего напряжения выполняются в виде полых цилиндров одинаковой высоты и располагаются на стержне одна внутри другой (рис. 2.2, *a*). Концентрические обмотки по характеру намотки подразделяются на цилиндрические, винтовые, спиральные.

Чередующиеся (дисковые) обмотки, в которых дисковые катушки высшего и низшего напряжения попеременно следуют друг за другом по высоте стержня (рис. 2.2, *б*), применяются в броневых трансформаторах.

На рис. 2.3. представлено устройство трехфазного масляного трансформатора с плоским магнитопроводом.

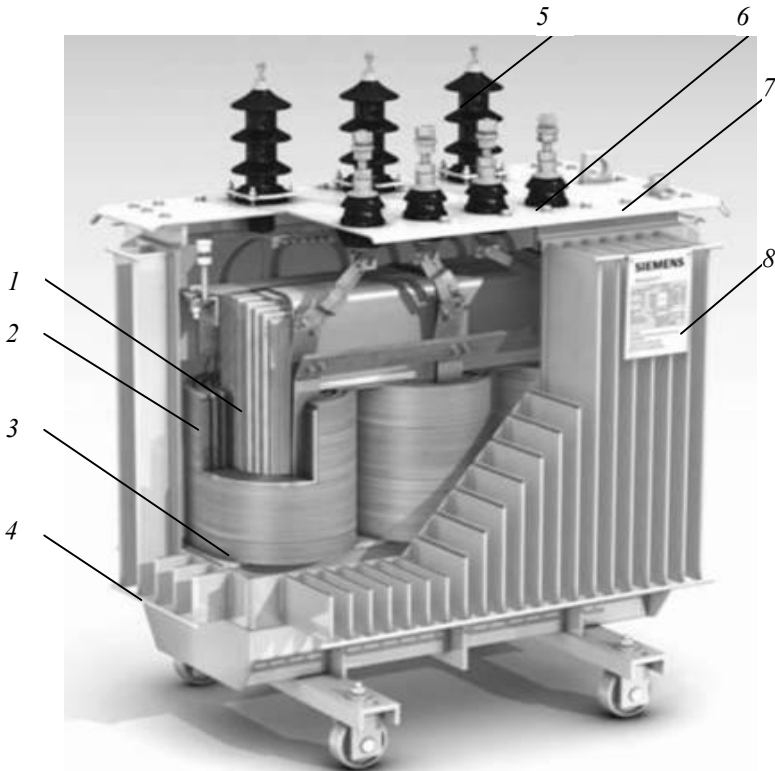


Рис. 2.3. Трехфазный силовой масляный трансформатор 10/0,4 кВ:  
1 – магнитопровод; 2 – обмотка низшего напряжения; 3 – обмотка высшего напряжения;  
4 – бак из гофрированного железа; 5 – выводы обмоток высшего напряжения;  
6 – выводы обмоток низшего напряжения; 7 – крышка бака; 8 – паспортная табличка

При работе трансформатора имеют место как электрические, так и магнитные процессы, а параметры электрических величин первичной и вторичной обмоток оказываются несоизмеримыми.

Для упрощения расчетов реальный трансформатор заменяют эквивалентным приведенным, у которого количество последовательно соединенных витков первичной и вторичной обмоток одинаковы:

$$W'_2 = W_1. \quad (2.1)$$

При этом мощности, потери и фазовые соотношения реального и приведенного трансформатора также должны быть одинаковы.

Для приведенного трансформатора составляют электрическую схему замещения (рис. 2.4), в которой магнитная связь между обмотками трансформатора заменена электрической. Схема замещения составляется для одной фазы.

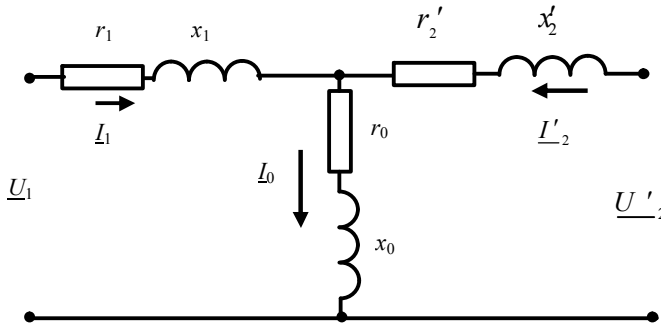


Рис. 2.4. Схема замещения трансформатора

Параметры схемы замещения  $r_1, x_1, r_2', x_2', r_0$  и  $x_0$  определяют на основе номинальных параметров трансформатора и данных опытов холостого хода и короткого замыкания.

Полное, активное и реактивное сопротивления короткого замыкания трансформатора равны:

$$Z_k = \frac{U_{1\text{кф}}}{I_{1\text{нф}}}; r_k = \frac{P_k}{m_1 I_{1\text{нф}}^2}; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \quad (2.2)$$

Полное, активное и реактивное сопротивления холостого хода трансформатора:

$$z_x = \frac{U_{1\text{нф}}}{I_{1\text{хф}}}; r_x = \frac{P_x}{m_1 I_{1\text{хф}}^2}; x_x = \sqrt{z_x^2 - r_x^2}. \quad (2.3)$$

Параметры схемы замещения:

$$r_1 = r_2' = \frac{r_k}{2}; x_1 = x_2' = \frac{x_k}{2}; r_0 = r_x - r_1; \quad (2.4)$$

## Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия трехфазного трансформатора по имеющимся в лаборатории образцам, плакатам, записать номинальные параметры исследуемого трансформатора:  $S_{\text{н}} = 300 \text{ В} \cdot \text{А}$ ;  $U_{1\text{нф}} = 220 \text{ В}$ .

2. Определить коэффициент трансформации.

Для определения фазного коэффициента трансформации собрать схему на стенде НТЦ-03 согласно рис. 2.5. Для определения линейного коэффициента трансформации собрать схему на стенде НТЦ-23 согласно рис. 2.6.

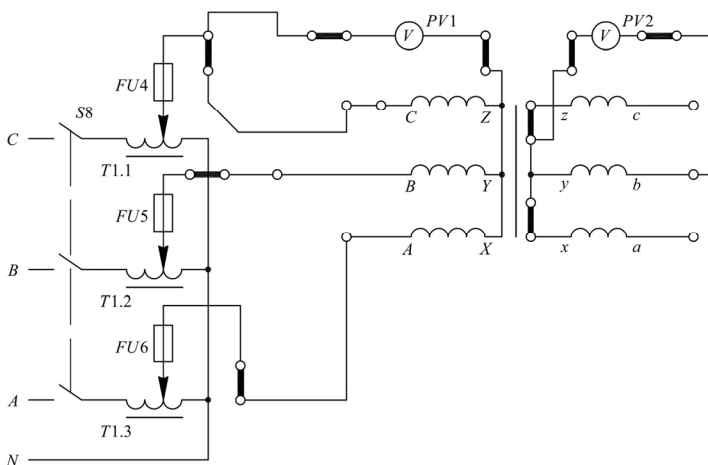


Рис. 2.5. Схема определения фазного коэффициента трансформации

**ВНИМАНИЕ!** *Перед проведением работы убедитесь, что все галетные переключатели ЛАТРов (Т1, Т1.1, Т1.3) установлены в поз. «0». При работе с трехфазным ЛАТРом Т1 не допускается одновременное использование однофазных ЛАТРов Т1.1 и Т1.3.*

Включить стенд тумблером «Сеть». Включить собранную схему тумблером S8. Переключателем ЛАТРа Т1 установить фазное напряжение на первичной обмотке трансформатора 220 В. Измерить фазные и линейные напряжения первичной и вторичной обмоток. Данные занести в табл. 2.1.

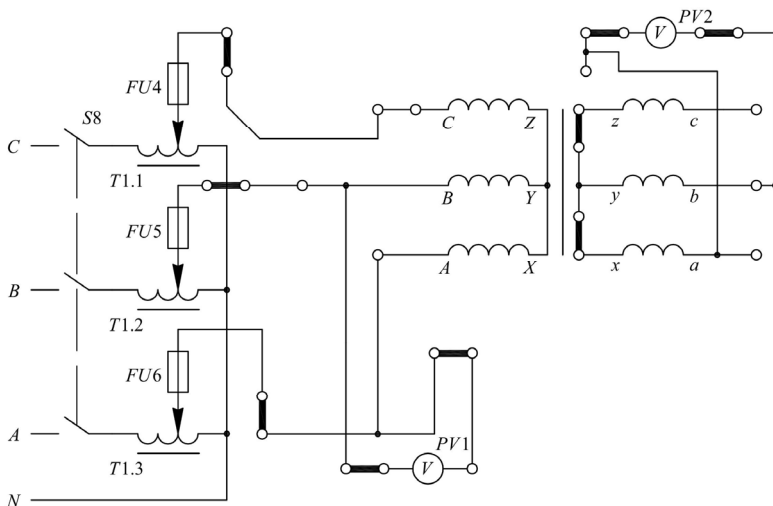


Рис. 2.6. Схема определения линейного коэффициента трансформации

Таблица 2.1

Определение коэффициента трансформации

Опыт				Расчет	
$U_{1\phi}, \text{ В}$	$U_{2\phi}, \text{ В}$	$U_{1л}, \text{ В}$	$U_{2л}, \text{ В}$	$k_{Т\phi}, \text{ о. е.}$	$k_{Тл}, \text{ о. е.}$

Вычислить фазный и линейный коэффициенты трансформации испытуемого трансформатора:

$$k_{Т\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}; k_{Тл} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}}.$$

3. Исследовать трансформатор в режиме холостого хода.

Собрать схему на стенде НТЦ-03 согласно рис. 2.7.

Включить стенд тумблером «Сеть». Включить собранную схему тумблером S8. Переключателем ЛАТРа 1 установить фазное напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1\phi} = U_{1н\phi} = 220 \text{ В}$ . Снять данные и занести в табл. 2.2.

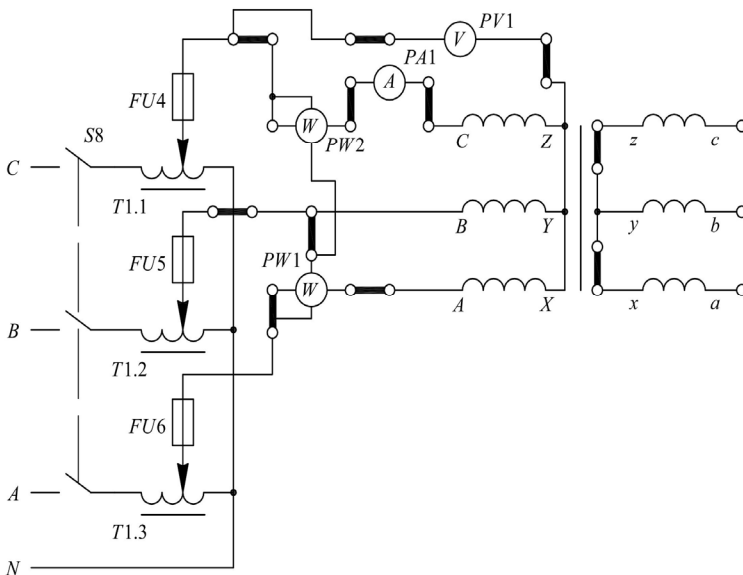


Рис. 2.7. Схема проведения опыта холостого хода

Таблица 2.2

Данные опыта холостого хода

Опыт			Расчет			
$U_{1xf}$ , В	$I_{1xf}$ , А	$P_{1x}$ , Вт	$i_{1x}$ , %	$z_{x}$ , Ом	$x_{x}$ , Ом	$r_{x}$ , Ом

Определить ток холостого хода в процентах от номинального:

$$i_{1x} = \frac{I_{1xf}}{I_{1нф}} 100 \% ; I_{1нф} = \frac{S_n}{3U_{1нф}}$$

По формулам (2.3) рассчитать полное, активное и реактивное сопротивления холостого хода трансформатора.

- Исследовать трансформатор в режиме короткого замыкания. Собрать схему на стенде НТЦ-03 согласно рис. 2.8.

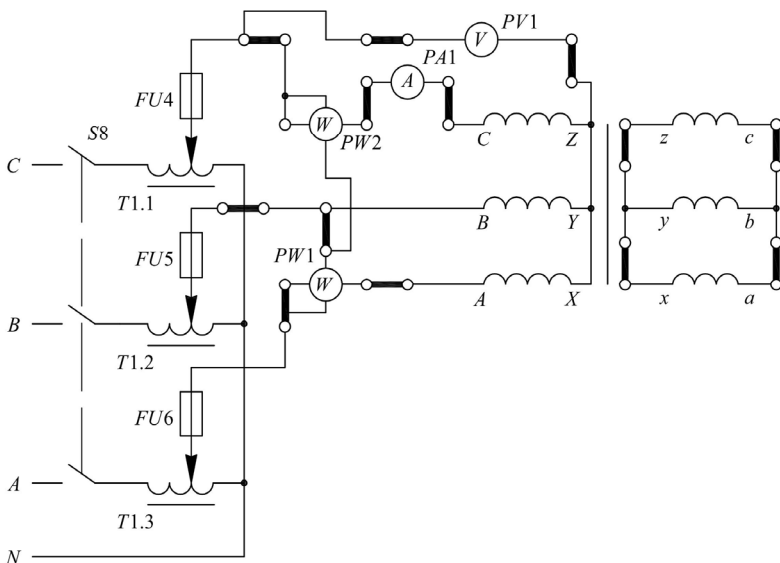


Рис. 2.8. Схема проведения опыта короткого замыкания

**ВНИМАНИЕ!** Перед включением вывести пакетный переключатель ЛАТРа Т1 в положение «0».

Включить стенд тумблером «Сеть». Включить собранную схему тумблером S8.

Переключателем ЛАТРа Т1 установить первичное фазное напряжение трансформатора равным 20 В (*ручку галетного переключателя ЛАТРа Т1 устанавливать только в пределах 0–20 В – в пределах зеленого диапазона, во избежание выхода из строя элементов схемы*) снять показания при положении переключателя на 20 В. Полученные данные занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Данные опыта короткого замыкания

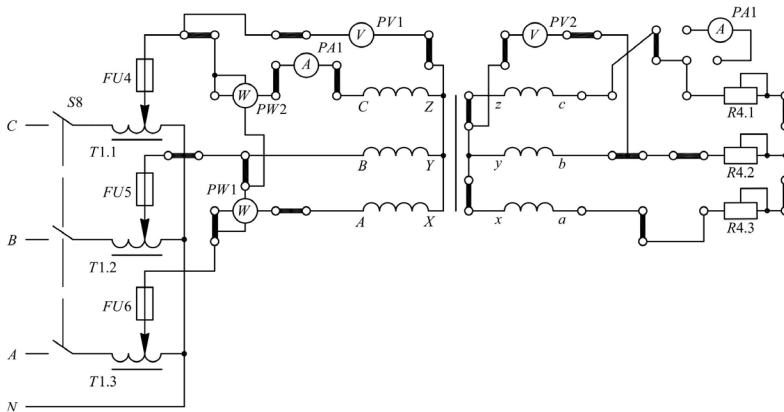
Опыт			Расчет			
$U_{1\text{кф}}, \text{В}$	$I_{1\text{кф}}, \text{А}$	$P_{1\text{к}}, \text{Вт}$	$u_{1\text{к}}, \%$	$z_{\text{к}}, \text{Ом}$	$x_{\text{к}}, \text{Ом}$	$r_{\text{к}}, \text{Ом}$

Определить напряжение короткого замыкания в процентах от номинального:  $u_{1K} = \frac{U_{1кф}}{U_{1нф}} 100 \%$ .

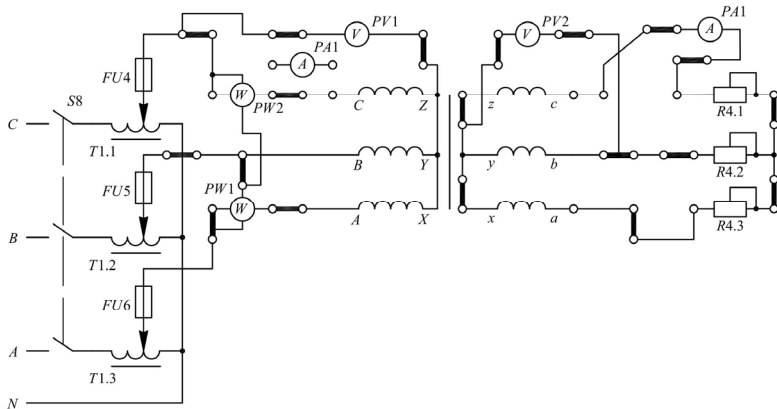
По формулам (2.4) рассчитать полное, активное и реактивное сопротивления короткого замыкания трансформатора.

5. Исследовать трансформатор в режиме нагрузки.

Собрать схему на стенде НТЦ-03 согласно рис. 2.9, а. Затем для определения тока  $I_{2ф}$  – согласно рис. 2.9, б.



*a*



*б*

Рис. 2.9. Схемы исследования трансформатора в режиме нагрузки

Включить стенд тумблером «Сеть». Включить собранную схему тумблером S8. Переключателем ЛАТРа1 установить фазное напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{1\phi} = U_{1нф} = 220 \text{ В}$ .

Нагружать трансформатор активной нагрузкой ( $\cos\varphi_2 = 1,0$ ), изменяя величину ее сопротивления переключателем R4 (положения 1–6). Снять показания приборов, и данные занести в табл. 2.4.

**Во избежание перегрева нагрузочных резисторов при больших токах нагрузки, после 5 минут работы необходимо делать паузу 5–10 минут.**

Таблица 2.4

Исследование трансформатора в режиме нагрузки

Положение переключателя R4	Опыт				
	$U_{1\phi}$ , В	$I_{1\phi}$ , А	$U_{2\phi}$ , В	$I_{2\phi}$ , А	$P_1$ , Вт
1					
2					
3					
4					
5					
6					

Построить внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(I_2)$ .

6. Используя данные опытов холостого хода и короткого замыкания по формулам (2.4) определить параметры схемы замещения трансформатора и занести их в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Параметры схемы замещения трансформатора

$r_1$ , Ом	$x_{к1}$ , Ом	$r'_2$ , Ом	$x'_{2}$ , Ом	$r_0$ , Ом	$x_0$ , Ом

Построить схему замещения трансформатора и указать на схеме ее параметры согласно табл. 2.5.

## Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики, схема замещения трансформатора;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

## Контрольные вопросы

1. Почему ток холостого хода трехфазного трансформатора неодинаков по фазам?
2. Как определяется коэффициент трансформации?
3. Из чего складываются потери холостого хода трансформатора?
4. Как осуществляется приведение параметров вторичной обмотки трансформатора к параметрам первичной обмотки?
5. Как определяются параметры намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора?
6. Из чего складываются потери короткого замыкания трансформатора?
7. Что называется напряжением короткого замыкания, от чего оно зависит, как его определить?
8. Чем объясняется изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке?
9. Расскажите о конструкции, принципе работы трансформатора.
10. При каких условиях КПД трансформатора имеет максимальное значение?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК, ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Цель работы** – анализ параллельной работы трехфазных трансформаторов, проверка маркировки выводов и определение групп соединения обмоток.

### Задачи работы:

1. Приобрести практические навыки маркировки выводов обмоток трехфазного трансформатора.
2. Приобрести практические навыки по определению группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.
3. Изучить условия включения и произвести исследование параллельной работы трехфазных трансформаторов.

### Общие сведения

Свойства трехфазного трансформатора в значительной мере определяются схемой соединения его обмоток. Наиболее часто обмотки соединяют по схеме «звезда» (Y), «звезда с нулевым проводом» ( $Y_n$ ) «треугольник» ( $\Delta$ ), «зигзаг с нулевым проводом» ( $Z_n$ ) (рис. 3.1, а, б, в).

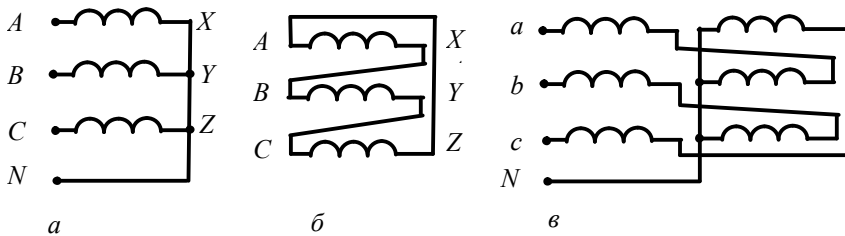


Рис. 3.1. Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов:  
а – звезда с нулевым проводом ( $Y_n$ ); б – треугольник ( $\Delta$ );  
в – зигзаг с нулевым проводом ( $Z_n$ )

Комбинация схем соединения первичной и вторичной обмоток трансформатора теоретически может быть любой. Наиболее употребительны комбинации:  $Y/Y_n$ ,  $\Delta/Y_n$ ,  $Y/Z_n$ ,  $Y/\Delta$ ,  $Y_n/\Delta$ .

Каждому способу соединения обмоток трансформатора соответствует определенный угол фазового сдвига между одноименными ЭДС первичной и вторичной стороны, который принято выражать *группой соединения*. Он может изменяться от 0 до 360° с кратностью в 30°, а трехфазные трансформаторы имеют 12 групп соединения.

Если ЭДС первичной обмотки совместить с минутой стрелкой часового циферблата, направленной на цифру «12», то вектор ЭДС вторичной обмотки, совмещенный с часовой стрелкой, покажет номер группы соединения: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0.

Группа соединения зависит от маркировки зажимов, порядка чередования фаз и направления намотки обмоток. При одинаковых схемах соединения обмоток высшего и низшего напряжений получают четные группы соединения, а при неодинаковых схемах – нечетные.

Промышленностью выпускаются силовые трансформаторы с нулевой и одиннадцатой группой:  $Y/Y_n-0$ ,  $\Delta/Y_n-11$ ,  $Y/Z_n-11$ ,  $Y/\Delta-11$ ,  $Y_n/\Delta-11$ .

Схемы  $Y/Y_n-0$ ,  $\Delta/Y_n-11$ ,  $Y/Z_n-11$  применяются в трансформаторах относительно небольшой мощности с первичным напряжением до 35 кВ включительно и вторичным – до 0,4 кВ для питания распределительных сетей с глухозаземленной нейтралью.

Схема  $Y/Y_n-0$  наиболее проста и экономична в изготовлении, но при несимметричной нагрузке фаз происходит значительное искажение симметрии напряжений, и возрастают потери электроэнергии.

Схема  $\Delta/Y_n-11$  более устойчива к искажающим воздействиям несимметричной нагрузки, но количество витков в первичной обмотке в  $\sqrt{3}$  раз больше, чем у схемы  $Y/Y_n-0$ . Применяется в трансформаторах от 400 кВА и выше.

Схема  $Y/Z_n-11$  при работе в несимметричных режимах практически не имеет искажений системы напряжений, но количество витков вторичной обмотки на 15 % больше, чем у схемы  $Y/Y_n$ . Применяется при значительной несимметрии нагрузки и в трансформаторах выпрямительных устройств.

Схема  $Y/\Delta-11$  применяется в трансформаторах средней и большой мощности с первичным напряжением до 35 кВ включительно и вторичным – от 0,69 до 10,0 кВ для питания распределительных сетей с изолированной нейтралью.

Схема  $Y_n/\Delta-11$  применяется в мощных трансформаторах с первичным напряжением 110 кВ и выше.

Группу соединения обмоток нужно знать при включении трансформаторов на параллельную работу.

Опытную проверку группы соединения при изготовлении и эксплуатации трансформаторов наиболее часто выполняют методом фазометра и методом вольтметра.

*Метод фазометра* основан на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями обмоток высшего и низшего напряжений с помощью фазометра.

Обмотку напряжения фазометра подключают на линейное вторичное напряжение  $U_{ab}$ , а токовую обмотку – на линейное первичное напряжение  $U_{AB}$  через активное сопротивление  $R$  (рис. 3.2). На активном сопротивлении векторы тока и напряжения совпадают. Поэтому, измеряя угол фазового сдвига между вектором вторичного линейного напряжения  $\underline{U}_{ab}$  и вектором первичного тока  $\underline{I}_{AB}$ , получаем угол векторами напряжений  $\underline{U}_{AB}$  и  $\underline{U}_{ab}$ .

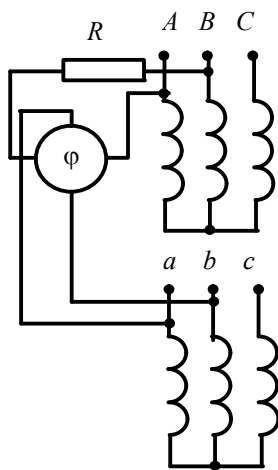


Рис. 3.2. Схема для определения группы соединений обмоток трансформатора с помощью фазометра

Этот метод самый простой, но если группа соединения не нулевая и не одиннадцатая, то сложно определить маркировку обмоток, чтобы привести группу соединения к стандарту.

Метод вольтметра позволяет определить как группу соединения, так и маркировку обмоток. При этом соединяются два одноименных вывода трансформатора, обычно «А» и «а» (рис. 3.3), и измеряются напряжения  $U_{Bb}$ ,  $U_{Cc}$ ,  $U_{Bc}$  и  $U_{Cb}$ .

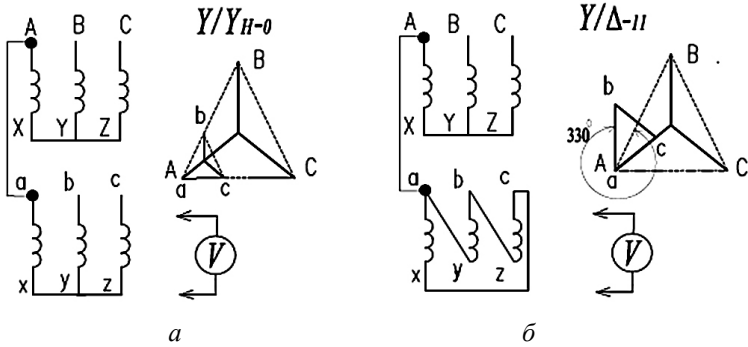


Рис. 3.3. Определение группы соединения обмоток методом вольтметра

По соотношению этих напряжений, полученных из топографических диаграмм, определяется группа соединения обмоток.

Например, для схемы  $Y/Y_n-0$  (рис. 3.3, а):

$$U_{Bb} = U_{Cc} = U_{ab} (k_{тл} - 1); \quad (3.1)$$

для схемы  $Y/\Delta-11$  (рис. 3.3, б):

$$U_{Bb} = U_{Cc} = U_{ab} \sqrt{1 - \sqrt{3}k_{тл} + k_{тл}^2}, \quad (3.2)$$

где  $k_{тл}$  – линейный коэффициент трансформации.

Для трансформации больших мощностей или повышения надежности электроснабжения потребителей трансформаторы включают на параллельную работу. При этом первичные обмотки включаются на общую первичную сеть, а к вторичным – подключается общая нагрузка (рис. 3.4).

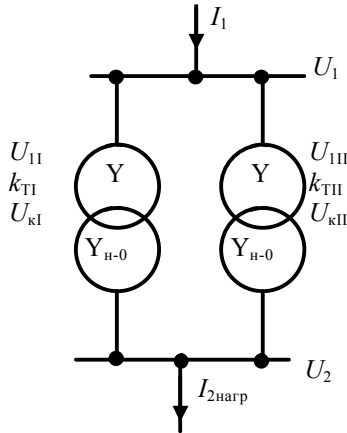


Рис. 3.4. Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами

При включении на параллельную работу необходимо соблюдение следующих условий:

1. Должен быть одинаковый порядок чередования фаз, как на первичной, так и на вторичной стороне трансформаторов, т. е. выполнена фазировка.

2. Трансформаторы должны иметь одинаковые группы соединения обмоток.

3. Трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации (допускается разность не более  $\pm 0,5\%$ ), чтобы при одинаковых первичных напряжениях вторичные напряжения были равны по величине:

$$K_{тI} = K_{тII} = \dots \quad (3.3)$$

4. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания (допускается различие  $\pm 10\%$ ), а также их активные и реактивные составляющие:

$$\begin{aligned} u_{кI} &= u_{кII} \dots; \\ u_{каI} &= u_{каII} = \dots; \\ u_{крI} &= u_{крII} = \dots \end{aligned} \quad (3.4)$$

Если не выполнена фазировка, то к шинам на вторичной стороне могут оказаться подключены выводы вторичных обмоток разных фаз параллельно работающих трансформаторов, что вызовет аварийный режим междуфазного короткого замыкания.

Если группы соединения неодинаковы, то вторичные напряжения трансформаторов одинаковы по величине, но сдвинуты по фазе. Из-за этого появляется разность потенциалов, вызывающая уравнивающий ток. Даже при разности в одну группу соединения векторы вторичных напряжений трансформаторов будут сдвинуты по фазе на  $30^\circ$ , разность потенциалов равна  $\Delta U_2 = 2U_2 \sin 15^\circ = 0,52U_2$ , а уравнивающий ток

$$I_y = \frac{0,52U_2}{z_{кI} + z_{кII}} = \frac{0,52U_2}{2z_k} = \frac{0,26E_2}{z_k} = 0,26I_k, \quad (3.5)$$

что превышает номинальный ток трансформатора в 3–5 раз. При большей разнице в группах соединения фазовый сдвиг векторов вторичных напряжений трансформаторов и уравнивающий ток будут еще больше. Поэтому параллельная работа трансформаторов с различными группами соединения невозможна.

Если неодинаковы коэффициенты трансформации, то при одинаковом первичном напряжении вторичные напряжения трансформаторов будут неодинаковы по величине:

$$U_{2I} = \frac{U_1}{k_{TI}} \neq U_{2II} = \frac{U_1}{k_{TII}}. \quad (3.6)$$

Из-за этого возникает уравнивающий ток, который течет по вторичным обмоткам двух трансформаторов в противоположных направлениях и выравнивает их потенциалы:

$$I_y = \frac{U_{2I} - U_{2II}}{z_{кI} + z_{кII}}, \quad (3.7)$$

где  $z_{кI}$  и  $z_{кII}$  – сопротивления короткого замыкания трансформаторов, Ом.

При работе под нагрузкой уравнительные токи геометрически складываются с токами нагрузки и вызывают циркуляцию мощности от одного трансформатора к другому. При этом трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации (и большим  $U_2$ ) всегда перегружен, а с большим коэффициентом трансформации (и меньшим  $U_2$ ) – недогружен. Чтобы не вышел из строя перегруженный трансформатор, общую нагрузку необходимо снижать.

При включении на параллельную работу трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания нагрузка между ними распределится неравномерно, пропорционально их сопротивлениям короткого замыкания:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{кII}}{Z_{кI}} = \frac{U_{кII} S_{нI}}{U_{кI} S_{нII}}, \quad (3.9)$$

где  $S_{нI}$  и  $S_{нII}$  – номинальные мощности трансформаторов, кВ·А.

Трансформатор с большим напряжением (и сопротивлением) короткого замыкания будет не догружен, а второй перегружен.

При параллельной работе нескольких ( $n$ ) трансформаторов нагрузка каждого из них равна:

$$S_i = \frac{(S_{нI} + S_{нII} + \dots + S_{нn}) S_{ни}}{\left( \frac{S_{нI}}{U_{кI}} + \frac{S_{нII}}{U_{кII}} + \dots + \frac{S_{нn}}{U_{кn}} \right) U_{ки}}. \quad (3.10)$$

Включение на параллельную работу трансформаторов с большой разностью номинальных мощностей не целесообразно, так трансформатор меньшей мощности не сможет взять на себя нагрузку трансформатора большей мощности при его отключении.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные исследуемых трансформаторов.
2. Собрать схему (рис. 3.5) и промаркировать выводы обмоток высшего напряжения трансформатора.

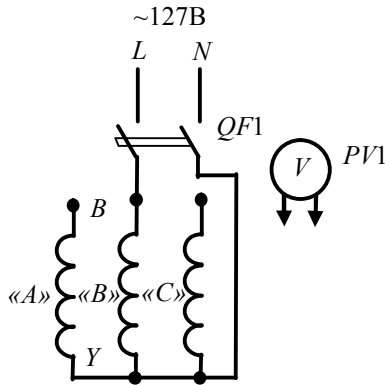


Рис. 3.5. Определение маркировки выводов стороны ВН

При проведении опыта использовать трансформатор  $T1$ , у которого известна маркировка первичной обмотки средней фазы (начало –  $B$ , конец –  $Y$ ) и принадлежность выводов двух других обмоток к фазам « $A$ » и « $C$ ». Необходимо определить начала и концы обмоток фаз « $A$ » и « $C$ » ( $A, X, C, Z$ ).

При сборке схемы нужно задаться выводами обмоток фаз « $A$ » и « $C$ », а предполагаемые выводы  $X, Z$  соединить с известным выводом  $Y$  в общую точку по схеме «звезда».

Вольтметром со свободными выводами измерить фазные и линейные напряжения. Результаты занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Маркировка выводов первичной стороны, В

$U_{BY}$	$U_{AX}$	$U_{CZ}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$

Рассматривая картину магнитного потока в стержнях магнитопровода (рис. 3.6), приходим к выводу, что магнитные потоки в крайних стержнях равны половине магнитного потока среднего стержня.

При соединении выводов  $X, Y, Z$  в общую точку ЭДС обмоток на крайних стержнях будут равны по величине половине ЭДС среднего стержня и будут иметь противоположное направление. В этом случае выполняются соотношения:

$$U_{AX} = U_{CZ} < U_{BY}; \quad (3.11)$$

$$U_{AB} = U_{BC} > U_{BY} \quad (3.12)$$

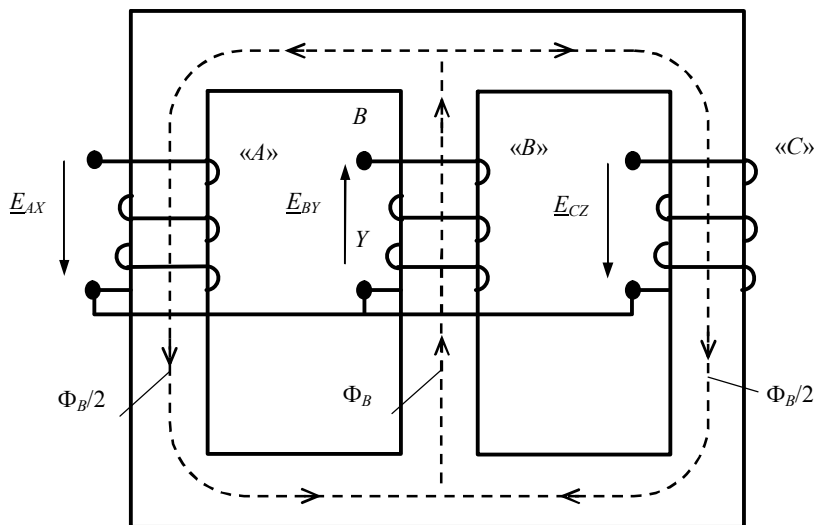


Рис. 3.6. Направление магнитных потоков и ЭДС при маркировке выводов первичной обмотки

Если эти соотношения не выполняются, то принята неверная маркировка выводов фаз «А» и «С». В этом случае ее следует изменить с последующей проверкой правильности.

По данным опыта построить в масштабе векторную диаграмму фазных и линейных напряжений первичной обмотки. Зарисовать клеммный щиток первичной обмотки трансформатора с маркировкой выводов.

3. Промаркировать выходы обмоток низшего напряжения трансформатора.

В результате выполнения предыдущего эксперимента известна маркировка выводов первичной обмотки, а также принадлежность выводов вторичной обмотки к фазам «а», «b», «с».

Опыт проводится для каждой фазы отдельно с использованием трансформатора Т1. Для маркировки выводов фазы «с» собрать схему (рис. 3.7).

Вольтметром со свободными выводами измерить необходимые величины. Результаты занести в табл. 3.2 в графу для фазы «с».

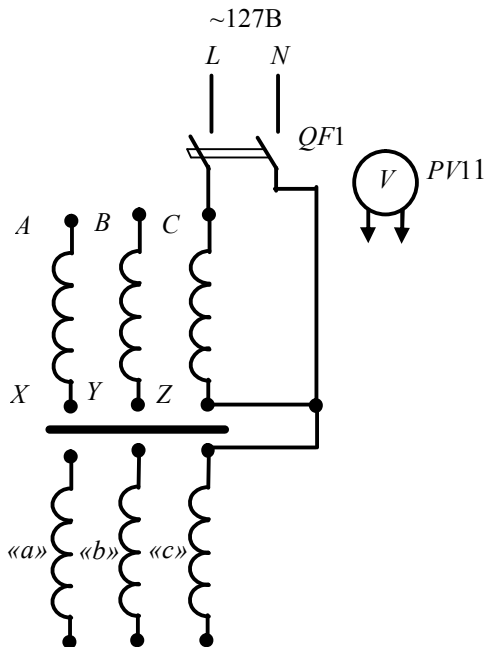


Рис. 3.7. Определение маркировки выводов стороны НН

Таблица 3.2

Маркировка выводов вторичной стороны, В

Фаза «a»			Фаза «b»			Фаза «c»		
$\underline{U}_{AX}$	$\underline{U}_{ax}$	$\underline{U}_{Aa}$	$\underline{U}_{BY}$	$\underline{U}_{by}$	$\underline{U}_{Bb}$	$\underline{U}_{CZ}$	$\underline{U}_{cz}$	$\underline{U}_{Cc}$

Так как первичная и вторичная обмотки одной фазы в нашем случае расположены на одном стержне, то они находятся в сцеплении с одним и тем же магнитным потоком. Величина наведенных в них ЭДС определяется числом витков, а направление – согласным или встречным включением обмоток. Например, для фазы «с» при соединении выводов  $Z$  и  $z$  ЭДС направлены встречно (рис. 3.8), а напряжение на свободных выводах равно

$$\underline{U}_{Cc} = \underline{U}_{CZ} - \underline{U}_{cz}. \quad (3.13)$$

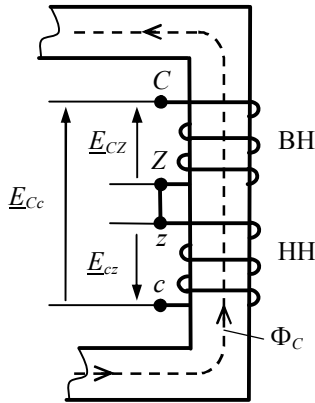


Рис. 3.8. Направление магнитных потоков и ЭДС при маркировке выводов фазы «с» вторичной обмотки

Собрать аналогичные схемы для маркировки выводов фаз «а» и «b», измерить необходимые величины, результаты занести в табл. 3.2 в графы для фаз «а» и «b». Должны выполняться условия:

$$\underline{U}_{Aa} = \underline{U}_{AX} - \underline{U}_{ax} . \quad (3.14)$$

$$\underline{U}_{Bb} = \underline{U}_{By} - \underline{U}_{by} . \quad (3.15)$$

Если условия (3.13)–(3.15) не выполняются, то следует поменять местами начало и конец соответствующей фазы вторичной обмотки с последующей проверкой.

По полученным данным отдельно для каждой из фаз построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и на основе их анализа промаркировать выходы вторичных обмоток.

Зарисовать клеммный щиток вторичной обмотки трансформатора с маркировкой выводов.

4. Проверить группу соединения обмоток трансформаторов  $Y/Y_n-0$  и  $Y/\Delta-11$ .

4.1. Собрать схему (рис. 3.9).

Вольтметром со свободными выводами измерить необходимые величины. Результаты занести в табл. 3.3 в столбцы для схемы  $Y/Y_n-0$ .

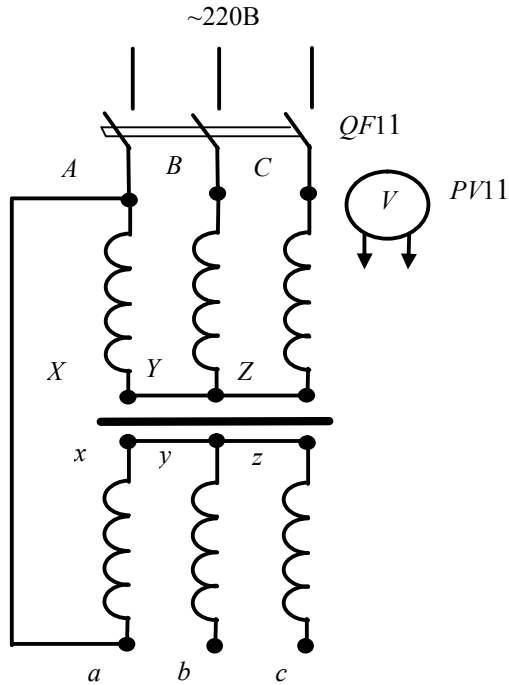


Рис. 3.9. Схема проверки группы соединения обмоток Y/Y<sub>H</sub>-0

Таблица 3.3

Проверка группы соединения обмоток

Схема Y/Y <sub>H</sub> -0						Схема Y/Δ-11					
$U_{AB},$ В	$U_{ab},$ В	$U_{Cc},$ В	$U_{Cb},$ В	$U_{Bb},$ В	$U_{Bc},$ В	$U_{AB},$ В	$U_{ab},$ В	$U_{Cc},$ В	$U_{Cb},$ В	$U_{Bb},$ В	$U_{Bc},$ В

При правильном соединении должно соблюдаться равенство (3.1), в котором коэффициент трансформации равен  $k_{тн} = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$ .

4.2. Собрать схему (рис. 3.10) и проверить правильность соединения обмоток трансформатора Y/Δ-11.

Вольтметром со свободными выводами измерить необходимые величины. Результаты занести в табл. 3.3 в столбцы для схемы Y/Δ-11.

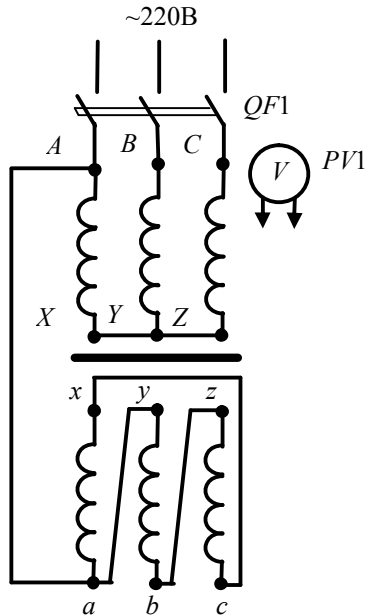


Рис. 3.10. Схема проверки группы соединения обмоток Y/Δ-11

При правильном соединении должно соблюдаться равенство (3.2).

По данным табл. 3.3, в масштабе методом засечек построить совместные векторные диаграммы напряжений первичной и вторичной сторон для схемы Y/Y<sub>н</sub>-0 и для схемы Y/Δ-11. При построении иметь в виду, что точки «A» и «a» являются общими. Угол между векторами одноименных линейных напряжений первичной и вторичной сторон должен соответствовать группе соединения.

