



Министерство образования и науки Самарской области  
Государственное бюджетное профессиональное образователь-  
ное учреждение  
Самарской области  
«САМАРСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»  
(ГБПОУ «СЭК»)

А.П. Волков

МДК 01.01 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, СЕТЕЙ И СИСТЕМ

Раздел 1 Применение основного электрооборудования электрических  
станций и сетей

Методические указания к лабораторным занятиям  
для студентов специальности

13.02.03 Электрические станции, сети и системы

ПМ.01 Обслуживание электрооборудования электрических станций,  
сетей и систем

Самара 2017

Печатается по решению методического совета государственного бюджетного профессионального образовательного учреждения Самарской области «Самарский энергетический колледж»

Методические указания к лабораторным занятиям раздела 1 *Применение основного электрооборудования электрических станций и сетей* МДК 01.01 *Техническое обслуживание электрооборудования электрических станций, сетей и систем* ПМ.01 *Обслуживание электрооборудования электрических станций, сетей и систем* для студентов специальности 13.02.03 / сост: Волков А.П. – Самара: ГБПОУ «СЭК», 2017 – 57 с.

Издание содержит методические указания к лабораторным занятиям раздела 1 *Применение основного электрооборудования электрических станций и сетей* МДК 01.01 *Техническое обслуживание электрооборудования электрических станций, сетей и систем* ПМ.01 *Обслуживание электрооборудования электрических станций, сетей и систем*

Замечания, предложения и пожелания направлять в ГБПОУ «СЭК» по адресу: 443001, г. Самара, ул. Самарская 205-А или по электронной почте [info@sam-ek.ru](mailto:info@sam-ek.ru)

## Введение

Методические указания соответствуют федеральному образовательному стандарту специальности 13.02.03 Электрические станции, сети и системы, рабочим программам профессиональных модулей ПМ.01. Обслуживание электрооборудования электрических станций, сетей и систем и ПМ.02. Эксплуатация электрооборудования электрических станций, сетей и систем.

Данные указания содержат описание лабораторных работ по исследованию практически всех типов электромеханических преобразователей энергии и силовых трансформаторов электроэнергетических систем.

В МДК.01.01 Техническое обслуживание электрооборудования электрических станций, сетей и систем исследуются характеристики генераторов и двигателей постоянного тока с различными схемами возбуждения, однофазный и трёхфазный трансформаторы, асинхронные машины: двигатели с короткозамкнутым и фазным роторами и индукционный регулятор.

В МДК.02.01 Техническая эксплуатация электрооборудования электрических станций, сетей и систем изучается синхронизации с сетью, регулирование активной и реактивной мощности синхронных генераторов, параллельная работа силовых трансформаторов с одинаковыми и различными коэффициентами трансформации.

Работы выполняются в составе бригад в количестве 4-5 человек. К работам допускаются студенты прошедшие инструктаж по технике безопасности.

По результатам работ оформляется отчёт, который должен содержать электрические схемы испытаний, в соответствии с методическими указаниями может включать таблицы экспериментальных и расчётных данных, графики и векторные диаграммы.

Номинальные данные изучаемых машин находятся на лабораторных стендах.

### Перечень лабораторных занятий

№ п/п	Название лабораторного занятия	Количество часов при всех формах обучения
1	Лабораторное занятие 1. Ознакомление с лабораторией, инструктаж по технике безопасности	2
2	Лабораторное занятие 2. Исследование генератора постоянного тока независимого возбуждения	2
3	Лабораторное занятие 3. Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения	2
4	Лабораторное занятие 4. Исследование генератора постоянного тока смешанного возбуждения	2
5	Лабораторное занятие 5. Исследование двигателя постоянного тока независимого возбуждения	2
6	Лабораторное занятие 6. Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения	2
7	Лабораторное занятие 7. Исследование двигателя постоянного тока смешанного возбуждения	2

8	Лабораторное занятие 8. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	2
9	Лабораторное занятие 9. Исследование асинхронного двигателя с фазным ротором	2
10	Лабораторное занятие 10. Индукционный регулятор	2
11	Лабораторное занятие 11. Исследование однофазного трансформатора	2
12	Лабораторное занятие 12 . Исследование трёхфазного трансформатора методом холостого хода и короткого замыкания	2
13	Лабораторное занятие 13. Группы соединения обмоток трехфазного трансформатора	2
14	Лабораторное занятие 14. Исследование характеристик синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку	2
Итого		28

## Лабораторное занятие 1

### Ознакомление с лабораторией, инструктаж по технике безопасности

*Цель:* изучить электрооборудование лаборатории электрических машин и трансформаторов, провести инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторных и практических работ.

#### Порядок работы

1. Общие сведения об организации работ в лаборатории.
2. Ознакомление с источниками, питающими лабораторию и лабораторными стендами.
3. Типы электрических машин и трансформаторов лаборатории и их основные характеристики.
4. Коммутационные аппараты лаборатории.
5. Электроизмерительные приборы лаборатории.
6. Ознакомление с типовой инструкцией по технике безопасности, инструктаж по технике безопасности.

#### Методические указания

##### Общие сведения об организации работ в лаборатории

Лаборатория электрических машин и трансформаторов относится к помещениям с повышенной опасностью в отношении поражения электрическим током, поэтому проведения учебных занятий требует выполнения комплекса организационных и технических мероприятий, обеспечивающих защиту от поражения электрическим током, электрической дугой, электромагнитным полем и статическим электричеством.

Основным техническим средством, обеспечивающим электробезопасность при проведении занятий в лаборатории, является защитное заземление.

К организационным мероприятиям, обеспечивающим электробезопасность

в лаборатории, относится инструктаж по технике безопасности, допуск бригады студентов к выполнению лабораторных и практических занятий, контроль за выполнением работ.

Лабораторные работы выполняются бригадами в составе 4...5 студентов.

### Типы электрических машин и трансформаторов лаборатории

В лаборатории находятся практически все типы электромеханических преобразователей и трансформаторов, применяемых в электроэнергетических системах – машины постоянного и переменного тока: генераторы, двигатели, однофазные и трёхфазные трансформаторы с номинальным напряжением до 380 В. На выходе индукционного регулятора напряжение может составлять двукратного значения напряжения сети 220 В.

В таблице 1 приведены основные технические характеристики электрических машин и трансформаторов лаборатории.

Таблица 1 – Перечень электрических машин лаборатории

Тип машины	Обозначение	Основные параметры
<b>Трансформаторы</b>		
Трёхфазный трансформатор	ТСВМ-4-74	4 кВА, $u_k\% = 3$ , Y-Δ 380/220 В; 6,08/10,5 А Y-Δ, Yн-Δ 230/133 В; 10,4/17,4А
Однофазный трансформатор	ОСВМ-16-74	1,6кВА; $u_k\% = 4,8$ ; 220/133 В; 7,27/12,03А
<b>Асинхронные машины</b>		
АД с короткозамкнутым ротором	4АМ-100-С4-У3	Y 380 В; 6,7 А; 3 кВт; 1410 об/мин; КПД 82%; $\cos\varphi = 0.83$
АД с фазным ротором	МТФ 111-6У1	Статор: 3,5кВт; 380/220; 10,8/18,7А; Ротор: 176 В; 15А; 900 об/мин
Индукционный регулятор	ИР-60-УХЛ4	380В; 32,5А; напряжение 20...680В; 24,5 А; КПД 93%
<b>Машины постоянного тока</b>		
Генератор	ПЗ1М1	1кВт; 230В; 4,25А; 1450 об/мин; КПД 75%.
Двигатель	2ПН-100И	2,2 кВт; 220 В; 11,8А; 3105 об/мин; КПД 82%
Двигатель	П-42УХЛ 4	2,2 кВт; 220 В; 13,1А; 1000 об/мин; S1; ПВ 40%

Конструктивно электрические машины объединены в агрегаты, состоящие из двух электрических машин: двигателя и генератора, механически соединённых муфтой. Для асинхронного двигателя МТФ 111-6У1 и двигателя постоянного тока П-42УХЛ 4 нагрузочным устройством является электромагнитный тормоз (рисунок 1). Многополюсная система возбуждения этого устройства получает питание от источника постоянного напряжения. Регулируя величину напряжения,

изменяют ток в электромагнитах 2. Созданный ток магнитный поток пронизывает вращающийся диск 7, в котором индуцируются токи, взаимодействие которых с магнитным потоком полюсов приводит к созданию тормозного момента на валу электродвигателя. Тормозной момент вызывает отклонение противовеса 5, с которым связана измерительная часть прибора – индикаторная стрелка, которая, перемещаясь вместе с противовесом 5, показывает величину момента по градуированной шкале 9. Полезный момент на валу, Н·м, определяется по верхней шкале электромагнитного тормоза по следующему выражению:

$$M = (\text{количество делений}) \cdot 0,736, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

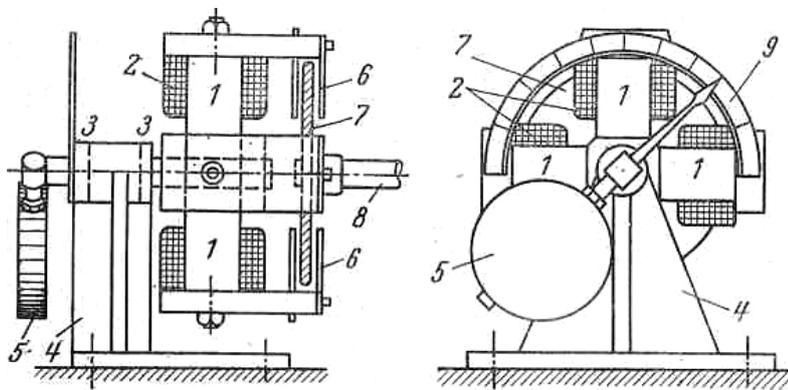


Рисунок 1 – Электромагнитный тормоз

### Коммутационные аппараты

Питающий лабораторию кабель напряжением 380 Вольт через рубильник и выключатель подключается к входу силового трансформатора (380/220 Вольт), размещённого в распределительном шкафу. Для защиты оборудования лабораторных стендов в распределительных шкафах установлены выключатели серии А-50. В шкафах также размещены магнитные пускатели постоянного и переменного тока, работа которых управляется со стороны лабораторных стендов. В распределительных шкафах установлен диодный выпрямитель, собранный по мостовой схеме, с выхода которого питаются цепи постоянного тока лабораторных стендов. Постоянный ток регулируется со стороны индукционного регулятора. Подача питающего напряжения на лабораторные стенды осуществляется с кнопочного поста, конструктивно размещённого в центральной части стенда. Левая черная кнопка «Пуск» подаёт на стенд переменное трёхфазное напряжение. Правая крайняя кнопка «Пуск» подаёт на стенд постоянное напряжение. Центральная красная кнопка «Стоп» одновременно отключает и постоянное и переменное напряжение. Для безопасности перед сборкой схем опытов необходимо нажать на красную кнопку

На лицевую панель стендов выведены рукоятки неавтоматических выключателей и переключателей, управляющих переключениями электрических цепей.

### Электроизмерительные приборы лаборатории

В лаборатории установлены только аналоговые измерительные приборы. Для выполнения измерений на лицевой панели стендов установлены амперметры, вольтметры, двухэлементные ваттметры и другие приборы различных классов

точности и измерительных систем щитовой конструкции. В некоторых работах используются переносные измерительные приборы – ваттметры, вольтметры и амперметры. На распределительном щите лаборатории и лабораторных стендах установлены вольтметры и лампочки, используемые как индикаторы наличия напряжения. Приборы, используемые как индикаторные, не имеют подключений со стороны передней панели стендов. При больших бросках тока при пуске двигателей амперметры, токовые обмотки ваттметров шунтируют съёмными перемычками, которые после пуска снимают. При проведении опытов необходимо контролировать измеряемые величины токов, напряжений, мощности, не допуская превышения их значений по отношению номинальных величин лабораторного оборудования, положение индикаторных стрелок приборов не должны выходить за пределы измерительной шкалы.

### Ознакомление с типовой инструкцией по технике безопасности, инструктаж по технике безопасности

На первом занятии студенты изучают утверждённую инструкцию по технике безопасности, прослушивают инструктаж по технике безопасности, расписываются в журнале инструктажей по технике безопасности.

До начала занятий студентам необходимо изучить методические указания по проведению текущей лабораторной работы, ознакомиться с электрической схемой экспериментов.