5. Собрать схему (рис. 3.11) и провести исследование параллельной работы трансформаторов.

Подать напряжения на первичные обмотки трансформаторов T-I, T-II, включив автоматы QF1 и QF2. Выключатель QS1 и автомат QF3 не включать (амперметры PA2, PA4, PA5 показывают 0).

Вольтметром со свободными выводами измерить напряжение между одноименными выводами вторичных обмоток двух трансформаторов «a<sub>1</sub>» и «a<sub>11</sub>», «b<sub>1</sub>» и «b<sub>11</sub>», «c<sub>1</sub>» и «c<sub>11</sub>». При правильном соединении выводов обмоток и соблюдении условий включения на параллельную работу эти точки равнопотенциальны, а вольтметр покажет 0.

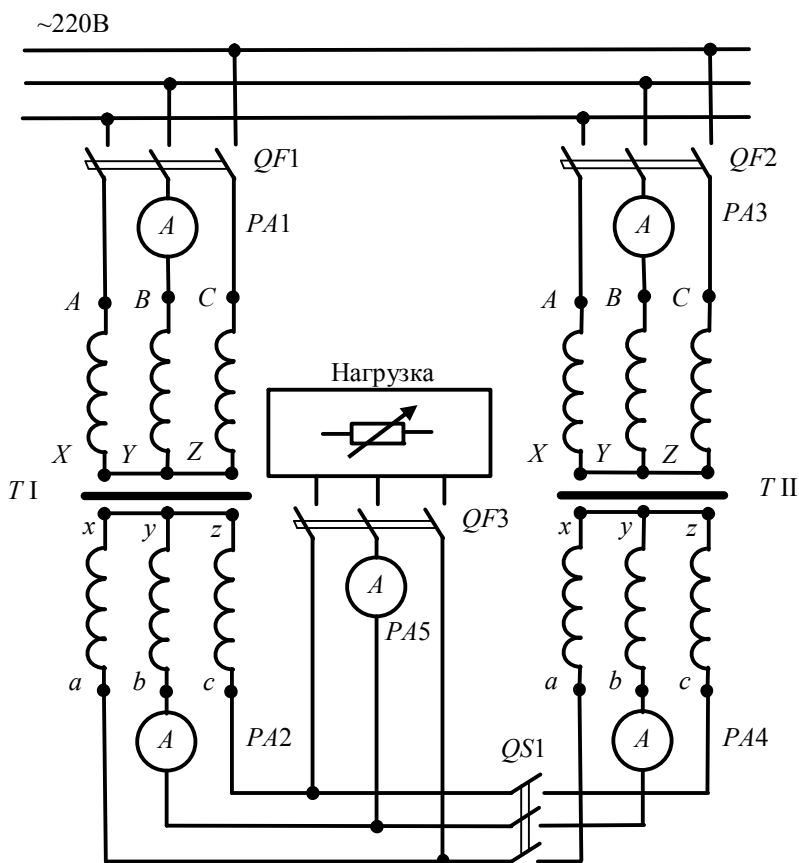


Рис. 3.11. Схема параллельной работы трансформаторов

Если это не выполняется, еще раз проверить схему и правильно соединить выводы обмоток первичной и вторичной сторон трансформаторов.

Добившись требуемого, включить трансформаторы на параллельную работу автоматом QF3 и выключателем QS1. Затем плавно нагрузить трансформаторы активной нагрузкой до номинального тока одного из трансформаторов, данные занести в табл. 3.4 (арабские цифры 1 и 2 в нижних индексах обозначают значения напряжений и токов первичной и вторичной сторон трансформаторов, а римские цифры I и II – номер трансформатора).

Параллельная работа трансформаторов

$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_{1\text{В}}, \text{А}$	$I_{1\text{П}}, \text{А}$	$I_{2\text{В}}, \text{А}$	$I_{2\text{П}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$

Используя данные опыта, на одной координатной плоскости построить графики распределения нагрузки между трансформаторами  $I_{2\text{I}} = (I_{\text{нагр}})$  и  $I_{2\text{II}} = (I_{\text{нагр}})$ .

Для точки наибольшей нагрузки проверить распределение тока нагрузки между параллельно работающими трансформаторами, пользуясь уравнениями:

$$\frac{I_{2\text{I}}}{I_{\text{нагр}} - I_{2\text{II}}} = \frac{I_{2\text{нI}} u_{\text{кII}}}{I_{2\text{нII}} u_{\text{кI}}}, \quad (3.16)$$

где  $I_{2\text{нI}}, I_{2\text{нII}}$  – номинальные вторичные токи первого и второго трансформатора, А;

$u_{\text{кI}}, u_{\text{кII}}$  – напряжения короткого замыкания трансформаторов, %;

$I_{\text{нагр}}$  – ток нагрузки по данным опыта, А.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики, векторные диаграммы;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите паспортные данные трансформатора и поясните их.

2. Каким способом и по какой схеме проводят определение выводов и их маркировку на высшей стороне трансформатора?
3. Каким способом и по какой схеме проводят определение выводов и их маркировку на низшей стороне трансформатора?
4. Что выражает группа соединения обмоток трансформатора?
5. Обмотка соединена по схеме Y/Y-0. Какую группу будет иметь трансформатор, если поменять местами начала и концы вторичной обмотки?
6. Какие группы соединений рекомендовано применять ГОСТ?
7. Перечислите условия, необходимые для включения трансформаторов на параллельную работу.
8. Что произойдет, если включить на параллельную работу трансформаторы с различными группами соединения обмоток?
9. Что произойдет, если включить на параллельную работу трансформаторы с различными коэффициентами трансформации?
10. Что произойдет, если включить на параллельную работу трансформаторы с различными напряжениями короткого замыкания?

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

**Цель работы** – анализ работы трехфазных трансформаторов с различными схемами соединения обмоток при несимметричной нагрузке.

### **Задачи работы:**

1. Исследовать влияние схемы соединения обмоток на работу трехфазных трансформаторов при несимметричной нагрузке.

2. Определить сопротивления нулевой последовательности и их влияние на искажение симметрии напряжений трехфазных трансформаторов со схемами соединения обмоток  $Y/Y_n$ ,  $\Delta/Y_n$ ,  $Y/Z_n$  при несимметричной нагрузке.

### **Общие сведения**

Если хотя бы один из фазных токов трансформатора  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  отличается от других – нагрузка несимметричная.

Для анализа несимметричных режимов используется метод симметричных составляющих. Согласно этому методу, несимметричная система токов раскладывается на три симметричные составляющие: прямой  $I_1$ , обратной  $I_2$  и нулевой  $I_0$  последовательностей:

$$\begin{aligned} I_{1a} &= \frac{1}{3} \left( \dot{I}_a + \alpha \dot{I}_b + \alpha^2 \dot{I}_c \right); \\ I_{2a} &= \frac{1}{3} \left( \dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_b + \alpha \dot{I}_c \right); \\ I_{0a} &= \frac{1}{3} \left( \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \right), \end{aligned} \quad (4.1)$$

где  $\alpha = e^{-j120^\circ}$  – оператор, по модулю равный единице и поворачивающий вектор на  $120^\circ$ .

Токи прямой последовательности выполняют полезную работу. Их векторы равны по модулю, угол между ними  $120^\circ$ . Они имеют прямой порядок чередования фаз: "a"  $\rightarrow$  "b"  $\rightarrow$  "c" (рис. 4.1, а).

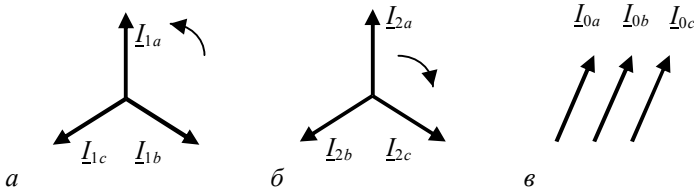


Рис. 4.1. Симметричные составляющие токов:  
 а – прямой последовательности; б – обратной последовательности;  
 в – нулевой последовательности

Токи обратной последовательности имеют обратный порядок чередования фаз "a"  $\rightarrow$  "c"  $\rightarrow$  "b" (рис. 4.1, б).

Векторы токов нулевой последовательности (рис. 4.1, в) равны по величине и совпадают по фазе.

В трансформаторе рабочий процесс и сопротивления обмоток не зависят от порядка чередования фаз, поэтому токи прямой и обратной последовательностей одинаково трансформируются из одной обмотки в другую, а магнитный поток прямой и обратной последовательностей уравновешен.

Влияние токов нулевой последовательности на работу трансформатора зависит от схемы соединения обмоток. Наиболее отрицательное воздействие токов нулевой последовательности на трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y<sub>H</sub>.

Предположим, что нагрузка трансформатора Y/Y<sub>H</sub> чисто активная и подключена только в фазе «а», а две другие фазы не загружены. Это крайний случай несимметричной нагрузки – неполнофазный режим. Тогда ток в фазе «а» равен  $I_a$ , а  $I_b = I_c = 0$ .

Несимметричный режим трансформатора Y/Y<sub>H</sub> можно описать по следующей схеме:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & I_1 & & & & \\
 & & \nearrow & & & & \\
 I_a \neq I_b \neq I_c & & I_0 & \longrightarrow \Phi_0 & \longrightarrow E_0 & \longrightarrow & U_a \neq U_b \neq U_c \\
 & & \longrightarrow & 2 & 3 & 4 & \\
 & & I_2 & & & & \\
 & & \searrow & & & & \\
 & & 1 & & & & 
 \end{array} \quad (4.2)$$

1. Несимметричные токи нагрузки, протекающие во вторичной обмотке, раскладывают на симметричные составляющие.

2. Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей наводят в магнитопроводе свои потоки. Потоки прямой и обратной последовательностей уравновешены аналогичными потоками, создаваемыми токами первичной обмотки.

3. Неуравновешенный поток нулевой последовательности наводит в обмотках ЭДС нулевой последовательности  $E_0$ .

4. Векторы ЭДС нулевой последовательности, одинаковые по величине и направлению, суммируясь с векторами фазных ЭДС, искажают фазные напряжения.

Покажем векторы токов нулевой последовательности  $I_0$  на вершинах треугольника линейных напряжений (рис. 4.2, а).

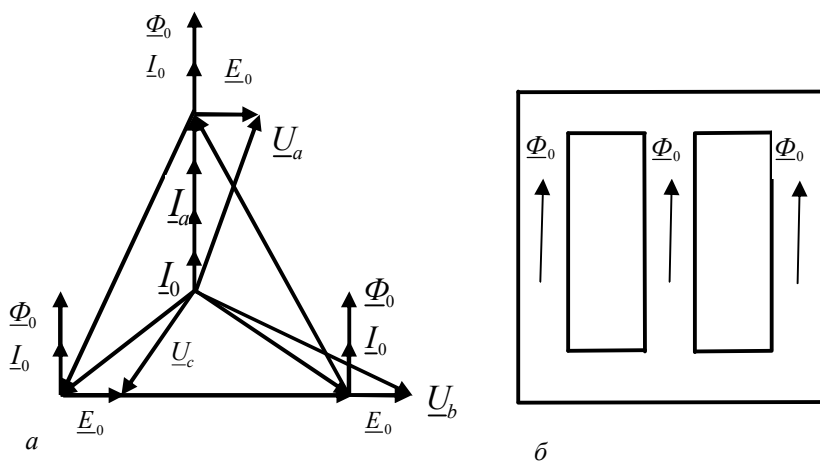
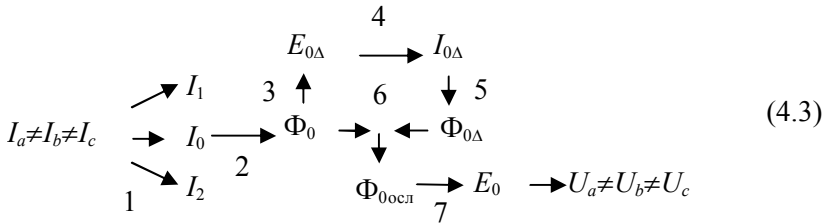


Рис. 4.2. Несимметричный режим работы трансформатора Y/Yn:  
а – векторная диаграмма; б – магнитопровод

По направлению они совпадают с вектором напряжения фазы «а». Векторы потоков нулевой последовательности  $\Phi_0$  по направлению совпадают с векторами токов, создавшими их. Векторы ЭДС нулевой последовательности  $E_0$  отстают от магнитных потоков на  $90^\circ$  и, суммируясь с фазными напряжениями, искажают их. В самом деле, была загружена фаза «а». Напряжение же на ней не снизилось, а, наоборот, повысилось. Напряжение фазы «в» увеличилось, а фазы «с» – уменьшилось (см. рис. 4.2, а).

Так как в стержнях магнитопровода потоки нулевой последовательности имеют одинаковое направление (рис. 4.2, б), они не могут замкнуться по нему. Вследствие этого магнитопровод трансформатора перегружен, что вызывает дополнительные потери  $\Delta P$ . Более того, указанные потоки замыкаются по баку трансформатора, что также вызывает дополнительные потери, которые зависят от степени несимметрии нагрузки.

Несимметричный режим трансформатора  $\Delta/Y_H$  можно описать по следующей схеме:



1–2 – Такие же, как в схеме 4.2.

3 – Поток нулевой последовательности наводит в первичной обмотке ЭДС  $E_{0\Delta}$ .

4 – Так как первичная обмотка замкнута в треугольник, а ЭДС  $E_{0\Delta}$  в фазах имеют одинаковые направления, то по обмоткам потечет ток  $I_{0\Delta}$ .

5 – Ток  $I_{0\Delta}$  создает свой магнитный поток  $\Phi_{0\Delta}$ .

6 – Магнитный поток  $\Phi_{0\Delta}$  направлен встречно потоку нулевой последовательности, который создан вторичной обмоткой  $\Phi_0$ . Суммируясь, потоки взаимно компенсируют друг друга. Но из-за потоков рассеяния компенсация неполная. Потоки нулевой последовательности компенсируются на 80 %–90 %.

7 – Ослабленный поток нулевой последовательности  $\Phi_{0осл}$  наводит  $E_0$ , и фазные напряжения незначительно искажаются.

Поэтому трансформатор  $\Delta/Y_H$  для работы в несимметричном режиме подходит лучше, чем трансформатор  $Y/Y_H$ .

У трансформатора  $Y/\Delta$  как в первичной, так и во вторичной обмотке нет нулевого провода, поэтому токов и потоков нулевой последовательности также нет.

У трансформатора  $Y/Z_N$  токи нулевой последовательности половин вторичных обмоток направлены встречно (рис. 4.3).

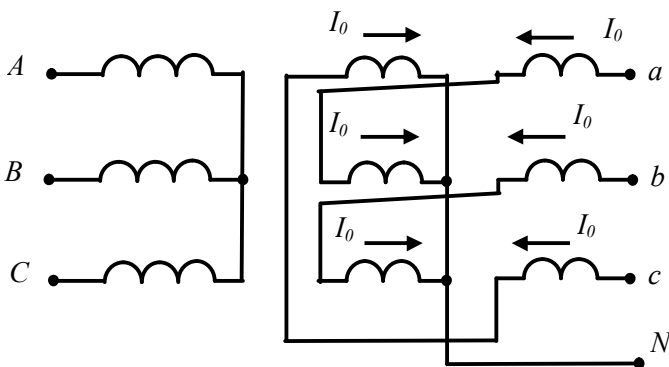


Рис. 4.3. Направление токов нулевой последовательности во вторичных обмотках трансформатора  $Y/Z_N$

Создаваемые ими магнитные потоки нулевой последовательности также направлены встречно и будут почти полностью компенсировать друг друга. Поэтому искажения вторичных напряжений будут наименьшие по сравнению с другими схемами. Для работы на несимметричную нагрузку трансформатор  $Y/Z_N$  наиболее целесообразен, поэтому широко используется за рубежом. В странах бывшего СССР он не нашел широкого применения вследствие высоких потерь короткого замыкания и более высокой стоимости.

В Белорусском государственном аграрном техническом университете были разработаны трансформаторы, которые имеют такие же потери короткого замыкания, как и трансформаторы  $Y/Y_N$ , но полностью компенсируют потоки нулевой последовательности. Они имеют компенсационные обмотки, включенные в цепь нулевого провода. Так как ток нулевого провода равен тройному току нулевой последовательности, число витков компенсационных обмоток равно  $1/3$  числа витков рабочей вторичной обмотки. На рис. 4.4, а показано, что компенсационная обмотка укладывается на каждый стержень, а на рис. 4.4, б – поверх рабочих обмоток всех трех стержней.

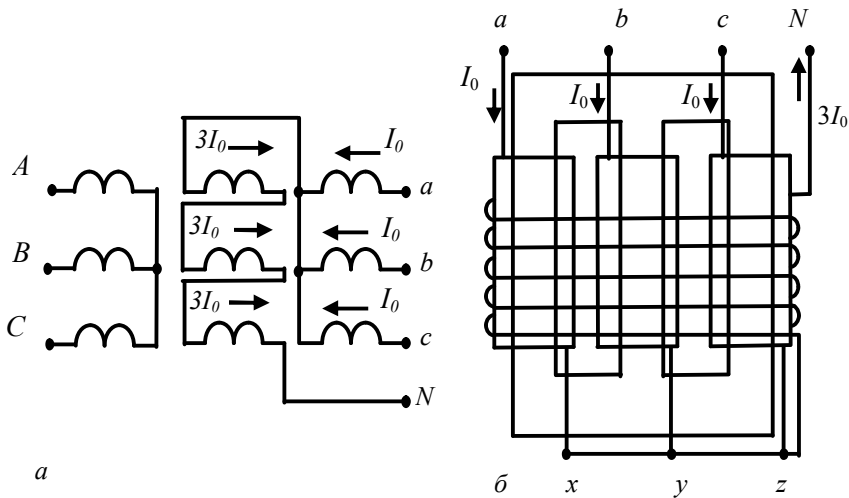


Рис. 4.4. Трансформаторы для работы в несимметричных режимах с компенсацией потоков нулевой последовательности

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, записать паспортные данные исследуемых трансформаторов.

2. Исследовать работу трехфазных трансформаторов со схемами соединения обмоток  $Y/Y_H$ ,  $\Delta/Y_H$ ,  $Y/Z_H$  при несимметричной нагрузке.

2.1. Для исследования несимметричного режима трансформатора  $Y/Y_H$  собрать схему (рис. 4.5).

Перед выполнением опыта нужно убедиться, что выключатели  $QS1$ ,  $QS4$  отключены, а напряжение на выходе автотрансформатора (ЛАТР 2) равно нулю (крайне левое положение ручки регулятора). Затем включают выключатели  $QS1$ ,  $QS4$  и, плавно увеличивая напряжение на выходе ЛАТР 2, нагружают одну фазу «с» трансформатора номинальным током, указанным на паспорте трансформатора. Измеряют линейные и фазные напряжения первичной стороны вольтметром  $PV2$  с переключателем  $SA5$ , а вторичной – вольтметром  $PV1$  с переключателем  $SA4$ . Измеряют токи с первичной и вторичной сторон. Данные опыта занести в табл. 4.1 (строка  $Y/Y_H$ ).

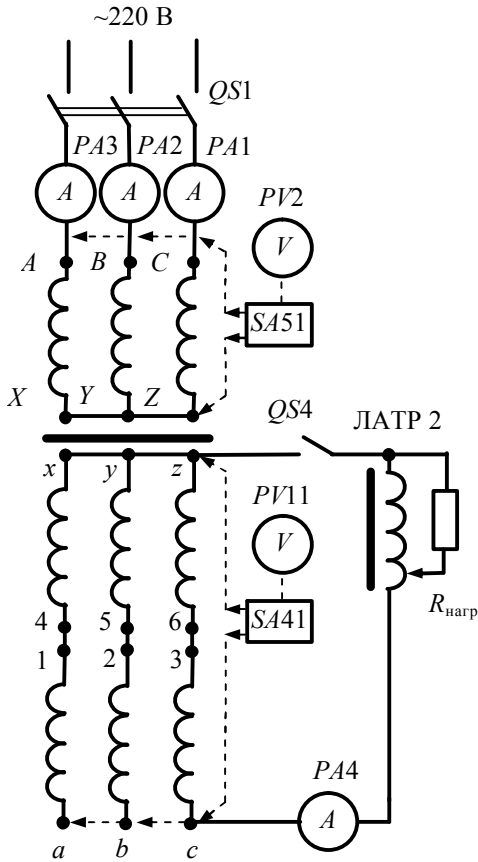


Рис. 4.5. Схема несимметричного режима работы трансформатора  $Y/Y_H$

Таблица 4.1

Несимметричная нагрузка трансформатора

Схемы	Первичная сторона								
	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$	$U_{AB}, B$	$U_{AC}, B$	$U_{BC}, B$	$U_A, B$	$U_B, B$	$U_C, B$
$Y/Y_H$									
$\Delta/Y_H$									
$\bar{Y}/Z_H$									

	Вторичная сторона						
	$I_c, A$	$U_{ab}, B$	$U_{ac}, B$	$U_{bc}, B$	$U_a, B$	$U_b, B$	$U_c, B$
$Y/Y_H$							
$\Delta/Y_H$							
$Y/Z_H$							

2.2. Для исследования несимметричного режима трансформатора  $\Delta/Y_H$  собрать схему (рис. 4.6).

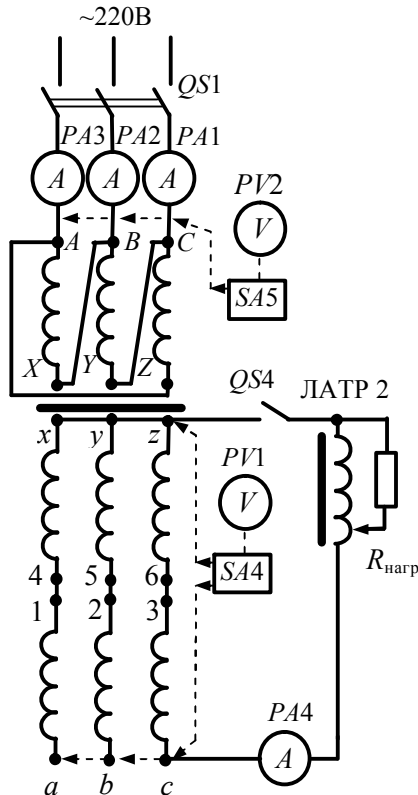


Рис. 4.6. Схема несимметричного режима работы трансформатора  $\Delta/Y_H$

При выполнении опыта вначале нужно убедиться, что выключатели  $QS1$ ,  $QS4$  отключены, а напряжение на выходе автотрансформатора

(ЛАТР 2) равно нулю (крайне левое положение ручки). Затем включают выключатели  $QS1$ ,  $QS4$  и, плавно увеличивая напряжение на выходе ЛАТР 2, нагружают одну фазу «с» трансформатора номинальным током. Измеряют напряжения и токи с первичной и вторичной сторон. Данные опыта занести в табл. 4.1 (строка  $\Delta/Y_H$ ).

2.3. Для исследования несимметричного режима трансформатора  $Y/Z_H$  собрать схему (рис. 4.7). При выполнении опыта вначале нужно убедиться, что выключатели  $QS1$ ,  $QS4$  отключены, а напряжение на выходе автотрансформатора (ЛАТР 2) равно нулю (крайне левое положение ручки). Затем включают выключатели  $QS1$ ,  $QS4$  и, плавно увеличивая напряжение на выходе ЛАТР 2, нагружают одну фазу «с» трансформатора номинальным током. Измеряют напряжения и токи с первичной и вторичной сторон. Данные опыта занести в табл. 4.1 (строка  $Y/Z_H$ ).

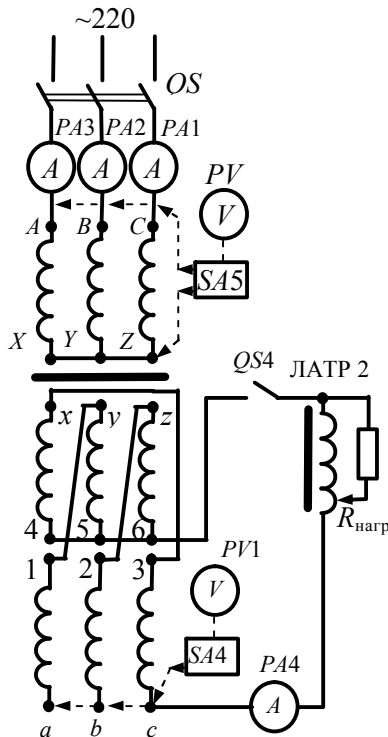


Рис. 4.7. Схема несимметричного режима работы трансформатора  $Y/Z_H$

По данным табл. 4.1 построить векторные диаграммы вторичных напряжений исследованных схем и определить смещение нулевой точки  $E_0$  (ЭДС нулевой последовательности), в вольтах. За точку отсчета смещения принимать центр тяжести треугольника линейных напряжений (точка пересечения медиан).

При построении использовать масштаб  $m_u = 1 \text{ В/мм}$ .

3. Определить сопротивления нулевой последовательности трехфазных трансформаторов со схемами соединения обмоток  $Y/Y_H$ ,  $\Delta/Y_H$ ,  $Y/Z_H$ .

3.1. Для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора  $Y/Y_H$  собрать схему (рис. 4.8).

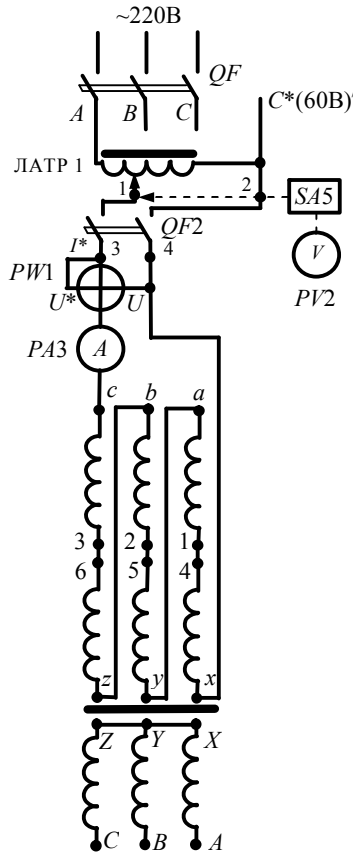


Рис. 4.8. Схема определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора  $Y/Y_H$

Перед проведением опыта необходимо убедиться, что выключатели  $QF1$ ,  $QF2$  отключены, а выход ЛАТР 1 установлен в минимальное положение. Включить выключатели  $QF1$ ,  $QF2$  и, плавно увеличивая напряжение ЛАТР 1, добиться условия, что по вторичной обмотке трансформатора протекает ток, равный  $\frac{1}{3}I_{2н}$  схемы  $Y/Y_H$ . Измерить необходимые параметры. Для измерения напряжения  $U_2$  с помощью  $PV2$  переключить  $S45$  в положение  $U_{12}$ . Данные опыта занести в табл. 4.2 (строка  $Y/Y_H$ ).

Таблица 4.2

Определение сопротивления нулевой последовательности

Схема	Опыт			Расчет			
	$I_2$ , А	$U_2$ , В	$P_2$ , Вт	$Z_0$ , Ом	$R_0$ , Ом	$X_0$ , Ом	$E_0$ , В
$Y/Y_H$							
$\Delta/Y_H$							
$Y/Z_H$							

3.2. Для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора  $\Delta/Y_H$  собрать схему (рис. 4.9).

Перед проведением опыта убедиться, что выключатели  $QF1$ ,  $QF2$  отключены, а выход ЛАТР1 установлен в минимальное положение.

Включить выключатели  $QF1$ ,  $QF2$  и, плавно увеличивая напряжение ЛАТР1, добиться условия, что по вторичной обмотке трансформатора протекает ток, равный  $\frac{1}{3}I_{2н}$  схемы  $\Delta/Y_H$ . Измерить

необходимые параметры. Напряжение  $U_2$  измеряется вольтметром  $PV3$  (кнопка  $SB$ ). Данные опыта занести в табл. 4.2 (строка  $\Delta/Y_H$ ).

3.3. Для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора  $Y/Z_H$  собрать схему (рис. 4.10).

Перед проведением опыта убедиться, что выключатели  $QF1$ ,  $QF2$  отключены, а выход ЛАТР1 установлен в минимальное положение.

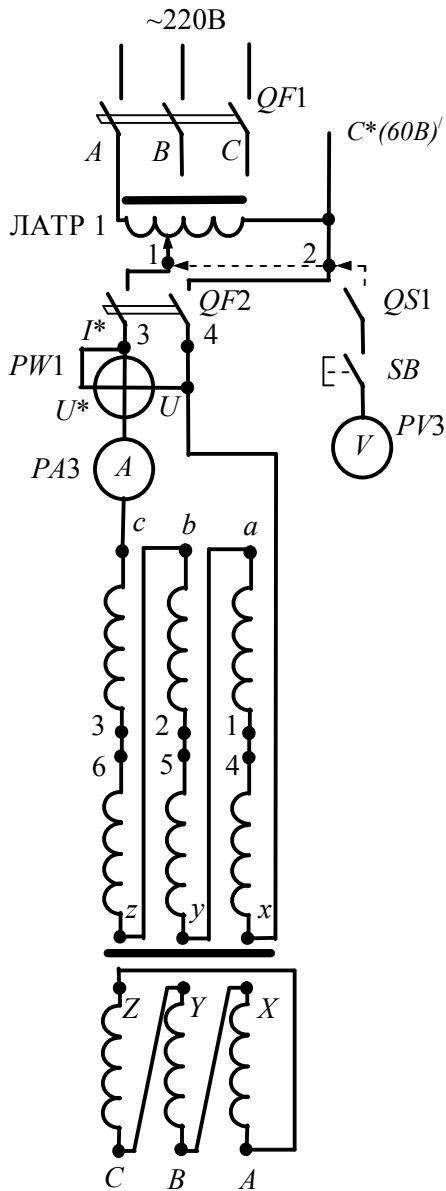


Рис. 4.9. Схема определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора  $\Delta/Y_H$

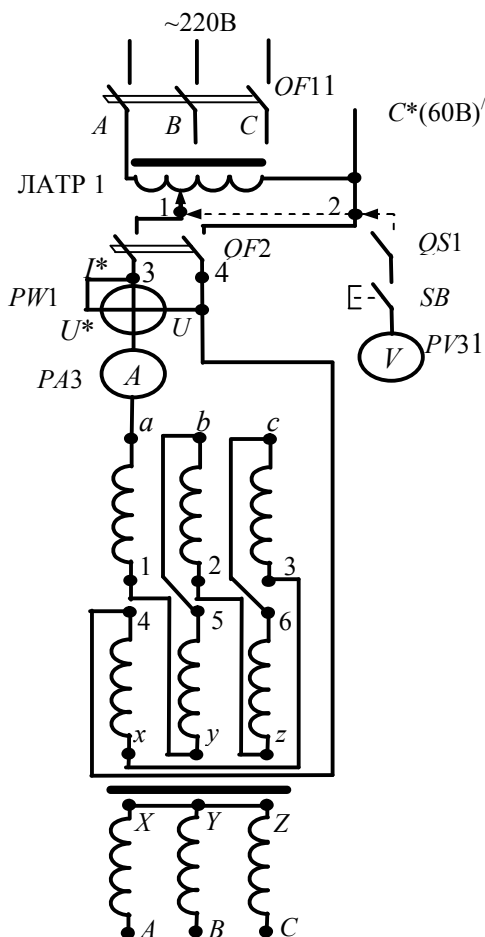


Рис. 4.10. Схема определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора  $Y/Z_H$

Включить выключатели  $QF1$ ,  $QF2$  и, плавно увеличивая напряжение ЛАТР1, добиться условия, что по вторичной обмотке трансформатора протекает ток, равный  $\frac{1}{3}I_{2H}$  схемы  $Y/Z_H$ . Измерить необходимые параметры. Напряжение  $U_2$  измеряется вольтметром  $PV3$  нажатием на кнопку  $SB$ . Данные опыта занести в табл. 4.2 (строка  $Y/Z_H$ ).

По данным табл. 4.2 рассчитать аналитически сопротивления и ЭДС нулевой последовательности, используя выражения:

$$Z_0 = \frac{U_2}{3I_2}; R_0 = \frac{P_2}{3I_2^2}; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; E_0 = \frac{1}{3}U_2 = I_2 \cdot Z_0. \quad (4.4)$$

Сравнить погрешность определения  $E_0$  графическим и опытным путем для трех схем.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики, векторные диаграммы напряжений;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. К чему приводит несимметричная нагрузка трансформатора? Почему?
2. Каким методом производится анализ несимметричных режимов работы трансформатора? В чем его сущность?
3. Какая из исследованных схем дает меньшее искажение фазных напряжений? Почему?
4. По какой схеме можно определить ЭДС нулевой последовательности трансформатора?
5. Почему параметры нулевой последовательности разные для различных схем соединения обмоток?
6. Объясните, по какому пути проходят потоки нулевой последовательности в трехстержневом трансформаторе?
7. Почему в схемах без выведенной нулевой точки на вторичной стороне потоки нулевой последовательности отсутствуют?
8. В чем преимущества и недостатки трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/Z_N$ ?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

**Цель работы** – изучение конструкции, принципа работы и характеристик генератора постоянного тока с независимым возбуждением.

### **Задачи работы:**

1. Изучить устройство и принцип действия генератора постоянного тока.
2. Изучить способы возбуждения машин постоянного тока.
3. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик генератора постоянного тока с независимым возбуждением.

### **Общие сведения**

Машины постоянного тока (МПТ) могут работать в двигательном и в генераторном режимах. Для машин постоянного тока, как и для других типов электрических машин, характерен принцип обратимости, согласно которому одна и та же электрическая машина может работать как генератором, так и двигателем.

Машина постоянного тока имеет неподвижную часть – статор и подвижную – якорь.

Статор является *индуктором* и включает в себя корпус 9, к корпусу крепятся полюсы 7, щеточный аппарат 4, подшипниковые щиты 2, 10 и лапы 12 для крепления машины к фундаменту (рис. 5.1). Для машин большой мощности устанавливаются отдельно стоящие подшипниковые щиты. В подшипниковых щитах установлены подшипники 13 для уменьшения трения при вращении ротора.

Корпус является частью магнитопровода (по нему идет магнитный поток). Так как магнитный поток постоянный, корпус изготавливается из цельнометаллической стальной трубы.

Полюсы состоят из сердечника и обмотки. Сердечники полюсов выполняются из изолированных пластин электротехнической стали. Полюсы делятся на главные и дополнительные. Главные полюсы

предназначены для создания основного магнитного потока и на них устанавливаются катушки обмотки возбуждения 8. Дополнительные полюсы предназначены для улучшения коммутации. На них размещается обмотка, которая включается последовательно и встречно с обмоткой якоря.

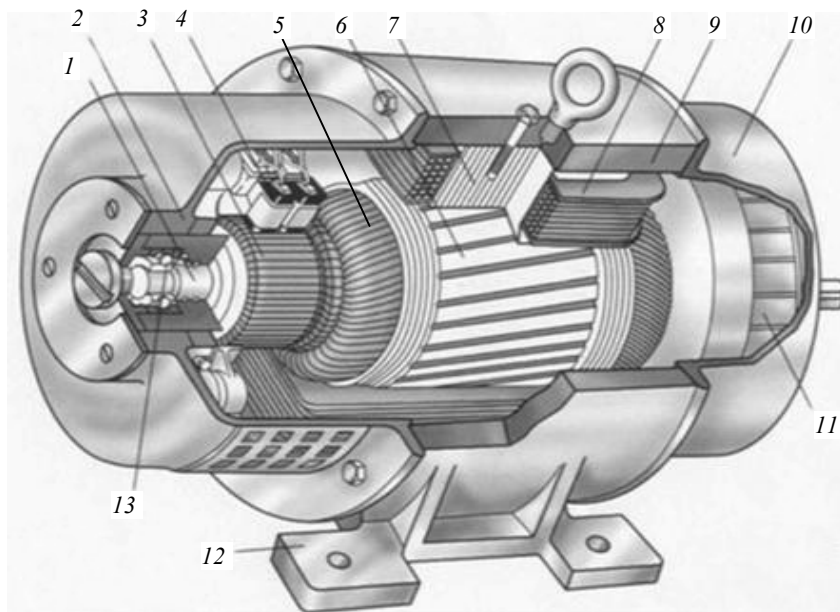


Рис. 5.1. Машина постоянного тока:

1 – вал; 2, 10 – подшипниковые щиты; 3 – коллектор; 4 – щеточный аппарат; 5 – обмотка якоря; 6 – сердечник якоря; 7 – полюс; 8 – обмотка возбуждения; 9 – корпус; 11 – вентилятор; 12 – лапы; 13 – подшипник

Ротор машины постоянного тока является *якорем* и состоит из вала 1, установленного в подшипниках, сердечника якоря 6, обмотки якоря 5 и коллектора 3. Сердечник якоря набирают из пластин электротехнической стали и напрессовывают на вал.

На внешней поверхности сердечника якоря выштампованы пазы, в которых укладывается обмотка якоря. Она состоит из отдельных секций и изготавливается из обмоточного провода. Концы каждой из секций электрически соединены с коллекторными пластинами, которые образуют коллектор.

Коллектор выполняют в виде цилиндра, собранного из клинообразных пластин твердотянутой меди, изолированных между собой и валом. Электрический контакт коллектора с внешней цепью осуществляется щетками, располагаемыми в щеткодержателях на поворотной траверсе. Щетки изготавливаются из материалов на основе графита. Плотный и надежный контакт между щеткой и коллектором осуществляется при помощи прижимных пружин. Давление на щетку должно быть отрегулировано, так как чрезмерный нажим может вызвать преждевременный износ щетки, а недостаточный – искрение на коллекторе.

Для охлаждения может использоваться вентилятор 11, который крепится на валу машины и закрывается кожухом 10.

Выводы обмоток идут в клеммную коробку, которая закреплена на корпусе. Для подъема машины используется рым-болт, вкрученный в верхнюю часть корпуса.

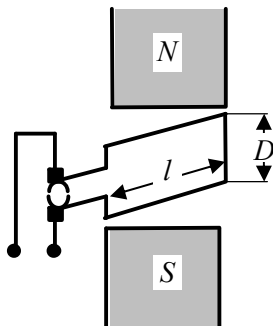


Рис. 5.2. Рамка в магнитном поле

Генератор постоянного тока преобразует механическую энергию в электрическую. Принцип его действия основан на явлении электромагнитной индукции.

Рассмотрим на примере простейшей машины. Возьмем два магнитных полюса  $N$  и  $S$  (рис. 5.2), между которыми равномерное магнитное поле с индукцией  $B$ . Поместим между полюсами рамку из проводникового материала длиной  $l$ , концы которой присоединены к полукольцам. Электрический контакт внешней сети с полукольцами

осуществляется щетками. Если рамку вращать с помощью внешнего приводного двигателя со скоростью  $v$ , то проводники рамки будут пересекать линии магнитного поля, и в них будет наводиться переменная ЭДС:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = Blv,$$

где  $\Phi$  – магнитный поток, проходящий через рамку, Вб;  
 $t$  – время, с.

Направление ЭДС определяется по правилу правой руки. С помощью неподвижных щеток и полуколец, которые являются простейшим электромеханическим выпрямителем, переменная ЭДС преобразуется в пульсирующую ЭДС постоянного направления. Если внешнюю цепь замкнуть, то под действием пульсирующей ЭДС будет протекать пульсирующий ток постоянного направления. В реальной машине для выпрямления ЭДС служат щетки и коллектор. Обмотка якоря состоит из большого количества витков, присоединенных к своим коллекторным пластинам и соединенных между собой параллельно и последовательно. Поэтому пульсации невелики, а ЭДС и ток на выходе машины являются практически постоянными. Магнитное поле в реальной машине создается обмоткой возбуждения или постоянными магнитами, расположенными на полюсах статора. При протекании тока по обмотке якоря, находящейся в магнитном поле, согласно закону Ампера возникает электромагнитная сила. Эта сила создает электромагнитный момент, который для генератора является тормозным – он направлен встречно внешнему вращающему моменту приводного двигателя и уравнивает его.

Для создания магнитного поля в машинах постоянного тока используется электромагнитная система возбуждения (обмотка возбуждения, расположенная на полюсах, по которой протекает постоянный ток). В машинах малой мощности может применяться магнитоэлектрическое возбуждение (постоянные магниты, расположенные на полюсах).

Варианты подключения обмотки возбуждения по отношению к обмотке якоря показаны на рис. 5.3. В табл. 5.1 приведены обозначения обмоток машин постоянного тока.

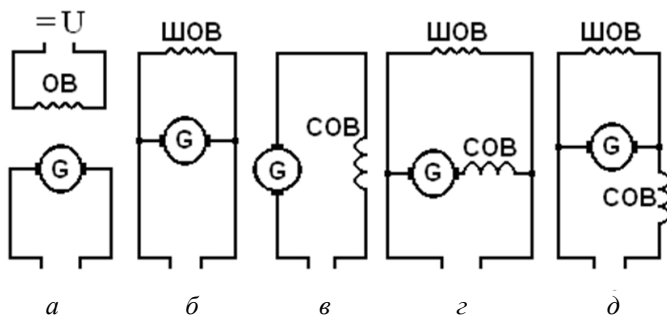


Рис. 5.3. Схемы возбуждения машины постоянного тока:  
*a* – независимое; *б* – параллельное; *в* – последовательное;  
*г* и *д* – смешанное;

обмотки возбуждения: ОВ – независимая обмотка возбуждения;  
 ШОВ – параллельная (шунтовая); СОВ – последовательная (серийная)

Таблица 5.1

Обозначение обмоток машин постоянного тока

Название	Обозначение	
	ГОСТ 183–74	ГОСТ 26772–85
Обмотка якоря	Я1-Я2	А1-А2
Обмотка независимого возбуждения	Ш1-Ш2	F1-F2
Обмотка параллельного возбуждения	Ш1-Ш2	E1-E2
Обмотка последовательного возбуждения	С1-С2	Д1-Д2
Компенсационная обмотка	К1-К2	С1-С2
Обмотка добавочных полюсов	Д1-Д2	В1-В2

Необходимое значение МДС можно получить, используя малое количество витков с большим током или большое количество витков с малым током:

$$F = I_{\text{в}} W_{\text{в}}, \quad (5.1)$$

где  $I_{\text{в}}$  – ток, проходящий по обмотке возбуждения, А;  
 $W_{\text{в}}$  – количество витков обмотки возбуждения.

Провод малого сечения проще уложить в катушки и легче выполнить контакты. Поэтому обмотки независимого и параллельного возбуждения имеют большое количество витков и малое сечение провода. По обмотке последовательного возбуждения протекает ток нагрузки, поэтому она имеет малое количество витков, выполненных проводом большого сечения.

У генератора с независимым возбуждением обмотка возбуждения подключена к независимому источнику напряжения (рис. 5.3, а).