Запрещается находиться в лаборатории студентам без преподавателя.

Запрещается включать лабораторные стенды без проверки схемы преподавателем. При проведении работ часто требуется вносить изменения в электрическую схему. Перед коммутацией схемы необходимо нажать красную кнопку «СТОП».

## Лабораторное занятие 2

### Исследование генератора постоянного тока независимого возбуждения

*Цель:* изучить конструкции и характеристики генератора постоянного тока независимого возбуждения.

#### Порядок работы

1. Ознакомиться с конструкцией и номинальными параметрами исследуемого генератора.
2. Собрать электрическую схему для снятия характеристик генератора.
3. Определить экспериментальным путем следующие характеристики:
  - 3.1 Характеристику холостого хода (х.х.х.)
  - 3.2 Внешнюю характеристику
  - 3.3 Регулировочную характеристику
  - 3.4 Характеристику короткого замыкания (х.к.з.)
4. Построить х.х.х. по данным испытаний генератора и определить коэффициент насыщения магнитной цепи.
5. Построить характеристический треугольник по данным х.х.х. и х.к.з.
6. Построить нагрузочную характеристику генератора при помощи х.х.х. и ха-

ракетического треугольника.

7. Построить внешнюю характеристику при помощи х.х.х. и характеристического треугольника.
8. Оформить отчёт по технике безопасности.

### Методические указания

Генератор постоянного тока (ГПТ) – электромеханический преобразователь механической энергии в энергию постоянного тока. Конструкция ГПТ представлена на рисунке 1. Генератор состоит из неподвижного статора и вращающегося якоря.

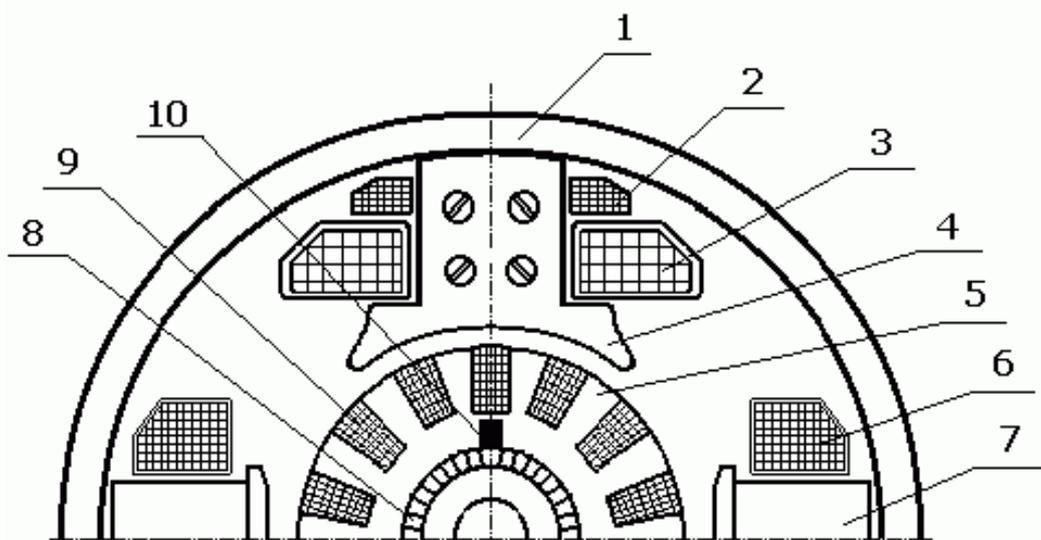


Рисунок 1 – Конструкция генератора постоянного тока

Статор состоит из стальной или чугунной станины 1, на которой закреплены главные магнитные полюсы 4 и дополнительные полюсы 7. На полюсах располагаются обмотки – 2, 3 и 6. Обмотки главных полюсов создают основное магнитное поле ГПТ, обмотка дополнительного полюса 6 создает поперечное магнитное поле, которое улучшает условия коммутации (снижает искрение под щётками 4). Магнитопровод якоря изготавливают из пакета штампованных пластин электротехнической стали. Пакет напрессовывается на вал, который вращается в подшипниках. На внешней стороне сердечника якоря находится зубцово-пазовая зона. В пазах располагается обмотка якоря 9. В генераторах с независимым возбуждением обмотка якоря не имеет электрической связи с обмотками возбуждения. В других типах генераторов обмотка якоря может включаться с обмотками возбуждения параллельно, последовательно или иметь смешанное соединение. Обмотка якоря включается последовательно с обмоткой дополнительного полюса 6. С внешней сетью обмотка якоря связана при помощи неподвижных щеток 10, которые скользят по коллектору 8. К коллектору присоединены концы секций обмотки якоря. В возбуждённой машине при вращении якоря в его обмотке наводится ЭДС:

$$E_a = C_e n \Phi, \quad (1)$$

где  $E_a$  – ЭДС генератора,  
 $C_e$  – конструктивный коэффициент,

$n$  – частота вращения,  
 $\Phi$  – магнитный поток.

Под нагрузкой напряжение на щетках генератора:

$$U = E_a - I_a R_a, \quad (2)$$

где  $I_a$  – ток якоря,

$R_a$  – суммарное сопротивление цепи якоря

При протекании тока нагрузки  $I_a$  возникает электромагнитный момент, который в генераторном режиме направлен против вращающего момента приводного двигателя:

$$M = C_m \Phi I_a \quad (3)$$

где  $C_m$  – конструктивный коэффициент.

При нагрузке ток якоря  $I_a$  создает магнитное поле реакции якоря, которое изменяет величину и распределение магнитной индукции в зазоре. Реакция якоря оказывает большое влияние на все характеристики генератора. В генераторах обычной конструкции поле реакции якоря уменьшает магнитный поток, ЭДС и ухудшает условия коммутации.

### Экспериментальное определение характеристик генератора

Выписать номинальные данные исследуемого генератора и приводного двигателя. Собрать электрическую схему согласно рисунку 2.

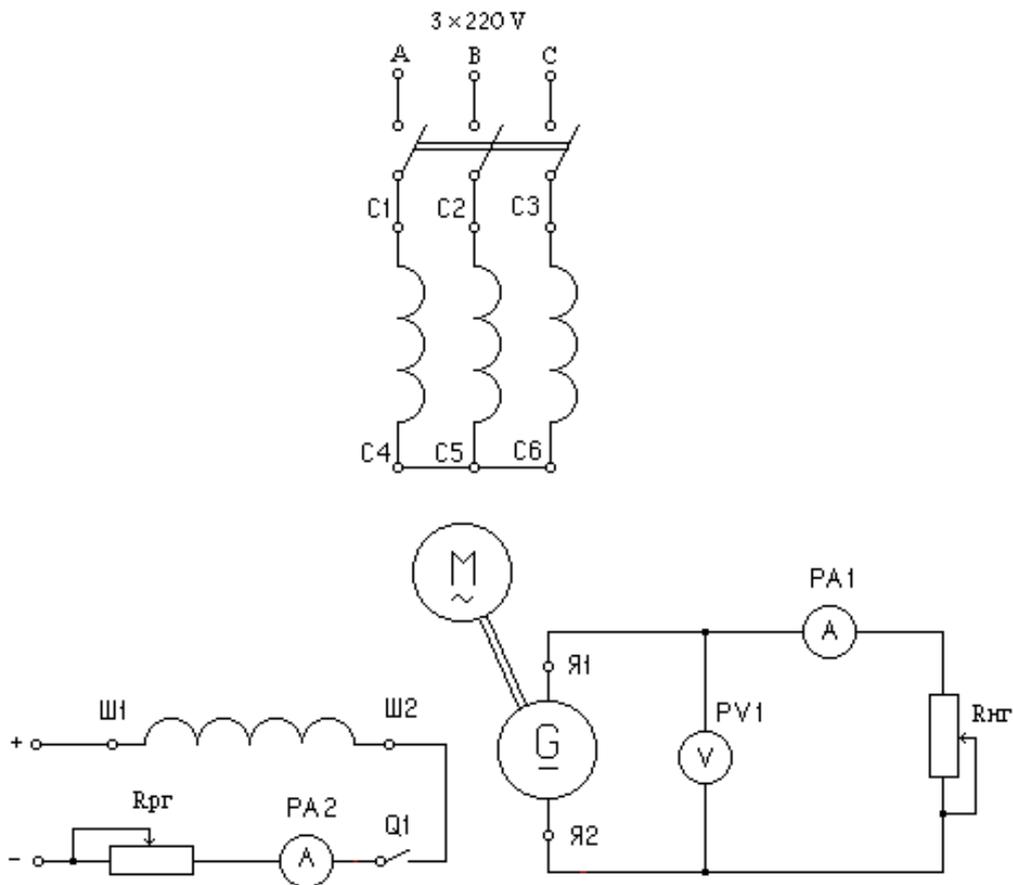


Рисунок 2 – Электрическая схема генератора с независимым возбуждением



Таблица 1- Характеристика холостого хода

Нисходящая ветвь		Восходящая ветвь	
$U, B$	$I_{\epsilon}, A$	$U, B$	$I_{\epsilon}, A$

### Внешняя характеристика

Внешняя характеристика – это зависимость напряжения на якоре генератора от тока нагрузки при постоянной частоте вращения и постоянном токе возбуждения:

$$U = f(I_a) \text{ при } I_{\epsilon} = const \text{ и } n = n_{ном}$$

Для снятия характеристики устанавливают номинальный режим – номинальный ток якоря  $I_{ном}$  и номинальное напряжение  $U_{ном}$ . Не изменяя ток возбуждения, уменьшают ток якоря до нуля.

Таблица 2 – Внешняя характеристика

$I_a, A$	$U, B$	Примечание
		$I_{\epsilon} = I_{\epsilon ном}$ $n =$

### Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока якоря при неизменном напряжении и постоянной частоте вращения:

$$I_{\epsilon} = f(I_a) \text{ при } U = U_{ном} \text{ и } n = const$$

Установить номинальный ток возбуждения  $I_{\epsilon ном}$ . Нагрузить генератор номинальным током  $I_{ном}$ . Уменьшая ток якоря, поддерживают напряжение неизменным за счёт регулирования тока возбуждения. Снять 5.. .6 точек, включая точку с  $I_a = 0$

Таблица 3 – Регулировочная характеристика

$I_{\epsilon}, A$	$I_a, A$	Примечание
		$U = U_{ном}$ $n = const$

### Характеристика короткого замыкания

Характеристика короткого замыкания – это зависимость тока якоря от тока возбуждения при замкнутой накоротке обмотке якоря

$$I_a = f(I_{\epsilon}) \text{ при } U = 0 \text{ и } n = const.$$

При проведении опыта установить ток в цепи возбуждения  $I_{\text{в}} = 0$ , отключить ключ  $Q1$ . Соединить якорные зажимы Я1-Я2 через амперметр:

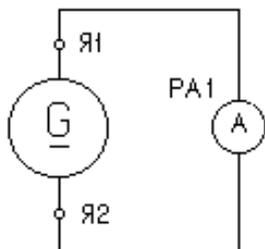


Рисунок 4 – опыт к.з.

Запустить приводной двигатель и зафиксировать ток в цепи якоря. Включить ключ  $Q1$ ; плавно увеличивая ток в цепи возбуждения зафиксировать 2.. 3 значения тока якоря. Ток якоря не должен превышать номинальное значение на 25 %.

Таблица 4 – характеристика короткого замыкания

$I_a, A$	$I_{\text{в}}, A$	Примечание
		$U = 0$ $n =$

Построение х.х.х. по данным испытаний генератора и определение коэффициента насыщения магнитной цепи

За расчётную х.х.х. принимают среднюю линию между точками 2-1-6 и проходящую через начало координат.

Для определения коэффициента насыщения провести касательную к расчётной характеристике х.х.х. в её начальной части. Отложить на оси ординат  $E_H$ :

$$E_H = U + I_a R_a$$

Касательная пересекает горизонтальную линию, соответствующую  $E_H$ , в точке В, делящей отрезок АС на два отрезка: АВ и ВС. В масштабе тока возбуждения отрезок АВ пропорционален МДС воздушного зазора, а ВС – МДС магнитопровода в масштабе тока возбуждения. Коэффициент насыщения определяется по следующему выражению:

$$K_H = (AB+BC)/AB = 1+BC/AB$$

Построение характеристического треугольника по данным х.х.х. и х.к.з.