Режимы работы генератора постоянного тока с независимым возбуждением могут быть описаны характеристиками холостого хода, внешней, регулировочной, нагрузочной и короткого замыкания.

**Характеристика холостого хода** (рис. 5.4) – это зависимость между напряжением генератора и током возбуждения, при токе якоря равном нулю и постоянной частоте вращения:  
 $U_r = f(I_b), I_a = 0, n = \text{const.}$

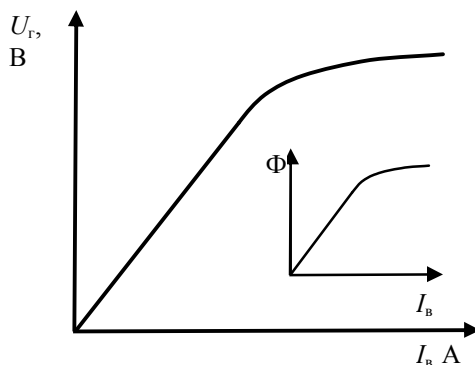


Рис. 5.4. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением

Характеристика холостого хода полностью повторяет магнитную характеристику машины постоянного тока. В режиме холостого хода:

$$U_r = E = C_e \Phi n. \quad (5.2)$$

Так как  $n = \text{const}$ , а  $C_e$  – постоянная величина, поэтому напряжение генератора в режиме холостого хода  $U_r$  пропорционально маг-

нитному потоку  $\Phi$ . Характеристика холостого хода имеет прямолинейный и криволинейный участки. Также как и у магнитной характеристики, перегиб характеристики холостого хода связан с насыщением магнитной системы.

**Внешняя характеристика** (рис. 5.5) – это зависимость напряжения генератора от тока якоря при неизменном токе возбуждения и постоянной частоте вращения:  $U_r = f(I_a), I_b = \text{const}, n = \text{const}$

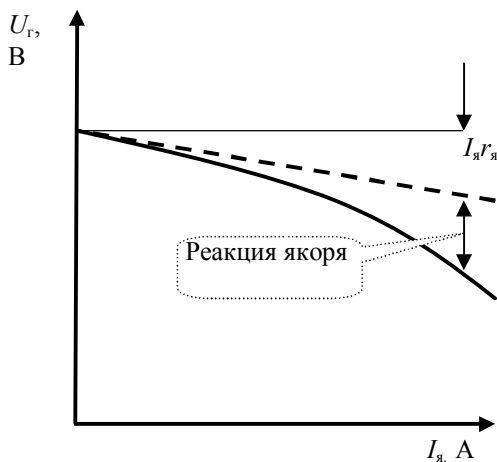


Рис. 5.5. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением

Для построения ее используем уравнение равновесия ЭДС генератора:

$$U_r = E - I_a r_a. \quad (5.3)$$

Если бы  $E = \text{const}$ , то характеристика представляла бы собой прямую линию: на напряжение влияло бы только падение напряжения в обмотке якоря  $I_a r_a$ . Но так как ЭДС зависит от магнитного потока, на который воздействует реакция якоря, характеристика теряет свою линейность.

**Регулировочная характеристика** (рис. 5.6) – это зависимость тока возбуждения от тока якоря при неизменном напряжении

генератора и постоянной частоте вращения:

$$I_b = f(I_a), U_r = \text{const}, n = \text{const}.$$

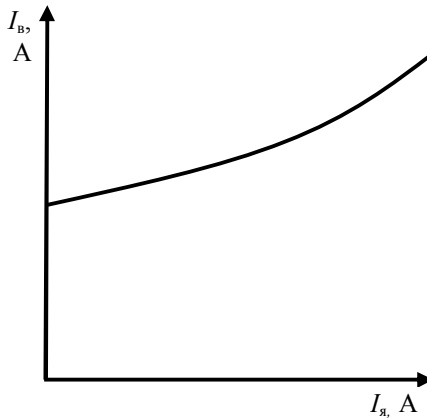


Рис. 5.6. Регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением

Регулировочная характеристика показывает, как следует регулировать ток возбуждения, чтобы напряжение генератора оставалось постоянным при изменении нагрузки. Чтобы выяснить характер кривой, необходимо рассматривать ее совместно с внешней характеристикой. С ростом нагрузки  $I_a$  напряжение  $U$  уменьшается. Чтобы поддерживать его постоянным, нужно увеличивать ЭДС. Магнитный поток, в свою очередь, зависит от тока обмотки возбуждения  $I_b$ , чем больше  $I_b$ , тем выше  $\Phi$ . Изменяя ток возбуждения, регулируем напряжение.

**Нагрузочная характеристика** (рис. 5.7) – это зависимость напряжения генератора от тока возбуждения при неизменном токе якоря, не равном нулю, и постоянной частоте вращения:

$$U_r = f(I_b), I_a \neq 0 = \text{const}, n = \text{const}.$$

Нагрузочная характеристика практически повторяет характеристику холостого хода, но идет ниже ее за счет падения напряжения на якоре  $I_a r_{я}$ , а также из-за реакции якоря. Характеристика имеет прямолинейный (ненасыщенный) и криволинейный (насыщенный) участки.

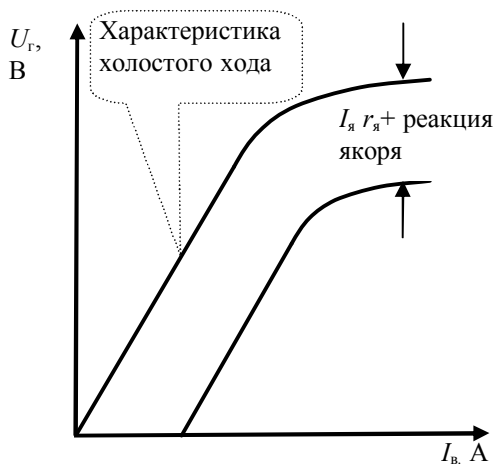


Рис. 5.7. Нагрузочная характеристика генератора с независимым возбуждением

**Характеристика короткого замыкания** (рис. 5.8) – это зависимость тока якоря от тока возбуждения, если сопротивление нагрузки генератора равно нулю и частота вращения постоянная:  $I_A = f(I_B)$ ,  $R_H = 0$ ,  $n = \text{const}$ .

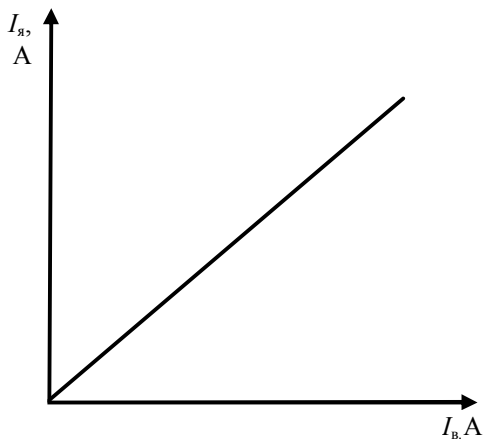


Рис. 5.8. Характеристика короткого замыкания генератора с независимым возбуждением

В опыте короткого замыкания сопротивление нагрузки равно нулю:  $R_n = 0$ , а ток якоря

$$I_{\text{я}} = U_{\text{г}} / r_{\text{я}} \quad (5.4)$$

и не должен превышать номинальное значение. Поэтому опыт короткого замыкания проводится при пониженном напряжении в пределах прямолинейного участка характеристики холостого хода, следовательно, характеристика короткого замыкания также прямолинейна.

Основной недостаток генератора с независимым возбуждением – необходимость в источнике напряжения для питания обмотки возбуждения.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия исследуемой машины по имеющимся в лаборатории образцам, плакатам. Записать ее паспортные данные .

2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 5.9).

3. Снять характеристики генератора.

Замеры производить:

– напряжение генератора  $U$  – вольтметром  $PV1$ ;

– ток якоря (нагрузки)  $I$  – амперметром  $PA1$ ;

– ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  – миллиамперметром  $PA2$ .

Регулировать:

– ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  – реостатом;

– ток якоря  $I_{\text{я}}$  – включением нагрузки выключателями  $QS2...QS6$ .

3.1. Характеристика холостого хода  $U_{\text{г}} = f(I_{\text{в}})$ ,  $I_{\text{я}} = 0$ ,  $n = \text{const}$ .

Привести генератор  $G$  во вращение двигателем  $M$ , включив автоматический выключатель  $QF1$ . Первая точка снимается при отключенном рубильнике  $QF2$  ( $I_{\text{в}} = 0$ ). Затем подать напряжение на обмотку возбуждения  $F1-F2$ , включив автоматический выключатель  $QF2$ , и, увеличивая ток возбуждения, снять точки характеристики холостого хода до  $U = 1,2U_{\text{н}}$ . Количество точек измерения – не менее пяти. Данные занести в табл. 5.2.

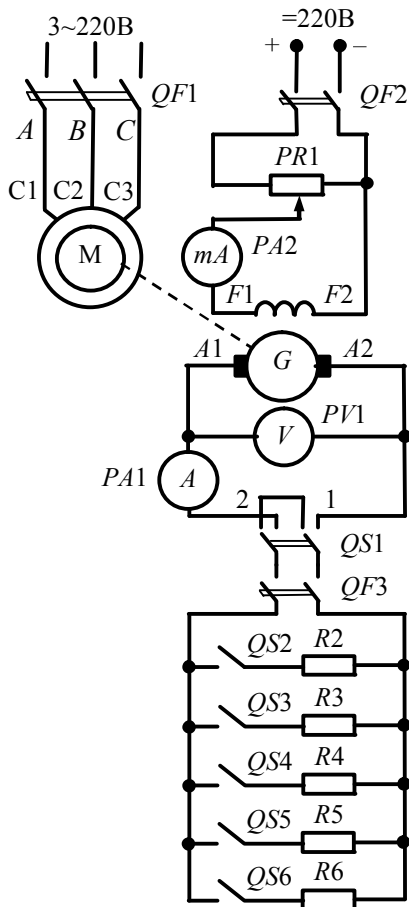


Рис. 5.9. Принципиальная электрическая схема испытания генератора постоянного тока с независимым возбуждением

Таблица 5.2

Данные для построения характеристики холостого хода

$I_B, A$	$U_G, B$

Построить по данным табл. 5.2 характеристику холостого хода и сравнить ее с теоретической. Сделать выводы.

3.2. Внешняя характеристика  $U_r = f(I_{\text{я}})$ ,  $I_{\text{в}} = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ .

При холостом ходе (нагрузка не включена) реостатом *PR1* установить номинальное напряжение 200 В и занести полученные данные в табл. 5.3. В дальнейшем, не изменяя ток возбуждения, нагрузить генератор, поочередно включая выключатели *QS2...QS6* до номинального тока, получая остальные точки внешней характеристики.

Таблица 5.3

Данные для построения внешней характеристики

$U_r$ , В	$I_{\text{я}}$ , А	$I_{\text{в}}$ , А

По данным опыта построить внешнюю характеристику генератора, сравнить с теоретической характеристикой и сделать выводы.

3.3. Регулировочная характеристика  $I_{\text{в}} = f(I_{\text{я}})$ ,  $U_r = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ .

В режиме холостого хода установить напряжение 200 В. Далее, постепенно нагружая генератор (включая *QS2...QS6*) до номинальной нагрузки, изменить сопротивление реостата *PR1*, чтобы напряжение оставалось неизменным – 200 В. Данные измерений занести в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Данные для построения регулировочной характеристики

$U_r$ , В	$I_{\text{я}}$ , А	$I_{\text{в}}$ , А

По данным табл. 5.4 построить регулировочную характеристику, сравнить ее с теоретической характеристикой и сделать выводы.

3.4. Характеристика короткого замыкания  $I_{\text{я}} = f(I_{\text{в}})$ ,  $R_{\text{н}} = 0$ ,  $n = \text{const}$ .

Для проведения опыта необходимо напряжение на выходе генератора установить равным нулю ( $I_{\text{в}} = 0$ ) и переключатель установить *QS1* в положение «2». В дальнейшем, увеличивая ток возбуждения, снять остальные точки характеристики. Первая точка

снимается при  $I_B = 0$ , последняя – при  $I_K = 1,2I_n$ , где  $I_n$  – номинальный ток генератора. Данные опыта занести в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Данные для построения характеристики короткого замыкания

$I_A$ , А	$I_B$ , А

По данным табл. 5.5 построить характеристику короткого замыкания, сравнить ее с теоретической характеристикой короткого замыкания и сделать выводы.

3.5. Нагрузочная характеристика  $U_r = f(I_B)$ ,  $I_A \neq 0 = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ .

Для снятия нагрузочной характеристики приводят генератор во вращение и устанавливают нагрузку  $0,5 I_n$ , включив  $QS2...QS6$ . Последующие точки получают включением выключателей  $QS4$ ,  $QS5$ ,  $QS6$ , уменьшая при этом ток возбуждения, чтобы ток нагрузки был неизменным –  $0,5 I_n$ . Данные опыта занести в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Данные для построения нагрузочной характеристики

$U_r$ , В	$I_B$ , А

По данным табл. 5.6 построить нагрузочную характеристику генератора, сравнить ее с теоретической характеристикой и сделать выводы.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:  
– название опыта;

- таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите элементы конструкции генератора и материалы, используемые для их изготовления.
2. Назовите параметры генератора постоянного тока с независимым возбуждением и его характеристики.
3. Нарисуйте электрическую схему генератора постоянного тока независимого возбуждения с регулировочным и нагрузочным реостатами, а также приборами для измерения его параметров.
4. Поясните порядок экспериментального снятия каждой характеристики генератора, умейте нарисовать их и объяснить характер кривых.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

**Цель работы** – изучение характеристик генератора постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением.

### **Задачи работы:**

1. Изучить процесс самовозбуждения генератора постоянного тока.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик генератора постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением.

### **Общие сведения**

Схема генераторов с параллельным и смешанным возбуждением приведена на рис. 5.3 (см.  $b$ ,  $z$ ,  $d$ ). Обмотка возбуждения получает питание от якоря самого генератора, имеет место самовозбуждение генератора. Для самовозбуждения генератора необходимы три условия:

1. Наличие остаточного магнитного потока.
2. Совпадение по направлению потока обмотки возбуждения и остаточного магнитного потока.
3. Сопротивление цепи  $R_{я-в}$ , по которой замыкается ток возбуждения (якорь–обмотка возбуждения), не должно быть большим.

Процесс самовозбуждения поясняет рис. 6.1. При вращении якоря генератора остаточный магнитный поток вызывает остаточное напряжение  $U_{ост}$ . В свою очередь,  $U_{ост}$ , приложенное к обмотке возбуждения, вызывает ток возбуждения  $I_{в. ост}$ , который наводит магнитный поток.

Если магнитный поток, наведенный током возбуждения, совпадает с остаточным, потоки суммируются и вызывают в обмотке якоря напряжение  $U_1$ , которое будет больше  $U_{ост}$ . Большее напряжение вызовет больший ток возбуждения и, следовательно, еще больший поток и напряжение.

Происходит лавинообразный процесс, в результате которого напряжение генератора повысится до напряжения холостого хода  $U_{ГХ}$ , определяемого точкой пересечения характеристики холостого хода и линии  $I$ , выражающей зависимость тока возбуждения от приложенного к обмотке возбуждения напряжения.

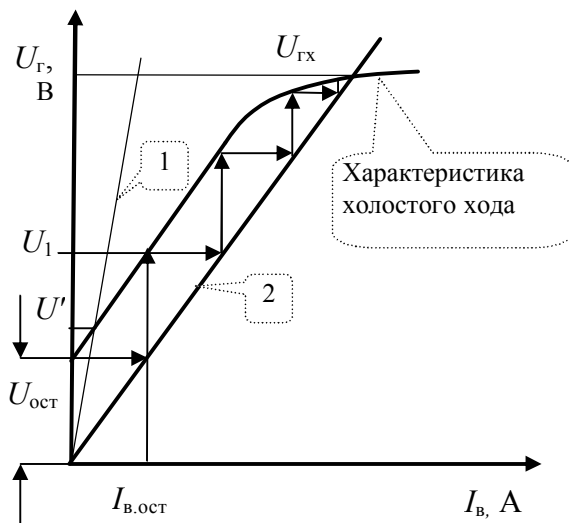


Рис. 6.1. Процесс самовозбуждения генератора:  
 1, 2 – зависимости тока возбуждения  
 от приложенного к обмотке возбуждения напряжения  
 (2 – при нормальном и 1 – повышенном сопротивлении цепи)

Наклон линии  $I$  на графике зависит от сопротивления цепи «якорь–обмотка возбуждения»  $R_{я-в}$ :

$$I_{в} = U_{Г} / R_{я-в} .$$

При большом сопротивлении  $R_{я-в}$  зависимость будет ближе к оси ординат (линия 2), и генератор не возбудится или возбудится до напряжения  $U'$ , которое мало.

**Характеристика холостого хода** показана на рис. 6.1. Ее отличие от аналогичной характеристики генератора с независимым возбуждением – в обязательном наличии остаточного напряжения, т. е. она должна начинаться не с нуля. В остальном они одинаковы: имеют прямолинейный участок и область насыщения – криволинейный участок (см. лабораторную работу № 5).

**Нагрузочная характеристика** также аналогична характеристике генератора с независимым возбуждением (рис. 6.2), только идет ниже ее, потому что на нее влияет также снижение напряжения

генератора, от которого зависит ток возбуждения. (Характеристики генератора с независимым возбуждением, приведенные для сравнения, показаны на рисунках штриховой линией).

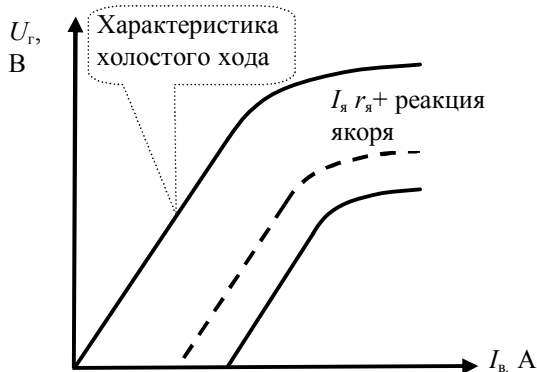


Рис. 6.2. Нагрузочная характеристика генератора с параллельным возбуждением

**Внешняя характеристика** генератора с параллельным возбуждением показана на рис. 6.3. На этом же рисунке показана внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением. Их отличие объясняется тем, что у генератора с параллельным возбуждением на величину напряжения влияют три фактора:

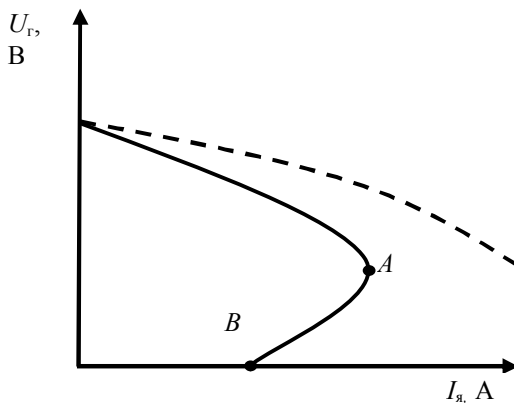


Рис. 6.3. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением

- 1) падение напряжения на якоре  $I_{я}r_{я}$ ;
- 2) реакция якоря;
- 3) уменьшение тока возбуждения при снижении напряжения.

У генератора с независимым возбуждением на напряжение влияют только первых два фактора.

Если нагрузка генератора увеличится до критической (рис. 6.3, точка *A*), происходит лавинообразное снижение напряжения до нуля (точка *B*).

**Регулировочная характеристика.** Так как внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением идет ниже, чем у генератора с независимым возбуждением, регулировочная характеристика пойдет выше (рис. 6.4).

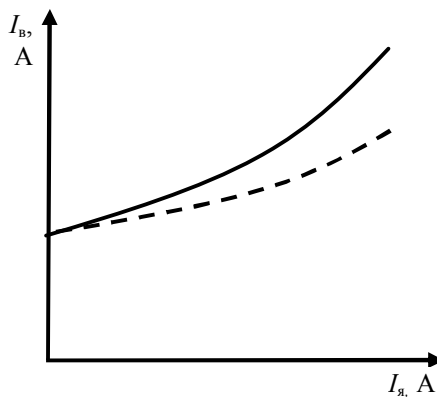


Рис. 6.4. Регулировочная характеристика генератора с параллельным возбуждением

**Характеристики короткого замыкания** у генератора параллельного возбуждения нет, потому что генератор не возбуждается при замкнутой накоротко обмотке якоря.

Генераторы параллельного возбуждения находят широкое применение, так как не требуют дополнительного источника постоянного напряжения для возбуждения.

У генератора со смешанным возбуждением обмотка параллельного возбуждения ШОВ (шунтовая ОВ) создает основной магнитный поток, последовательного (СОВ – серийная обмотка возбуждения) – дополнительный поток, который зависит от нагрузки.

Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением показана на рис. 6.5.

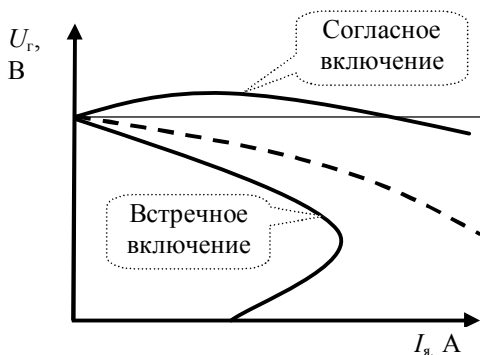


Рис. 6.5. Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением

Последовательная обмотка обычно включается согласно параллельной, чтобы их магнитные потоки совпадали. В этом случае магнитный поток последовательной обмотки компенсирует поток реакции якоря, обеспечивая жесткую внешнюю характеристику. Для сравнения: на рис. 6.5 штриховой линией приведена внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением.

При встречном включении обмоток напряжение генератора резко уменьшается, т. к. поток последовательной обмотки направлен против основного магнитного потока. Встречное включение обмоток можно использовать в специальных генераторах (сварочных), где используется мягкая внешняя характеристика.

Характеристика холостого хода такая же, как и генератора с параллельным возбуждением. Характеристики короткого замыкания нет. Нагрузочная и регулировочная характеристики при согласном включении обмоток идут ниже, чем у генератора с параллельным возбуждением, что связано с компенсацией реакции якоря обмоткой последовательного возбуждения.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия исследуемой машины по имеющимся в лаборатории образцам, плакатам. Записать ее паспортные данные.

Изучить условия и процесс самовозбуждения генератора постоянного тока.

2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 6.6).

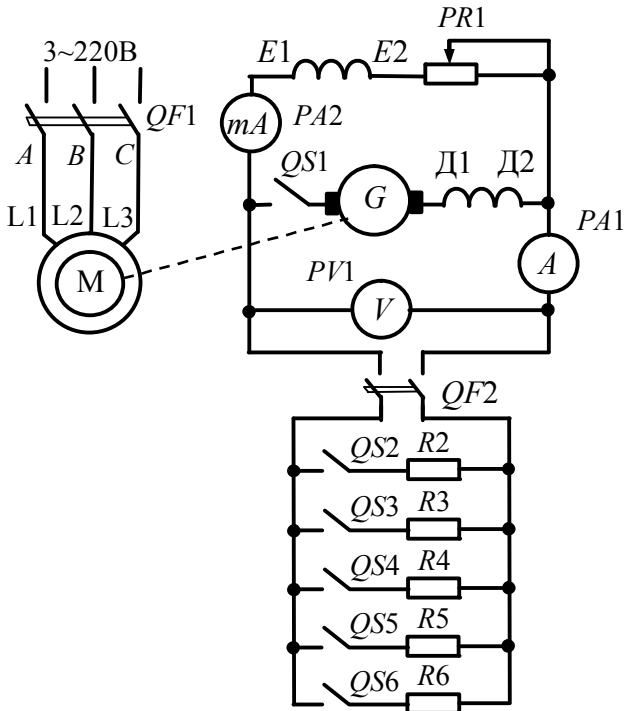


Рис. 6.6. Схема испытания генератора смешанного и параллельного возбуждения

3. Снять характеристики генератора.

Замеры производить:

– напряжение генератора  $U$  – вольтметром  $PV1$ ;

– ток якоря (нагрузки)  $I_{\text{я}}$  – амперметром  $PA1$ ;

– ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  – миллиамперметром  $PA2$ .

Регулировать:

– ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  – реостатом  $PR1$ ;

– ток якоря  $I_{\text{я}}$  – включением нагрузки выключателями  $QS2 \dots QS6$ .

3.1. Характеристика холостого хода  $U_{\Gamma} = f(I_{\text{в}})$ ,  $I_{\text{я}} = 0$ ,  $n = \text{const}$ .

Привести якорь генератора  $G$  во вращение двигателем  $M$ , включив выключатель  $QF1$ . Проверить соответствие направления вращения якоря генератора (стрелка на станине генератора). Если направление вращения не соответствует, измените на двигателе  $M$  порядок чередования фаз питающего напряжения, изменяя сопротивление реостата  $PR1$ , возбудите генератор. При проведении опыта автоматический выключатель  $QF2$  отключен.

Первую точку характеристики холостого хода снять при отключенном выключателе  $QF2$ , чтобы зафиксировать напряжение, обусловленное остаточным магнетизмом главных полюсов машины. Последующие точки снимаются путем замыкания выключателя  $QF2$  и увеличения тока в обмотке возбуждения до получения напряжения  $U = 1,2U_H$  (4–6 точек). Данные занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Данные для построения характеристики холостого хода

$U, В$						240
$I_B, А$	0					

По данным табл. 6.1 построить характеристику холостого хода генератора  $U_r = f(I_B)$ , сравнить построенную кривую с теоретической характеристикой и сделать выводы.

3.2. Внешняя характеристика  $U_r = f(I_A)$ ,  $I_B = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ .

Якорь генератора смешанного возбуждения привести во вращение двигателем  $M$  и так же, как и в предыдущем опыте, возбудить генератор до напряжения 200 В. Затем, включив автоматический выключатель  $QF2$ , постепенно нагрузить генератор до тока, близкого к номинальному, используя сопротивления  $R2...R6$ , включив, соответственно, выключатели  $QS2...QS6$ . Записать первую точку характеристики в табл. 6.2 (для смешанного возбуждения).

Для всех следующих точек ток возбуждения не менять, а нагрузку уменьшать до нуля.

Затем изменить принципиальную схему, исключив последовательную обмотку возбуждения. Снять аналогично внешнюю характеристику для параллельного возбуждения. Данные занести в табл. 6.2 (для параллельного возбуждения).

Таблица 6.2

Данные для построения внешней характеристики

Параллельное возбуждение		Смешанное возбуждение	
$U, В$	$I, А$	$U, В$	$I, А$
200	0	200	0

По данным табл. 6.2 построить на одном графике внешние характеристики для параллельного и смешанного возбуждения генератора.

3.3. Регулировочная характеристика  $I_b = f(I_a), U_r = \text{const}, n = \text{const}$ .

В режиме холостого хода для генератора с параллельным возбуждением установить номинальное напряжение 200 В и данные занести в табл. 6.3 (графа «Параллельное возбуждение»).

Далее, включив автоматический выключатель  $QF2$  и оставляя для всех последующих точек неизменным напряжение генератора 200 В, довести нагрузку выключателями  $QS2...QS6$  до значений, не превышающих ток  $1,2 I_H$ . Данные занести в табл. 6.3 (графа «Параллельное возбуждение»).

После проверки полученных данных аналогично снять регулировочную характеристику для генератора со смешанным возбуждением. Данные занести в табл. 6.3 (графа «Смешанное возбуждение»).

Таблица 6.3

Данные для построения регулировочной характеристики

Параллельное возбуждение		Смешанное возбуждение	
$I_b, А$	$I, А$	$I_b, А I_b$	$I, А$
	0		0

По данным опыта на одном графике построить регулировочные характеристики.

3.4. Нагрузочная характеристика  $U_r = f(I_b), I_a \neq 0 = \text{const}, n = \text{const}$ .

Для снятия нагрузочной характеристики собрать схему генератора с параллельным возбуждением, привести якорь генератора

во вращение, возбудить генератор до номинального напряжения и выключателями  $QS2\dots QS3$  установить нагрузку  $0,5 I_n$ . Это – первая точка характеристики. Последующие точки характеристики получают путем уменьшения тока возбуждения, но при этом сохраняя ток нагрузки равным  $0,5 I_n$ . Данные занести в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Данные для построения нагрузочной характеристики

$U, В$	$I, А$

По данным опыта построить нагрузочную характеристику генератора.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. Назовите паспортные данные исследуемой машины.
2. Нарисуйте принципиальную схему генератора смешанного и параллельного возбуждения.
3. Объясните принцип самовозбуждения генератора.
4. Какую роль выполняет последовательная обмотка возбуждения?
5. Назовите элементы магнитной цепи машины.
6. Поясните методику проведения опытов для получения каждой характеристики генератора, нарисуйте их и объясните характер кривой.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

**Цель работы** – изучить конструкцию, принцип работы и характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

### **Задачи работы:**

1. Изучить устройство и принцип работы двигателя постоянного тока.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятия характеристик двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

### **Общие сведения**

Электродвигатели постоянного тока позволяют в широких пределах регулировать частоту вращения, развивают большие пусковые моменты, имеют значительную перегрузочную способность. Они применяются в регулируемых электроприводах и рассчитаны на питание от полупроводниковых преобразователей. Двигатели постоянного тока применяют для привода различных механизмов в черной металлургии (прокатные станы, роликовые транспортеры), на транспорте (электровозы, тепловозы, электрокары и т. д.), в грузоподъемных и землеройных устройствах (краны, шахтные подъемники, экскаваторы), на морских и речных судах и в других приводах мощностью до нескольких тысяч киловатт. Двигатели небольшой мощности применяют в системах автоматики.

Устройство двигателя постоянного тока аналогично устройству генератора и приведено в лабораторной работе № 5.

При работе в режиме двигателя машина развивает электромагнитный вращающий момент и преобразовывает подводимую к ней электрическую мощность в механическую.

Принцип действия двигателя постоянного тока рассмотрим на простейшей модели. Для того, чтобы машина работала в качестве *двигателя*, необходимо к щеткам на рис. 5.2 подвести постоянное напряжение. Под действием напряжения через щетки, пластины коллектора и витки обмотки якоря потечет ток  $I$ . Коллектор в режиме

двигателя выполняет функцию механического инвертора, т.е. преобразует постоянный ток во внешней цепи в переменный ток в витках обмотки якоря. При взаимодействии тока якоря с магнитным полем двигателя возникает электромагнитная сила:

$$f = BI. \quad (7.1)$$

Эта сила создаст электромагнитный вращающий момент. Направление вращения (вектор приложения силы  $f$ ) определится по правилу левой руки. Чтобы изменить направление силы, необходимо изменить или направление тока в рамке, или направление магнитного потока. Для этого необходимо изменить полярность одной из обмоток: обмотки возбуждения или обмотки якоря.

Схема двигателя параллельного возбуждения приведена на рис. 7.1.

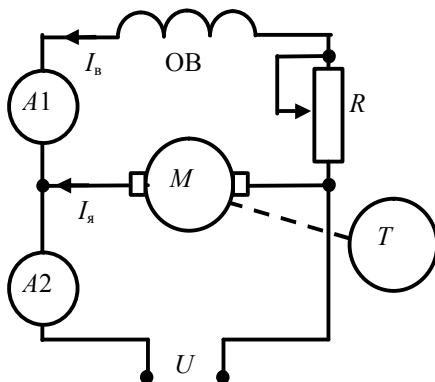


Рис. 7.1. Схема двигателя параллельного возбуждения

Двигатели постоянного тока имеют следующие характеристики: моментную, скоростную (электромеханическую), механическую, рабочие.

Все характеристики, построенные без дополнительных сопротивлений в цепях двигателя, называются естественными, а остальные – искусственными.

**Моментная характеристика** – зависимость момента на валу двигателя от тока якоря  $M = f(I_A)$ , при постоянном напряжении сети  $U = \text{const}$ .

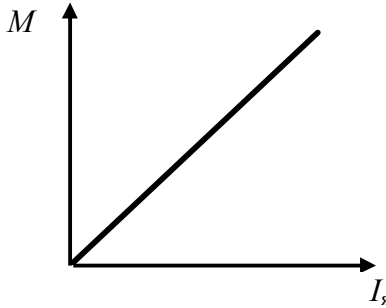


Рис. 7.2. Моментная характеристика двигателя параллельного возбуждения

Момент на валу двигателя

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}}, \quad (7.2)$$

где  $C_M$  – постоянная машины при определении момента.

Так как магнитный поток постоянный, не зависит от нагрузки, то зависимость момента от тока якоря линейная, и моментная характеристика является прямой линией (рис. 7.2).

**Скоростная (электромеханическая) характеристика** – зависимость частоты вращения якоря двигателя от тока якоря  $n = f(I_{\text{я}})$ , при  $U = \text{const}$ .

Для вывода уравнения скоростной характеристики в формулу равновесия напряжения двигателя  $U = E + I_{\text{я}} r_{\text{я}}$  подставим выражение ЭДС  $E = C_e \Phi n$ . Откуда

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{C_e \Phi}. \quad (7.3)$$

Скоростная характеристика приведена на рис. 7.3. На ней  $n_x$  – частота вращения в режиме холостого хода (если  $I_{\text{я}} = 0$ ):

$$n_x = \frac{U}{C_e \Phi}. \quad (7.4)$$

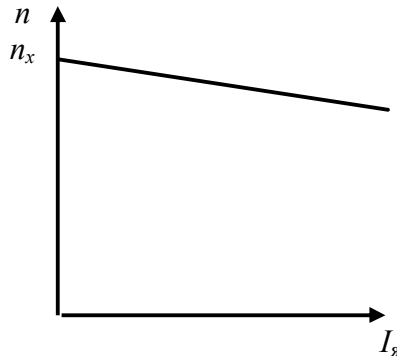


Рис. 7.3. Скоростная характеристика двигателя параллельного возбуждения

При обрыве цепи обмотки возбуждения, когда ток возбуждения равен нулю, магнитный поток равен остаточному, частота вращения резко увеличивается. Это может привести к аварии.

Следует также обратить внимание, что скоростная характеристика двигателя с параллельным возбуждением жесткая: при значительном изменении тока якоря частота вращения меняется незначительно.

**Механическая характеристика** – зависимость частоты вращения якоря от момента на валу двигателя,  $n = f(M)$ , при  $U = \text{const}$ .

Для вывода уравнения механической характеристики выразим ток якоря из формулы момента (7.2):

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{C_{\text{м}} \Phi} \quad (7.5)$$

и подставим его в уравнение (7.3). Получим выражение для механической характеристики:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{Mr_{\text{я}}}{C_e C_{\text{м}} \Phi}. \quad (7.6)$$

Так же, как и скоростная характеристика, она линейна (рис. 7.4).

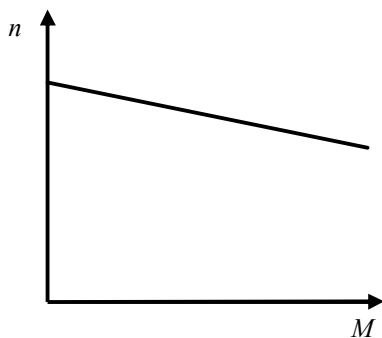


Рис. 7.4. Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения

**Рабочие характеристики** (рис. 7.5) – это зависимости момента на валу  $M$ , частоты вращения якоря  $n$ , тока якоря  $I_{я}$ , подводимой мощности  $P_1$ , и КПД  $\eta$  от полезной мощности двигателя  $P_2$ ,  $M$ ,  $n$ ,  $I_{я}$ ,  $n = f(P_2)$ , при  $U = \text{const}$ .

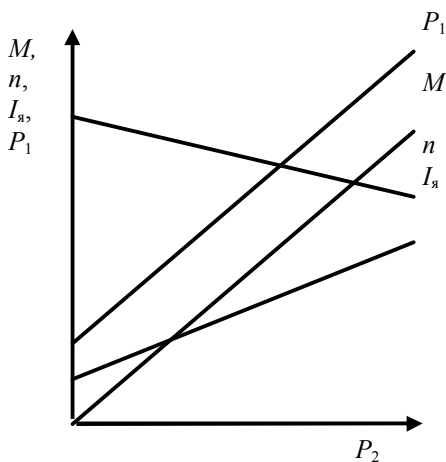


Рис. 7.5. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Характеристика  $I_{я} = f(P_2)$ . Как известно, мощность на валу равна

$$P_2 = UI_{я}\eta.$$

Поэтому ток якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{P_2}{U\eta}. \quad (7.7)$$

При  $P_2 = 0$  ток якоря равен току холостого хода  $I_x$ . При изменении  $P_2$  от  $0,25 P_n$  до  $1,25 P_n$  КПД практически не изменяется, и при построении характеристик можно допустить, что  $\eta = \text{const}$ . Тогда при  $U = \text{const}$  характеристика  $I_{\text{я}} = f(P_2)$  близка к линейной.

*Характеристика  $n = f(P_2)$ .* Если выражение (7.7) подставим в формулу (7.3), получим

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{P_2 r_{\text{я}}}{\eta U C_e \Phi}. \quad (7.8)$$

Из уравнения видно, что рабочая характеристика  $n = f(P_2)$  аналогична скоростной и механическим характеристикам.

*Характеристика  $M = f(P_2)$*  объясняется следующей формулой:

$$M = 9550 (P_2 / n). \quad (7.9)$$

Так как с ростом  $P_2$  частота вращения  $n$  уменьшается, а  $P_2$  прямо пропорционально  $I_{\text{я}}$ , характеристика  $M = f(P_2)$  будет иметь больший наклон, чем зависимость  $I_{\text{я}} = f(P_2)$ , и будет начинаться с нуля.

*Характеристика  $P_1 = f(P_2)$ .* Подведенная мощность к двигателю больше мощности на валу на величину потерь  $\Delta P$ :

$$P_1 = P_2 + \Delta P. \quad (7.10)$$

Как известно, электрические потери зависят от квадрата нагрузки, поэтому характеристика  $P_1 = f(P_2)$  теряет свою линейность, но незначительно.

Характеристика  $\eta = f(P_2)$  приведена на рис. 7.6. При  $P_2 = 0$  КПД также равен нулю. При изменении нагрузки от  $0,25 P_n$  до  $1,25 P_n$  КПД меняется незначительно.

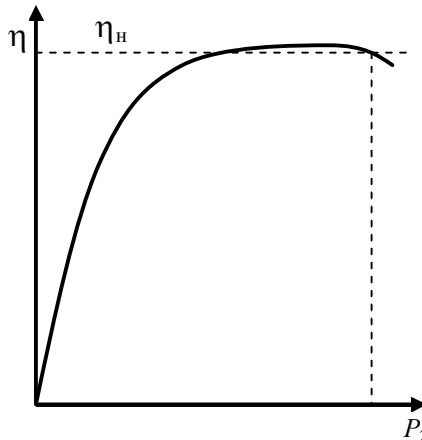


Рис. 7.6. Кривая зависимости КПД от нагрузки

### Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия исследуемой машины по имеющимся в лаборатории образцам, плакатам. Записать ее паспортные данные.
2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 7.7).
3. Снять скоростную, моментную, механическую и рабочие характеристики двигателя.

**Внимание! Перед включением установить выход «А» двухканального автотрансформатора  $TN$  в положение «min», а выход «В» – в положение «max». Убедиться, что нагрузка двигателя отключена автоматическим выключателем  $QF3$ .**

Осуществить пуск двигателя. Для этого включить автоматический выключатель  $QF1$ . На выходе «В» двухканального автотрансформатора установить ток возбуждения, равный 1,0 А. Затем включить автоматический выключатель  $QF2$  и постепенно увеличить напряжение автотрансформатора на выходе «А» до номинального значения 200 В.

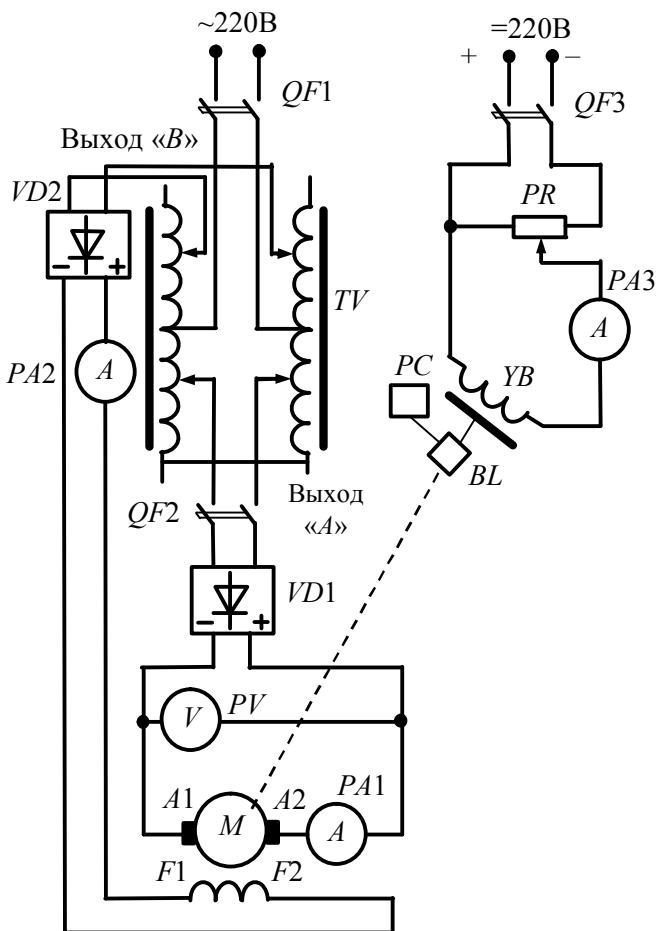


Рис. 7.7. Схема испытания двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Для снятия характеристик двигатель нагружают от тока холостого хода до номинального тока электромагнитным тормозом  $YB$ , включив автоматический выключатель  $QF3$  и увеличивая сопротивление реостата  $PR$ . При этом необходимо поддерживать номинальное напряжение 200 В и ток в обмотке возбуждения 1,0 А.