Характеристический треугольник строится по данным начальной части х.х.х. и расчётной х.к.з. Расчётную характеристику х.к.з. получают параллельным переносом опытной х.к.з., проводя её через начало координат – рисунок 5. Ход построения поясняют стрелки. В масштабе тока откладывают отрезок  $\sim I_a$  до пересечения с х.к.з. Из точки С в масштабе напряжения откладывают падение напряжения в цепи якоря при номинальном токе ( $I_a R_a$ ) – отрезок СВ. Точку В

соединяют линией с х.х.х. Проекция точек А и В на ось ординат в масштабе напряжения численно равны ЭДС соответственно в режимах х.х. и к.з. При этом мдс в режиме короткого замыкания в масштабе тока возбуждения будет больше на величину  $I_{\text{в}a}$ . Поэтому катет АВ характеризует действие реакции якоря в масштабе тока возбуждения. Треугольник АВС называется характеристическим. Он используется для построения характеристик генератора.

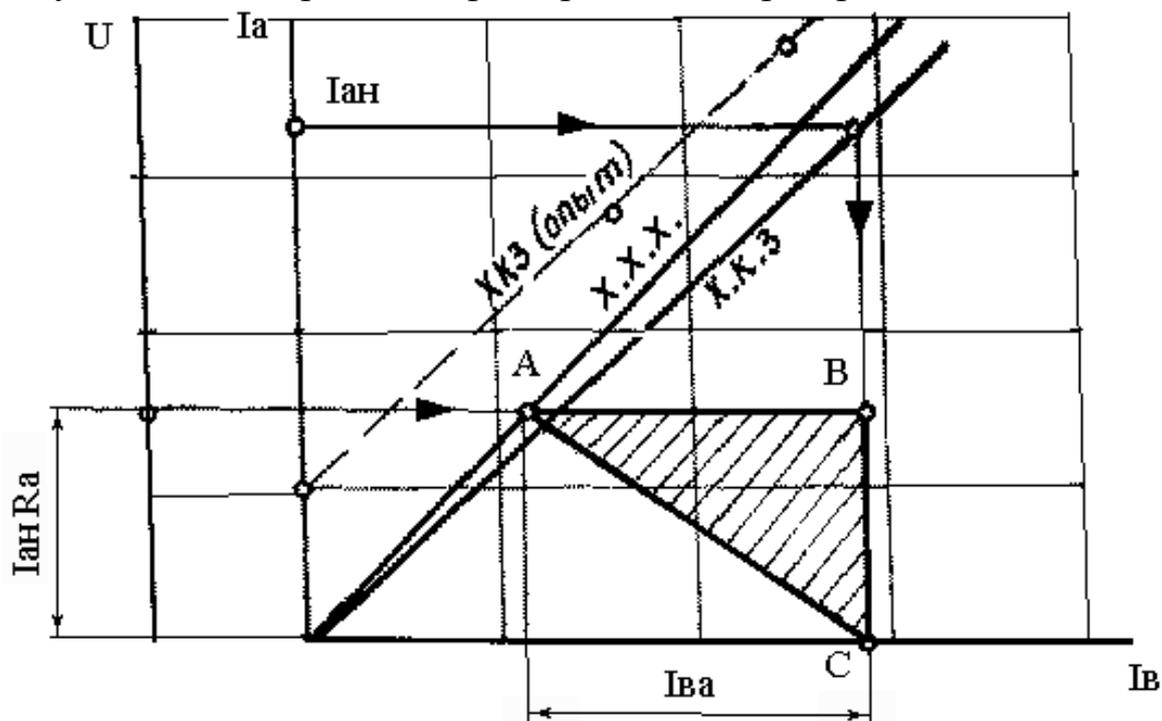


Рисунок 5 – Построение характеристического треугольника

Построение нагрузочной характеристики генератора при помощи х.х.х. и характеристического треугольника

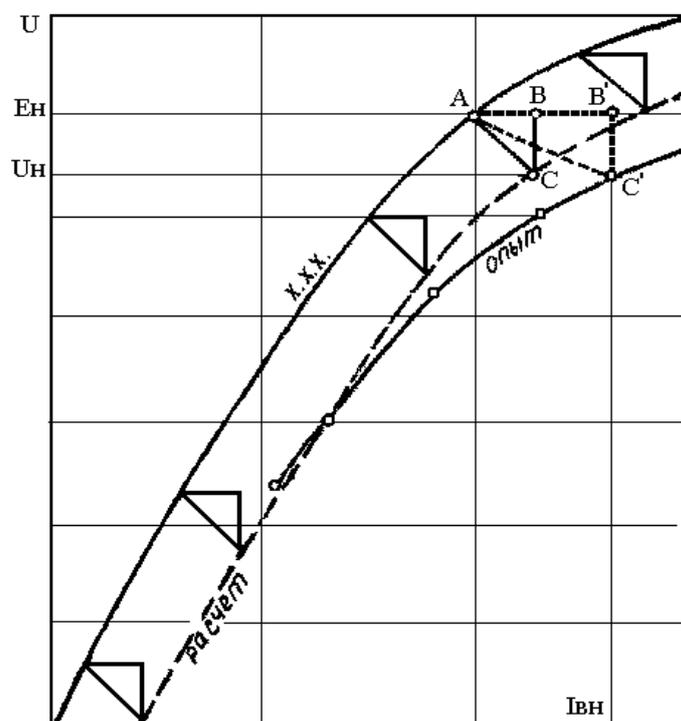


Рисунок 6 – Построение нагрузочной характеристики

Нагрузочную характеристику строят графическим методом при помощи х.х.х. и характеристического треугольника. Вершина треугольника А скользит по х.х.х., а вершина С будет описывать линию нагрузочной характеристики. Треугольник АВ'С', построенный по номинальным данным и опытной характеристике, будет отличаться на отрезок ВВ', который характеризует реакцию якоря, проявляющуюся наиболее ярко при насыщении магнитопровода.

Построение внешней характеристики при помощи х.х.х. и характеристического треугольника

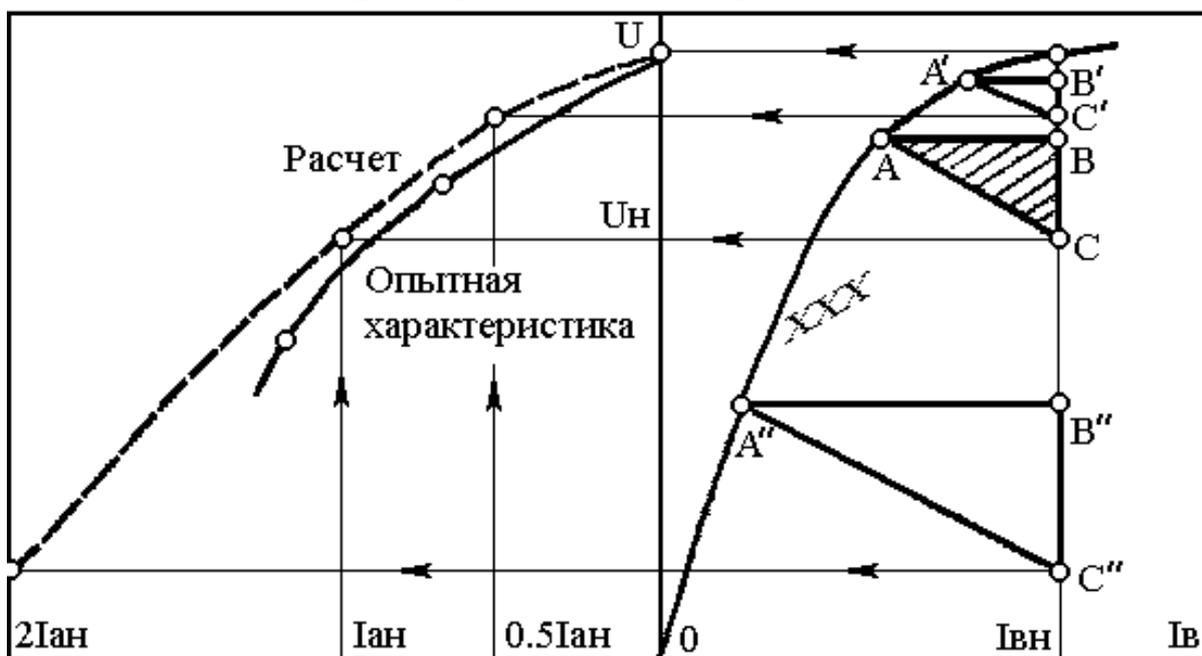


Рисунок 7 – Построение внешней характеристики

Внешняя характеристика (рисунок 7) построена при помощи х.х.х. и характеристического треугольника. Вершина треугольника А лежит на х.х.х., а вершина С на линии  $U = U_{ном}$ . Через точку С проводят линию до пересечения с линией, соответствующей  $I_{ном}$ . Для получения промежуточных точек необходимо изменять стороны треугольника пропорционально току якоря. Например, для получения промежуточной точки, соответствующей  $0,5 I_{ном}$ , уменьшают стороны треугольника в два раза, а их расположение должно быть таким: вершина А' находится на х.х.х., а катет В'С' скользит по линии, соответствующей  $I_{вн}$ . Тогда промежуточная точка внешней характеристики получается на пересечении линий, проведённых через С' и  $0,5 I_{ном}$ . Току нагрузки, соответствующему  $2 I_{ном}$  соответствует вершина С''. Вершины А'' и В'' располагаются аналогично предыдущим точкам.

Вопросы по работе

1. Где применяют генераторы постоянного тока?
2. Какие обмотки включают последовательно с обмоткой якоря?
3. Что понимают под номинальной мощностью генератора?

4. Допускается ли при эксплуатации превышение номинального тока?
5. Назвать причины изменения напряжения генератора под нагрузкой.
6. Для чего в конструкции генератора предусматривают установку дополнительных полюсов?
7. Почему х.к.з. имеет вид прямой линии?
8. Как поддержать неизменным напряжение на зажимах генератора при изменении нагрузки?
9. Что понимают под величиной  $R_a$ ?
10. Как оценить степень насыщения магнитопровода генератора?

### Лабораторное занятие 3

#### Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения

*Цель:* изучить процесс самовозбуждения и характеристики генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

#### Порядок работы

1. Собрать электрическую схему для снятия характеристик генератора параллельного возбуждения
2. Определить экспериментальным путем следующие характеристики генератора:
  - 1.1 Характеристика холостого хода (х.х.х.)
  - 1.2 Нагрузочная характеристика
  - 1.3 Внешняя характеристика
  - 1.4 Регулировочная характеристика
  - 1.5 Вольт-амперная характеристика обмотки возбуждения
2. По экспериментальным данным построить х.х.х., нагрузочную, внешнюю и регулировочную характеристики
3. Оформить отчёт.

#### Методические указания

Самовозбуждение генераторов означает процесс возникновения магнитного потока без подключения обмотки возбуждения к независимому источнику постоянного тока. Генераторы с самовозбуждением классифицируют в зависимости от способа подключения обмотки возбуждения к обмотке якоря. Различают параллельное, последовательное и смешанное (последовательно-параллельное) возбуждение генераторов. На практике нашли применение генераторы с параллельным и смешанным возбуждением.

Для самовозбуждения необходимо выполнение ряда условий:

1. Наличие остаточного магнитного потока.
2. Подключение обмотки возбуждения к обмотке якоря должно обеспечить увеличение магнитного потока.
3. Сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического значения или частота вращения должна быть больше критической.

При выполнении условий самовозбуждения происходит лавинообразный процесс увеличения тока возбуждения, ЭДС и напряжения на зажимах якоря. Рост напряжения ограничен нелинейностью характеристики намагничивания машины.

Характеристики генераторов с самовозбуждением имеют заметные отличия от соответствующих характеристик генераторов с независимым возбуждением только в диапазоне  $I_a > I_{аном}$ . Широкое распространение генераторов с самовозбуждением связано с тем, что они не требуют отдельного источника питания обмоток возбуждения.

Ряд характеристик генераторов с самовозбуждением, можно определить только по схеме независимого возбуждения.

### Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода представляет зависимость напряжения на зажимах якоря от тока возбуждения при отсутствии нагрузки ( $I_2 = 0$ ) и постоянной частоте вращения  $n = const$ :  $U_a = f(I_e)$

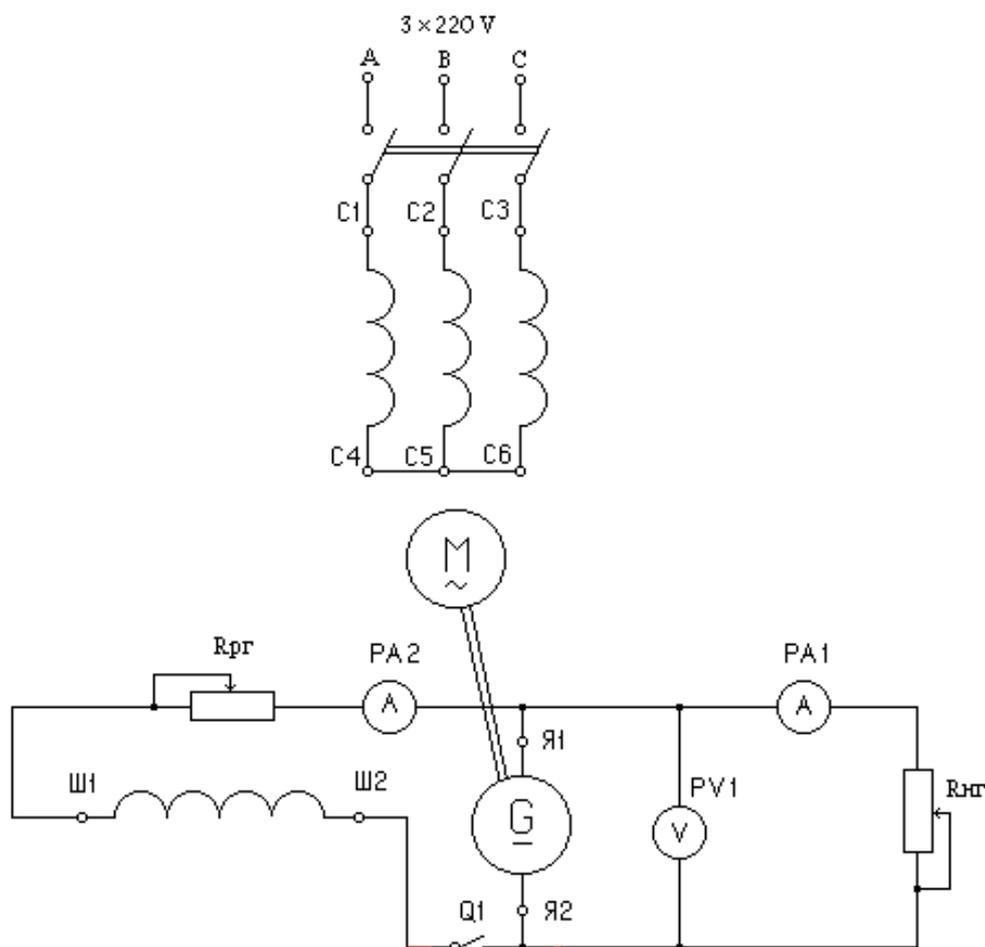


Рисунок 1 – Электрическая схема генератора параллельного возбуждения

Опыт х.х. снимают при разомкнутой нагрузке:  $R_{нг} = \infty$ . Включают приводной двигатель, причём направление вращения должно соответствовать стрелке на корпусе генератора. Изменяя сопротивление регулировочного резистора  $R_{пр}$ , повышают напряжение на якоре от  $U_{ост}$  до  $U_{ном}$ .

Характеристику снимают от  $U_{max} \approx (1.2 \dots 1.25) U_{ном}$  до  $U_{ост}$ , уменьшая ток возбуждения при помощи резистора  $R_{пр}$ .  $U_{ост}$ , определяют при отключен-

ном ключе **Q1**. Нисходящую ветвь характеристики снимают при изменении тока возбуждения в одну сторону. Восходящую ветвь характеристики снимают, увеличивая ток возбуждения и изменяя напряжение от  $U_{ост}$  до  $U_{max}$ , также только в одну сторону. При проведении опыта приводной двигатель от сети не отключают.

Результаты измерений занести в таблицу 1. Внешний вид х.х.х. приведен на рисунке 2.