При снятии характеристик параметры двигателя определять по следующим приборам:

- напряжение двигателя  $U$  – вольтметр  $PV$ ;

- ток якоря  $I_{я}$  – амперметр  $PA1$ ;
  - ток обмотки возбуждения  $I_{в}$  – амперметр  $PA2$ ;
  - частота вращения якоря – переносной цифровой тахометр  $PC$ ;
  - момент двигателя – нижняя шкала электромагнитного тормоза  $УВ$ .
- Данные занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Данные для построения характеристик двигателя

Измерено				Вычислено			
$U, В$	$I_{в}, А$	$n, \text{мин}^{-1}$	$M, Н \cdot м$	$I_{я}, А$	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	$\eta_{д}, \text{о. е.}$

Расчетные формулы:

$$P_1 = (I_{я} + I_{в})U; \quad P_2 = \frac{Mn}{9,55}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

На основании проделанных опытов построить характеристики:

- а) скоростную  $n = f(I_{я})$ ;
- б) моментную  $M = f(I_{я})$ ;
- в) механическую  $n = f(M)$ ;
- г) рабочие  $n, M, I_{я}, P_1, \eta = f(P_2)$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

## **Контрольные вопросы**

1. Назовите области применения двигателей постоянного тока.
2. Объясните принцип действия двигателя постоянного тока.
3. Как правильно осуществить пуск двигателя, изменить направления вращения?
4. Нарисуйте принципиальную электрическую схему двигателя параллельного возбуждения.
5. Поясните порядок экспериментального снятия каждой характеристики двигателя, объясните характер изменения величин.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

**Цель работы** – изучить эксплуатационные особенности и характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

**Задачи работы:**

1. Изучить эксплуатационные особенности двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

### Общие сведения

Схема двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. 8.1.

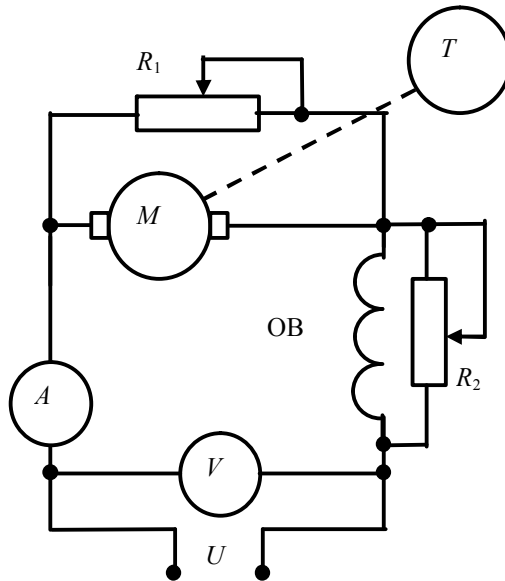


Рис. 8.1. Схема двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Характерная особенность указанного двигателя в том, что ток возбуждения является током нагрузки, и магнитный поток практически пропорционален току якоря:

$$\Phi = kI_{\text{я}}, \quad (8.1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Подставив выражение (8.1) в формулу момента двигателя (7.2), получим аналитическое выражение **моментной характеристики**:

$$M = C_{\text{м}} k I_{\text{я}}^2. \quad (8.2)$$

Из выражения видно, что моментная характеристика является параболой (рис. 8.2).

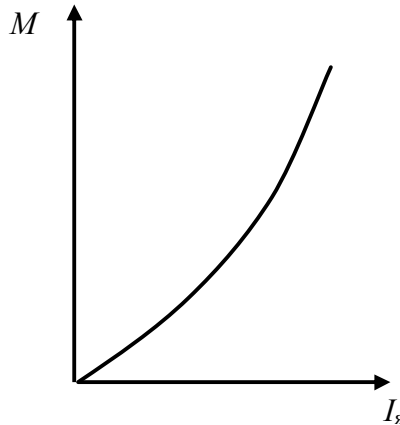


Рис. 8.2. Моментная характеристика двигателя последовательного возбуждения

Чтобы получить формулу **скоростной характеристики** (рис. 8.3), подставим выражение (8.1) в уравнение (7.3). Получим

$$n = \frac{U}{C_{\text{е}} k I_{\text{я}}} - \frac{r_{\text{я}}}{C_{\text{е}} k}. \quad (8.3)$$



Рис. 8.3. Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения

Скоростная характеристика является гиперболой. Из выражения (8.3) видно, что если ток якоря равен нулю ( $I_{я} = 0$ ), частота вращения стремится к бесконечности. Это означает, что двигатель последовательного возбуждения нельзя запускать в режиме холостого хода.

Для вывода аналитического выражения **механической характеристики** выразим ток из формулы (8.2):

$$I_{я} = \sqrt{M / C_{м} k}. \quad (8.4)$$

Подставим полученное выражение в уравнение (8.3):

$$n = \frac{U}{C_{э} k \sqrt{M / C_{м} k}} - \frac{r_{я}}{C_{э} k} = \frac{U}{C_{э} k} \sqrt{\frac{C_{м}}{M k}} - \frac{r_{я}}{C_{э} k}. \quad (8.5)$$

Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением – также гипербола (рис. 8.4). Следует обратить внимание, что скоростная и механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением мягкие: при изменении нагрузки в значительной мере меняется частота вращения.

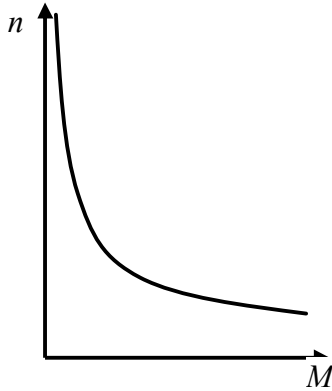


Рис. 8.4. Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

Некоторые из **рабочих характеристик** показаны на рис. 8.5.

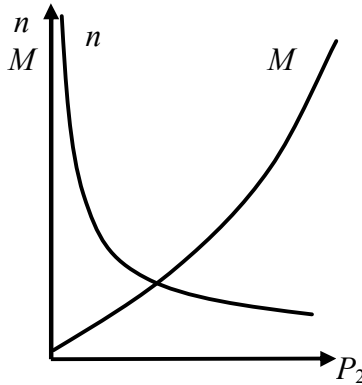


Рис. 8.5. Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

Характеристика  $\eta = f(P_2)$ . Если выражение (7.10) подставить в формулу (8.3), получим следующее выражение:

$$n = \frac{U^2 \eta}{C_e k P_2} - \frac{r_a}{C_e k}. \quad (8.6)$$

Из формулы (8.6) видно, что характер кривой аналогичен скоростной характеристике.

Характеристика  $M = f(P_2)$ . Аналитическое выражение этой характеристики получится путем подстановки выражения (7.7) в формулу (8.2):

$$M = C_m k \frac{P^2}{\eta^2 U^2}. \quad (8.7)$$

Из формулы (8.7) видно, что характеристика представляет собой параболу. Характеристики  $I_{\text{я}}$ ,  $P_1$ ,  $\eta = f(P_2)$  подобны аналогичным характеристикам двигателя с параллельным возбуждением (см. лабораторную работу № 7).

### Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия исследуемой машины по имеющимся в лаборатории образцам, плакатам. Записать ее паспортные данные.
2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 8.6).
3. Снять характеристики двигателя: скоростную, механическую, моментную, рабочие.

Параметры определять по следующим приборам:

- напряжение двигателя  $U_{\text{д}}$  – вольтметр  $PV1$ ;
- ток якоря  $I_{\text{я}}$  – амперметр  $PV2$ ;
- напряжение генератора  $U_{\text{г}}$  – вольтметр  $PV2$ ;
- ток генератора  $I_{\text{г}}$  – амперметр  $PV5$ ;
- ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  – амперметр  $PA1$ ;
- ток шунтов  $I_{\text{ш}}$  – амперметры  $PA3$  и  $PA4$ ;
- частота вращения якоря – тахометр механический (подключен к валу).

#### *3.1. Скоростная, моментная и механическая характеристики двигателя*

Осуществить пуск двигателя. Перед пуском убедиться, что цепи, шунтирующие обмотку возбуждения и якоря, отключены выключателями  $SA1$ ,  $SA2$ , а генератор  $G$  нагружен включением одной ступени сопротивлений (включен  $SA3$ ). Запустить двигатель, установить напряжение генератора 200 В. Двигатель при этом нагружен генератором, который, в свою очередь, работает на нагрузку. Последующие

точки получают включением остальных ступеней сопротивлений ( $R2...R6$ ) выключателями  $SA4...SA8$ . Напряжение генератора поддерживать равным 200 В для всех точек. Данные записать в табл. 8.1.

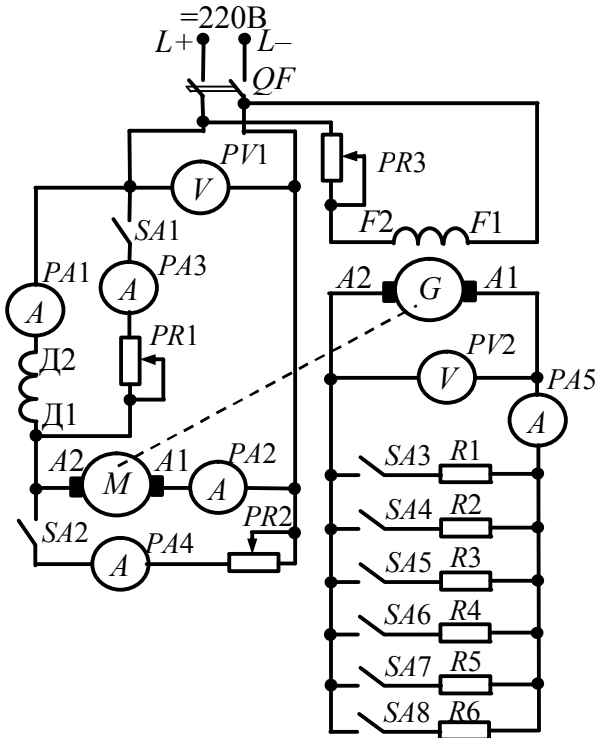


Рис. 8.6. Схема испытания двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Таблица 8.1

Данные для построения скоростной, механической и моментной характеристик

$U_{д}, В$	$I_{я}, А$	$n, \text{мин}^{-1}$	$I_{г}, А$	$U_{г}, В$

На основании полученных данных построить скоростную  $n = f(I_{я})$ , моментную  $M = f(I_{я})$  и механическую  $n = f(M)$  характеристики.

### 3.2. Рабочие характеристики

Запустить двигатель. Напряжение на двигателе поддерживать постоянным – 220 В, а на нагрузочном генераторе – 200 В (реостатом  $PR3$ ), шунтирующие цепи отключены выключателями  $SA1$  и  $SA2$ .

Первая точка рабочих характеристик будет такой же, как при пуске двигателя (включен выключатель,  $SA3$ ), а последующее получают включением ступеней нагрузки генератора выключателями  $SA4...SA8$ . Данные опыта занести в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Данные для построения рабочих характеристик

Измерено					Вычислено					
$U_d, В$	$I_я, А$	$n, мин^{-1}$	$I_r, А$	$U_r, В$	$P_1, Вт$	$P_r, Вт$	$\eta_d, \%$	$P_2, Вт$	$M, Н \cdot м$	$\eta, \%$

Расчетные формулы:

$$P_2 = \frac{P_r}{\eta_r}; \eta_d = \frac{P_2}{P_1}; M = \frac{P_2}{\omega}; \omega = \frac{2\pi n}{60}; P_1 = U_d I_я; P_r = U_r I_r.$$

КПД генератора  $\eta_r$  определить по графику (рис. 8.7).

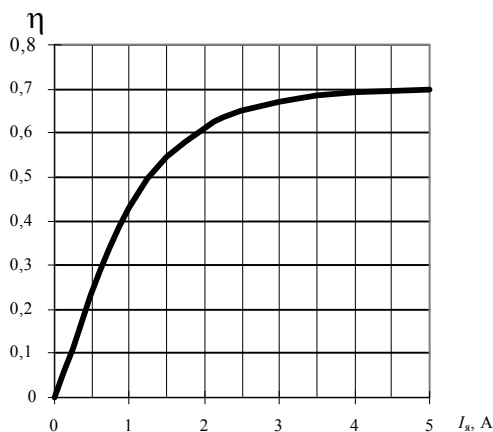


Рис. 8.7. КПД генератора

На основании полученных результатов построить рабочие характеристики двигателя:  $n, M, I_{я}, P_1, \eta_d = f(P_2)$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. Почему для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения недопустим режим холостого хода?
2. Как правильно осуществить пуск двигателя?
3. Нарисуйте принципиальную электрическую схему двигателя последовательного возбуждения.
4. Поясните порядок экспериментального снятия каждой характеристики двигателя, объясните характер изменения величин.
5. Назовите области применения двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

**Цель работы** – изучить устройство, принцип действия и характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

### **Задачи работы:**

1. Изучить устройство и принцип действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

### **Общие сведения**

*Асинхронной машиной* называется электрическая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора не равна частоте вращения магнитного поля ( $n_2 \neq n_1$ ).

Магнитное поле вращается с синхронной частотой

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (9.1)$$

где  $f_1$  – частота тока статора;

Гц;  $p$  – количество пар полюсов машины.

Синхронная частота не зависит от нагрузки, а частота вращения ротора  $n_2$  изменяется при изменении нагрузки на валу. Относительная разность между частотой вращения магнитного поля и частотой вращения ротора называется *скольжением*:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (9.2)$$

Основные режимы работы асинхронной машины — двигательный и генераторный режимы (рис. 9.1).

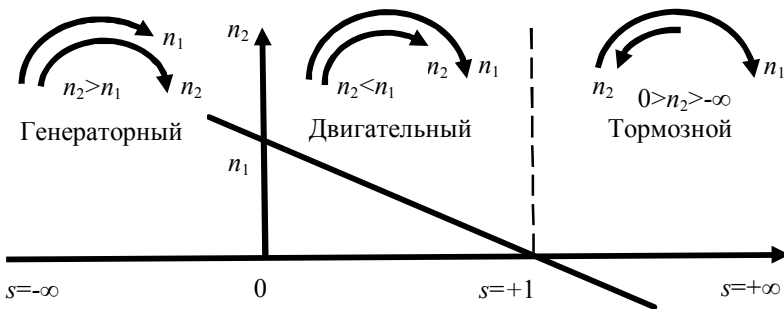


Рис. 9.1. Режимы работы асинхронной машины

В двигательном режиме  $n_2 < n_1$ , скольжение  $0 < s \leq 1$ . При пуске  $n_2 = 0$ , а  $s = 1$ ; при холостом ходе  $s = 0,001-0,007$ ; в номинальном рабочем режиме  $s = 0,01-0,07$ .

В генераторном режиме  $n_2 > n_1$ , а скольжение отрицательное  $s < 0$ . При этом изменится направление ЭДС и тока ротора, а также электромагнитной силы момента. Машина начинает развивать тормозной момент на валу (потребляет механическую энергию) и возвращает в сеть электрическую энергию.

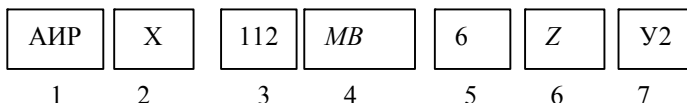
Согласно принципу обратимости одну и ту же машину можно использовать и в качестве двигателя, и в качестве генератора.

Асинхронная машина может оказаться и в тормозном режиме, если ротор и магнитное поле вращаются в разные стороны, а  $s > 1$ . Например, при реверсе асинхронного двигателя направление вращения магнитного поля изменяется мгновенно, а ротор по инерции вращается в прежнем направлении. Машина получает механическую энергию вращения ротора и одновременно потребляет из сети электрическую энергию. Вся энергия идет на нагрев машины.

Асинхронные машины используются в основном в качестве двигателей в различных отраслях промышленности, в строительстве, в сельском хозяйстве и т. д. Асинхронные двигатели выполняют с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Двигатели с короткозамкнутым ротором являются наиболее дешевыми, надежными и самыми распространенными из всех типов электрических двигателей.

При мощности от 0,5 кВт и выше асинхронные двигатели выполняют, как правило, трехфазными. Однофазные двигатели небольшой мощности используют в бытовых устройствах.

Обозначения, применяемые при маркировке асинхронных двигателей, и их расшифровка:



1. Серия: А, АО, 4А, АИ и др.
2. Модификация (может быть несколько символов, или отсутствовать): В – встраиваемый; М – модернизированный; К – с фазным ротором; С – повышенного скольжения; Е – однофазные с рабочим конденсатором; Н – защищенного исполнения с самовентиляцией; и др.
3. Габарит (высота оси вращения, мм).
4. Установочный размер по длине станины (*S, M, L*), и (или) длины сердечника (*A, B, C*), и (или) их сочетания (*MA, MB, LA, LB, ...*).
5. Число полюсов.
6. Признак отличия по назначению (может отсутствовать): Е – со встроенным тормозом; Э – энергосберегающие по ГОСТ Р 51677–2000, Тр – для привода осевых вентиляторов, применяющихся в системах охлаждения силовых трансформаторов, и др.
7. Климатическое исполнение двигателей (У, Т, УХЛ, ХЛ, ОМ и др.) и категория размещения (1, 2, 3, 4) по ГОСТ 1515069.

Асинхронный двигатель состоит из неподвижной части – статора и подвижной – ротора, которые разделены воздушным зазором (рис. 9.2).

*Статор* включает в себя литой корпус 1 из немагнитного материала (чугуна или алюминиевого сплава). Для лучшего охлаждения поверхность корпуса выполнена ребристой. В корпус запрессован сердечник 2 в виде полого цилиндра из изолированных пластин электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм. Изоляция пластин – оксидная пленка на поверхности стали или лак. В машинах большой мощности для улучшения теплоотдачи сердечник выполняют из отдельных пакетов, между которыми предусмотрены радиальные каналы охлаждения.

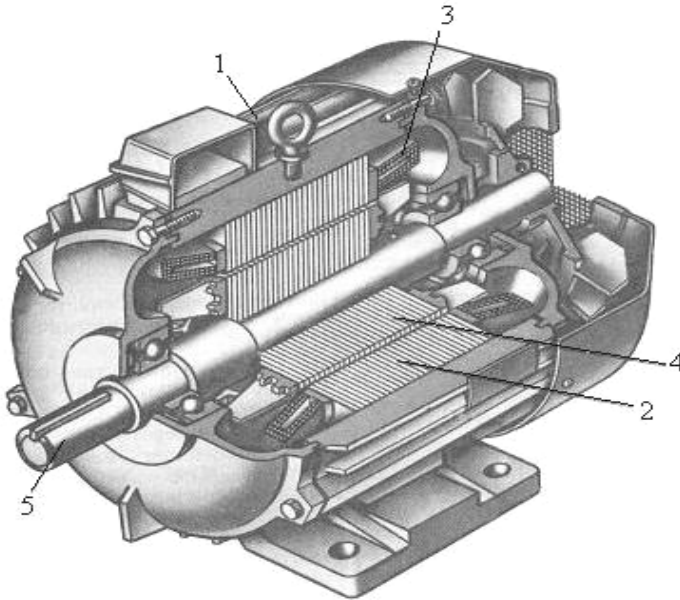


Рис. 9.2. Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором:  
 1 – корпус; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка статора;  
 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 5 – вал

На внутренней поверхности сердечника выштампованы пазы, в которые укладывают обмотку статора 3. Она выполняется из изолированного медного провода. В машинах небольшой и средней мощности применяется полузакрытая форма паза, а обмотка выполняется с мягкими секциями проводом круглого сечения и высыпается в паз через его шлиц. В мощных машинах применяется открытая форма паза, а обмотки изготавливают с жесткими секциями.

Обмотка статора изолирована от магнитопровода пазовой изоляцией, которая включает пазовую коробку, прокладку в нижней части паза, прокладку под клин и межслойную изоляцию в двухслойных обмотках. Применяется изоляция классов нагревостойкости *B* (130 °C), *F* (155 °C), *H* (180 °C).

Для фиксации обмотки в пазу устанавливается пазовый клин.

Выводы обмотки статора присоединены к клемной колодке в специальной коробке на корпусе машины. По торцам к корпусу крепятся алюминиевые или чугунные подшипниковые щиты,

в которых расположены подшипники. Подшипники наполнены смазкой и закрыты крышкой.

В подшипниках установлен вал ротора 5 (см. рис. 9.2). На вал напрессован сердечник ротора 4, выполненный из изолированных пластин электротехнической стали в виде цилиндра. В машинах большой мощности вал прямоугольного сечения, а сердечник ротора располагается на ободе с крестовиной и втулкой, надетой на вал. На внешней поверхности сердечника имеются пазы, в которых расположена обмотка ротора. Она бывает двух видов: короткозамкнутая и фазная. Соответственно, асинхронные двигатели бывают с ротором короткозамкнутым и фазным.

Короткозамкнутая обмотка ротора состоит из стержней (рис. 9.3), которые расположены в пазах сердечника ротора. С торцов эти стержни замыкаются торцевыми короткозамыкающими кольцами.

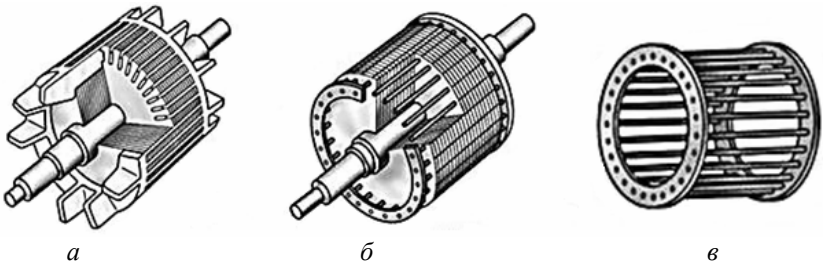


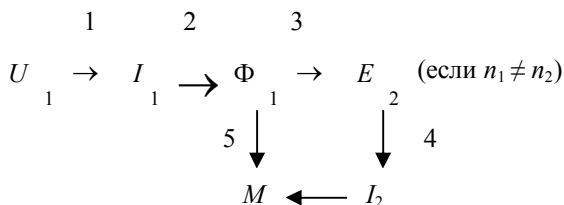
Рис. 9.3. Короткозамкнутый ротор: *а* – с литой обмоткой; *б* – со сварной обмоткой; *в* – короткозамкнутая обмотка без сердечника

В машинах небольшой и средней мощности обмотка заливается в пазы расплавленным алюминием. Одновременно отливаются короткозамыкающие кольца с расположенными на них вентиляционными лопатками (рис. 9.3, *а*). Лопатки перемешивают воздух внутри машины для улучшения охлаждения. В машинах большой мощности или специального назначения в пазы ротора вставляют медные, бронзовые или латунные стержни, концы которых сваривают (впаивают) в медные короткозамыкающие кольца (рис. 9.3, *б, в*).

Короткозамкнутая обмотка ротора выполнена бесконтактной (она не соединена с внешней цепью), что определяет высокую надежность такого двигателя. Но из-за сильно закороченного ротора у него большой пусковой ток и ограниченный пусковой момент.

Асинхронный двигатель преобразует потребляемую от источника питания электрическую энергию в механическую энергию вращения ротора, которую через вал передает присоединенной к нему рабочей машине.

Принцип действия асинхронного двигателя основан на законе электромагнитной индукции и законе электромагнитных сил. Его можно показать по следующей упрощенной схеме:



1. При подаче напряжения  $U_1$  на обмотку статора в ней начинает протекать переменный ток  $I_1$ .

2. Ток  $I_1$  создает вращающееся магнитное поле, поток которого  $\Phi_1$  замыкается между полюсами по магнитной цепи машины, пересекая витки обмоток статора и ротора.

3. Если частота вращения магнитного поля (синхронная частота)  $n_1$  не равна частоте вращения ротора  $n_2$ , то магнитный поток относительно обмотки ротора будет переменным и наводит в ней ЭДС  $E_2$ .

4. Так как обмотка ротора замкнута, ЭДС  $E_2$  создает в ней ток ротора  $I_2$ .

5. При взаимодействии магнитного поля с током обмотки ротора возникает электромагнитная сила, создающая электромагнитный вращающий момент  $M$ , под действием которого ротор вращается с частотой  $n_2 = n_1(1-s)$ .

Направление момента вращения определяется по правилу левой руки. Чтобы изменить направление вращения, необходимо изменить направление вращающегося магнитного поля статора. Для этого надо изменить чередование фаз сетевого напряжения. Вращающий электромагнитный момент двигателя уравнивается моментом сопротивления на его валу.

Если частоты вращения поля и ротора одинаковы, ЭДС  $E_2$  не наводится, следовательно, нет тока  $I_2$  и вращающего момента  $M$ .

Поэтому неизменным условием работы двигателя являются неравные частоты вращения ротора и магнитного поля статора.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип действия исследуемого электродвигателя, записать его паспортные данные.
2. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 9.4).

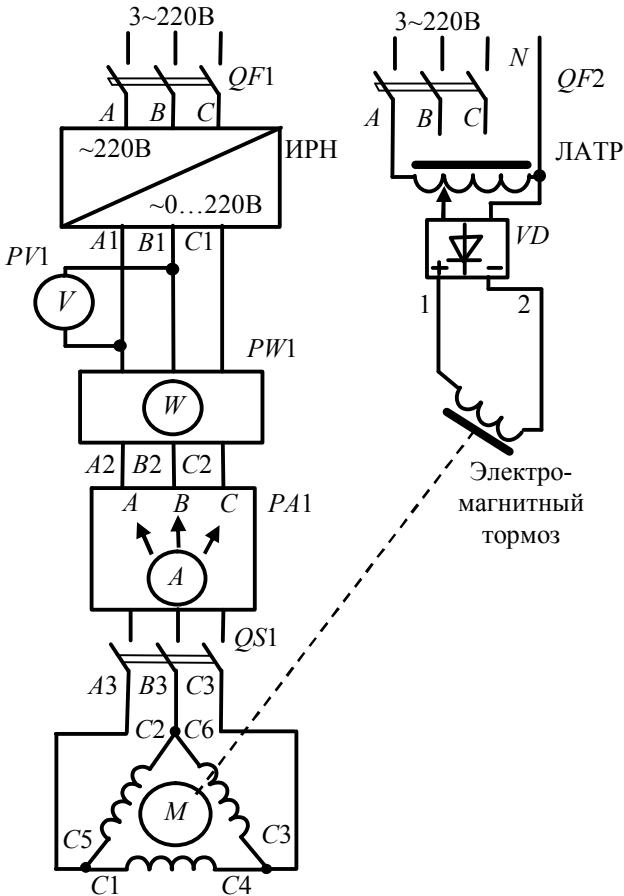


Рис. 9.4. Принципиальная электрическая схема испытания трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

3. Снять характеристики холостого хода электродвигателя  $I_{1X}$ ,  $P_{1X}$ ,  $\cos \varphi_{1X} = f(U_{1X})$  при  $P_2 = 0$ .

Перед включением лабораторной установки установить  $QF1$ ,  $QF2$  и выключатель  $QS1$  в положение «откл.».

Включить  $QF1$  и регулятором напряжения ИРН установить номинальное напряжение двигателя – 220 В. Переведя выключатель  $QS1$  в положение «вкл.», запустить электродвигатель. Снижая напряжение от  $U_1 = U_{1H} = 220$  В до  $U_1 \approx 0,4U_{1H} = 90$  В, снять показания.

Замеры токов и мощностей производить пофазно с помощью переключателя  $PA1$ , при этом

$$P_{1X} = P_{1XA} + P_{1XB} + P_{1XC}.$$

Полученные результаты занести в табл. 9.1. Установку выключить, переведя  $QF1$  и  $QS1$  в положение «откл.».

Таблица 9.1

Данные опыта холостого хода

Экспериментальные данные					Расчетные данные		
$U_{1X}$ , В	$I_{1XA}$ , А	$I_{1XB}$ , А	$I_{1XC}$ , А	$P_{1X}$ , Вт	$I_{1X}$ , А	$S_{1X}$ , ВА	$\cos \varphi_{1X}$

По результатам опыта (табл. 9.1) вычислить  $\cos \varphi_{1X}$ , пользуясь выражениями:

$$I_{1X} = \frac{I_{1XA} + I_{1XB} + I_{1XC}}{3};$$

$$S_{1X} = \sqrt{3}U_{1X}I_{1X};$$

$$\cos \varphi_{1X} = \frac{P_{1X}}{S_{1X}}.$$

По данным опытов и расчетов построить характеристики  $I_{1X}$ ,  $P_{1X}$ ,  $\cos \varphi_{1X} = f(U_{1X})$ .

4. Снять характеристики короткого замыкания  $I_{1К}$ ,  $P_{1К}$ ,  $\cos \varphi_{1К} = f(U_{1К})$  при частоте вращения  $n_2 = 0$ .

Перед включением установки  $QF1$ ,  $QF2$ ,  $QS1$  находятся в положении «откл.». Ручку регулятора напряжения ИРН установить в положение «min» до упора. Ручку ЛАТРа установить в положение «больше» до упора. Включить  $QF2$ , подав питание на катушку электромагнитного тормоза, тем самым затормозив ротор двигателя. Включить  $QF1$  и убедиться, что напряжение на двигателе ( $PV1$ ) равно 0.  $QS1$  перевести в положение «вкл.», подключив двигатель к сети. Изменять регулятором ИРН напряжение на двигателе (5–6 точек) так, чтобы его ток изменялся в пределах от  $I_{1ЛК} = 0$  до  $I_{1К} = (1,0 \dots 1,2)I_{1Н}$ , где  $I_{1Н}$  – номинальный ток двигателя ( $I_{1Н} = 4,0 \text{ А}$ ).

Замеры производить пофазно, аналогично предыдущему опыту, при этом  $P_{1К} = P_{1КА} + P_{1КВ} + P_{1КС}$ . Полученные результаты занести в табл. 9.2, после чего установку отключить в следующей последовательности: выключить  $QF1$ ,  $QS1$ , затем  $QF2$ .

Таблица 9.2

Данные опыта короткого замыкания

Экспериментальные данные					Расчетные данные		
$U_{1К}$ , В	$I_{1КА}$ , А	$I_{1КВ}$ , А	$I_{1КС}$ , А	$P_{1К}$ , Вт	$I_{1К}$ , А	$S_{1К}$ , В·А	$\cos \varphi_{1К}$ , о. е.

По результатам опыта (табл. 9.2) вычислить значения  $\cos \varphi_{1К}$ , пользуясь выражениями:

$$I_{1К} = \frac{I_{1КА} + I_{1КВ} + I_{1КС}}{3}; \quad S_{1К} = \sqrt{3}U_{1К}I_{1К}; \quad \cos \varphi_{1К} = \frac{P_{1К}}{S_{1К}}$$

По данным опытов и расчетов построить зависимости  $I_{1К}$ ,  $P_{1К}$ ,  $\cos \varphi_{1К} = f(U_{1К})$ .

5. Снять рабочие характеристики двигателя  $I_1, P_1, S, \cos \varphi_1, \eta, P_2 = f(M)$  при  $U_1 = \text{const}, f_1 = \text{const}$ .

Перед включением лабораторной установки установить  $QF1, QF2$  и  $QS1$  в положение «откл.»; ЛАТР – в крайнее положение «меньше» до упора ручки; ИРН – в крайнее правое положение «min» до упора ручки. Включить  $QF1$ . Регулятором ИРН установить напряжение  $U_1 = 220$  В. Переведя  $QS1$  в положение «вкл.», запустить электродвигатель. Включить  $QF2$ , подав питание на катушку электромагнитного тормоза. Изменять ЛАТРОм напряжение питания электромагнитного тормоза, тем самым изменяя нагрузку электродвигателя так, чтобы ток двигателя изменялся от тока холостого хода до  $I_1 = (1,0 - 1,2)I_{1H}$ . Напряжение на двигателе поддерживать постоянным и равным  $U_1 = 220$  В. Снять с 5–6 точек замеры, которые производить пофазно, при этом  $P_1 = P_{1A} + P_{1B} + P_{1C}$ .

Синхронная частота вращения магнитного поля двигателя  $n_1$  не зависит от нагрузки и будет иметь одно и то же значение для всех экспериментальных точек. Частоту вращения ротора  $n_2$  измерять с помощью переносного цифрового тахометра, который подключается к разьему на клеммной колодке двигателя.

Полученные результаты занести в табл. 9.3, лабораторную установку выключить.

Последовательность отключения следующая. Снимают нагрузку с двигателя, установив ЛАТР в крайнее левое положение «меньше» до упора ручки и отключив  $QF2$ . Затем отключают двигатель, переводя  $QF1$  и  $QS1$  в положение «откл.».

Таблица 9.3

Рабочие характеристики электродвигателя

Экспериментальные данные								Расчетные данные						
$U_{1Л},$ В	$I_{1А},$ А	$I_{1В},$ А	$I_{1С},$ А	$P_1,$ Вт	$M,$ Н·м	$n_2,$ мин <sup>-1</sup>	$n_1,$ мин <sup>-1</sup>	$I_1,$ А	$S_1,$ В·А	$\cos \varphi_1,$ о.е.	$P_2,$ Вт	$\eta,$ о.е.	$s,$ о.е.	

По результатам опыта (табл. 9.3) выполнить необходимые расчеты, пользуясь выражениями:

– скольжение:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1};$$

– линейный ток двигателя:

$$I_1 = \frac{I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}}{3};$$

– полная мощность двигателя:

$$S_1 = \sqrt{3}U_1 I_1;$$

– коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1};$$

– полезная мощность:

$$P_2 = \frac{M n_2}{9,55};$$

– коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

По данным опытов и расчетов построить рабочие характеристики  $I_1, P_1, s, \cos \varphi_1, \eta, P_2 = f(M)$ .

## Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

## Контрольные вопросы

1. Объяснить устройство и принцип действия трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.
2. На что расходуется мощность холостого хода электродвигателя?
3. Что такое электромагнитная мощность асинхронной машины? Как она определяется?
4. Что называется скольжением асинхронного двигателя? Как оно определяется?
5. Что такое КПД асинхронного двигателя? Как он определяется?
6. Почему исследуемый двигатель называется асинхронным?
7. Назовите области применения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
8. Поясните обозначения, применяемые при маркировке асинхронных двигателей, и дайте их расшифровку.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

**Цель работы** – изучить устройство, принцип действия и характеристики трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.

**Задачи работы:**

1. Изучить устройство и принцип действия асинхронного двигателя с фазным ротором.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятия характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором.

### Общие сведения

Статор двигателя с фазным ротором имеет аналогичную конструкцию, как и у асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (см. рис. 9.2). Эти двигатели конструктивно отличаются главным образом устройством ротора.

Фазный ротор 4 (рис. 10.1) более сложный по сравнению с короткозамкнутым. Обмотка фазного ротора выполняется трехфазным обмоточным проводом, аналогично обмотке статора, с тем же числом пар полюсов. Концы фазных обмоток соединяются по схеме «звезда». Начала проходят через центральное отверстие вала и соединяются с тремя контактными кольцами 2, которые закреплены на валу ротора, выполнены из латуни или стали и изолированы друг от друга и от вала.

Электрическая связь обмотки ротора с внешней цепью осуществляется через скользящий контакт между контактными кольцами и щеточным аппаратом. Используют металлографитовые щетки, которые прижимаются к контактным кольцам с помощью пружин щеткодержателей 1 (см. рис. 10.1), закрепленных неподвижно в корпусе машины. Щеточный аппарат и контактные кольца выполняются, как правило, в отдельной оболочке.

При тяжелых условиях пуска с нагрузкой на валу применяется *реостатный пуск* асинхронных двигателей с фазным ротором. В основу способа заложено свойство асинхронного двигателя увеличивать

пусковой момент с ростом активного сопротивления в цепи ротора. Для этого в цепь ротора включают пусковой реостат (рис. 10.2, а).

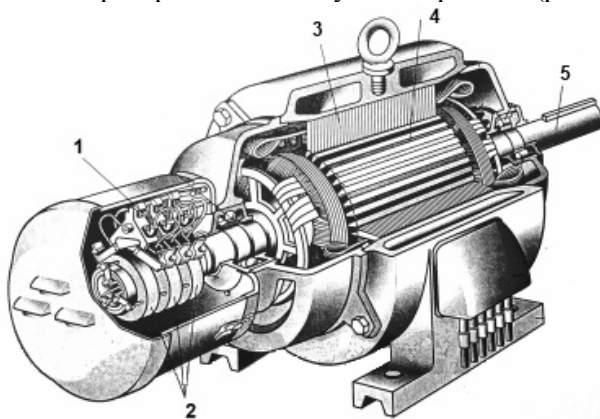


Рис. 10.1. Асинхронный двигатель с фазным ротором в разрезе: 1 – щеткодержатели; 2 – контактные кольца; 3 – статор; 4 – ротор; 5 – вал ротора

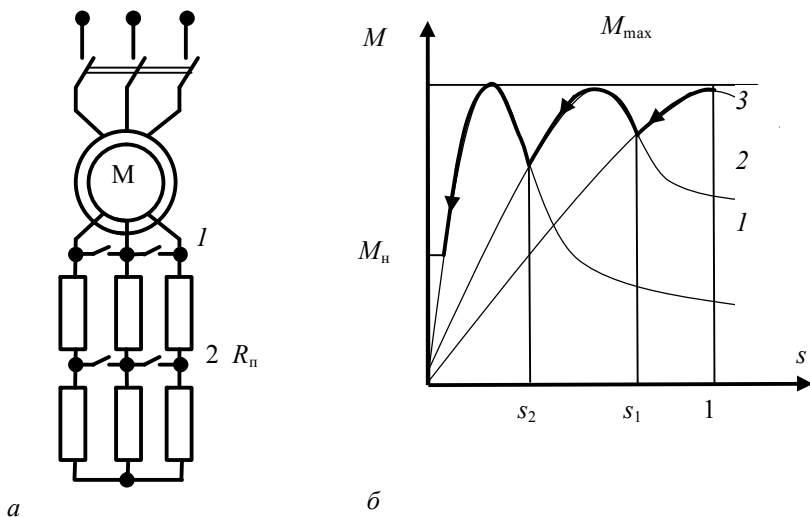


Рис. 10.2. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата: а – схема пуска; б – процесс разгона

На схеме пусковой реостат состоит из двух секций. Сопротивление пускового реостата  $R_n$  подбирается такое, чтобы пусковой момент был близок к максимальному (кривая 3 на рис. 10.2, б).

Пуск двигателя начинается при полностью введенном пусковом сопротивлении (контакты 1 и 2 на рис. 10.2, а разомкнуты). Двигатель разгоняется до частоты, соответствующей скольжению  $s_1$ . В этот момент замыкаются контакты 2, в цепи ротора оказывается только одна секция пускового сопротивления, что соответствует характеристике 2, и двигатель продолжает разгоняться до частоты, определяемой скольжением  $s_2$ . Когда все контакты замкнутся, они отключат пусковой реостат, и двигатель «выйдет» на естественную характеристику. В общем случае количество секций может быть больше.

Достоинства реостатного пуска – увеличивается пусковой момент, а пусковой ток снижается. Недостатками способа являются относительная сложность и дополнительные потери в пусковом реостате.

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны, но они обладают пусковыми свойствами, чем двигатели с короткозамкнутым ротором. Поэтому асинхронные двигатели с фазным ротором применяются при тяжелых условиях пуска, так как включение дополнительного сопротивления в цепь ротора позволяет повысить пусковой момент и уменьшить пусковые токи.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип действия исследуемого асинхронного двигателя с фазным ротором, записать его паспортные данные.

Собрать схему на стенде НТЦ-23 для проведения опытов (рис. 10.3).

**2. Провести опыт холостого хода** в следующей последовательности:

- 1) включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- 2) включить выключатель SA1;
- 3) включить выключатель SA26 и установить режим работы инвертора:

- независимое управление – положение SA27 – «Включено»;
- с помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 50$  Гц (см. по прибору HZ1);

- с помощью регулятора *RP5* «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру *PV4*);
- 4) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку *SB1*;

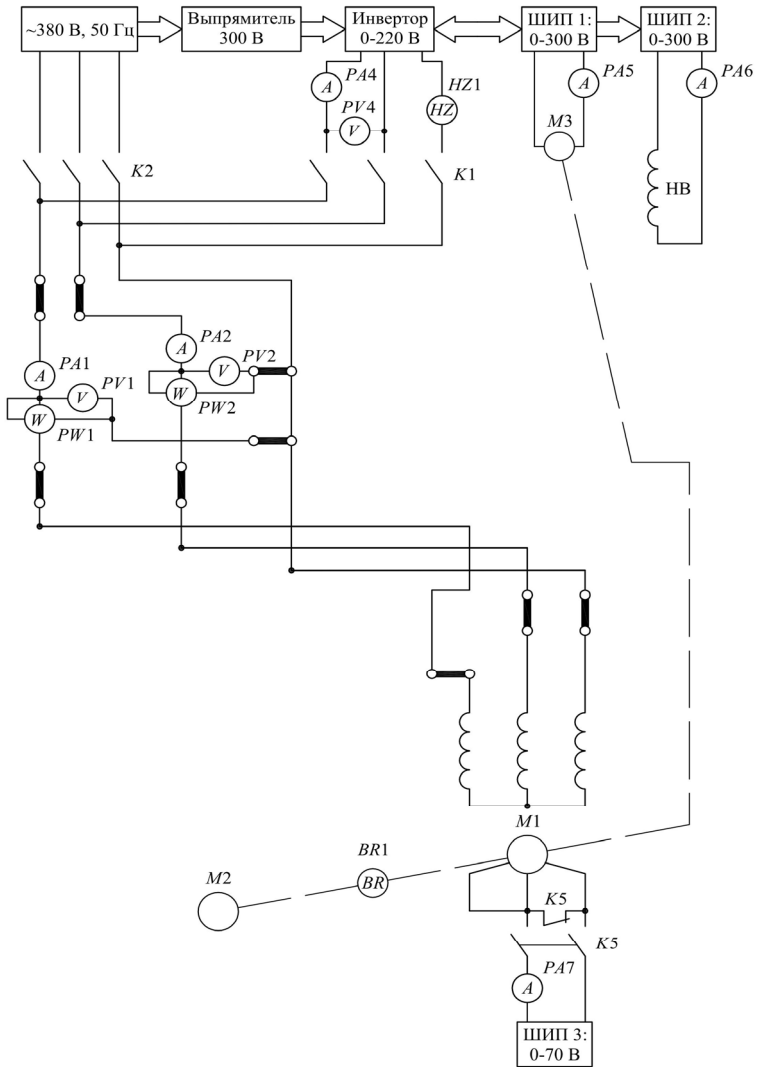


Рис. 10.3. Схема проведения опытов холостого хода и короткого замыкания трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

5) при помощи регулятора *RP5* «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре АД до номинального значения  $U_1 = 220 \text{ В}$  (контролировать по вольтметру *PV4*);

6) прогреть АД в течение **5** минут;

7) при помощи регулятора *RP5* «Задание напряжения», плавно уменьшая напряжение на исследуемом двигателе *M1* до **130 В**, снять 5 точек (контролировать по вольтметру *PV4*).

Измеряемые значения снимать со следующих приборов:

– для  $U_{1x}$  – вольтметр *PV2* (*SA31* в положении «*PV2*»);

– для  $I_{1x}$  – амперметр *PA1* или *PA2*;

– для  $P_{1x1}$  – ваттметр *PW1* (*SA30* в положении «*PW1*»);

– для  $P_{1x2}$  – ваттметр *PW2* (*SA31* в положении «*PW2*»).

Данные занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Данные опыта холостого хода

Измерено				Вычислено		
$U_{1x}, \text{ В}$	$I_{1x}, \text{ А}$	$P_{1x1}, \text{ Вт}$	$P_{1x2}, \text{ Вт}$	$P_{1x}, \text{ Вт}$	$S_{1x}, \text{ В} \cdot \text{ А}$	$\cos\varphi_{1x},$ о. е.

Завершив эксперимент, необходимо:

1) уменьшить напряжение на выходе инвертора до нуля (контролировать по прибору *PV4*);

2) отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку *SB2*;

3) выключить выключатель *SA1*;

4) выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

Выполнить необходимые расчеты и данные занести в табл. 10.1:

– активная мощность электродвигателя

$$P_{1x} = P_{1x1} \pm P_{1x2};$$

– полная мощность

$$S_{1x} = \sqrt{3}U_{1x}I_{1x};$$

– коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{1x} = \frac{P_{1x}}{S_{1x}}.$$

По результатам измерений и вычислений построить характеристики холостого хода  $I_{1x}$ ,  $P_{1x}$ ,  $\cos \varphi_{1x} = f(U_{1x})$ .

### 3. Провести опыт короткого замыкания.

**ВНИМАНИЕ!** При выполнении опыта ротор исследуемого двигателя не вращается, ток статора не должен превышать  $1,5I_{1н}$ . Продолжительность каждого отсчета – не более 10 с.

Опыт требует хорошей организации и слаженной работы бригады студентов. На каждого наблюдателя возлагается наблюдение за одним-двумя приборами в момент отсчета (времени включения).

Последовательность выполнения:

- 1) включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- 2) включить выключатель SA1;
- 3) включить выключатель SA26, установить режим инвертора:
  - независимое управление – положение SA27 – «Включено»;
  - с помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 50$  Гц (см. по прибору HZ1);
  - с помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру PV4);
- 4) подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора, нажав кнопку SB1;
- 5) чтобы ротор двигателя M1 не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину M3, которая работает в генераторном режиме. Для этого необходимо:

5.1) установить выключатель SA25 ШИП2 в положение «Включено» и с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины M3  $I_b = 0,4$  А (контролировать по амперметру PA6);

- 5.2) установить режим работы ШИП1:
  - SA20 – положение «Включить замкнутую СУ»;
  - SA21 – положение «Задание скорости»;
  - SA22 – положение «Генераторный режим»;

5.3) Включить ШИП1 (SA23) и с помощью регулятора RP1 «Задание», ШИП1, установить значение частоты вращения ротора, равное нулю (контролировать по прибору BR1);

6) С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» инвертора увеличивать напряжение на исследуемом двигателе от 50 В до 90 В (контролировать по вольтметру PV4).

Чтобы ротор двигателя М1 не вращался (контролировать по прибору BR1), поддерживать ток возбуждения вспомогательной машины М3  $I_b = 0,4A$  (контролировать по амперметру PA6).

Измеряемые значения снимать со следующих приборов:

- для  $U_{1K}$  – вольтметр PV2 (SA31 в положении «PV2»);
- для  $I_{1K}$  – амперметр PA1 или PA2;
- для  $P_{1K1}$  – ваттметр PW1 (SA30 в положении «PW1»);
- для  $P_{1K2}$  – ваттметр PW2 (SA31 в положении «PW2»);

Данные занести в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Данные опыта короткого замыкания

Измерено				Вычислено		
$U_{1K}$ , В	$I_{1K}$ , А	$P_{1K1}$ , Вт	$P_{1K2}$ , Вт	$P_{1K}$ , Вт	$S_{1K}$ , В·А	$\cos\phi_{1K}$ , о. е.

Завершив эксперимент, необходимо:

- выключить ШИП1 – тумблер в положение «Выключено»;
- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (регулятор RP5, контролировать по прибору PV4);
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3 равное нулю (контролировать по амперметру PA6);
- установить выключатель ШИП2 в положение «Выключено»;
- выключить выключатель SA1;
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

Выполнить необходимые расчеты и данные занести в табл. 10.2:

- активная мощность электродвигателя:

$$P_{1K} = P_{1K1} \pm P_{1K2};$$

- полная мощность:

$$S_{1K} = \sqrt{3}U_{1K}I_{1K};$$

– коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_{1К} = \frac{P_{1К}}{S_{1К}}$$

По результатам измерений и вычислений построить характеристики холостого хода  $I_{1К}$ ,  $P_{1К}$ ,  $\cos \varphi_{1К} = f(U_{1К})$ .

**4. Провести исследование рабочих характеристик двигателя.**  
Собрать схему на стенде НТЦ-23 согласно рис. 10.4.

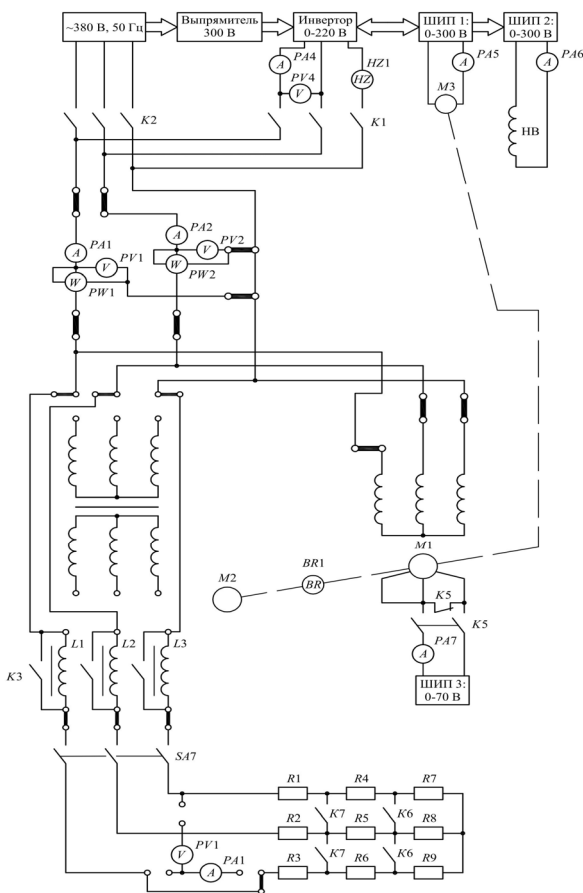


Рис. 10.4. Схема исследования рабочих характеристик асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Опыт проводить в следующей последовательности:

- 1) включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- 2) включить выключатель  $SA1$ ;
- 3) включить выключатель  $SA26$  и установить режим работы инвертора:
  - независимое управление – положение  $SA27$  – «Включено»;
  - с помощью регулятора  $RP4$  «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 50$  Гц (см. по прибору  $HZ1$ );
  - с помощью регулятора  $RP5$  «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
- 4) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку  $SB1$ ;
- 5) При помощи регулятора  $RP5$  «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре АД до номинального значения  $U_1 = 220$  В и в дальнейшем поддерживать его неизменным (контролировать по вольтметру  $PV4$ ):
  - установить выключатель  $SA30$  в положение « $PW1$ »;
  - установить выключатель  $SA31$  в положение « $PV2$ »;
  - установить выключатель  $SA32$  в положение « $PV3$ »;
- 6) Чтобы создать механическую нагрузку на валу исследуемого двигателя, нужно подключить к сети вспомогательную машину  $M3$ , которая работает в генераторном режиме. Для этого необходимо:
  - 6.1) установить выключатель ШИП2 ( $SA25$ ) в положение «Включено»;
    - с помощью регулятора  $RP3$  «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины  $M3$   $I_b = 0,4$  А (контролировать по амперметру  $PA6$ );
  - 6.2) установить режим работы ШИП1:
    - $SA20$  – положение «Отключить замкнутую СУ»;
    - $SA21$  – положение «Задание тока»;
    - $SA22$  – положение «Генераторный режим»;
  - 6.3) Включить ШИП1 ( $SA23$ ) и с помощью регулятора  $RP1$  «Задание», ШИП1, установить значение тока (контролировать по амперметру  $PA5$ ), равное нулю.
- 7) Включить шунты переключателем  $SA2$ , затем при выключенном  $SA7$  снять первые пять точек, увеличивая ток в цепи якоря

вспомогательной машины МЗ с помощью регулятора РР1 «Задание» ШИП1 (поворачивать регулятор РР1 против часовой стрелки).

8) Включить SA7, снять по 5 показаниям приборов для каждой ступени пускового сопротивления  $R_{ст}$  при номинальном напряжении  $U_{1н}$  (включение ступеней R1-R9 осуществлять переключателем SA5).

Данные опыта занести в табл. 10.3.

Таблица 10.3

Рабочие характеристики двигателя

Измерено						Вычислено					
$I_{пт}$ , А	$I_1$ , А	$U_1$ , В	$P_{11}$ , Вт	$P_{12}$ , Вт	$\omega_2$ , рад/с	$P_1$ , Вт	$n_2$ , мин <sup>-1</sup>	$\cos\varphi_1$ , о.е.	$P_2$ , Вт	$M_2$ , Н·м	$\eta$ , о.е.

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора «Задание» ШИП1 уменьшить ток до нуля (контролировать по прибору PA5);
- выключить ШИП1 – тумблер в положение «Выкл.»;
- уменьшить напряжение на выходе инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ равное нулю (контролировать по амперметру PA6);
- установить выключатель ШИП2 в положение «Выключено».

Выключить выключатель SA1.

Выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

Выполнить необходимые расчеты и данные занести в табл. 10.3:

– потребляемая активная мощность электродвигателя:

$$P_1 = P_{11} \pm P_{12};$$

– частота вращения ротора:

$$n_2 = \frac{30\omega_2}{\pi};$$

– коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1};$$

– момент на валу асинхронного двигателя считать равным моменту нагрузочного генератора постоянного тока:

$$M_2 \approx M_{\text{гпт}} = I_{\text{гпт}} \cdot C_M \cdot \Phi, \text{ где } C_M \cdot \Phi = \frac{9,55 \cdot U_{\text{н.гпт}}}{n_{\text{н.гпт}}};$$

– полезная активная мощность электродвигателя:

$$P_2 = \frac{M_2 n_2}{9,55};$$

– коэффициент полезного действия асинхронного двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Построить в одной системе координат рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:  $I_1, P_1 \cos \varphi_1, n_2, M_2, \eta = f(P_2)$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

## Контрольные вопросы

1. Объяснить устройство и принцип действия асинхронного двигателя с фазным ротором.
2. Назвать области применения двигателей с фазным ротором.
3. В чем отличие двигателя с фазным ротором от короткозамкнутого по конструкции и по электрическим параметрам?
4. Как связаны величины  $M_{ЭМ.макс}$  и  $M_{ПУСК}$  с активным сопротивлением цепи ротора?
5. Как осуществляется пуск асинхронного двигателя с фазным ротором?
6. В чем преимущество двигателя с фазным ротором по отношению к короткозамкнутому в режиме пуска?
7. В чем преимущество короткозамкнутого двигателя в сравнении с двигателем с фазным ротором в рабочем режиме?
8. Почему при разомкнутом роторе двигателя с фазным ротором пусковой момент его равен нулю?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ИНДУКЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА И ФАЗОРЕГУЛЯТОРА

**Цель работы** – изучение работы асинхронной машины с фазным ротором в режиме индукционного регулятора и фазорегулятора.

### **Задачи работы:**

1. Ознакомиться с конструкцией асинхронного двигателя с заторможенным ротором.
2. Изучить электрические схемы индукционного регулятора и фазорегулятора.
3. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик асинхронной машины в режиме индукционного регулятора и фазорегулятора.

### **Общие сведения**

Режимы работы асинхронной машины при заторможенном роторе наиболее просты для исследования. В этом случае обмотки статора и ротора пересекаются магнитным потоком с одной и той же скоростью и их ЭДС имеют одинаковую частоту  $f_1 = f_2$ .

Тогда ЭДС статора и ротора будут равны:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44f_1 \Phi_1 W_1 K_{061}; \\ E_2 &= 4,44f_1 \Phi_1 W_2 K_{062}. \end{aligned}$$

Режим с неподвижным ротором можно получить для двигателя с фазным ротором путем подъема щеток с контактных колец. Тогда обмотка ротора окажется разомкнутой, а асинхронная машина работает в режиме холостого хода как трансформатор с коэффициентом трансформации:

$$k_{\text{Ад}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1 K_{061}}{W_2 K_{062}}.$$

Но в отличие от трансформатора магнитное поле в асинхронной машине вращающееся, а не пульсирующее.

Наличие воздушного зазора ослабляет магнитный поток. Поэтому требуется большая МДС, чем у трансформатора, что приводит к увеличению тока холостого хода (до 20 %–40 % от номинального). Это вызывает увеличение потерь в обмотке статора (особенно в небольших машинах) и уменьшение коэффициента мощности машины. По этой причине использовать асинхронную машину как трансформатор неэкономично.

Однако асинхронная машина с неподвижным ротором может быть использована как фазорегулятор или индукционный регулятор напряжения. Их принцип действия основан на свойстве асинхронной машины изменять фазу ЭДС ротора при его повороте. Ротор механически затормаживают с возможностью его поворота через червячную передачу.

На рис. 11.1 приведены схема фазорегулятора и векторные диаграммы напряжений статора и ротора. Если ротор установлен в положении, при котором оси одноименных фаз ротора и статора совпадают (рис. 11.1, *а*), то вращающийся магнитный поток пересекает обмотки ротора и статора одновременно. Поэтому одноименные векторы напряжений обмоток ротора и статора направлены в одну сторону и имеют одинаковую фазу. При повороте ротора навстречу магнитному потоку на угол  $\alpha$  (рис. 11.1, *б*) магнитный поток будет пересекать сначала фазу обмотки ротора, а только потом одноименную фазу обмотки статора. Вследствие этого векторы напряжений обмотки ротора будут опережать одноименные векторы напряжений обмотки статора по фазе на угол  $\alpha$ . Поворачивая ротор, можно получить требуемую фазу его напряжений.

На рис. 11.2 приведена схема и векторная диаграмма индукционного регулятора.

На начала обмоток подается напряжение  $U_1$ , а нагрузка подключается на концы обмотки статора (напряжение  $U_2$ ). Работу индукционного регулятора можно описать по схеме:

$$U_1 \xrightarrow{1} I_2 \xrightarrow{2} \Phi_1 \xrightarrow{3} E_1 \xrightarrow{4} \underline{U}_2 = \underline{U}_1 + \underline{E}_1$$

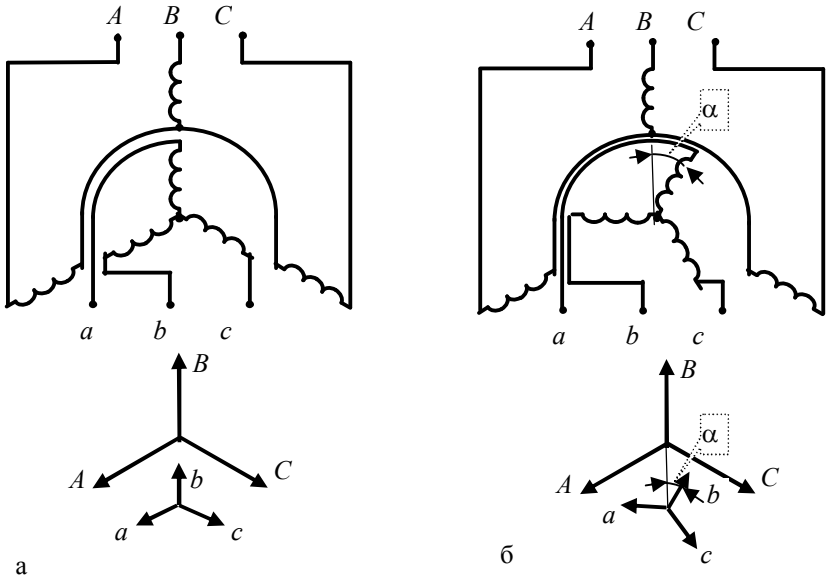


Рис. 11.1. Фазорегулятор

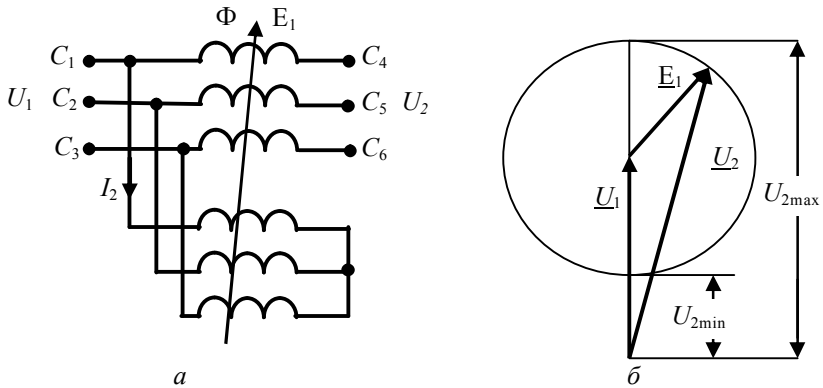


Рис. 11.2. Индукционный регулятор:  
а – схема; б – векторная диаграмма

1. При подаче напряжения  $U_1$  в обмотке ротора появляется ток  $I_2$ .
2. Ток  $I_2$  создает вращающийся магнитный поток  $\Phi_1$ .
3. Вращающийся магнитный поток, пересекая обмотку статора, наводит ЭДС  $E_1$ .

4. Напряжение  $U_2$  равно сумме векторов первичного напряжения  $\underline{U}_1$  и ЭДС  $\underline{E}_1$ .

При повороте ротора фаза ЭДС  $E_1$  будет изменяться, и конец вектора  $\underline{E}_1$  будет скользить по окружности радиусом  $E_1$ . Напряжение  $U_2$  будет при этом меняться от максимального значения до минимального. Таким образом, поворотом ротора регулируется напряжение.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию исследуемой машины, записать ее паспортные данные.

2. Исследовать работу асинхронной машины с заторможенным ротором.

2.1. Исследовать работу трехфазной асинхронной машины в режиме индукционного регулятора напряжения.

Собрать схему (рис. 11.3).

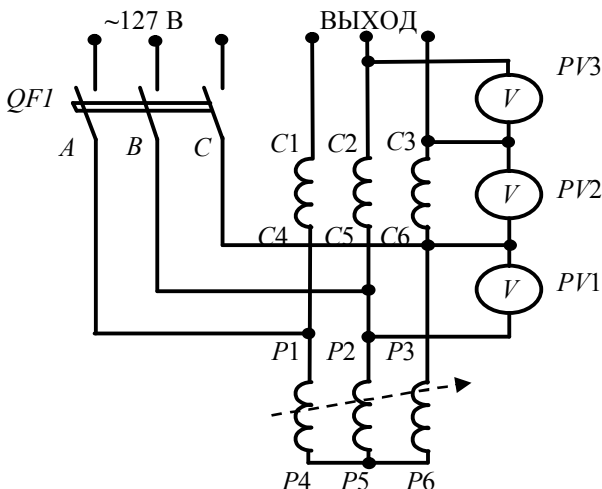


Рис. 11.3. Электрическая схема индукционного регулятора напряжения

Снять зависимость выходного напряжения от угла поворота ротора  $U_{2, \text{вл оп}} = f(\alpha_{\text{эвл}}^\circ)$ , для чего включить  $QF1$ . Вращая ручку, которая находится на самой машине, изменять угол поворота ротора  $\alpha$  от 0 до 160 электрических градусов в обе стороны (что соответствует

80 геометрическим градусам, т. к.  $\alpha_{\text{эл}}^{\circ} = p\alpha_{\text{ГЕОМ}}^{\circ}$ , где  $p = 2$  – число пар полюсов машины). Показания снимать через 20 электрических градусов.

Результаты занести в табл. 11.1, установку отключить, выключив QF1.

Таблица 11.1

Режим индукционного регулятора напряжения

$\alpha_{\text{эл}}^{\circ}$	-160°	-140°	-120°	-100°	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°
$U_{1\text{Л}}, \text{В}$																	
$E_{2\text{Ф}}, \text{В}$																	
$U_{2\text{Л ОП}}, \text{В}$																	
$U_{2\text{Л РАСЧ}}, \text{В}$																	

Используя результаты экспериментальных данных (табл. 11.1), построить в масштабе векторную диаграмму изменения выходного фазного напряжения от угла поворота ротора для одной фазы (рис. 11.4), где  $U_{1\text{Ф}}$  – фазное первичное напряжение регулятора,  $E_{2\text{Ф}}$  – фазная ЭДС вторичной обмотки регулятора,  $U_{2\text{Ф РАСЧ}}$  – выходное фазное напряжение регулятора.

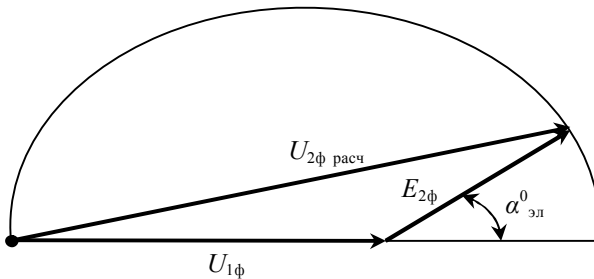


Рис. 11.4. Векторная диаграмма изменения выходного фазного напряжения от угла поворота

$$U_{1\text{Ф}} = \frac{U_{1\text{Л}}}{\sqrt{3}}.$$

Пользуясь диаграммой, рассчитать для каждого угла величину  $U_{2\text{ЛРАСЧ}}$ :

$$U_{2\text{ЛРАСЧ}} = \sqrt{3}U_{2\text{ФРАСЧ}}.$$

По результатам опытов и расчетов построить совместно, в одних координатных осях, зависимости  $U_{2\text{ЛОП}}, U_{2\text{ЛРАСЧ}} = f(\alpha_{\text{эл}})$ .

2.2. Исследовать работу трехфазной асинхронной машины с заторможенным ротором в режиме фазорегулятора.

Собрать схему (рис. 11.5).

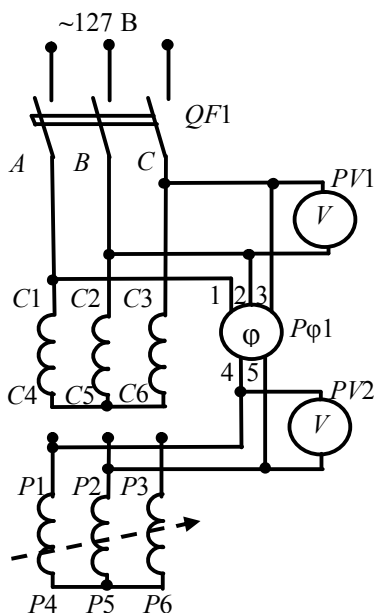


Рис. 11.5. Электрическая схема фазорегулятора

Включить установку при помощи  $QF1$ . Изменять положение первичной обмотки относительно вторичной, изменяя угол поворота ротора через  $20_{\text{эл}}^{\circ}$  от  $0$  до  $160_{\text{эл}}^{\circ}$  в обе стороны. Угол  $\phi$  определить с помощью фазометра, учитывая знак («+» или «-»). Результаты занести в табл. 11.3, установку отключить.

Режим фазорегулятора

$\alpha_{\text{ЭЛ}}^{\circ}$	$-160^{\circ}$	$-140^{\circ}$	$-120^{\circ}$	$-100^{\circ}$	$-80^{\circ}$	$-60^{\circ}$	$-40^{\circ}$	$-20^{\circ}$	$0^{\circ}$	$20^{\circ}$	$40^{\circ}$	$60^{\circ}$	$80^{\circ}$	$100^{\circ}$	$120^{\circ}$	$140^{\circ}$	$160^{\circ}$
$\Phi_{\text{ЭЛ}}^{\circ}$																	

По результатам измерений (табл. 11.2) построить зависимость  $\Phi_{\text{ЭЛ}}^{\circ} = f(\alpha_{\text{ЭЛ}}^{\circ})$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. В чем сущность работы индукционного регулятора?
2. В каких пределах может изменяться вторичное напряжение индукционного регулятора, и от чего эти пределы зависят?
3. При каких условиях выходное напряжение индукционного регулятора будет равно нулю?
4. Объясните принцип построения векторной диаграммы для определения изменения выходного напряжения в схеме индукционного регулятора от угла поворота ротора.
5. Что такое «электрический градус»?
6. Объясните, почему при повороте ротора в схеме фазорегулятора изменяется фаза выходного напряжения, а не его величина?
7. Назовите области возможного применения схем с заторможенным ротором.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы** – изучить устройство, принцип действия и характеристики однофазного асинхронного двигателя.

**Задачи работы:**

1. Ознакомиться с устройством, принципом работы и способом пуска однофазного асинхронного двигателя.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик однофазного асинхронного двигателя.

### Общие сведения

Однофазный асинхронный двигатель – это маломощный двигатель, который применяется в установках, когда питание двигателя может быть осуществлено только от однофазной сети.

Однофазный асинхронный двигатель имеет две обмотки на статоре – пусковую и рабочую (рис. 12.1).

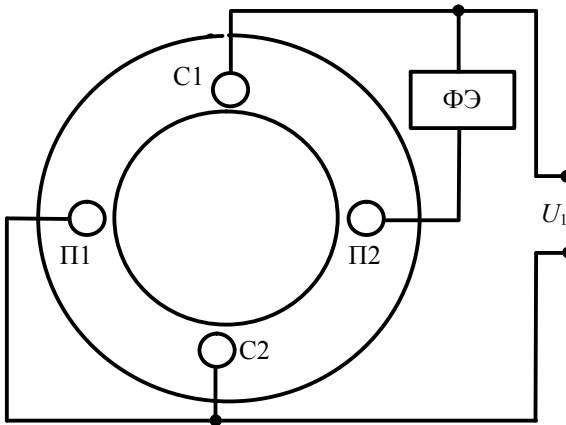


Рис. 12.1. Схема однофазного асинхронного двигателя

Рабочая обмотка занимает  $2/3$  пазов статора, а пусковая обмотка –  $1/3$ . Пусковая обмотка используется только при пуске. Обычно вы-

воды рабочей обмотки маркируется буквами С1–С2, пусковой – П1–П2. Конструкция ротора такая же, как у трехфазного двигателя.

Однофазная рабочая обмотка статора создает пульсирующее магнитное поле, которое не может привести во вращение ротор двигателя – ее пусковой момент равен нулю.

Чтобы привести двигатель во вращение, в нем в момент пуска создают вращающееся магнитное поле. Для создания вращающегося магнитного поля необходимо, чтобы:

1) пусковая и рабочая обмотки были сдвинуты в пространстве на 90 электрических градусов и создавали одинаковые по величине магнитные потоки;

2) токи в обмотках отставали друг от друга на 1/4 периода.

Первое условие выполняется при укладке обмоток в пазы статора. Для выполнения второго условия в пусковую обмотку включают фазосдвигающий элемент ФЭ.

На рис. 12.2 приведены векторные диаграммы токов при использовании разных ФЭ. Вектор тока рабочей обмотки  $I_p$  отстает от вектора напряжения  $\underline{U}_1$  на угол  $\varphi$  меньший  $90^\circ$ , потому что рабочая обмотка имеет активное и индуктивное сопротивления.

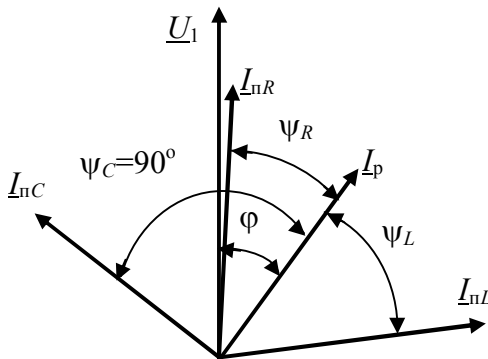


Рис. 12.2. Векторные диаграммы токов при использовании в качестве ФЭ резистора  $R$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$

При использовании в качестве ФЭ резистора вектор тока пусковой обмотки  $I_{пR}$  приближается по направлению к вектору напряжения  $\underline{U}_1$ . Если в качестве ФЭ включена индуктивность, вектор тока

$\underline{I}_{\text{нл}}$  отстает от вектора  $\underline{U}_1$  на угол меньший  $90^\circ$ . Следовательно, активное и индуктивное сопротивления не могут обеспечить фазовый сдвиг в  $90^\circ$  между векторами токов  $\underline{I}_p$  и  $\underline{I}_n$ .

При использовании емкости в качестве ФЭ вектор тока  $\underline{I}_{\text{нс}}$  опережает вектор  $\underline{U}_1$ , и можно подобрать такую емкость, что угол  $\psi_c$  будет равен  $90^\circ$ . Создастся круговое вращающееся магнитное поле, и пусковой момент будет такой же, как у трехфазного двигателя. Поэтому в качестве ФЭ чаще всего применяются конденсаторы.

В отдельных случаях, когда от двигателя не требуется большого пускового момента, в качестве ФЭ используется активное сопротивление самой пусковой обмотки. В этом случае пусковая обмотка выполняется проводом меньшего сечения (с большим активным сопротивлением), чем рабочая обмотка.

Есть разновидность однофазных асинхронных двигателей, у которых вторая обмотка на статоре работает как при пуске, так и в рабочем режиме. Она включена через конденсаторы, поэтому двигатель называется *конденсаторным*. Ее назначение – создавать круговое вращающееся магнитное поле не только при пуске, но и во время работы.

Мощности конденсаторного и однофазного двигателя одних и тех же габаритов меньше, чем трехфазного. В однофазном двигателе имеется поле обратной последовательности, которое уменьшает его вращающий момент.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство и принцип действия исследуемого электродвигателя, записать его паспортные данные.

Исследуемый однофазный асинхронный двигатель имеет две обмотки на статоре. Сдвинутые в пространстве на угол  $90^\circ$  (электрических): рабочую (выводы С1–С2) и пусковую (выводы П1–П2). Круговое вращающееся поле, обеспечивающее максимальный пусковой и рабочий моменты, будет в случае сдвига токов в обмотках на угол  $90^\circ$  электрических. В данной конструкции пусковая обмотка используется только в период пуска. Причем сдвиг тока по фазе  $\alpha < 90^\circ$  электрических обеспечивается за счет параметров самой обмотки,



двигатель. Кнопку SB1 отпустить через 2–4 с после запуска двигателя. Снижая напряжение при помощи ЛАТРа от  $U_{1X} = U_{H1}$  до  $U_{1X} = (0,4–0,5)U_{H1}$ , снять показания (4–6 точек). Полученные результаты занести в табл. 12.1. Установку выключить, переведя QF1 и QF2 в положение «откл.».

Таблица 12.1

Данные опыта холостого хода

Экспериментальные данные			Расчетные данные		
$U_{1X}$ , В	$I_{1X}$ , А	$P_{1X}$ , Вт	$S_{1X}$ , В·А	$\cos \varphi_{1X}$ , о. е.	$U_{1X}^2$ , В <sup>2</sup>

По результатам опыта (табл. 12.1) вычислить  $\cos \varphi_{1X}$ , пользуясь выражениями:

$$S_{1X} = U_{1X} I_{1X}; \quad \cos \varphi_{1X} = \frac{P_{1X}}{S_{1X}}.$$

По данным опытов и расчетов построить характеристики  $I_{1X}$ ,  $P_{1X}$ ,  $\cos \varphi_{1X} = f(U_{1X})$ .

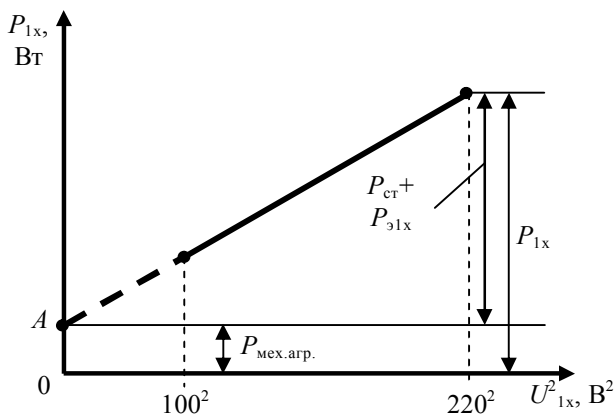


Рис. 12.4. График разделения потерь

Для определения механических потерь и магнитных потерь в стали используется *метод разделения потерь*. Строят график  $P_{1X} = f(U_{1X}^2)$  и продлевают его до пересечения его с осью  $Oy$  (рис. 12.4). Отрезок  $OA$  есть мощность механических потерь агрегата  $P_{\text{МЕХ.АГР}}$ , которые не зависят от загрузки двигателя, т. е.  $P_{\text{МЕХ.АГР}} = \text{const}$  независимо от того, в каком режиме работает двигатель – на холостом ходу или под нагрузкой. Затем определяют потери в обмотке статора при напряжении  $U_{1X} = U_{\text{Н1}} = 220 \text{ В}$  по выражению

$$P_{\text{э1x}} = I_{1x}^2 R_1,$$

где  $I_{1X}$  – ток холостого хода при  $U_{1X} = U_{\text{Н1}} = 220 \text{ В}$  ;  
 $R_1$  – сопротивление рабочей обмотки ( $R_1 = 8,7 \text{ Ом}$ ).

Определяют потери в стали при  $U_{1X} = U_{\text{Н1}} = 220 \text{ В}$  :

$$P_{\text{СТ}} = P_{1X} - P_{\text{М1X}} - P_{\text{МЕХ.АГР.}}$$

где  $P_{1X}$  – мощность двигателя на холостом ходу при  $U_{1X} = U_{\text{Н1}} = 220 \text{ В}$ .

Потери в стали также не зависят от нагрузки, т. е. одинаковы на холостом ходу и в рабочем режиме.

Потери механические двигателя:  $P_{\text{МЕХ.ДВ.}} = \frac{P_{\text{МЕХ.АГР.}}}{2}$ .

4. Снять рабочие характеристики  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $\eta$ ,  $s$ ,  $M = f(P_2)$ .

Перед включением установки выключатели  $QF1$ ,  $QF2$ ,  $QF3$ ,  $QF4$  должны находиться в положении «Откл.», ползунок реостата  $PR2$  – в положении «min» (крайнее нижнее положение), ручка ЛАТРа – в крайнем левом положении. Включить  $QF1$  и установить напряжение на входе ЛАТРа  $U_1 = 220 \text{ В}$ . Одновременным включением  $QF2$  и нажатием на кнопку  $SB1$  запустить двигатель. Кнопку

*SB1* через 2–4 с отпустить. Включив *QF3*, подать питание на обмотку возбуждения генератора постоянного тока, который используется в качестве нагрузки двигателя. Включить нагрузку генератора, переведя *QF4* в положение «Вкл.».

Далее, при постоянном нагрузочном сопротивлении в цепи якоря генератора *PR1*, нагружать двигатель от холостого хода до тока  $I_1 = (1,0 - 1,3)I_{1H}$  путем увеличения тока возбуждения генератора с помощью реостата *PR2* (ползунок реостата при этом перемещается от положения «min» в режиме холостого хода до положения «max» при  $I_1 = (1,0 - 1,3)I_{1H}$ ). Напряжение на двигателе поддерживать с помощью ЛАТРа неизменное  $U_1 = 220$  В. Снять показания с 5–6 точек. Скольжение определить стробоскопическим методом. Для этого перед включением установки стробоскоп включить в сеть и направить его на диск с сектором, который находится на валу двигателя. После запуска установки замерять количество полных оборотов *N* диска с сектором в свете стробоскопической лампы для каждой исследуемой точки. Отсчет времени вести по электрическому секундомеру *PS*. Число измеряемых полных оборотов диска *N* при малых скольжениях (точки, близкие к холостому ходу) должно составлять 2 или 3, при больших скольжениях (точки, близкие к номинальной нагрузке) – 5–10.

Полученные результаты занести в табл. 12.2. Лабораторную установку отключить. Отключение производить в следующей последовательности: ползунок реостата *PR2* перевести в положение «min», выключить *QF4*, затем *QF3*. Потом отключить двигатель, переводя *QF1* и *QF2* в положение «Откл.».

Таблица 12.2

Рабочие характеристики двигателя

Экспериментальные данные					Расчетные данные											
$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$N$ , об.	$t$ , с	$S_1$ , В·А	$\cos\varphi_1$ , о. е.	$P_{Э1}$ , Вт	$P_{Э1}^+$ , Вт	$P_{ЭМ}$ , Вт	$S$ , о. е.	$P_{Э2}$ , Вт	$P_D$ , Вт	$\Sigma P$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$ , о. е.	$M$ , Н·м

Используя экспериментальные данные, сделать необходимые расчеты и результаты занести в табл. 12.2.

Полная потребляемая мощность:  $S_1 = U_1 I_1$ .

Коэффициент мощности:  $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$ .

Потери в рабочей обмотке:  $P_{\text{э1}} = I_1^2 R_1$ , где  $R_1 = 8,7 \text{ Ом}$ .

Электромагнитная мощность:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - P_{\text{э1}} - P_{\text{ст}},$$

где  $P_{\text{ст}}$  – потери в стали при рабочем напряжении (определены из графика разделения потерь по результатам опыта холостого хода).

Скольжение:

$$s = \frac{2N}{t \cdot f_1},$$

где  $N$  – число полных оборотов диска в свете лампы стробоскопа;

$t$  – время, за которое подсчитываются обороты, с;

$f_1$  – частота сети ( $f_1 = 50 \text{ Гц}$ ).

Потери в обмотке ротора:  $P_{\text{э2}} = P_{\text{эм}} s$ .

Добавочные потери:  $P_{\text{д}} = 0,005 P_1$ .

Сумма потерь:  $\sum P = P_{\text{э1}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{мех.дв.}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{д}}$ .

Мощность на валу двигателя:  $P_2 = P_1 - \sum P$ .

Коэффициент полезного действия:  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ .

Момент на валу двигателя:

$$M = \frac{P_2}{\omega_2},$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора, рад/с:

$$\omega_2 = \omega_1 (1 - s),$$

где  $\omega_1$  – синхронная угловая скорость вращения поля ( $\omega_1 = 157$  рад/с).

По данным опытов и расчетов построить рабочие характеристики электродвигателя:  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $\cos \varphi_1$ ,  $\eta$ ,  $s$ ,  $M = f(P_2)$ .

### **Содержание отчета**

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Объяснить устройство и принцип действия однофазного асинхронного двигателя с рабочей и пусковой обмотками на статоре.
2. Как определяются механические потери однофазного асинхронного двигателя по данным опыта холостого хода?
3. Чему равен пусковой момент однофазного асинхронного двигателя при отключенной пусковой обмотке? Почему?
4. Почему по окончании пуска пусковая обмотка должна быть отключена?
5. Построить векторную диаграмму токов рабочей и пусковой обмотки для момента начала пуска.
6. Почему в данной конструкции двигателя не достигается кругового вращающегося поля при пуске?
7. Почему трехфазный асинхронный двигатель с теми же выходными параметрами имеет меньшие габариты, чем однофазный?
8. Почему изменится направление вращения однофазного двигателя, если изменить направление тока при пуске в одной из его обмоток?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ОДНОФАЗНОМ РЕЖИМЕ

**Цель работы** – изучение характеристик трехфазного асинхронного двигателя при питании от однофазной электрической сети.

**Задачи работы:**

1. Ознакомиться с электрическими схемами подключения трехфазного асинхронного двигателя к однофазной сети и приобрести навыки его пуска.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик трехфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме.

### Общие сведения

Если возникает необходимость использовать трехфазный асинхронный двигатель в однофазной сети, его включают по схемам, приведенным на рис. 13.1.

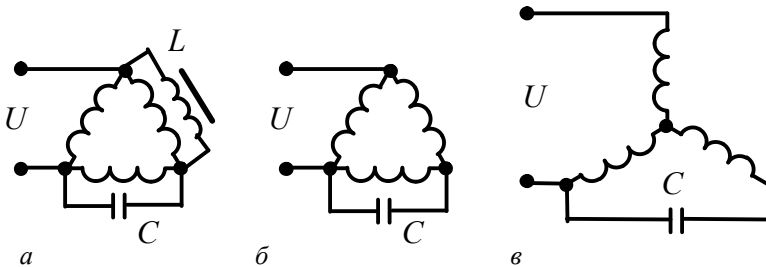


Рис. 13.1. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

Для создания вращающегося магнитного поля двигателя применяются фазосдвигающие элементы.

В двигателе, включенном по схеме, показанной на рис. 13.1, а, при точном подборе емкости и индуктивности создается круговое вращающееся магнитное поле. Это означает, что при расчетной нагрузке двигатель может развить мощность, равную 100 %

от мощности трехфазного. При использовании указанной схемы индуктивность подбирается экспериментально, так, чтобы напряжения на индуктивности и на емкости равнялись напряжению сети  $U_1$ , что вызывает некоторые трудности. Рабочую емкость конденсатора (в мкФ) можно рассчитать по формуле

$$C_p = \frac{4800I_1}{U_1}, \quad (13.1)$$

где  $I_1$  – номинальный (фазный) ток статора, А;

$U_1$  – напряжение однофазной сети, В.

Упрощенно рабочую емкость (в мкФ) можно определить, зная номинальную мощность (кВт) асинхронного двигателя:

$$C_p = 66P_n. \quad (13.2)$$

При использовании схемы, показанной на рис. 13.1, б, можно получить 70 %–80 % мощности трехфазного двигателя. Снижение мощности происходит за счет того, что магнитное поле получается не круговое, а эллиптическое. Емкость конденсатора определяется по формуле (13.1).

Иногда в клеммной коробке имеются только начала обмоток, а концы соединены в «звезду» внутри двигателя. Тогда используют схему, показанную на рис. 13.1, в. Так как значение тока будет в  $\sqrt{3}$  раз меньшим, чем в предыдущей схеме, то мощность будет также в  $\sqrt{3}$  раз меньше и составит 40 %–46 % мощности трехфазного двигателя. Рабочая емкость конденсаторов:

$$C_p = \frac{2800I_1}{U_1}. \quad (13.3)$$

Если пуск электродвигателя происходит при нагрузке на валу, то параллельно рабочему конденсатору необходимо включать пусковой конденсатор. Включается он только на время пуска двигателя

(примерно 2–4 с) до набора номинальной частоты вращения ротора, а затем отключается.

Величина емкости пускового конденсатора выбирается в 2–3 раза больше емкости рабочего конденсатора:

$$C_{\text{пуск}} = (2...3)C_p. \quad (13.4)$$

### Порядок выполнения работы

1. Изучить схемы подключения трехфазного асинхронного двигателя к однофазной сети. Ознакомиться с лабораторной установкой. Записать паспортные данные электродвигателя. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 13.2).

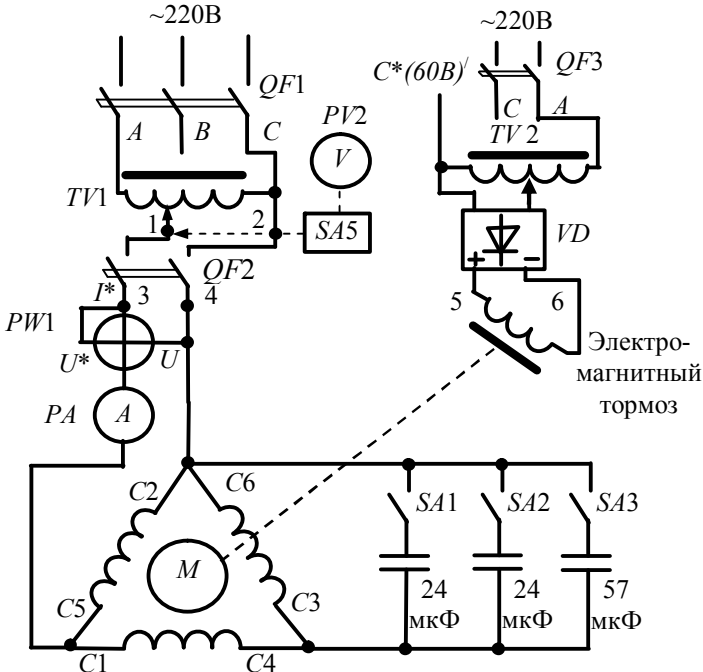


Рис. 13.2. Принципиальная электрическая схема испытания трехфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме

2. Рассчитать рабочую и пусковую емкости, необходимые для испытаний трехфазного двигателя в однофазном режиме.

Для схемы (см. рис. 13.2), по которой подключается исследуемый двигатель к сети, рабочая емкость определяется из выражения

$$C_p = 66P_H,$$

где  $P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт ( $P_H = 0,75$  кВт).

Пусковая емкость:  $C_{\text{пуск}} = (2...3)C_p$ .

3. Произвести пуск двигателя. Перед пуском выключатели  $QF1$ ,  $QF2$ ,  $QF3$  должны находиться в положении «откл.»; регуляторы напряжения  $TV1$  и  $TV2$  – в положении «min» (ручки регуляторов – в крайнем левом положении до упора); переключатель  $SA5$  – в положении  $U_{12}$ ; вольтметр  $PV2$  переключен на диапазон «0–300 В»; переключатели  $SA1$ ,  $SA2$ ,  $SA3$  – в положении «Вкл.».

Запуск двигателя производят в следующей последовательности. Включить  $QF1$  и при помощи регулятора  $TV1$  установить напряжение, подаваемое на двигатель  $U_{1H} = 220$  В. Включив  $QF2$ , запустить двигатель. Через 2–4 с после запуска двигателя отключить пусковую емкость (при помощи  $SA3$ ), оставив только рабочую.

4. Снять характеристики холостого хода двигателя в однофазном режиме  $I_{1X}$ ,  $P_{1X}$ ,  $\cos \varphi_{1X} = f(U_{1X})$  при  $P_2 = 0$ .

С помощью регулятора  $TV1$  изменять напряжение, подводимое к зажимам двигателя, от  $U_{1X} = U_{1H} = 220$  В до  $U_{1X} = (0,3 - 0,4)U_{1H}$ . Снять 5–6 точек, результаты занести в табл. 13.1, после чего лабораторную установку выключить, переведя  $QF1$  и  $QF2$  в положение «Откл.».

Таблица 13.1

Данные опыта холостого хода

Экспериментальные данные			Расчетные данные			
$U_{1X}$ , В	$I_{1X}$ , А	$P_{1X}$ , Вт	$I_{1\Phi X}$ , А	$S_{1X}$ , В·А	$\cos \varphi_{1X}$ , о. е.	$U_{1X}^2$ , В <sup>2</sup>

Используя экспериментальные данные, сделать расчеты, пользуясь выражениями:

$$I_{1\phi X} = \frac{I_{1X}}{\sqrt{3}}; S_{1X} = 3U_{1X}I_{1\phi X}; \cos\varphi_{1X} = \frac{P_{1X}}{S_{1X}}.$$

По данным опыта холостого хода построить характеристики  $I_{1X}$ ,  $P_{1X}$ ,  $\cos\varphi_{1X} = f(U_{1X})$ .

Построить зависимость  $P_{1X} = f(U_{1X}^2)$  и, пользуясь методом разделения потерь, описанном в лабораторной работе № 12, определить потери механические  $P_{\text{МЕХ}}$  и потери в стали  $P_{\text{СТ}}$  двигателя при напряжении  $U_{1X} = U_{1Н} = 220$  В. Расчетное сопротивление фазы обмотки статора принять равным  $R_1 = 10,6$  Ом.

5. Снять рабочие характеристики  $I_{1\phi}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\cos\varphi_1$ ,  $s$ ,  $\eta = f(M)$ .

Запуск двигателя производить по методике, описанной в п. 1.

После запуска двигателя включить  $QF3$ . Регулируя напряжение питания катушки электромагнитного тормоза при помощи регулятора  $TV2$ , нагружать двигатель от холостого хода (регулятор  $TV2$  – в положение «min») до тех пор, пока ток двигателя не станет равен  $(1,0 - 1,2)I_{1Н}$ . Напряжение  $U_1$  на зажимах двигателя поддерживать неизменным (220 В) при помощи регулятора  $TV1$ . Снять данные с 5–6 точек. Частоту вращения ротора  $n_2$  измерять с помощью переносного цифрового тахометра, который подключается к разъему на клемной колодке двигателя.

Результаты измерений занести в табл. 13.2, после чего лабораторную установку отключить в следующей последовательности: регулятор  $TV2$  установить в положение «min», отключить  $QF3$ , отключить  $QF1$  и  $QF2$ .

Таблица 13.2

Рабочие характеристики электродвигателя

Экспериментальные данные					
$U_1$ , В	$I_{1Л}$ , А	$P_1$ , Вт	$M$ , Н·м	$n_2$ , мин <sup>-1</sup>	$n_1$ , мин <sup>-1</sup>

Расчетные данные													
$I_{1\Phi}$ , А	$S_1$ , В·А	$\cos\varphi_1$ , о. е.	$P_{\Sigma 1}$ , Вт	$P_{\Sigma 1} + P_{\text{СТ}}$ , Вт	$P_{\text{ЭМ}}$ , Вт	$s$ , о. е.	$P_{\Sigma 2}$ , Вт	$P_{\text{Д}}$ , Вт	$\Sigma P$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$ , о. е.	$P_2'$ , Вт	

Используя экспериментальные данные, сделать расчеты.

$$\text{Фазный ток: } I_{1\Phi} = \frac{I_{1\Delta}}{\sqrt{3}}.$$

$$\text{Полная мощность: } S_1 = 3U_1 I_{1\Phi}.$$

$$\text{Коэффициент мощности: } \cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}.$$

$$\text{Потери в обмотке статора: } P_{\Sigma 1} = 3I_{1\Phi}^2 R_1,$$

где  $R_1$  – расчетное сопротивление фазы статора ( $R_1 = 10,6$  Ом).

Потери в стали при  $U_1 = U_{1\text{н}} = 220$  В и механические определены методом разделения потерь по результатам опыта холостого хода.

$$\text{Электромагнитная мощность: } P_{\text{ЭМ}} = P_1 - (P_{\Sigma 1} + P_{\text{СТ}}).$$

$$\text{Скольжение: } s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

$$\text{Потери в обмотке ротора: } P_{\Sigma 2} = P_{\text{ЭМ}} s.$$

$$\text{Добавочные потери: } P_{\text{Д}} = 0,005 P_1.$$

$$\text{Суммарные потери: } \Sigma P = P_{\Sigma 1} + P_{\text{СТ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{Д}}.$$

$$\text{Полезная мощность: } P_2 = P_1 - \Sigma P.$$

$$\text{Коэффициент полезного действия: } \eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

$$\text{Полезная мощность, рассчитанная через момент: } P_2' = \frac{Mn_2}{9,55}.$$

При правильно снятых и обработанных данных  $P_2$  должна отличаться от  $P_2'$  не более чем на 10 %.

Результаты расчетов занести в табл. 13.2.

По данным табл. 13.2 построить рабочие характеристики двигателя  $I_{1\phi}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $s$ ,  $\eta = f(M)$ .

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. Какую роль выполняет емкость в однофазном режиме трехфазного асинхронного двигателя?
2. Почему при пуске требуется большая емкость, чем при рабочем режиме?
3. Чем объяснить снижение полезной мощности двигателя в однофазном режиме по сравнению с трехфазным режимом?
4. С какими, схемами, кроме исследованной схемы, однофазного включения двигателя вы знакомы?
5. Как определяются механические потери двигателя  $P_{\text{мех}}$ ?
6. Как определяются потери в стали двигателя  $P_{\text{ст}}$ ?
7. Как определяются потери в обмотке ротора  $P_{\text{э2}}$ ?
8. Как изменить направление вращения двигателя в однофазном режиме?
9. Можно ли в исследуемой схеме получить круговое вращающееся поле?

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПУСКА ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

**Цель работы** – исследование способов пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

### **Задачи работы:**

1. Изучить пусковые свойства и способы пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем, выполнении пуска и снятии характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

### **Общие сведения**

Пуск асинхронного двигателя сопровождается процессом перехода ротора и механически соединенного с ним исполнительного механизма из неподвижного состояния в состояние равномерного вращения.

В момент пуска асинхронного двигателя частота вращения его ротора  $n_2 = 0$ , а скольжение  $s = 1$ . Основными показателями, характеризующими пусковые свойства асинхронных двигателей, являются пусковой момент  $M_n$  и пусковой ток  $I_n$ :

$$M_n = \frac{m U_1^2 r'_2 p}{2 \pi f_1 \left[ (r_1 + c r'_2)^2 + (x_1 + c x'_2)^2 \right]}, \quad (14.1)$$

$$I_n = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + c r'_2)^2 + (x_1 + c x'_2)^2}}. \quad (14.2)$$

Для серийно выпускаемых асинхронных двигателей в справочниках приводятся кратности этих величин  $\frac{M_n}{M_H} = K_{пм}$ ;  $\frac{I_n}{I_H} = K_{пI}$ .

Для успешного пуска должны выполняться условия:

1. Пусковой момент был больше момента сопротивления рабочей машины  $M_{\text{п}} > M_{\text{с}}$ .

2. Пусковой ток  $I_{\text{п}}$  не должен превышать допустимое значение  $I_{\text{п}} > I_{\text{доп}}$ .

Допустимое значение пускового тока определяется величиной вызываемого им падения напряжения в питающей электрической сети (допускается не более 15 %). Снижение напряжения отрицательно сказывается на работе других потребителей электроэнергии. Пусковой ток в несколько раз больше номинального и при прохождении по обмоткам самого двигателя вызывает значительные динамические усилия и их нагрев.

Чем больше превышение пускового момента двигателя над моментом сопротивления, тем легче будет пуск. Поэтому для асинхронных двигателей стремятся сделать пусковой момент как можно большим, а пусковой ток – как можно меньшим.

Кроме пускового момента и пускового тока, важны еще и такие показатели, как продолжительность пуска, плавность пуска, сложность пусковой операции и ее экономичность (стоимость и надежность пусковой аппаратуры и потерь энергии в ней).

Применяется прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и специальные методы пуска.

**Прямой пуск.** Это самый простой и самый дешевый способ пуска. При прямом пуске двигатель подключается к сети без дополнительных пусковых устройств (рис. 14.1, а).

В качестве выключателя  $Q$  чаще всего используют магнитный пускатель. Двигатель разгоняется по естественной механической характеристике от точки соответствующей моменту пуска при  $M_{\text{п}}$  и  $s = 1$  (рис. 14.1, б), до точки, соответствующей номинальному режиму ( $M_{\text{н}}$  при  $s = s_{\text{н}}$ ). Ток двигателя при этом уменьшается от пускового  $I_{\text{п}}$  до номинального значения  $I_{\text{н}}$ .

Недостатки прямого пуска — относительно небольшой пусковой момент и большой пусковой ток. Но благодаря своей простоте такой способ является одним из основных для пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, а все двигатели малой и средней мощности спроектированы на прямой пуск. Пусковой момент их составляет 100 %–130 % от номинального, а пусковой ток превышает номинальный в 4–7 раз. Длительность пуска составляет от доли секунд у двигателей небольшой мощности

до нескольких секунд у более мощных двигателей. Обмотки двигателей при этом не успевают перегреться, а крепления обмоток рассчитаны на динамические усилия, возникающие при пуске.

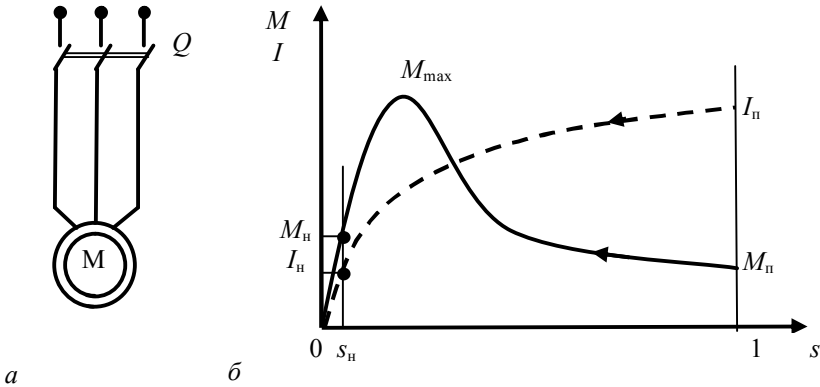


Рис. 14.1. Прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:  
*a* – схема пуска; *б* – изменение тока и момента при пуске

Если мощность двигателя соизмерима с мощностью силового трансформатора, пусковой ток может вызвать такое падение напряжения в сети, что двигатель не сможет запуститься, а рядом работающий двигатель может остановиться. Поэтому при проектировании электроснабжения необходимо делать проверку сети на запуск наиболее мощного двигателя. Если она покажет, что двигатель не запускается или вызывает при пуске недопустимое снижение напряжения, необходимо увеличить мощность сети или применять специальные способы пуска: частотный пуск, пуск при пониженном напряжении.

**Частотный пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.** Способ может применяться для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Обмотка статора двигателя подключается к электрической сети через управляемый полупроводниковый преобразователь частоты ПЧ (рис. 14.2).

При плавном увеличении частоты тока на выходе преобразователя от  $f_2 = 0$  до частоты питающей сети  $f_2 = f_1$  также плавно увеличивается частота вращения магнитного поля двигателя  $n_1 = \frac{60f_2}{p}$ ,

увлекая за собой ротор. Происходит плавный разгон двигателя, практически без броска пускового тока.

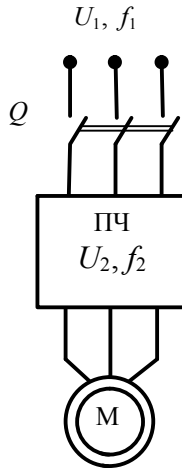


Рис. 14.2. Схема частотного пуска асинхронного двигателя

При частотном пуске одновременно с изменением частоты тока одновременно приходится изменять по определенному закону и напряжение  $U_2$  на выходе ПЧ для получения требуемых механических характеристик асинхронного двигателя. Например, при необходимости обеспечивать в процессе пуска неизменным максимальный момент  $M_{\max} = \text{const}$  напряжение изменяют пропорционально его частоте  $\frac{U_2}{f_2} = \text{const}$ . Могут применяться и другие

законы регулирования.

Этот же преобразователь частоты используется при работе двигателя для регулирования его частоты вращения.

Достоинства способа – плавный пуск практически без броска пускового, экономичность. Недостаток – высокая стоимость преобразователя частоты.

**Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении.** Пуск при пониженном напряжении применяют для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой и средней мощности, когда прямой пуск недопустим

из-за большого падения напряжения, вызываемого пусковым током в питающей электрической сети. Такой пуск должен осуществляться на холостом ходу или с малым первоначальным моментом сопротивления рабочей машины.

Для уменьшения пускового тока используют следующие способы снижения напряжения, подаваемого на двигатель:

- переключение со «звезды» на «треугольник»;
- пуск через реактор;
- пуск через понижающий автотрансформатор.

Схема пуска переключением со «звезды» на «треугольник» приведена на рис. 14.3, а.

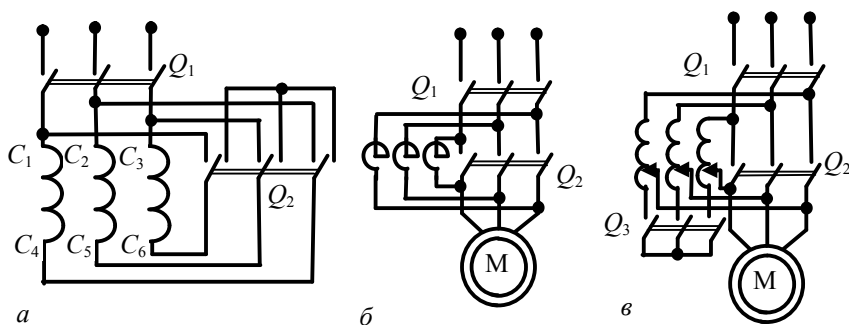


Рис. 14.3. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении:

- а – переключением со «звезды» на «треугольник»; б – через реактор;  
в – с помощью автотрансформатора

При пуске напряжение подается на «звезду» (правое положение переключателя  $Q_2$ ). По мере разгона переключатель срабатывает, переходит в левое положение, и двигатель работает со схемой соединения обмоток статора «треугольник». Это является недостатком, так как линейное напряжение сети, равное 400 В, требует схемы «звезда» для большинства асинхронных двигателей. Переключение со «звезды» на «треугольник» дает возможность снизить пусковой ток в сети в три раза.

При пуске через реактор (рис. 14.3, б) в первый момент выключатель  $Q_2$  разомкнут, и пусковой ток идет через реактор. Из-за падения напряжения в реакторе напряжение на двигателе

уменьшается. После разгона двигателя выключатель  $Q_2$  замыкается, тем самым шунтируя реакторы.

Пусковой ток линии  $I_{\text{пл}}$  уменьшается пропорционально отношению напряжений:

$$I_{\text{пл}} = I_{\text{пн}} \cdot \frac{U_1}{U_{1\text{н}}}, \quad (14.3)$$

где  $I_{\text{пн}}$  – пусковой ток двигателя при номинальном напряжении, А;  
 $U_1$  – напряжение на двигателе, В;  
 $U_{1\text{н}}$  – номинальное напряжение, В.

Пуск через автотрансформатор (рис. 14.3, в) осуществляется при разомкнутом выключателе  $Q_2$  и замкнутых  $Q_1$  и  $Q_3$ . При этом на двигатель подается напряжение через понижающий автотрансформатор. После разгона двигателя выключатель  $Q_3$  размыкается, а  $Q_2$  – замыкается.

Пусковой ток в линии уменьшается пропорционально квадрату отношения напряжений:

$$I_{\text{пл}} = I_{\text{пн}} \left( \frac{U_{2\text{а}}}{U_{1\text{н}}} \right)^2. \quad (14.4)$$

Недостатком всех способов пуска при пониженном напряжении является то, что одновременно с уменьшением пускового тока происходит и уменьшение пускового момента пропорционально квадрату питающего напряжения. Предположим, что с помощью реактора или понижающего автотрансформатора подаваемое на двигатель напряжение снизилось на 40 %. Пусковой момент будет снижен на 64 %. При пуске через реактор ток будет снижен на 40 %, а через автотрансформатор — на 64 %, поэтому пуск через автотрансформатор предпочтительнее, чем через реактор, однако он дороже.

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить пусковые свойства и способы пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

2. Ознакомиться с лабораторной установкой. Записать паспортные данные исследуемой машины. Собрать схему для проведения экспериментов на стенде НТЦ-23, согласно рис. 14.4.

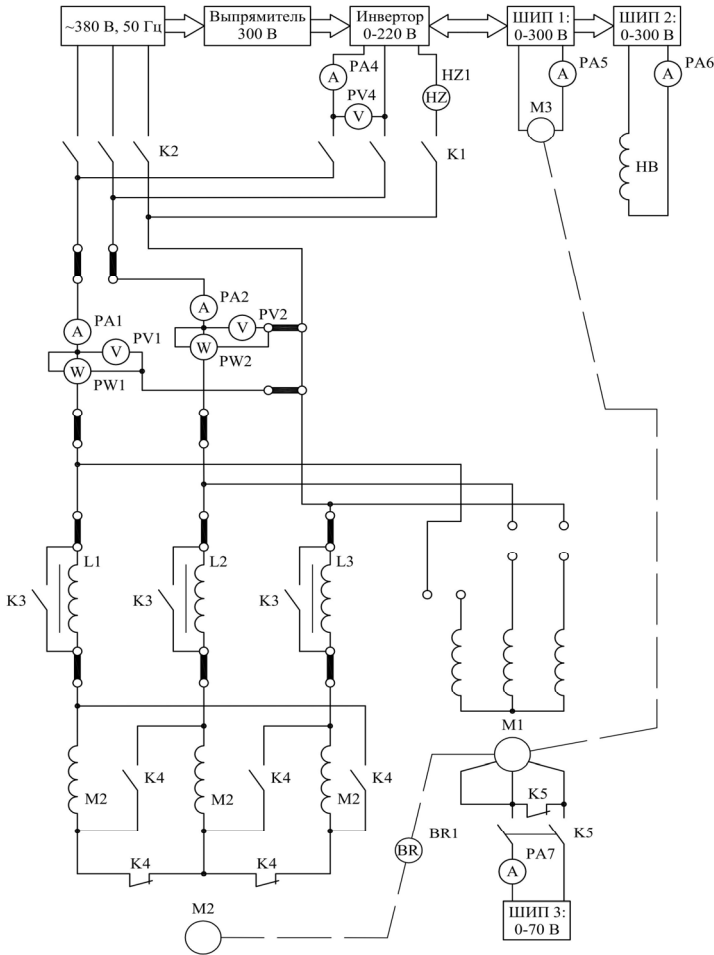


Рис. 14.4. Схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в различных режимах

Из-за наличия фильтров индикации, показания приборов носят приближенный характер и не позволяют сопоставить значения токов

при различных пусках. Поэтому измерение пусковых токов осуществляется при **заторможенном роторе** асинхронного двигателя (машина  $M2$ ).

**ВНИМАНИЕ!** *Пусковой ток двигателя  $M2$  намного больше номинального тока, поэтому снимать показания приборов следует по возможности быстро, не допуская чрезмерного перегрева двигателя.*

**3. Исследовать прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки статора треугольником.**

Опыт проводить в следующей последовательности:

- 1) включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- 2) включить выключатель  $SA1$ ;
- 3) для включения обмотки статора по схеме «треугольник» установить переключатель  $SA3$  в положение «Включено»;
- 4) включить шунты переключателем  $SA2$ ;
- 5) установить режим работы Инвертора:
  - независимое управление – положение «Включено»;
  - установить выключатель  $SA30 PV1/PW1$  в положение « $PW1$ »;
  - установить выключатель  $SA31 PV2/PW2$  в положение « $PV2$ »;
  - установить выключатель  $SA32 PV3/\phi$  в положение « $PV3$ »;
  - с помощью регулятора  $RP4$  «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 50$  Гц (контролировать по прибору  $HZ1$ );
  - с помощью регулятора  $RP5$  «Задание напряжения» инвертора установить значение напряжения  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
- 6) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку  $SB1$ ;
- 7) при помощи регулятора «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1 = 220$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
- 8) прогреть асинхронный двигатель в течение **5** минут;
- 9) при помощи регулятора «Задание напряжения» плавно установить напряжение  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
- 10) отключить исследуемый двигатель от выхода Инвертора, нажав кнопку  $SB2$ ;
- 11) чтобы ротор двигателя  $M2$  не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину  $M3$ , которая работает в генераторном режиме.

Для этого необходимо:

- установить выключатель SA25 ШИП2 в положение «Включено»;
- SA20 – положение «НВ» (независимое возбуждение);
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины M3  $I_B = 0,4$  А (контролировать по амперметру PA6);

12) установить режим работы ШИП1:

- SA20 – положение «Включить замкнутую СУ»;
- SA21 – положение «Задание скорости»;
- SA22 – положение «Генераторный режим».

Включить ШИП1 (SA23) и с помощью регулятора RP1 «Задание», ШИП1, установить значение частоты вращения ротора равное нулю (контролировать по прибору BR1).

13) при помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре АД до номинального значения  $U_1 = 220$  В (контролировать по вольтметру PV4);

14) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1;

15) измерить амперметром PA5 ток в якорной цепи нагрузочного двигателя M3, пусковой ток и напряжение исследуемого двигателя;

16) отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2.

Опыт повторить 5 раз, и полученные данные занести в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Данные исследования прямого пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки статора треугольником

№	Измерено			Вычислено					
	$I_{я,дпт}$ А	$I_{п}$ А	$U_{1п}$ В	$U_{Iфп}$ В	$I_{Iфп}$ А	$I_{Iфспр}$ А	$I_{Iфспр}/I_{Iфп}$	$\frac{M_{п}}{H \cdot M}$	$M_{п}/M_{н}$
1									
2									
3									
4									
5									

Завершив эксперимент, необходимо:

- выключить ШИП1 – тумблер SA23 в положение «Выкл.»;

- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору *PV4*);
- с помощью регулятора *RP3* «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины *M3* равное нулю (контролировать по амперметру *PA6*);
- установить выключатель *SA25* ШИП2 в положение «Выкл.»;
- выключить выключатель *SA1*;
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

Определить фазные значения напряжения и тока асинхронного двигателя:

– при соединении в «звезду»:  $U_{1\Phi\Pi} = \frac{U_{1\Pi}}{\sqrt{3}}; I_{1\Phi\Pi} = I_{1\Pi}$ ;

– при соединении в треугольник:  $U_{1\Phi\Pi} = U_{1\Pi}; I_{1\Phi\Pi} = \frac{I_{1\Pi}}{\sqrt{3}}$ .

Среднее значение пускового тока:

$$I_{1\Phi\Pi\text{CP}} = \frac{I_{1\Phi\Pi1} + I_{1\Phi\Pi2} + I_{1\Phi\Pi3} + I_{1\Phi\Pi4} + I_{1\Phi\Pi5}}{5}.$$

Пусковой момент асинхронного двигателя считать равным электромагнитному моменту тормозного ДПТ:

$$M_{\Pi} = M_{\text{дпт}} = I_{\text{я.дпт}} \cdot C_M \cdot \Phi, \text{ где } C_M \cdot \Phi = \frac{9,55 \cdot U_{\text{н.дпт}}}{n_{\text{н.дпт}}}.$$

Номинальный момент асинхронного двигателя:

$$M_{\text{н}} = \frac{9,55 P_{2\text{н}}}{n_{2\text{н}}},$$

где  $P_{2\text{н}}$  – номинальная мощность асинхронного двигателя, Вт;

$n_{2\text{н}}$  – номинальная частота вращения ротора асинхронного двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ .

По результатам измерений рассчитать кратности пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

#### **4. Исследовать прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки статора «звездой».**

Опыт проводить в следующей последовательности:

- 1) включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- 2) включить выключатель  $SA1$ ;
- 3) для включения обмотки статора по схеме «звезда» установить переключатель  $SA3$  в положение «Выкл.»;
- 4) включить шунты переключателем  $SA2$ ;
- 5) установить режим работы Инвертора:
  - независимое управление – положение «Вкл.»;
  - установить выключатель  $SA30 PV1/PW1$  в положение « $PW1$ »;
  - установить выключатель  $SA31 PV2/PW2$  в положение « $PV2$ »;
  - установить выключатель  $SA32 PV3/\phi$  в положение « $PV3$ »;
  - с помощью регулятора  $RP4$  «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 50$  Гц (контролировать по прибору  $HZ1$ );
  - с помощью регулятора  $RP5$  «Задание напряжения» Инвертора установить значение напряжения  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
- 6) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку  $SB1$ ;
- 7) при помощи регулятора «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения;  
 $U_1 = 220$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
- 8) прогреть асинхронный двигатель в течение 5 минут;
- 9) при помощи регулятора «Задание напряжения» плавно установить напряжение  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
- 10) отключить исследуемый двигатель от выхода Инвертора, нажав кнопку  $SB2$ ;
- 11) чтобы ротор двигателя  $M2$  не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину  $M3$ , которая работает в генераторном режиме.

Для этого необходимо:

- установить выключатель  $SA25$  ШИП2 в положение «Включено»;

– SA20 – положение «НВ» (независимое возбуждение);  
 – с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины M3  $I_{\text{в}} = 0,4$  А (контролировать по амперметру PA6);

12) установить режим работы ШИП1:

- SA20 – положение «Включить замкнутую СУ»;
- SA21 – положение «Задание скорости»;
- SA22 – положение «Генераторный режим».

Включить ШИП1 (SA23) и с помощью регулятора RP1 «Задание», ШИП1, установить значение частоты вращения ротора равное нулю (контролировать по прибору BR1).

13) при помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре АД до номинального значения  $U_1 = 220$  В (контролировать по вольтметру PV4);

14) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1;

15) измерить амперметром PA5 ток в якорной цепи нагрузочного двигателя M3, пусковой ток и напряжение исследуемого двигателя;

16) отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2.

Опыт повторить 5 раз и полученные данные занести в табл. 14.2.

Таблица 14.2

Данные исследования прямого пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки статора «звездой»

№	Измерено			Вычислено					
	$I_{\text{я, дпт}}$ А	$I_{1\text{п}}$ А	$U_{1\text{п}}$ В	$U_{I\text{фп}}$ В	$I_{I\text{фп}}$ А	$I_{I\text{фпспр}}$ А	$I_{I\text{фпспр}}/I_{I\text{фп}}$	$M_{\text{п}}$ Н·м	$M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$
1									
2									
3									
4									
5									

Завершив эксперимент, необходимо:

- выключить ШИП1 – тумблер SA23 в положение «Выкл.»;
- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);

– с помощью регулятора *RP3* «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины *M3* равное нулю (контролировать по амперметру *PA6*);

– установить выключатель *SA25* ШИП2 в положение «Выключено»;

– выключить выключатель *SA1*;

– выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений рассчитать кратности пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

### **5. Исследовать реакторный пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.**

Опыт проводить в следующей последовательности:

1) включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;

2) включить выключатель *SA1*;

3) для включения обмотки статора по схеме «треугольник» установить переключатель *SA3* в положение «Включено»;

4) включить шунты переключателем *SA2*;

5) установить режим работы Инвертора:

– независимое управление – положение «Включено»;

– установить выключатель *SA30 PV1/PW1* в положение «*PW1*»;

– установить выключатель *SA31 PV2/PW2* в положение «*PV2*»;

– установить выключатель *SA32 PV3/φ* в положение «*PV3*»;

– с помощью регулятора *RP4* «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 50$  Гц (контролировать по прибору *HZ1*);

– с помощью регулятора *RP5* «Задание напряжения» инвертора установить значение напряжения  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру *PV4*);

6) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку *SB1*;

7) при помощи регулятора «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1 = 220$  В (контролировать по вольтметру *PV4*);

8) прогреть асинхронный двигатель в течение 5 минут;

9) при помощи регулятора «Задание напряжения» плавно установить напряжение  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру *PV4*);

10) отключить исследуемый двигатель от выхода Инвертора, нажав кнопку *SB2*;

11) чтобы ротор двигателя  $M2$  не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину  $M3$ , которая работает в генераторном режиме.

Для этого необходимо:

– установить выключатель  $SA25$  ШИП2 в положение «Включено»;

–  $SA20$  – положение «НВ» (независимое возбуждение);

– с помощью регулятора  $RP3$  «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины  $M3$   $I_{в} = 0,4$  А (контролировать по амперметру  $PA6$ );

12) установить режим работы ШИП1:

–  $SA20$  – положение «Включить замкнутую СУ»;

–  $SA21$  – положение «Задание скорости»;

–  $SA22$  – положение «Генераторный режим».

Включить ШИП1 ( $SA23$ ) и с помощью регулятора  $RP1$  «Задание», ШИП1, установить значение частоты вращения ротора равное нулю (контролировать по прибору  $BR1$ ).

13) при помощи регулятора  $RP5$  «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре АД до номинального значения  $U_1 = 220$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );

14) для включения реакторов в цепь статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором установить переключатель  $SA2$  в положение «Выключено».

***ВНИМАНИЕ! Реакторы рассчитаны на кратковременное включение. Поэтому пуск двигателя следует проводить не более 10 секунд. Повторный пуск следует проводить не раньше, чем через 30 секунд. Количество пусков – не более пяти. Повтор серии измерений – через 5 минут.***

15) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку  $SB1$ ;

15) измерить амперметром  $PA5$  ток в якорной цепи нагрузочного двигателя  $M3$ , пусковой ток и напряжение исследуемого двигателя;

16) отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку  $SB2$ .

Опыт повторить 5 раз и полученные данные занести в табл. 14.3.

Данные исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при реакторном пуске

№	Измерено			Вычислено					
	$I_{я,длт}$ А	$I_{1п}$ А	$U_{1п}$ В	$U_{1фп}$ В	$I_{1фп}$ А	$I_{1фспр}$ А	$I_{1фспр}/I_{1фн}$	$\frac{M_{п}}{H \cdot M}$	$M_{п}/M_{н}$
1									
2									
3									
4									
5									

Завершив эксперимент, необходимо:

- выключить ШИП1 – тумблер SA23 в положение «Выкл.»;
- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины M3 равное нулю (контролировать по амперметру PA6);
- установить выключатель SA25 ШИП2 в положение «Выкл.»;
- выключить выключатель SA1;
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений рассчитать кратности пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

#### **6. Исследование пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменении напряжения.**

Опыт проводить в следующей последовательности:

- 1) включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- 2) включить выключатель SA1;
- 3) для включения обмотки статора по схеме «треугольник» установить переключатель SA3 в положение «Вкл.»;
- 4) включить шунты переключателем SA2;
- 5) установить режим работы Инвертора:
  - независимое управление – положение «Включено»;
  - установить выключатель SA30 PV1/PW1 в положение «PW1»;
  - установить выключатель SA31 PV2/PW2 в положение «PV2»;
  - установить выключатель SA32 PV3/φ в положение «PV3»;

- с помощью регулятора  $RP4$  «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 50$  Гц (контролировать по прибору  $HZ1$ );
  - с помощью регулятора  $RP5$  «Задание напряжения» Инвертора установить значение напряжения  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
  - б) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку  $SB1$ ;
  - 7) при помощи регулятора «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1 = 220$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
  - 8) прогреть асинхронный двигатель в течение 5 минут;
  - 9) при помощи регулятора «Задание напряжения» плавно установить напряжение  $U_1 = 0$  В (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
  - 10) отключить исследуемый двигатель от выхода Инвертора, нажав кнопку  $SB2$ ;
  - 11) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку  $SB1$ ;
  - 12) при помощи регулятора  $RP4$  «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре АД до момента пуска (контролировать по вольтметру  $PV4$ );
  - 14) измерить ток в якорной цепи нагрузочного двигателя  $M3$ , пусковой ток и напряжение исследуемого двигателя;
  - 15) отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку  $SB2$ .
- Опыт повторить 5 раз, и полученные данные занести в табл. 14.4.

Таблица 14.4

Данные исследования пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменении напряжения

№	Измерено			Вычислено					
	$I_{я.дпт}$ А	$I_{п}$ А	$U_{п}$ В	$U_{I_{фп}}$ В	$I_{I_{фп}}$ А	$I_{I_{фспр}}$ А	$I_{I_{фспр}}/I_{I_{фп}}$	$M_{п}$ Н·м	$M_{п}/M_{н}$
1									
2									
3									
4									
5									

Завершив эксперимент, необходимо:

- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору *PV4*);
- выключить выключатель *SA1*;
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений рассчитать кратности пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

### **7. Исследовать частотный пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.**

Опыт проводить в следующей последовательности:

- 1) включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- 2) включить выключатель *SA1*;
- 3) для включения обмотки статора по схеме «треугольник» установить переключатель *SA3* в положение «Включено»;
- 4) включить шунты переключателем *SA2*;
- 5) установить режим работы Инвертора:
  - независимое управление – положение «Выключено» ( $U/f = \text{const}$ );
  - установить выключатель *SA30 PV1/PW1* в положение «*PW1*»;
  - установить выключатель *SA31 PV2/PW2* в положение «*PV2*»;
  - установить выключатель *SA32 PV3/φ* в положение «*PV3*»;
  - с помощью регулятора *RP4* «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 0$  Гц (контролировать по прибору *HZ1*);
- 6) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку *SB1*.
- 7) при помощи регулятора *RP4* «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 50$  Гц (контролировать по прибору *HZ1*);
- 8) прогреть асинхронный двигатель в течение 5 минут;
- 9) при помощи регулятора *RP4* «Задание частоты» установить значение частоты  $f = 0$  Гц (контролировать по прибору *HZ1*);
- 10) отключить исследуемый двигатель от выхода Инвертора, нажав кнопку *SB2*;
- 11) чтобы ротор двигателя *M2* не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину *M3*, которая работает в генераторном режиме.

Для этого необходимо:

- установить выключатель *SA25 ШИП2* в положение «Вкл.»;
- *SA20* – положение «НВ» (независимое возбуждение);

– с помощью регулятора  $RP3$  «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины  $M3$   $I_b = 0,4$  А (контролировать по амперметру  $PA6$ );

12) установить режим работы ШИП1:

–  $SA20$  – положение «Включить замкнутую СУ»;

–  $SA21$  – положение «Задание скорости»;

–  $SA22$  – положение «Генераторный режим».

Включить ШИП1 ( $SA23$ ) и с помощью регулятора  $RP1$  «Задание», ШИП1, установить значение частоты вращения ротора равное нулю (контролировать по прибору  $BR1$ );

14) подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку  $SB1$ ;

15) при помощи регулятора  $RP4$  «Задание частоты» плавно увеличить частоту на статоре асинхронного двигателя до момента пуска (контролировать по прибору  $HZ1$ );

16) измерить ток в якорной цепи нагрузочного двигателя  $M3$ , пусковой ток и напряжение исследуемого двигателя;

17) отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку  $SB2$ .

Опыт повторить 5 раз, и полученные данные занести в таблицу 14.5.

Таблица 14.5

Данные исследования пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при постоянном моменте

№	Измерено				Вычислено					
	$I_{я,длт}$ А	$I_{1п}$ А	$U_{1п}$ В	$f_1$ Гц	$U_{1фп}$ В	$I_{1фп}$ А	$I_{1фспр}$ А	$I_{1фспр}/I_{1фп}$	$M_{п}$ Н·м	$M_{п}/M_{н}$
1										
2										
3										
4										
5										

Завершив эксперимент, необходимо:

– выключить ШИП1 – тумблер  $SA23$  в положение «Выкл.»;

– с помощью регулятора  $RP3$  «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины  $M3$  равное нулю (контролировать по амперметру  $PA6$ );

– установить выключатель  $SA25$  ШИП2 в положение «Выкл.»;

- выключить выключатель  $S_{A1}$ .
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений рассчитать кратности пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

### **Содержание отчета**

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Какими показателями характеризуются пусковые свойства асинхронных двигателей?
2. Как лучше, с точки зрения улучшения пусковых свойств, уменьшить пусковой ток: снижением подводимого к двигателю напряжения или увеличением активного сопротивления в цепи обмотки ротора?
3. Каковы достоинства и недостатки пуска асинхронных двигателей непосредственным включением в сеть?
4. Какие существуют способы пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении?
5. Почему при частотном пуске одновременно с частотой тока необходимо изменять напряжение?
6. На чем основаны методы уменьшения пускового тока асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором?
7. Каков общий недостаток методов пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении?
8. Насколько уменьшается пусковой ток асинхронного двигателя при его пуске методом переключения обмотки статора со «звезды» на «треугольник»? Как при этом изменяется пусковой момент?
9. Какова зависимость пускового момента асинхронного двигателя от напряжения, подводимого к обмотке статора?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Цель работы** – исследование характеристик синхронного генератора при автономной работе.

**Задачи работы:**

1. Изучить конструкцию и принцип работы трехфазного синхронного генератора.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристики синхронного генератора при автономной работе.

### Общие сведения

*Синхронной машиной* называется электрическая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля ( $n_2 = n_1$ ). Синхронные машины применяются в качестве генераторов, двигателей и компенсаторов реактивной мощности.

Синхронные генераторы составляют основу электроэнергетики и являются основным типом генераторов переменного тока. Их единичная мощность может составлять сотни тысяч киловатт – это самые мощные электрические машины в мире. По типу исполнения синхронные генераторы разделяют на турбогенераторы (первичный двигатель или источник механической энергии – паровая или газовая турбина), гидрогенераторы (первичный двигатель – гидротурбина), общего исполнения, специальной конструкции (автомобильные, судовые, авиационные и т. д.).

Синхронная машина имеет неподвижную часть – *статор* и вращающуюся часть – *ротор*. Синхронные машины бывают *прямого и обращенного исполнения*. При прямом исполнении обмотка переменного тока расположена на статоре, и он является *якорем*, а обмотка возбуждения – на роторе, и он является *индуктором*. При обращенном исполнении – наоборот. Прямое исполнение является основным, обращенное – применяется редко для машин небольшой мощности (до 5 кВт).

Статор (якорь) машины прямого исполнения по конструкции аналогичен статору асинхронной машины и содержит корпус с подшипниковыми щитами, сердечник якоря, обмотку якоря, щеточный аппарат и другие вспомогательные элементы.

Ротор (индуктор) содержит вал, который опирается на подшипники. На валу расположены магнитопровод ротора и обмотка возбуждения. Она имеет такое же число полюсов, как и обмотка якоря. Обмотка возбуждения питается постоянным током через контактные кольца и щеточный аппарат от системы возбуждения. Ротор бывает явнополюсной и неявнополюсной конструкции.

*Явнополюсная* конструкция применяется в генераторах и двигателях при частоте вращения ротора  $n_2 \leq 1500 \text{ мин}^{-1}$  (или  $2p \geq 4$  для частоты тока 50 Гц). Явнополюсный ротор включает в себя стальной вал 1 (рис. 15.1).

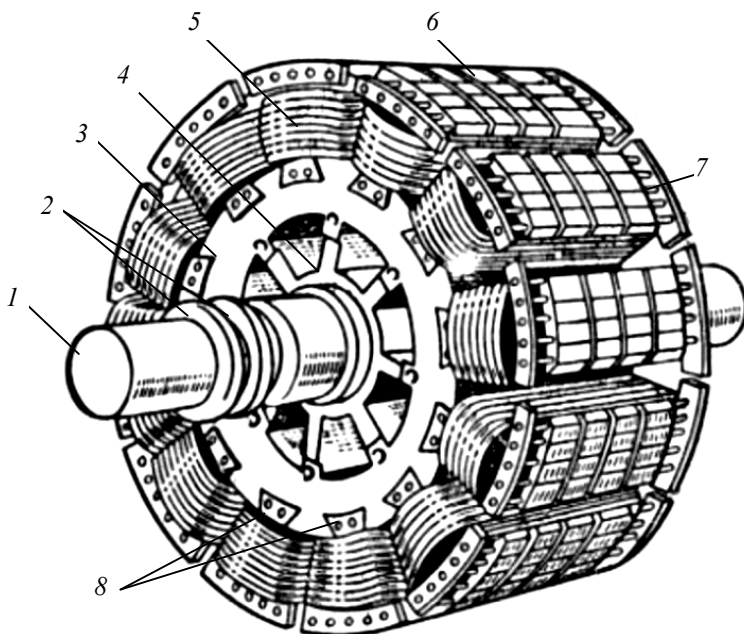


Рис. 15.1. Явнополюсный ротор синхронной машины:

1 – вал; 2 – контактные кольца; 3 – обод ротора; 4 – осто́в ротора;

5 – катушка обмотки возбуждения; 6 – полюсный сердечник;

7 – демпферная (пусковая обмотка); 8 – хвостовики полюсных сердечников

На валу крепится остов ротора 4, а к нему – обод ротора 3. У машин небольшой мощности обод может устанавливаться прямо на вал. Обод ротора (или крестовина) выполняется литым или шихтованным из листов стали толщиной 2–6 мм, которые стягиваются шпильками. К ободу с помощью хвостовых соединений (хвостовиков) 8 крепятся сердечники полюсов 6, которые шихтуются из листов конструкционной стали толщиной 1–2 мм и стягиваются с помощью шпилек. Наконечники полюсных сердечников имеют выступы для крепления обмотки возбуждения. На каждом полюсном сердечнике устанавливаются катушки обмотки возбуждения 5. Катушки изолированы от сердечника и выполняются из медного обмоточного провода круглого или прямоугольного сечения в один-два слоя. Витки обмотки возбуждения равномерно распределяются между катушками всех полюсов. В пазах на внешней поверхности полюсных наконечников расположена демпферная обмотка 7, которая обеспечивает быстрое затухание колебаний ротора, возникающих в переходных режимах работы синхронной машины. У синхронных двигателей она используется при пуске и называется пусковой обмоткой. По конструкции демпферная обмотка аналогична короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного двигателя, но выполняется из материала с повышенным удельным электрическим сопротивлением (латуни).

*Неявнополюсная* конструкция ротора применяется в двух- и четырехполюсных турбогенераторах и двигателях большой мощности, работающих при частоте вращения  $3000 \text{ мин}^{-1}$  и  $1500 \text{ мин}^{-1}$ , когда явнополюсное исполнение нецелесообразно по условиям механической прочности. Неявнополюсный ротор выполняется массивным в виде цилиндра (рис. 15.2). Для турбогенераторов сердечник 3 выковывается вместе с валом 5 из цельной поковки легированной (хромоникелевой или хромоникельмолибденовой) высокопрочной стали, обладающей высокими магнитными свойствами. На наружной поверхности ротора фрезеруются продольные пазы прямоугольной или трапецеидальной формы, в которые укладывается обмотка возбуждения 4 и закрепляется с помощью немагнитных клиньев. Пазы с обмоткой возбуждения занимают примерно  $2/3$  окружности ротора. Часть ротора (примерно  $1/3$ ) не обматывается и образует большой зубец, через который проходит основная часть магнитного потока возбуждения. На большом зубце

также может выполняться фрезеровка пазов с последующим заполнением магнитными клиньями, предназначенная для выравнивания жесткости ротора. Катушки обмотки возбуждения укладываются в пазы симметрично относительно большого зубца и изолируют от сердечника пазовой изоляцией. Для защиты от центробежных сил лобовые части обмотки возбуждения укрепляют бандажными кольцами 2, которые жестко сопрягаются с ротором. Демпферная обмотка не выполняется, а ее функцию обеспечивает массивное цельное тело ротора и проводящие пазовые клинья.

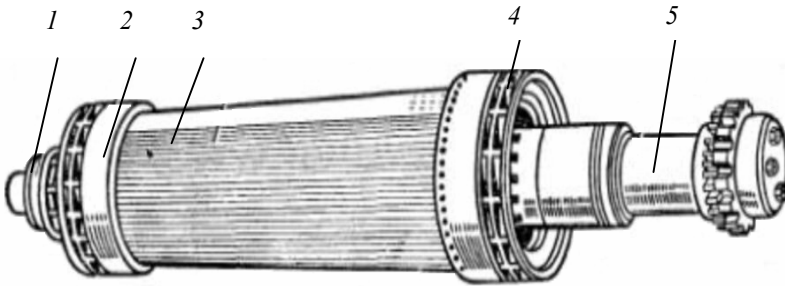
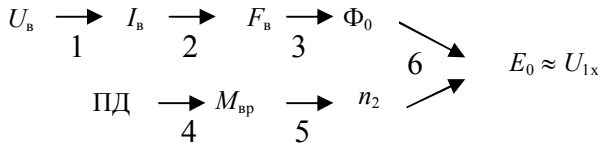


Рис. 15.2. Неявнополюсный ротор синхронной машины:

1 – контактные кольца; 2 – бандажные кольца; 3 – сердечник (массив) ротора; 4 – лобовые части обмотки возбуждения; 5 – вал

При работе в режиме генератора синхронная машина преобразует механическую энергию, передаваемую ей через вал ротора от первичного двигателя, в электрическую энергию, которая передается автономным потребителям или в единую электроэнергетическую систему.

Процессы, происходящие в синхронном генераторе, можно описать схемой:



1. На обмотку возбуждения подается постоянное напряжение  $U_{\text{в}}$ , под действием которого в обмотке возникает ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ .

2. Ток  $I_B$  создает МДС  $F_B$ .
3. Под действием МДС  $F_B$  возникает основной магнитный поток  $\Phi_0$ , который направлен по продольной оси машины, и замыкается между полюсами.
4. С помощью первичного двигателя ПД к валу ротора прикладывают вращающий момент  $M_{вр}$ .
5. Под действием момента  $M_{вр}$  ротор вместе с магнитным потоком  $\Phi_0$  вращается с частотой  $n_2$ .
6. Вращающийся вместе с ротором основной магнитный поток  $\Phi_0$  пересекает витки обмотки статора и наводит в ней ЭДС  $E_0$  с частотой

$$f_1 = \frac{pn_2}{60}, \quad (15.1)$$

где  $p$  – количество пар полюсов машины, шт.

В режиме холостого хода напряжение на выводах обмотки статора  $U_{1х} = E_0$ .

Чтобы получить трехфазную систему со сдвигом ЭДС фаз во времени на  $1/3$  периода, фазные обмотки статора конструктивно смещают в пространстве на угол  $120^\circ$  электрических градусов.

При работе генератора между основным магнитным полем и полем статора возникает связь в виде упругих магнитных силовых линий. Под действием внешнего момента первичного двигателя ось полюсов ротора  $N-S$  опережает ось полюсов статора  $N_я-S_я$  на некоторый угол  $\theta$  (рис. 15.3), который называется *нагрузочным углом*. Основное магнитное поле «ведет» за собой поле статора. При этом появляется деформация магнитных силовых линий в воздушном зазоре и возникает тангенциально направленная электромагнитная сила  $F_{эм}$ . Она действует на ротор и стремится ориентировать ротор так, чтобы его ось полюсов совпала с осью полюсов статора. Эта сила создает электромагнитный момент  $M_{эм}$ , который в генераторном режиме является тормозным, направлен против внешнего вращающего момента и уравнивает его:  $M_{эм} = M_{вр}$ .

*Автономной* является работа одного синхронного генератора на свою нагрузку вне единой электроэнергетической системы.

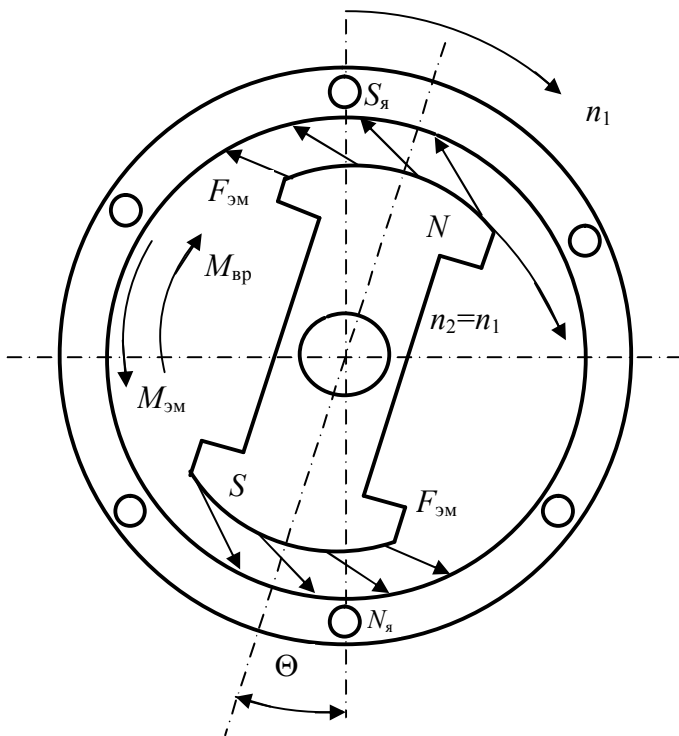


Рис. 15.3. Возникновение электромагнитного момента синхронного генератора

При автономной работе синхронный генератор имеет пять характеристик:

1) **Характеристика холостого хода** – это зависимость напряжения генератора от тока возбуждения  $U_1 = f(I_b)$  при неизменной частоте вращения  $n_2 = \text{const}$  и разомкнутой обмотке якоря ( $I_1 = 0$ ).

При  $I_1 = 0$  потоки реакции якоря, потоки рассеяния и их ЭДС наводиться не будут. Тогда  $U_1 = E_0$ , и характеристика холостого хода (рис. 15.4) повторяет кривую намагничивания. Она имеет прямолинейный и криволинейный участки, что связано с насыщением стали магнитной системы.

2) **Характеристика короткого замыкания** — это зависимость тока статора от тока возбуждения  $I_{1к} = f(I_b)$  при неизменной частоте вращения  $n_2 = \text{const}$  и замкнутой накоротко обмотке статора (сопротивление нагрузки  $Z_{\text{нагр}} = 0$ ).



Рис. 15.4. Характеристика холостого хода

Нагрузкой генератора является собственное сопротивление обмотки статора, индуктивная составляющая которого значительно больше активной составляющей. Поэтому ток короткого замыкания можно считать индуктивным. Реакция якоря  $F_{1d}$  будет продольно-размагничивающей (рис. 15.5, а). Из-за этого МДС взаимной индукции  $F_{1\delta}$  и магнитный поток генератора малы, а магнитная система является ненасыщенной. Генератор работает на прямолинейном участке магнитной характеристики, где его ЭДС  $E_{1\delta}$  и ток статора прямо пропорциональны току возбуждения. Поэтому характеристики короткого замыкания прямолинейны. Характеристика трехфазного короткого замыкания идет ниже, чем двухфазного и однофазного (рис. 15.5, б), потому что МДС реакции якоря от трех фаз будет больше, чем от двух или одной фазы.

3) **Внешняя характеристика** – это зависимость напряжения генератора от тока статора  $U_1 = f(I_1)$  при неизменных частоте вращения  $n_2 = \text{const}$ , характере нагрузки  $\cos\varphi_1 = \text{const}$  и токе возбуждения  $I_B = \text{const}$ .

На рис. 15.6, а показаны внешние характеристики синхронного генератора при емкостной  $C$ , активной  $R$  и индуктивной  $L$  нагрузке.

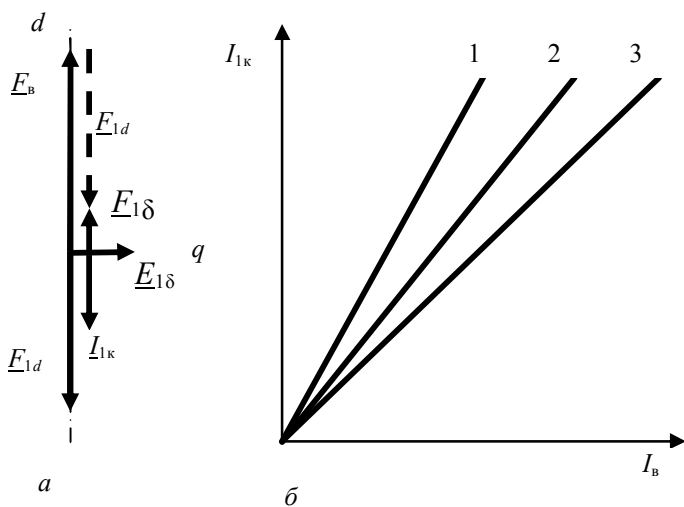


Рис. 15.5. Режим короткого замыкания:  
 а – векторная диаграмма МДС; б – характеристики короткого замыкания  
 (1 – однофазного; 2 – двухфазного; 3 – трехфазного)

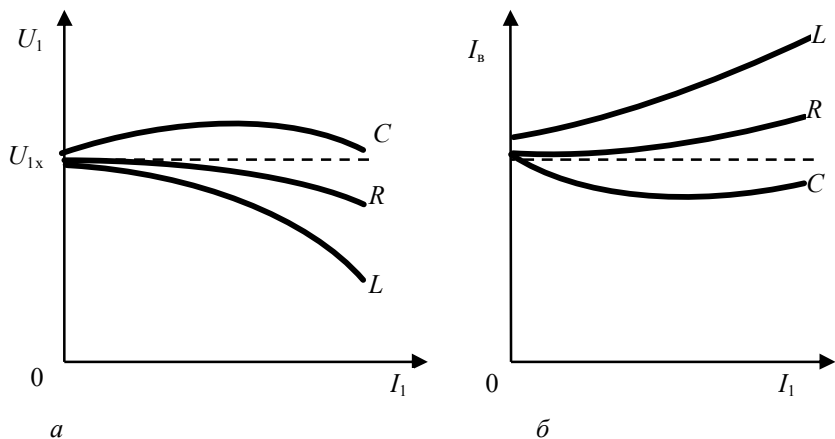


Рис. 15.6. Внешние и регулировочные характеристики:  
 а – внешние характеристики; б – регулировочные

Характер кривых объясняется действием реакции якоря. При индуктивной нагрузке реакция якоря направлена встречно основному магнитному полю и ослабляет его. С ростом нагрузки размагничивающее

действие реакции якоря усиливается, а ЭДС и напряжение генератора уменьшаются. При емкостной нагрузке реакция якоря усиливает магнитное поле, а ЭДС и напряжение увеличиваются. При активной нагрузке поперечная реакция якоря искажает магнитное поле. Напряжение уменьшается, но не так сильно, как при индуктивной нагрузке.

4) **Регулировочная характеристика** – это зависимость тока возбуждения от тока статора  $I_b = f(I_1)$  при неизменных частоте вращения  $n_2 = \text{const}$ , характере нагрузки  $\cos \varphi_1 = \text{const}$  и номинальном напряжении генератора  $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ .

Она показывает, как надо регулировать ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение генератора осталось неизменным и равным номинальному. Характер кривых объясняется внешними характеристиками. При увеличении индуктивной нагрузки ток возбуждения надо увеличивать, чтобы напряжение генератора осталось неизменным (рис. 15.6, б). При росте активной нагрузки ток возбуждения надо увеличивать меньше. С увеличением емкостной нагрузки ток возбуждения надо уменьшать.

5) **Нагрузочная характеристика** – это зависимость напряжения генератора от тока возбуждения  $U_1 = f(I_b)$  при неизменных частоте вращения  $n_2 = \text{const}$ , характере нагрузки  $\cos \varphi_1 = \text{const}$  и номинальном токе статора  $I_1 = I_{1н} = \text{const}$ .

Наибольший интерес представляет нагрузочная характеристика при индуктивной нагрузке. Она аналогична характеристике холостого хода и проходит ниже ее из-за размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора (рис. 15.7).

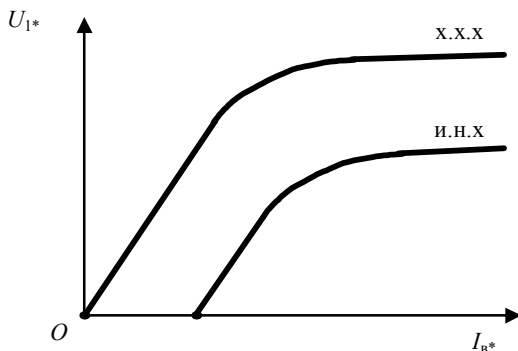


Рис. 15.7. Нагрузочная характеристика



при котором напряжение генератора станет равным  $1,2 U_{\text{н}}$ . Данные опыта занести в табл. 15.4.

Выключить лабораторную установку.

Таблица 15.4

Данные для построения характеристики холостого хода

Измерено		Вычислено		
$U_1, \text{В}$	$I_{\text{В}}, \text{А}$	$U_{1\phi}, \text{В}$	$U_{1\phi}^*, \text{о. е.}$	$I_{\text{В}}^*, \text{о. е.}$

В практических расчетах, связанных с исследованием электрических машин, применяется система относительных единиц, позволяющая более наглядно сравнивать машины разных типов и мощности и облегчающая расчеты. Параметр в относительных единицах выражается как доля базовой величины и обозначается тем же индексом, но со звездочкой. За базовые величины принимаются соответствующие номинальные параметры машины.

Расчетные формулы:

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}; \quad U_{1\phi}^* = \frac{U_1}{U_{\text{н}}}; \quad I_{\text{В}}^* = \frac{I_{\text{В}}}{I_{\text{Вн}}}.$$

На основании полученных результатов построить характеристику холостого хода синхронного генератора в системе относительных единиц  $U_{1\phi}^* = f(I_{\text{В}}^*)$ .

#### *Характеристика короткого замыкания*

Режим двухфазного короткого замыкания получают путем соединения накоротко двух выходных клемм генератора. Перед включением установки в работу проверить, чтобы пусковой реостат двигателя  $PR2$  находился в положении «пуск», регулировочный реостат в цепи возбуждения генератора  $PR1$  – в положении, соответствующем минимуму тока возбуждения, автоматы в цепи нагрузки  $QF2$  и  $QF3$  и в цепи возбуждения  $QF4$  отключены. После включения автоматом  $QF1$  питания приводного двигателя пусковой реостат  $PR2$  плавно, в течение 5–7 с, вывести в положение

«полный». Подключить обмотку возбуждения генератора автоматом  $QF4$ . Ток возбуждения при помощи реостата  $PR1$  изменять от нуля до значения, при котором ток генератора станет равным  $1,2 I_{1н}$ . Данные опыта занести в табл. 15.5.

Таблица 15.5

Данные для построения характеристик короткого замыкания

Двухфазное короткое замыкание				Трехфазное короткое замыкание			
Измерено		Вычислено		Измерено		Вычислено	
$I_1^{(2)}, A$	$I_B, A$	$I_1^{*(2)},$ о. е.	$I_B^*,$ о. е.	$I_1^{(3)}, A$	$I_B, A$	$I_1^{*(3)},$ о. е.	$I_B^*,$ о. е.

Выключить лабораторную установку и отключить ее от электросети. Соединив накоротко все клеммы обмотки якоря генератора, аналогично снять характеристику трехфазного короткого замыкания. Данные опыта занести в табл. 15.5. Выключить лабораторную установку и отключить ее от электросети.

Расчетные формулы:

$$I_1^{*(2)} = \frac{I_1^{(2)}}{I_{1н}}; \quad I_1^{*(3)} = \frac{I_1^{(3)}}{I_{1н}}; \quad I_B^* = \frac{I_B}{I_{Вн}}.$$

На основании полученных результатов построить на одном графике характеристики короткого замыкания синхронного генератора  $I_1^{*(2)} = f(I_B^*)$  и  $I_1^{*(3)} = f(I_B^*)$ .

*Внешняя характеристика*

Восстановить первоначальную схему, убрав закоротку на клеммах генератора. Запустить генератор и в режиме холостого хода установить номинальное напряжение на его выходе. Автоматом  $QF2$  включить активную нагрузку и, регулируя ее с помощью выключателей  $SA1 \dots SA3$ , нагружать генератор до номинального тока, поддерживая ток возбуждения неизменным. Данные опыта занести в табл. 15.6. Отключить активную нагрузку. В режиме холостого хода установить номинальное напряжение на выходе генератора. Автоматом  $QF3$  включить реактивную нагрузку и нагружать генератор

до номинального тока, поддерживая ток возбуждения неизменным. Данные опыта занести в табл. 15.6.

Таблица 15.6

Данные для построения внешних характеристик

Активная нагрузка генератора				Реактивная нагрузка генератора			
Измерено		Вычислено		Измерено		Вычислено	
$U_1, В$	$I_1, А$	$U_{1\phi}^*, о. е.$	$I_1^*, о. е.$	$U_1, В$	$I_1, А$	$U_{1\phi}^*, о. е.$	$I_1^*, о. е.$

Расчетные формулы:

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}; \quad U_{1\phi}^* = \frac{U_1}{U_{1H}}; \quad I_1^* = \frac{I_1}{I_{1H}}.$$

На основании полученных результатов построить на одном графике внешние характеристики генератора  $U_{1\phi}^* = f(I_1^*)$  при активном и при реактивном характере нагрузки.

#### *Регулировочная характеристика*

Запустить генератор и в режиме холостого хода установить номинальное напряжение на его выходе. Автоматом *QF2* включить активную нагрузку и, регулируя ее с помощью выключателей *SA1...SA3*, нагружать генератор до номинального тока, поддерживая напряжение на выводах генератора неизменным путем регулирования тока возбуждения. Данные занести в табл. 15.7. Отключить активную нагрузку. В режиме холостого хода установить номинальное напряжение на выходе генератора. Автоматом *QF3* включить реактивную нагрузку и нагружать генератор до номинального тока, поддерживая напряжение генератора неизменным. Данные занести в табл. 15.7.

Таблица 15.7

Данные для построения регулировочных характеристик

Активная нагрузка генератора				Реактивная нагрузка генератора			
Измерено		Вычислено		Измерено		Вычислено	
$I_B, А$	$I_1, А$	$I_B^*, о. е.$	$I_1^*, о. е.$	$I_B, А$	$I_1, А$	$I_B^*, о. е.$	$I_1^*, о. е.$

Расчетные формулы:

$$I_B^* = \frac{I_B}{I_{ВН}}; \quad I_1^* = \frac{I_1}{I_{1Н}}.$$

На основании полученных результатов построить на одном графике регулировочные характеристики генератора  $I_B^* = f(I_1^*)$  при активном и при реактивном характере нагрузки.

*Нагрузочная характеристика*

Запустить генератор на холостой ход и установить на его выходе напряжение, равное  $1,2 U_{1Н}$ . В качестве нагрузки подключить автоматом *QF3* асинхронную машину с фазным ротором, работающую в режиме регулируемой реактивной катушки, и путем поворота ротора добиться в цепи генератора номинального тока. Далее, изменяя одновременно угол поворота ротора и уменьшая ток возбуждения генератора, снять характеристику, поддерживая номинальное значение тока в цепи генератора. Данные опыта занести в табл. 15.8.

Таблица 15.8

Данные для построения нагрузочной характеристики

Измерено		Вычислено		
$U_1, В$	$I_B, А$	$U_{1\phi}, В$	$U_{1\phi}^*, \text{о. е.}$	$I_B^*, \text{о. е.}$

Расчетные формулы:

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}; \quad U_{1\phi}^* = \frac{U_1}{U_{1Н}}; \quad I_B^* = \frac{I_B}{I_{ВН}}.$$

На основании полученных результатов построить нагрузочную характеристику синхронного генератора в системе относительных единиц  $U_{1\phi}^* = f(I_B^*)$ .

## Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

## Контрольные вопросы

1. Назовите элементы конструкции синхронной машины, материалы, используемые для их изготовления.
2. Объясните принцип действия синхронного генератора.
3. Что значит «автономная» работа синхронного генератора?
4. Объясните методику вычисления параметров синхронной машины в системе относительных единиц.
5. Почему точка  $U = U_H$  выбрана на сгибе характеристики холостого хода, а не в точке с меньшим насыщением?
6. Почему характеристики короткого замыкания прямолинейны?
7. Почему при одинаковом токе возбуждения ток двухфазного короткого замыкания больше тока трехфазного короткого замыкания?
8. Как влияет характер нагрузки на внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ

**Цель работы** – изучение характеристик и методов включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью.

### **Задачи работы:**

1. Приобрести практические навыки включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью методами точной синхронизации и самосинхронизации.

2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик синхронного генератора при параллельной работе с электроэнергетической системой.

### **Общие сведения**

Практически все электростанции Беларуси объединены в единую электроэнергетическую систему. При этом все синхронные генераторы всех электростанций работают параллельно, а мощность нагрузок распределяется между ними. Это обеспечивает высокую надежность электроснабжения потребителей, возможность маневра потоками электроэнергии, требует минимальный резерв мощности.

Совокупность операций при подключении генератора на параллельную работу с электроэнергетической системой или другим генератором называется синхронизацией. Применяют метод точной синхронизации и метод грубой синхронизации (самосинхронизация).

При **точной синхронизации** для уменьшения броска тока в момент включения генератора на параллельную работу должны быть выполнены условия:

- 1) напряжение генератора равно напряжению системы  $U_r = U_c$ ;
- 2) одинаковый порядок чередования и совпадение фаз напряжений генератора и системы;
- 3) частота тока генератора равна частоте тока системы  $f_r = f_c$ .

До начала синхронизации выполняют фазировку, чтобы обеспечить одинаковый порядок чередования фаз генератора (СГ) (рис. 16.1) и электроэнергетической системы (ЭС). Тогда векторы напряжений генератора и системы будут вращаться в одном направлении.

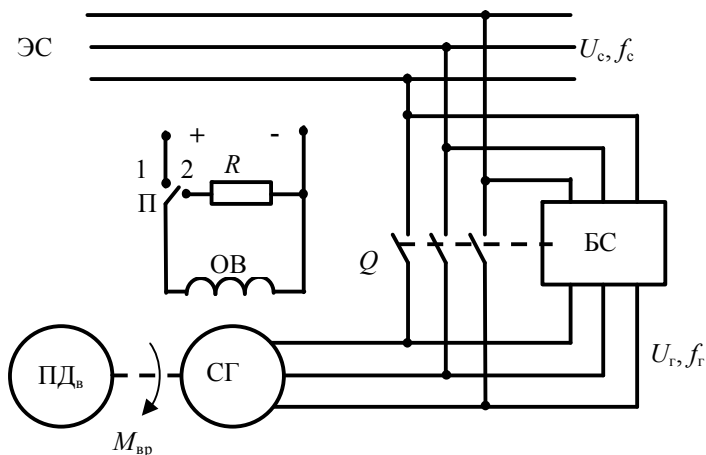


Рис. 16.1. Схема включения синхронного генератора на параллельную работу с электроэнергетической системой

Затем с помощью первичного двигателя ПД разгоняют генератор до номинальной частоты вращения. После этого подают питание на обмотку возбуждения генератора ОВ (переключатель П в положении «1»). Регулируя ток возбуждения от нуля до номинального, добиваются равенства напряжений  $U_r = U_c$ . Регулируя частоту вращения первичного двигателя (подачей пара, топлива или воды), добиваются равенства частоты токов  $f_r = f_c$ . В момент совпадения фаз напряжений генератора и системы обмотку статора подключают к электрической сети выключателем Q. Генератор включен на параллельную работу.

Совпадение фаз векторов напряжений генератора и системы контролируется специальными приборами – синхроскопами, расположенными в блоке синхронизации БС. Для генераторов малой мощности применяют ламповые синхроскопы, представляющие собой три лампы, включенные между соответствующими фазами генератора и сети. Для генераторов средней мощности применяют стрелочные синхроскопы, работающие по принципу вращающегося магнитного поля. Для мощных турбо- и гидрогенераторов, чтобы исключить ошибочные действия, используются автоматические синхронизаторы, которые включают генератор на параллельную работу без помощи персонала по предварительной команде, а также регулируют напряжение и частоту тока генератора.

Достоинство метода точной синхронизации – небольшой бросок тока при подключении генератора. Недостаток – сложность операций по включению в аварийных режимах, когда наблюдаются колебания напряжения и частоты тока системы.

В таких случаях может применяться *метод грубой синхронизации (самосинхронизации)*, который обеспечивает быстрое включение генератора на параллельную работу.

Перед началом синхронизации обмотку возбуждения генератора ОВ отключают от источника питания и замыкают на гасительный резистор  $R$  (переключатель П в положении «2» на рис. 6.28), чтобы избежать в ней перенапряжений. Первичным двигателем ПД разгоняют ротор невозбужденного генератора СГ до номинальной частоты вращения. Затем обмотка статора подключается к сети и наблюдается небольшой бросок тока. После этого обмотка возбуждения переключается с гасительного резистора на источник питания (переключатель П из положения «2» в положение «1») и в нее подается номинальный ток возбуждения. Появляется синхронизирующий момент, и генератор втягивается в синхронизм. При этом наблюдается несколько больших бросков тока.

Большие броски тока вредны как для самого генератора, так и для энергосистемы. Поэтому самосинхронизация допускается, если большие броски тока не превышают номинальный ток статора более, чем в 3,5 раза.

Мощность каждого отдельно взятого генератора значительно меньше мощности всей энергосистемы, поэтому можно считать, что генераторы работают параллельно с системой бесконечной мощности. В этом случае напряжение и частота тока не зависят от нагрузки данного генератора и являются постоянными:

$$U_{\Gamma} = U_{\epsilon} = \text{const}, \quad (16.1)$$

$$f_{\Gamma} = f_{\epsilon} = \text{const}. \quad (16.2)$$

Напряжение генератора не зависит от тока возбуждения, а частота его ЭДС не зависит от мощности, тока якоря и момента первичного двигателя:

$$U_{\Gamma} \neq f(I_{\epsilon}), \quad (16.3)$$

$$f_r \neq f(P_2, I_1, M_{\text{пд}}). \quad (16.4)$$

Регулирование активной мощности синхронного генератора производится изменением внешнего вращающего момента первичного двигателя. Для увеличения активной мощности увеличивают приложенный к валу внешний момент, а для уменьшения мощности — уменьшают. При этом изменяется и реактивная мощность генератора.

Для регулирования реактивной мощности синхронного генератора регулируют ток возбуждения. При этом активная мощность не изменяется, а результирующий магнитный поток генератора не зависит от тока возбуждения.

При параллельной работе с энергосистемой характеристики автономной работы синхронного генератора недействительны, а его режимы определяются  $U$ -образными и угловыми характеристиками.

**$U$ -образные характеристики** — это зависимости тока статора от тока возбуждения  $I_1 = f(I_{\text{в}})$  при неизменной мощности  $P_2 = \text{const}$  и частоте вращения  $n_2 = \text{const}$  (рис. 16.2).

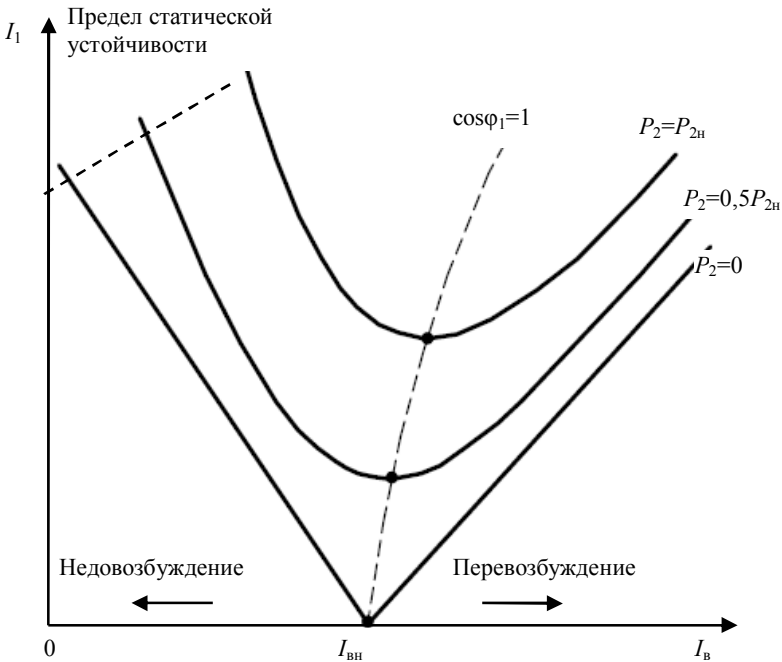


Рис. 16.2.  $U$ -образные характеристики синхронных генераторов

При *нормальном возбуждении* с током  $I_{вн}$  ток якоря  $I_1$  минимальный. Он является чисто активным, реактивная составляющая равна нулю, а  $\cos\varphi_1 = 1$ . При  $P_2 = 0$ ;  $I_1 = 0$ .

В *режиме недовозбуждения* при уменьшении тока возбуждения  $I_b < I_{вн}$  генератор потребляет из системы реактивную мощность, ток якоря  $I_1$  увеличивается за счет увеличения реактивной составляющей, а активная составляющая не изменяется. Минимальное значение тока возбуждения ограничено пределом статической устойчивости, при котором магнитный поток оказывается настолько ослабленным, что генератор выпадает из синхронизма.

В *режиме перевозбуждения* при увеличении тока возбуждения  $I_b > I_{вн}$  генератор отдает в систему реактивную мощность, ток якоря  $I_1$  увеличивается за счет реактивной составляющей, а активная составляющая тока не изменяется.

С ростом активной мощности нормальный ток возбуждения  $I_{вн}$  увеличивается для компенсации возрастающих потерь напряжения в генераторе. При этом минимумы  $U$ -образных характеристик смещаются вверх и вправо по линии, которая представляет собой регулировочную характеристику генератора

$$I_b = f(I_1) \text{ при } \cos\varphi_1 = 1.$$

Изменяя величину тока возбуждения, можно регулировать реактивную мощность и коэффициент мощности генератора. Наиболее выгодный для генератора режим нормального возбуждения с  $\cos\varphi_1 = 1$ . Но так как в энергосистеме есть потребители реактивной энергии (асинхронные двигатели, трансформаторы, газоразрядные лампы и др.), то генераторы работают в режиме перевозбуждения с  $\cos\varphi_1 = 0,8$ , отдавая в сеть реактивную мощность. Чтобы обеспечить требуемую мощность, одновременно регулируют ток возбуждения и вращающий момент первичного двигателя.

**Угловые характеристики** – это зависимости электромагнитной мощности и электромагнитного момента от нагрузочного угла  $P_{эм} = f(\Theta)$  и  $M_{эм} = f(\Theta)$  при неизменном напряжении  $U_1 = \text{const}$ , токе возбуждения  $I_b = \text{const}$  и частоте вращения  $n_2 = \text{const}$ .

Электромагнитная мощность явнополюсного синхронного генератора:

$$P_{эм} = \frac{m_1 E_0 U_1}{x_d} \sin \Theta + \frac{m_1 U_1^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta, \quad (16.5)$$

где  $m_1$  – количество фаз генератора, шт.;

$E_0$  – ЭДС, индуцируемая в обмотке статора магнитным полем обмотки возбуждения, В;

$U_1 = U_c$  – фазное напряжение электроэнергетической системы, В;

$x_d, x_q$  – синхронные реактивные сопротивления генератора по продольной и поперечной оси соответственно, Ом;

$\Theta$  – нагрузочный угол между векторами  $\underline{E}_0$  и  $\underline{U}_1$ , градус.

Электромагнитная мощность явнополюсного генератора состоит из двух частей. Первая (*основная*) составляющая пропорциональна  $\sin\Theta$  и возникает только при наличии тока возбуждения, так как она пропорциональна  $E_0$ . Если  $I_b = 0$ , то  $E_0 = 0$  и основная составляющая равны нулю. Вторая составляющая пропорциональна  $\sin 2\Theta$ , не зависит от тока возбуждения, возникает за счет действия поля реакции якоря на ротор и называется *реактивной* составляющей. Из-за несимметрии магнитной цепи явнополюсной машины ротор располагается в магнитном поле якоря так, чтобы его сопротивление прохождению магнитного потока было минимальным (ориентируется по оси магнитного поля подобно магнитной стрелке компаса). Реактивная составляющая возникает и в невозбужденной машине при наличии тока в обмотке якоря, а генератор сохраняет синхронный режим работы.

Электромагнитный момент равен:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega}, \quad (16.6)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения, рад/с.

В системе относительных единиц для синхронного режима работы:

$$M_{эм}^* = P_{эм}^*. \quad (16.7)$$

На рис. 16.3, а представлена угловая характеристика явнополюсного синхронного генератора (кривая 3), а также ее основная (кривая 1) и реактивная составляющая (кривая 2).

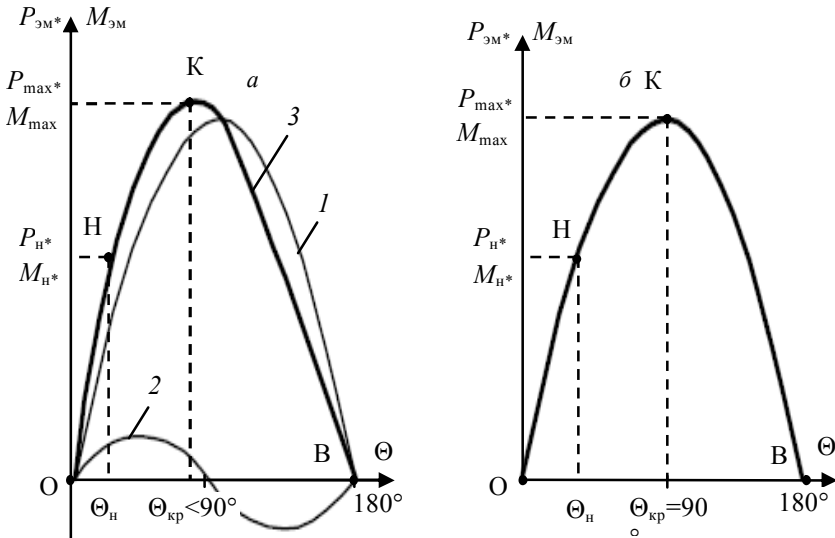


Рис. 16.3. Угловые характеристики синхронного генератора:  
 а – явнопольсого; б – неявнопольсого

Нагрузочный угол, соответствующий максимальным значениям электромагнитной мощности и момента, называется *критическим*. У явнопольсных машин  $\theta_{кр} < 90^\circ$ .

$$\cos\theta_{кр} = \sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta, \quad (16.8)$$

$$\beta = \frac{E_f}{4U_1 \left( \frac{x_d}{x_q} - 1 \right)}. \quad (16.9)$$

В точке О (рис. 16.3)  $P_{эм} = 0$ ,  $\theta = 0$ . Генератор работает синхронно в режиме холостого хода. В точке К  $P_{эм} = P_{max}$ ,  $\theta = \theta_{кр}$ . Участок ОК – область устойчивой работы генератора в синхронном режиме. Н – точка номинальной нагрузки. Участок KB – область неустойчивой работы. При  $\theta > 180^\circ$  теряется связь между магнитным полем возбуждения и магнитным полем якоря, а генератор выпадает

из синхронизма (точка В). Возникает асинхронный колебательный режим, опасный для генератора, первичного двигателя и энергосистемы.

Магнитная цепь неявнополюсной машины симметрична ( $x_d = x_q = x_c$ ), а реактивная составляющая электромагнитной мощности равна нулю. Тогда

$$P_{эм} = \frac{m_1 E_0 U_1}{x_c} \sin \Theta, \quad (16.10)$$

где  $x_c$  – синхронное реактивное сопротивление неявнополюсного генератора, Ом.

У неявнополюсного генератора  $\theta_{кр} = 90^\circ$  (рис. 16.3, б).

При потере возбуждения неявнополюсный генератор не развивает электромагнитную мощность в синхронном режиме. Он переходит в асинхронный режим и работает как асинхронный генератор.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить порядок включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью способами точной синхронизации и самосинхронизации.

2. Ознакомиться с лабораторной установкой. Записать паспортные данные исследуемого генератора:

$$U_H = 220 \text{ В}; I_H = 10 \text{ А}; I_{BH} = 4,8 \text{ А}; \eta = 0,8; \cos \varphi_H = 0,9; n_H = 1500 \text{ мин}^{-1}.$$

Собрать схему для проведения экспериментов (рис. 16.4).

3. Включить СГ на параллельную работу с сетью **методом точной синхронизации**. Последовательность включения:

1) Убедиться в том, что автомат включения на параллельную работу *QF4* отключен.

2) Запустить приводной двигатель *M*. Пуск двигателя осуществляется через пусковой реостат. Начальное положение ручки пускового реостата «пуск», регулировочного реостата *PR1* – «min». После подачи питания автоматическим выключателем *QF3* плавно вывести пусковой реостат в положение «ход». Установить соответствующие направления вращения согласно указанию стрелки на корпусе двигателя.

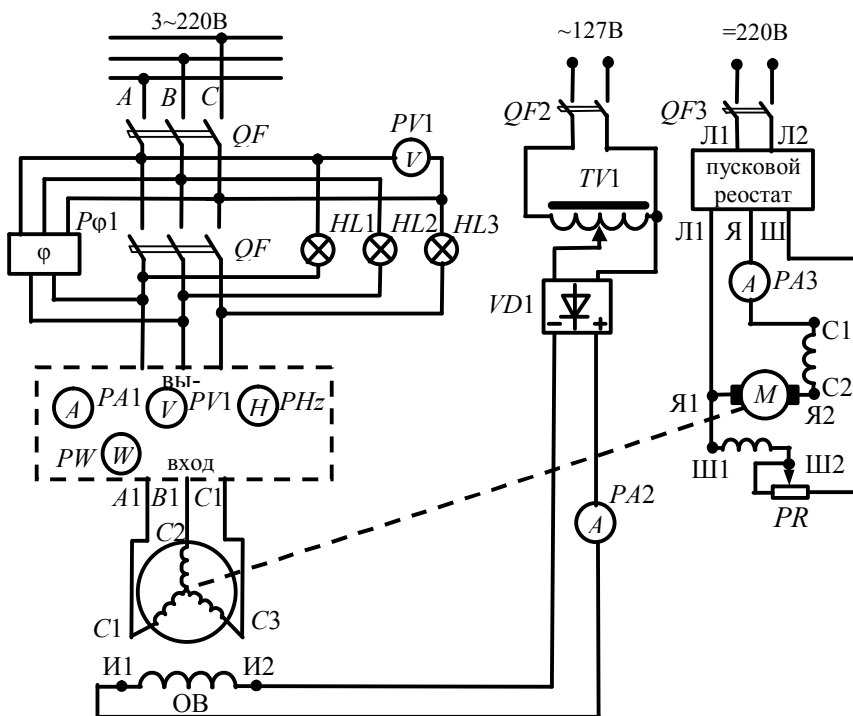


Рис. 16.4. Схема включения на параллельную работу и исследования синхронного генератора

3) Автоматическим выключателем  $QF1$  подключить лабораторную установку к электрической сети переменного тока.

4) Автоматическим выключателем  $QF2$  включить питание цепи обмотки возбуждения синхронного генератора. Установить ЛАТ-Тром ток возбуждения, при котором напряжение генератора равно напряжению сети по величине ( $PV2, PV1$ ).

5) Проверить совпадение порядка чередования фаз сети и генератора с помощью лампового синхроскопа. На схеме (см. рис. 16.4) лампы синхроскопа включены по схеме на «потухание», поэтому при одинаковом порядке чередования фаз сети и генератора все они должны загораться и гаснуть одновременно. В противном случае необходимо изменить порядок чередования фаз генератора.

6) Регулируя реостатом  $PR1$  частоту вращения приводного двигателя, установить частоту тока генератора равной частоте тока электрической сети, при которой частота мигания ламп синхроскопа равна  $0,5-1,0$  Гц. Стрелочный синхроскоп также дает информацию об отклонении частоты генератора от частоты сети: если стрелка вращается в направлении «больше» –  $f_T > f_C$ , «меньше» –  $f_T < f_C$ .

7) Определить моменты совпадения фаз сети и генератора с помощью лампового синхроскопа. Согласно схеме включения ламп синхроскопа ( $HL1$ ,  $HL2$ ,  $HL3$ ) при совпадении фаз напряжений сети и генератора точки их подключения будут иметь одинаковый потенциал, и лампы гореть не будут. Максимальное свечение ламп будет наблюдаться в момент, когда напряжения сети и генератора находятся в противофазе. Контроль совпадения фаз можно также осуществлять по стрелочному синхроскопу  $Pф1$ . В момент совпадения фаз стрелка синхроскопа проходит над красной чертой.

8) Уловив момент потухания ламп или проход стрелки синхроскопа над красной чертой, включить генератор на сеть автоматическим выключателем  $QF4$ . При определении момента включения иметь в виду, что лампы потухнут при напряжении на них около  $30\% - 40\%$  от номинального, поэтому включение выполнять с некоторой задержкой после наблюдаемого погасания ламп.

Отключение генератора выполнять в обратной последовательности:

- 1) отключить генератор от сети ( $QF4$ );
- 2) установить ЛАТРом  $i_B = 0$ , отключить питание ( $QF1$ ,  $QF2$ );
- 3) отключить питание двигателя ( $QF3$ ), установить пусковой реостат двигателя в положение «пуск», регулировочный  $PR1$  – в положение «min».

4. Включить генератор на сеть **методом самосинхронизации**. Последовательность включения:

- 1) запустить приводной двигатель  $M$ , убедившись, что автомат включения  $QF4$  разомкнут;
- 2) включить питание цепи возбуждения ( $QF1$ ,  $QF2$ );
- 3) отрегулировать частоту вращения приводного двигателя с помощью  $PR1$  и ток возбуждения ЛАТРом таким образом, чтобы выполнялись условия  $U_T = U_C$  и  $f_T = f_C$ ;
- 4) отключить цепь возбуждения автоматическим выключателем  $QF2$ ;
- 5) осуществить синхронизацию последовательным включением сначала якоря генератора в сеть ( $QF4$ ), а затем – цепи возбуждения

(QF2). Обязательно соблюдать очередность операций включения. Время между операциями должно быть минимальным.

5. Исследовать  $U$ -образные характеристики синхронного генератора для различных активных нагрузок генератора  $I_1 = f(I_B)$  при  $U = U_H = \text{const}$ ,  $f_r = f_H = \text{const}$ . Включить генератор на параллельную работу с сетью одним из рассмотренных способов. Снять  $U$ -образные характеристики для нагрузок генератора, равных, соответственно, 0; 1,0 и 1,5 кВт. Контроль активной нагрузки вести по ваттметру  $PW1$ . Ток возбуждения изменять в пределах, чтобы ток якоря изменялся от  $I_1 = I_{1H}$  до  $I_1 = I_{1\min}$  (недовозбуждение) и от  $I_1 = I_{1\min}$  до  $I_1 = I_{1H}$  (перевозбуждение) по 4–6 точек для каждого режима возбуждения. Величину активной нагрузки и ее поддержание постоянной осуществлять регулированием момента приводного двигателя (реостат  $PR1$ ).

Данные опыта занести в табл. 16.1 и рассчитать токи нагрузки и возбуждения генератора в относительных единицах.

$$I_1^* = I_1 / I_{1H} ; I_B^* = I_B / I_{BH}.$$

Таблица 16.1

Зависимости тока возбуждения от тока нагрузки генератора при различной отдаваемой активной мощности в сеть

$P_r = 0$				$P_r = 1,0 \text{ кВт}$				$P_r = 1,5 \text{ кВт}$			
$I_1, \text{ А}$	$I_B, \text{ А}$	$I_1^*, \text{ о. е.}$	$I_B^*, \text{ о. е.}$	$I_1, \text{ А}$	$I_B, \text{ А}$	$I_1^*, \text{ о. е.}$	$I_B^*, \text{ о. е.}$	$I_1, \text{ А}$	$I_B, \text{ А}$	$I_1^*, \text{ о. е.}$	$I_B^*, \text{ о. е.}$

По данным табл. 16.1 построить на одном графике  $U$ -образные характеристики  $I_1^* = f(I_B^*)$  для различных значений активной нагрузки.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:

- название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое синхронизация СГ с сетью, какими методами она осуществляется?
2. Объясните порядок включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом самосинхронизации.
3. Объясните порядок включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.
4. Поясните принцип работы лампового синхроскопа.
5. Как регулируют активную мощность генератора, работающего параллельно с сетью?
6. Как регулируют реактивную мощность генератора, работающего параллельно с сетью?
7. Объясните термины «перевозбуждение», «недовозбуждение» генератора.
8. Почему на  $U$ -образных характеристиках минимум тока якоря сдвигается в сторону увеличения тока возбуждения при росте активной нагрузки?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы** – изучение устройства, способов пуска и характеристик трехфазного синхронного двигателя.

### **Задачи работы:**

1. Изучить конструкцию и принцип работы синхронного двигателя.
2. Ознакомиться со способами пуска синхронного двигателя.
3. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем и снятии характеристик синхронного двигателя.

### **Общие сведения**

Синхронные двигатели выпускаются мощностью от долей Ватт до нескольких десятков мегаватт. При частоте вращения до  $1500 \text{ мин}^{-1}$  они имеют явнополюсное исполнение ротора, при частоте  $1500\text{--}3000 \text{ мин}^{-1}$  – неявнополюсное. В зависимости от мощности двигателя выполняются на напряжения от 230 В до 10 000 В.

Конструкция двигателей аналогична конструкции синхронных генераторов, но имеются и некоторые отличия. У синхронных двигателей меньше воздушный зазор, больше ширина полюсных наконечников (у двигателей 0,9 ширины полюсного деления, у генераторов — 0,7), больше сечение демпферной обмотки, так как она используется для пуска.

Наиболее часто применяется электромагнитное возбуждение от тиристорных возбудителей, реже – возбуждения от электромашинных возбудителей постоянного тока. Растет количество синхронных двигателей относительно небольшой мощности с возбуждением от постоянных магнитов, установленных на полюсах индуктора вместо обмотки возбуждения.

Обозначения, применяемые при маркировке синхронных двигателей общего назначения:

СДНЗ	–	X	–	XX	–	XX	–	X	XX	X
1		2		3		4		5	6	7

1. Серия: С – синхронный, Д – двигатель, Н – нормального исполнения (С – специальный); 3 – закрытый; П – взрывозащищенный; Т – турбодвигатель; К – компрессорный; М – для привода мельниц и др.

2. Номер серии.

3. Условное обозначение габарита (две цифры).

4. Длина сердечника статора, см.

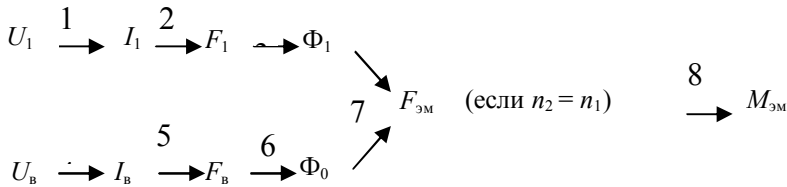
5. Число полюсов, шт.

6. Климатическое исполнение (У, Т, УХЛ, ХЛ, ОМ и др.).

7. Категория размещения (1, 2, 3, 4).

Например: СДН-2-16-46-8 ХЛЗ – синхронный двигатель нормального исполнения, серия 2, 16-й габарит, длина сердечника статора 46 см, 8 полюсов, для холодного климата, для работы в закрытых помещениях с естественной циркуляцией воздуха.

Принцип работы синхронного двигателя можно описать схемой:



1. На обмотку статора подается переменное напряжение  $U_1$ , под действием которого в обмотке возникает ток  $I_1$ .

2. Система токов  $I_1$  трехфазных обмоток статора создает МДС  $F_1$ .

3. Под воздействием  $F_1$  возникает магнитный поток статора  $\Phi_1$ , который вращается с синхронной частотой  $n_1$ .

4. На обмотку возбуждения подается постоянное напряжение  $U_b$ , под действием которого в обмотке возникает ток возбуждения  $I_b$ .

5. Ток  $I_b$  создает МДС  $F_b$ .

6. Под воздействием  $F_b$  возникает основной магнитный поток  $\Phi_0$ , который неподвижен относительно ротора.

7. Если ротор двигателя предварительно разогнать с помощью внешних сил до синхронной скорости вращения ( $n_2 = n_1$ ), то между полем возбуждения и полем статора возникает связь в виде упругих магнитных силовых линий: полюса противоположной полярности притягиваются, а одноименной – отталкиваются. Из-за внешнего

момента сопротивления  $M_c$  на валу ось полюсов ротора  $N-S$  отстает от оси полюсов статора  $N_a-S_a$  на угол  $\theta$  (рис. 17.1). Магнитное поле статора «ведет» за собой обмотки возбуждения. Из-за деформации магнитных силовых линий в воздушном зазоре возникает тангенциально направленная электромагнитная сила  $F_{эм}$ .

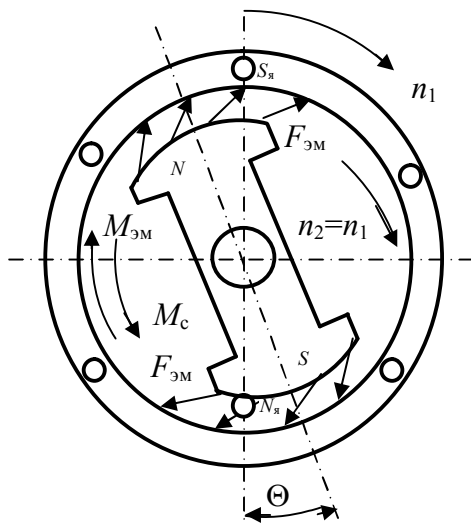


Рис. 17.1. Возникновение электромагнитного момента синхронного двигателя  
*a* – генераторный режим; *б* – двигательный режим

8. Электромагнитная сила  $F_{эм}$  создает электромагнитный момент  $M_{эм}$ , направленный против внешнего момента сопротивления рабочей машины. Под его воздействием ротор вращается с синхронной частотой  $n_2 = n_1$ .

Синхронный двигатель невозможно запустить прямым включением в электрическую сеть переменного тока из-за инерционности ротора, который не может мгновенно разогнаться до синхронной частоты вращения, как магнитное поле статора. При этом между полюсами возбужденного ротора и вращающегося поля статора не возникает устойчивой магнитной связи – пусковой момент равен нулю, и двигатель не может начать вращение.

Поэтому применяют специальные способы пуска: пуск с помощью разгонного двигателя, асинхронный пуск при номинальном или пониженном напряжении, частотный (синхронный) пуск.

При *пуске с помощью разгонного двигателя* ротор синхронного двигателя необходимо предварительно разогнать до подсинхронной частоты вращения, близкой частоте вращения поля статора ( $n_2 = 0,95n_1$  или  $s = 0,05$ ). Тогда поле статора настолько медленно перемещается относительно поля ротора, что между ними устанавливается магнитная связь и возникает синхронный электромагнитный момент, под действием которого ротор втягивается в синхронизм – начинает вращаться с синхронной частотой  $n_2 = n_1$ . Для разгона применяют асинхронный двигатель небольшой мощности, находящийся на одном валу с синхронным двигателем. Он разгоняет ротор до подсинхронной частоты вращения при отключенной от сети обмотке статора. Затем обмотка статора подключается к сети, на обмотку возбуждения подается напряжение постоянного тока, а разгонный двигатель выключают. Метод может применяться для пуска явнополюсных и неявнополюсных синхронных двигателей. Его недостаток – потребность в дополнительном разгонном двигателе.

**Асинхронный пуск** – самый распространенный метод пуска явнополюсных синхронных двигателей. Он аналогичен пуску асинхронного двигателя. Для предварительного разгона ротора до подсинхронной частоты используется короткозамкнутая пусковая обмотка (рис. 17.2), которая расположена в полюсных наконечниках ротора и создает асинхронный вращающий момент при пуске.

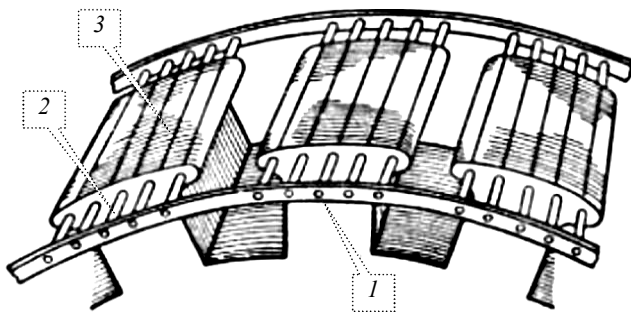


Рис. 17.2. Пусковая обмотка:

- 1 – короткозамыкающее кольцо; 2 – стержни;
- 3 – полюсный наконечник

Во избежание опасных перенапряжений, которые возникают в обмотке возбуждения двигателя (ОВ) при пересечении ее вращающимся полем статора, перед пуском ее замыкают на гасительное сопротивление  $R$ , переводя переключатель П в положение «2» (рис. 17.3, а).

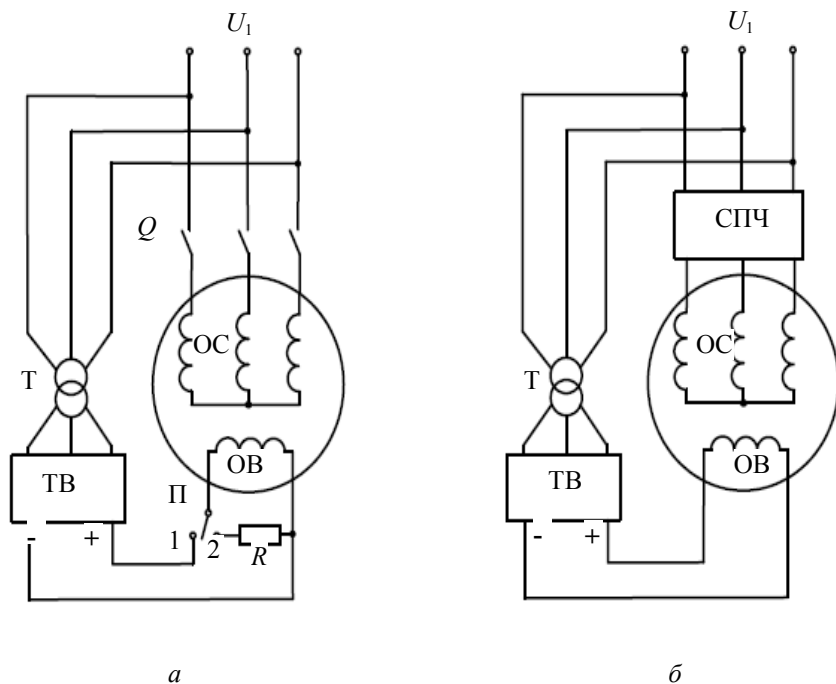


Рис. 17.3. Схемы пуска синхронного двигателя:  
а – асинхронный пуск; б – частотный пуск

При пуске на обмотку статора (ОС) подают напряжение. Созданное статором вращающееся магнитное поле будет пересекать пусковую обмотку и наведет в ней ЭДС и ток. Момент, образованный взаимодействием тока и вращающегося магнитного поля, развернет ротор до подсинхронной частоты вращения ( $s < 0,05$ ). После этого обмотку возбуждения переключают с гасительного резистора на возбудитель ТВ (переключатель П в положение «1»). При подаче питания на обмотку возбуждения ротор втягивается в синхронизм, что сопровождается механическими и электрическими колебаниями.

Свойства двигателя при асинхронном пуске характеризуются начальным пусковым моментом  $M_n$  при  $s = 1$  и моментом вхождения в синхронизм  $M_{0,05}$  при  $s = 0,05$ .

Прямой асинхронный пуск синхронного двигателя при номинальном напряжении возможен, если пусковой ток  $I_n$  не превышает допустимого тока сети  $I_{\text{доп}}$ , а пусковой момент  $M_n$  больше момента сопротивления на валу  $M_c$ :

$$I_n \leq I_{\text{доп}} \quad (17.1)$$

$$M_n > M_c \quad (17.2)$$

Если первое условие не выполняется, то применяется пуск при пониженном напряжении – трансформаторный или реакторный. Схемы пуска аналогичные, как и для асинхронного двигателя. С помощью реактора или трансформатора уменьшается подаваемое на двигатель напряжение. При этом уменьшается пусковой ток.

Недостатки способа – большой пусковой ток и затруднение пуска под нагрузкой из-за небольшого пускового момента ( $M_n = 0,8-1,1M_c$ ).

**Частотный (синхронный) пуск** чаще всего применяется для запуска синхронных двигателей большой мощности (более 1 МВт), а также двигателей электрических транспортных средств (электромобилей) и др.

Обмотка статора подключается к сети через специализированный преобразователь частоты (СПЧ) (рис. 17.3, б). Преобразователем плавно повышают частоту тока от нуля до номинальной. Частота вращения поля статора также плавно изменяется от нуля до синхронной. Ротор, следуя за полем статора, также плавно разгоняется. В процессе пуска магнитные поля ротора и статора все время в «зацеплении». Одновременно с изменением частоты регулируют напряжение. Пуск двигателя при этом плавный без толчков и колебаний. Этот способ позволяет уменьшить время переходных процессов и пусковые токи, снизить тепловые нагрузки, осуществлять пуск синхронных двигателей под нагрузкой.

Такая схема также позволяет регулировать частоту вращения синхронного двигателя в зависимости от требований рабочей машины, для привода которой он используется. При этом необходимо очень плавно изменять частоту питающего напряжения, чтобы двигатель не выпал из синхронизма.

Частотный пуск – наиболее перспективный способ, он позволяет устранить многие недостатки синхронных электрических машин. Недостатком способа является относительно высокая цена специализированного преобразователя частоты.

Рабочий процесс синхронных двигателей можно охарактеризовать рабочими, угловыми и  $U$ -образными характеристиками.

**Рабочие характеристики** синхронных двигателей – это зависимости  $I_1, P_1, M, \eta = f(P_2)$  при неизменных питающем напряжении  $U_1 = \text{const}$ , частоте тока  $f_1 = \text{const}$ , и токе возбуждения  $I_B = \text{const}$ . Характер кривых аналогичен рабочим характеристикам асинхронных двигателей.

**Угловые характеристики** синхронного двигателя (рис. 17.4) удобнее представить как зависимости электромагнитного момента от нагрузочного угла  $M_{эм} = f(\theta)$  при неизменном напряжении сети  $U_1 = \text{const}$ , частоте тока  $f_1 = \text{const}$  и токе возбуждения  $I_B = \text{const}$ .

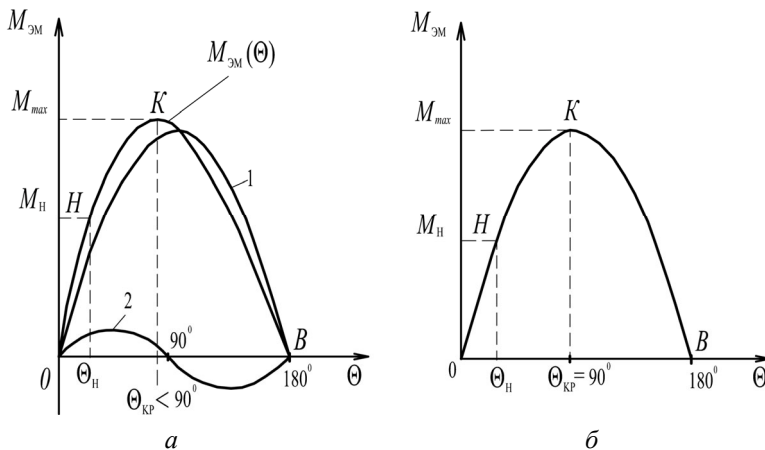


Рис. 17.4. Угловые характеристики синхронного двигателя

Электромагнитный момент:

– явноплюсного синхронного двигателя:

$$M_{эм} = \frac{m_1 E_0 U_1}{\omega x_d} \sin \Theta + \frac{m_1 U_1^2}{2\omega} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta ; \quad (17.3)$$

– неявнополюсного синхронного двигателя

$$M_{эм} = \frac{m_1 E_0 U_1}{\omega x_c} \sin \Theta. \quad (17.4)$$

В точке  $O$   $M_{эм} = 0$ ,  $\theta^\circ = 0^\circ$ . Двигатель работает синхронно в режиме холостого хода:  $P_2 = 0$ ,  $P_1 = P_{лх}$ . В точке  $K$   $M_{эм} = M_{max}$ ,  $\theta^\circ = \theta_{кр}^\circ$ .

Участок  $OK$  при  $0^\circ < \theta^\circ < \theta_{кр}^\circ$  – область устойчивой работы двигателя;  $H$  – точка номинальной нагрузки.

Участок  $KB$  при  $\theta_{кр}^\circ < \theta^\circ < 180^\circ$  – область неустойчивой работы. При  $\theta > 180^\circ$  двигатель выпадает из синхронизма.

Перегрузочная способность двигателя:

$$k_{п} = \frac{M_{max}}{M_H} \geq 2. \quad (17.5)$$

***U-образные характеристики*** синхронного двигателя (рис. 17.5) – это зависимости тока статора от тока возбуждения  $I_1 = f(I_B)$  при неизменной мощности  $P_2 = \text{const}$  и частоте тока  $f_1 = \text{const}$ .

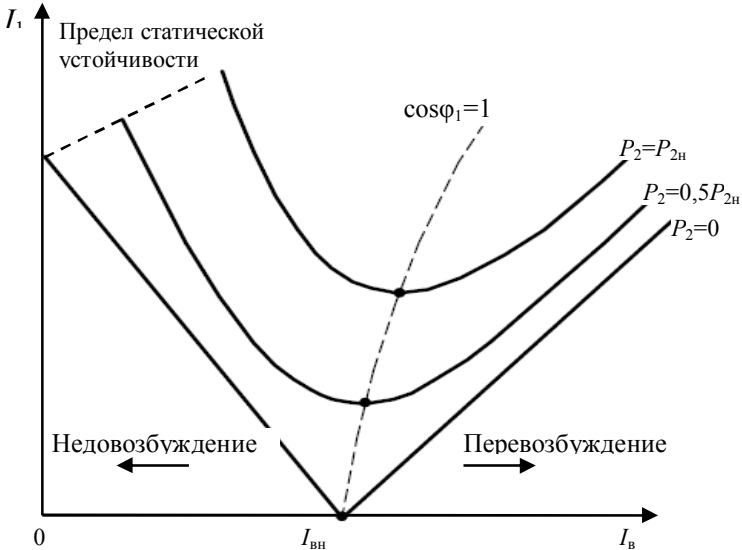


Рис. 17.5. U-образные характеристики синхронного двигателя

Они отличаются от  $U$ -образных характеристик генератора тем, что в режиме холостого хода двигателя при  $I_{\text{в}} = I_{\text{вн}}$  ток статора  $I_1$  не равен нулю. Минимумы семейства  $U$ -образных характеристик соответствуют  $\cos\varphi_1 = 1$ .

Как и генератор, при недовозбуждении двигатель потребляет реактивную мощность, а при перевозбуждении отдает ее в сеть. Регулируя ток возбуждения, управляют его реактивной мощностью. Двигатель рассчитывают на работу с перевозбуждением при  $\cos\varphi_1 = 0,9$ . Тогда он одновременно с выполнением механической работы отдает в систему реактивную мощность и повышает ее коэффициент мощности. При этом полная мощность двигателя не должна превышать номинальное значение.

Синхронные двигатели имеют ряд преимуществ по сравнению с асинхронными:

1. Возможность регулирования возбуждения и реактивной мощности, что позволяет работать с  $\cos\varphi_1 = 1$  и опережающим током в режиме перевозбуждения для компенсации реактивной мощности.

2. Возможность регулирования максимального момента путем регулирования тока возбуждения, что повышает запас статической устойчивости.

3. Меньшая чувствительность к колебаниям напряжения, так как вращающий момент пропорционален напряжению сети в первой степени, а не квадрату напряжения, как у асинхронного двигателя.

4. Стабильная частота вращения, не зависящая от нагрузки.

Имеются и недостатки синхронных двигателей:

1. Более сложная конструкция и высокая стоимость.

2. Сложность пуска.

3. Трудности регулирования частоты вращения, которое возможно только изменением частоты питающего напряжения.

Мощные синхронные двигатели применяются для привода воздуховодов доменных печей, угольных и цементных мельниц, компрессорных, насосных и вентиляционных установок, прецизионных обрабатывающих станков, подъемно-транспортных машин, конвейеров и прокатных станов, где необходима стабильная частота вращения и не требуется частых пусков. Синхронные двигатели малой мощности применяются в системах автоматического регулирования и управления, в высокоскоростных приводах станков, металлообрабатывающих центрах, роботостроении. Синхронные микродвигатели мощностью

от долей ватта до сотен ватт имеют упрощенную конструкцию и применяются для привода печатных машин в полиграфии, в часах, в точном приборостроении.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию и принцип действия синхронного двигателя по имеющимся в лаборатории образцам, плакатам.
2. Ознакомиться с лабораторной установкой. Записать паспортные данные исследуемой машины. Собрать схему для снятия характеристик (рис. 17.6).

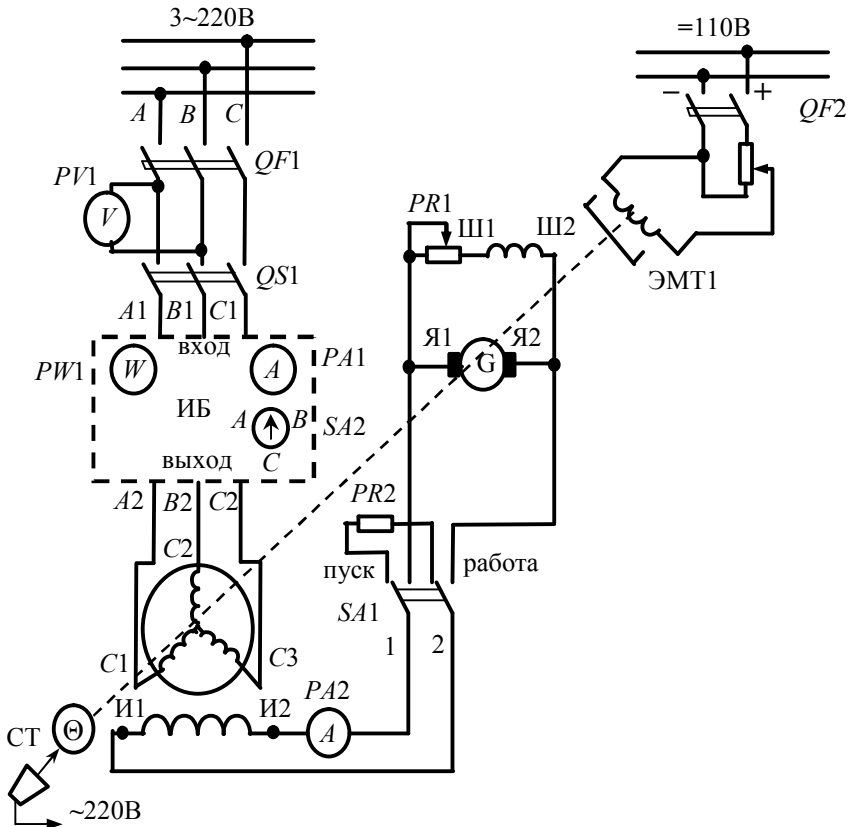


Рис. 17.6. Схема асинхронного пуска и испытания синхронного двигателя

3. Включить синхронный двигатель методом асинхронного пуска. Для этого обмотка возбуждения двигателя переключателем  $SA1$  предварительно замыкается на гасительный резистор  $PR2$ , сопротивление которого в 8–12 раз превышает ее собственное. Пуск проводить при обесточенном электромагнитном тормозе (автомат  $QF2$  отключен).

Затем кратковременно включают двигатель в сеть, замечая направление его вращения (должно соответствовать указанному стрелкой на корпусе двигателя). При необходимости изменения направления вращения изменить порядок чередования фаз питающего напряжения.

Для обеспечения максимального пускового момента устанавливают движок реостата  $PR1$  в цепи возбуждения возбудителя в положение, отмеченное чертой «Пуск», и включают двигатель в сеть.

В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с токами, индуктированными в пусковой обмотке, появляется вращающий асинхронный момент, под действием которого ротор разворачивается до частоты вращения, близкой синхронной (не менее 95 % от синхронной). По достижении ротором установившейся частоты вращения (через 5–10 с после включения) обмотку возбуждения двигателя переключают переключателем  $SA1$  на якорь возбудителя  $G$  (генератор постоянного тока)). При этом по обмотке возбуждения потечет постоянный ток, появится синхронизирующий момент, и двигатель втягивается в синхронизм.

После проведения пуска включить цепь питания электромагнитного тормоза автоматом  $QF2$  и установить минимальную нагрузку, при которой отсутствуют колебания тока якоря двигателя.

4. Снять и построить рабочие  $I_1, P_1, M, \eta = f(P_2)$  и угловую  $M = f(\Theta)$  характеристики двигателя при неизменных питающем напряжении  $U_1 = \text{const}$ , частоте тока  $f_1 = \text{const}$ , и токе возбуждения  $I_b = \text{const}$ .

Опыт проводить, постепенно нагружая двигатель электромагнитным тормозом до тока  $I_t = I_{тн}$ , начиная с точки устойчивой работы. Ток возбуждения при снятии характеристик поддерживать постоянным и равным номинальному. Одновременно со снятием рабочих характеристик снимается угловая характеристика двигателя  $M = f(\Theta)$ . Для этого на валу агрегата закреплена шкала, имеющая деления в электрических градусах. При освещении шкалы стробоскопом СТ, дающим вспышки импульсивной лампы с частотой,

равной частоте тока сети, для каждой точки нагрузки по шкале  $\Theta$ .  
 Определить угол между осью полюсов и осью поля якоря.

Данные опыта и расчетов занести в табл. 17.1.

Таблица 17.1

Рабочие и угловая характеристики синхронного двигателя

Опыт					Расчет					
$I_1$ , А	$U_1$ , В	$P_1$ , Вт	$M$ , Н·м	$\Theta$ , град	$I_1^*$ , о. е.	$P_1^*$ , о. е.	$M^*$ , о. е.	$P_2^*$ , о. е.	$P_2$ , Вт	$\eta_d$ , о. е.

Мощность на валу двигателя

$$P_2 = M n_n / 9,55,$$

где  $M$  – момент на валу двигателя, Н·м;

$n_n$  – номинальная частота вращения вала двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ .

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta_d = P_2 / P_1,$$

где  $P_1$  – мощность, потребляемая двигателем, Вт.

Относительные значения тока, момента, мощности:

$$I_1^* = I_1 / I_{1H}; \quad M^* = M / M_H; \quad P_1^* = P_1 / P_{1H}; \quad P_2^* = P_2 / P_{2H},$$

где  $I_{1H}$ ,  $M_H$ ,  $P_{1H}$  – номинальные значения тока, момента и мощности двигателя соответственно.

5. Снять и построить  $U$ -образную характеристику двигателя  $I_1^* = f(i_b^*)$  при  $M_2 = \text{const}$ .

Запустить двигатель, установить момент на валу двигателя  $M = 8 \text{ Н·м}$ . Затем изменять ток возбуждения двигателя с помощью реостата  $PR1$  так, чтобы ток двигателя  $I_1$  изменялся от  $I_1 = I_{1H}$  до  $I_1 = I_{1\text{min}}$  (недовозбуждение) и от  $I_1 = I_{1\text{min}}$  до  $I_1 = I_{1H}$  (перевозбуждение).

При снятии характеристики ток статора не должен превышать номинальное значение, так как возможен выход машины из режима синхронизма. В таком случае опыт следует повторить сначала. Данные опыта и расчета токов занести в табл. 17.2.

Таблица 17.2

Зависимость тока двигателя от тока возбуждения

Опыт		Расчет	
$I_1, \text{A}$	$i_B, \text{A}$	$I_1^*, \text{о. е.}$	$i_B^*, \text{о. е.}$

Относительный ток возбуждения двигателя

$$i_B^* = i_B / i_{Bн},$$

где  $i_{Bн}$  – номинальный ток возбуждения двигателя.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
  - графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип работы синхронного двигателя.
2. Какие достоинства и недостатки синхронного двигателя?
3. Назовите области применения синхронных двигателей.
4. Почему невозможен прямой пуск синхронного двигателя?

5. Назовите способы пуска синхронного двигателя и дайте их краткое описание.
6. Почему обмотка возбуждения синхронного двигателя при асинхронном пуске замыкается на резистор?
7. Покажите на  $U$ -образной характеристике зоны перевозбуждения, недо возбуждения и точку нормального возбуждения с  $\cos\varphi = 1$ .
8. Почему  $U$ -образная характеристика синхронного двигателя при  $P_2 = 0$  не касается оси абсцисс и лежит выше ее?
9. Чем объясняется выпадение двигателя из синхронизма при его перегрузке?

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАУНДИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Цель работы** – изучение конструкции и основных характеристик компаундированного синхронного генератора.

### **Задачи работы:**

1. Изучить устройство синхронного генератора с компаундирующей обмоткой.
2. Приобрести практические навыки в сборке электрических схем, снятии внешних и регулировочных характеристик компаундированного синхронного генератора.

### **Общие сведения**

Известно, что внешняя характеристика синхронного генератора круто падает с увеличением нагрузки. Поддерживать напряжение неизменным, близким к номинальному, как этого требуют правила эксплуатации, можно путем компаундирования генератора.

В лабораторной работе используется однофазный компаундированный синхронный генератор (КСГ) обращенного исполнения, который выполнен в одном корпусе с приводным двигателем постоянного тока параллельного возбуждения.

Статор генератора в данной конструкции является индуктором (создает магнитный поток). На статоре КСГ к станине крепятся полюсы с основной обмоткой возбуждения (И1-И2) и вспомогательной (К1-К2) компаундирующей обмоткой. Назначение статора – создать магнитный поток основной обмоткой И1-И2 и дополнительной – К1-К2. Компаундирующая обмотка включается согласно с основной обмоткой возбуждения так, чтобы создаваемые ими магнитные потоки суммировались. Генератор может работать и с отключенной компаундирующей обмоткой.

Подвижная часть машины – ротор имеет вал, магнитопровод с якорной обмоткой (С1-С2), подключенной на два контактных кольца, размещенные на этом же валу. В обмотке С1-С2 наводится ЭДС, и с контактных колец посредством токосъемных щеток снимается напряжение. Ротор в этом случае является якорем.

Компаундирующая обмотка получает питание от вторичной обмотки трансформатора тока ( $TA$ ) после выпрямления диодным мостом  $VD1$ . Первичная обмотка трансформатора тока Л1-Л2 включается последовательно в цепь обмотки якоря С1-С2.

Число витков компаундирующей обмотки  $W_k$  выбирается с учетом необходимости компенсации реакции якоря и вызываемого этим падением напряжения в обмотке якоря при номинальной нагрузке:

$$W_k = W_{\text{осн}}/20,$$

где  $W_{\text{осн}}$  – число витков основной обмотки возбуждения.

Как известно из теории работы синхронного генератора, с ростом нагрузки напряжение на выходе генератора уменьшается, что вызвано ослаблением основного магнитного потока вследствие размагничивающего действия реакции якоря. При наличии компаундирующей обмотки пропорционально увеличению нагрузки возрастает автоматически напряжение вторичной обмотки трансформатора тока, в цепь которой она включена, и при правильном выборе числа витков обмотки К1-К2 суммарный магнитный поток остается неизменным, несмотря на размагничивающее действие реакции якоря. Таким образом, компаундирующая обмотка позволяет улучшить работу синхронного генератора под нагрузкой.

В данной лабораторной работе при снятии основных характеристик включение и отключение компаундирующей обмотки производится с помощью переключателя  $QS2$ . Различная по величине активная нагрузка включается выключателями  $QS3...QS5$  и автоматически – выключателем  $QF3$ . Реактивная нагрузка включается автоматическим выключателем  $QF2$  и регулируется изменением числа витков на катушке с сердечником.

Пуск приводного двигателя постоянного тока необходимо осуществлять с ограничением пускового тока, включая на это время сопротивление  $R_n$ , после пуска – его закорачивают выключателем  $QS1$ .

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить устройство синхронного генератора с компаундирующей обмоткой.



до номинального тока  $I_n = 10$  А активной нагрузкой ( $\cos \varphi = 1$ ), реактивной ( $\cos \varphi = 0$ ), в режиме без компаундирования и с компаундированием (переключатель QS2). Данные занести в табл. 18.1 и 18.2.

Таблица 18.1

Внешние характеристики генератора при  $\cos \varphi = 1$

Характеристики							
с компаундированием				без компаундирования			
опыт		расчет		опыт		расчет	
$U, В$	$I, А$	$U^*, \text{о. е.}$	$I^*, \text{о. е.}$	$U, В$	$I, А$	$U^*, \text{о. е.}$	$I^*, \text{о. е.}$

Таблица 18.2

Внешние характеристики генератора при  $\cos \varphi = 0$

Характеристики							
с компаундированием				без компаундирования			
опыт		расчет		опыт		расчет	
$U, В$	$I, А$	$U^*, \text{о. е.}$	$I^*, \text{о. е.}$	$U, В$	$I, А$	$U^*, \text{о. е.}$	$I^*, \text{о. е.}$

Относительное напряжение генератора

$$U^* = U/U_n,$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение генератора.

Относительный ток нагрузки генератора

$$I^* = I/I_n,$$

где  $I_n$  – номинальный ток генератора.

По данным табл. 18.1 и 18.2 построить внешние характеристики генератора и сделать выводы.

4. Снять регулировочные характеристики синхронного генератора  $i_{\text{вн}} = f(I)$ , соблюдая условие:  $U = U_n = 200 В = \text{const}, f = 50 Гц = \text{const}$ .

Регулировочные характеристики снять с компаундированием для активной нагрузки ( $\cos\varphi = 1$ ) и для реактивной нагрузки ( $\cos\varphi = 0$ ). Нагрузку изменять от холостого хода до номинальной ( $I_n = 10$  А). Данные опыта занести в табл. 18.3 и 18.4.

Таблица 18.3

Регулировочные характеристики генератора при  $\cos \varphi = 1$

Характеристики							
без компаундирования				с компаундированием			
опыт		расчет		опыт		расчет	
$i_B, \text{А}$	$I, \text{А}$	$i_B^*, \text{о. е.}$	$I^*, \text{о. е.}$	$i_B, \text{А}$	$I, \text{А}$	$i_B^*, \text{о. е.}$	$I^*, \text{о. е.}$

Таблица 18.4

Регулировочные характеристики генератора при  $\cos \varphi = 0$ .

Характеристики							
без компаундирования				с компаундированием			
опыт		расчет		опыт		расчет	
$i_B, \text{А}$	$I, \text{А}$	$i_B^*, \text{о. е.}$	$I^*, \text{о. е.}$	$i_B, \text{А}$	$I, \text{А}$	$i_B^*, \text{о. е.}$	$I^*, \text{о. е.}$

Относительный ток возбуждения генератора

$$i_B^* = i_B / i_{Bn},$$

где  $i_{Bn}$  – номинальный ток возбуждения генератора.

По данным табл. 18.3 и 18.4 построить регулировочные характеристики генератора и сделать выводы.

### Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема лабораторной установки, паспортные данные исследуемой машины.
3. Информация по каждому опыту:
  - название опыта;
  - таблицы с экспериментальными и расчетными данными;

- графически построенные характеристики;
  - расчетные формулы, примеры расчетов.
4. Выводы по лабораторной работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните конструкцию однофазного компаундированного синхронного генератора.
2. Укажите достоинства и недостатки данной конструкции генераторов.
3. В чем сущность метода компаундирования?
3. Для каких целей в данной машине применяется компаундирующая обмотка?
5. Как влияет характер нагрузки на работу генератора?
6. Проанализировать внешние характеристики генератора?
7. Для чего необходимо знать регулировочные характеристики?
8. Как определяется число витков компаундирующей обмотки?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов, И. П. Электрические машины : в 2 т. : учеб. / И. П. Копылов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2020. – Т. 1. – 267 с.
2. Копылов, И. П. Электрические машины : в 2 т. : учеб. / И. П. Копылов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2020. – Т. 2. – 407 с.
3. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин : учеб. / И. П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2019. – 828 с.
4. Электрические машины : лабораторный практикум / В. М. Збродыга [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2019. – 216 с.
5. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2010. – 350 с.
6. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учеб. / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 320 с.
7. Подгайский, Г. Д. Электрические машины : учеб. пособие / Г. Д. Подгайский, Н. Е. Шевчик. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2009. – 336 с.
8. Шевчик, Н. Е. Электрические машины : учеб.-метод. пособие : в 2 ч. / Н. Е. Шевчик ; Минсельхозпрод Респ. Беларусь, «УО БГАТУ». – Минск : БГАТУ, 2011. – Ч. 1 – 188 с.
9. Шевчик, Н. Е. Электрические машины : учеб.-метод. пособие : в 2 ч. Ч. 2 : Асинхронные машины и трансформаторы / Н. Е. Шевчик ; Минсельхозпрод Респ. Беларусь, УО «БГАТУ». – Минск : БГАТУ, 2014. – 188 с.
10. Кацман, М. М. Электрические машины : учеб. / М. М. Кацман. – 8-е изд., стереотип. – М. : Академия, 2008. – 496 с.

Учебное издание

**Збродыга Владимир Михайлович,  
Зеленькевич Александр Иосифович,  
Елифанов Валерий Игоревич и др.**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *А. И. Зеленькевич*  
Редактор *Г. В. Анисимова*  
Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*  
Дизайн обложки *Д. О. Михеевой*

Подписано в печать 15.12.2025. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 12,55. Уч.-изд. л. 9,82. Тираж 99 экз. Заказ 359.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.