Таблица 1- Характеристика холостого хода

Нисходящая ветвь		Восходящая ветвь	
$U, В$	$I_{в}, А$	$U, В$	$I_{в}, А$

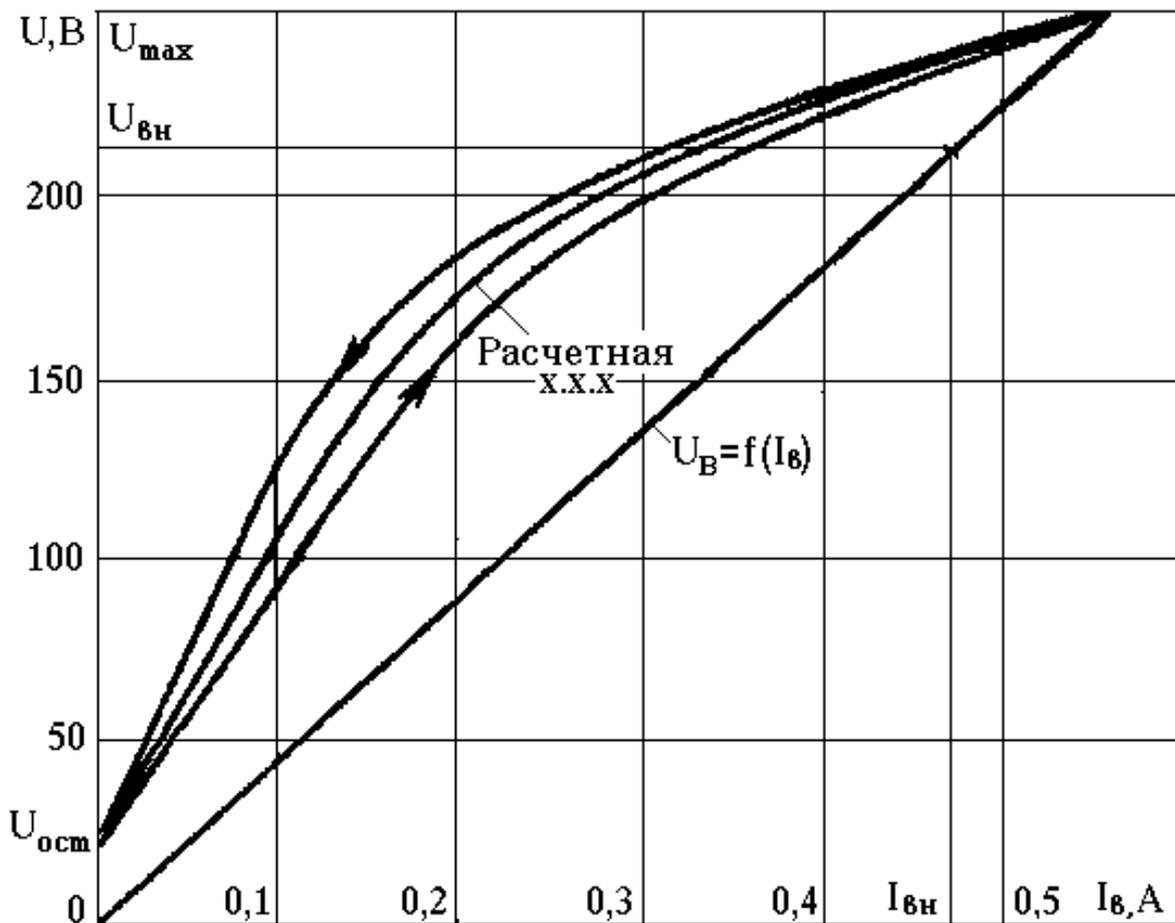


Рисунок 2 – Характеристика холостого хода

### Нагрузочная характеристика

Нагрузочная характеристика – это зависимость  $U_a = f(I_{в})$  при постоянном токе нагрузки  $I_2 = const$  и  $U = const$ . Ввиду того, что ток возбуждения намного меньше тока якоря, полагаем, что  $I_a \approx I_2$ .

Для снятия характеристики подключают нагрузочный реостат, включают приводной двигатель и возбуждают генератор. Устанавливают номинальный

ток якоря. Уменьшают ток возбуждения, поддерживая нагрузочным реостатом постоянное значение тока якоря. Данные опыта занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Нагрузочная характеристика

$I_{\omega}, A$	$U_a, B$	<i>Примечание</i>
		$I_2 =$

#### Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика – это зависимость  $I_{\omega} = f(I_2)$  при  $U_a = const$  и  $n = const$ .

Характеристика снимается при номинальном напряжении. Изменяя нагрузку, поддерживают напряжение при помощи тока в цепи возбуждения. Результаты опыта занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Регулировочная характеристика

$I_{\omega}, A$	$I_a, A$	<i>Примечание</i>
		$U = U_{ном} =$ , $n =$

#### Внешняя характеристика

Внешняя характеристика – это зависимость напряжения на якоре генератора от тока нагрузки при постоянной частоте вращения и постоянном токе возбуждения:

$$U_a = f(I_a) \text{ при } R_{pr} = const \text{ и } n = n_{ном} = const.$$

Характеристику начинают снимать при  $I_a = I_{ном}$ . Изменяя сопротивление нагрузочного реостата, уменьшают ток нагрузки. Сопротивление в цепи возбуждения не изменять. Результаты опыта занести в таблицу 4.

Таблица 4 – Внешняя характеристика

$U_a, B$	$I_a, A$	<i>Примечание</i>
		$n =$

#### Вольт-амперная характеристика обмотки возбуждения

Под вольт-амперной характеристикой обмотки возбуждения понимают зависимость напряжения обмотки от тока возбуждения:  $U_{\omega} = f(I_{\omega})$ . Для снятия характеристики разбирают якорную цепь, обмотку возбуждения подключают к источнику регулируемого напряжения. Напряжение изменяют от 0 до  $1.25 U_n$ . Определить 4...5 точек вольт-амперной характеристики. Результаты опыта занести в таблицу 5.

Таблица 5 – Вольт-амперная характеристика обмотки возбуждения

$U_{\omega}, B$	$I_{\omega}, A$	<i>Примечание</i>
		Опыт снимают при неподвижном якоре

## Вопросы по работе

1. Назовите условия, при которых возникает процесс самовозбуждения.
2. Как протекает процесс самовозбуждения ГПТ?
3. С какой целью на корпусе генератора установлена стрелка, указывающая направление вращения якоря?
4. Почему характеристика холостого хода ГПТ параллельного возбуждения определяется в одном квадранте?
5. Назовите причины изменения напряжения ГПТ параллельного возбуждения под нагрузкой.
6. При какой схеме возбуждения (независимое, параллельное) ГПТ будет иметь большее изменение напряжения под нагрузкой?
7. Каким образом увеличивают диапазон регулирования напряжения у ГПТ с самовозбуждением?
8. Можно ли провести опыт короткого замыкания у ГПТ параллельного возбуждения?
9. Каким образом можно определить критическое сопротивление?
10. В чём заключается преимущество применения генераторов с самовозбуждением?

## Лабораторное занятие 4

### Исследование генератора смешанного возбуждения

*Цель:* изучить внешние характеристики генератора постоянного тока смешанного возбуждения при различных способах подключения обмоток возбуждения.

### Порядок работы

1. Собрать электрическую схему генератора.
2. Определить экспериментальным путём внешнюю характеристику при согласном включении обмоток возбуждения.
3. Определить экспериментальным путём внешнюю характеристику при встречном включении обмоток возбуждения.
4. Построить на одном графике внешние характеристики при параллельном возбуждении, смешанном согласном и смешанным встречным возбуждением.
5. Оформить отчёт по работе.

### Методические указания

Генераторы смешанного возбуждения имеют две обмотки возбуждения – одна из них включается параллельно (Ш1-Ш2) якорю и является основной, вторая (С1-С2) включается последовательно. В зависимости от подключения последовательной обмотки С1-С2 магнитодвижущая сила (МДС) параллельной и последовательной обмотки могут складываться или вычитаться. МДС последовательной обмотки изменяется пропорционально току нагрузки. При согласном включении обмоток увеличение тока нагрузки приводит к увеличению тока в последовательной об-

мотке и, соответственно, к увеличению магнитного потока. Таким образом, последовательная обмотка будет компенсировать реакцию якоря и уменьшение напряжения под нагрузкой. При встречном включении обмоток магнитный поток генератора ослабевает, что приводит к значительному уменьшению напряжения под нагрузкой.

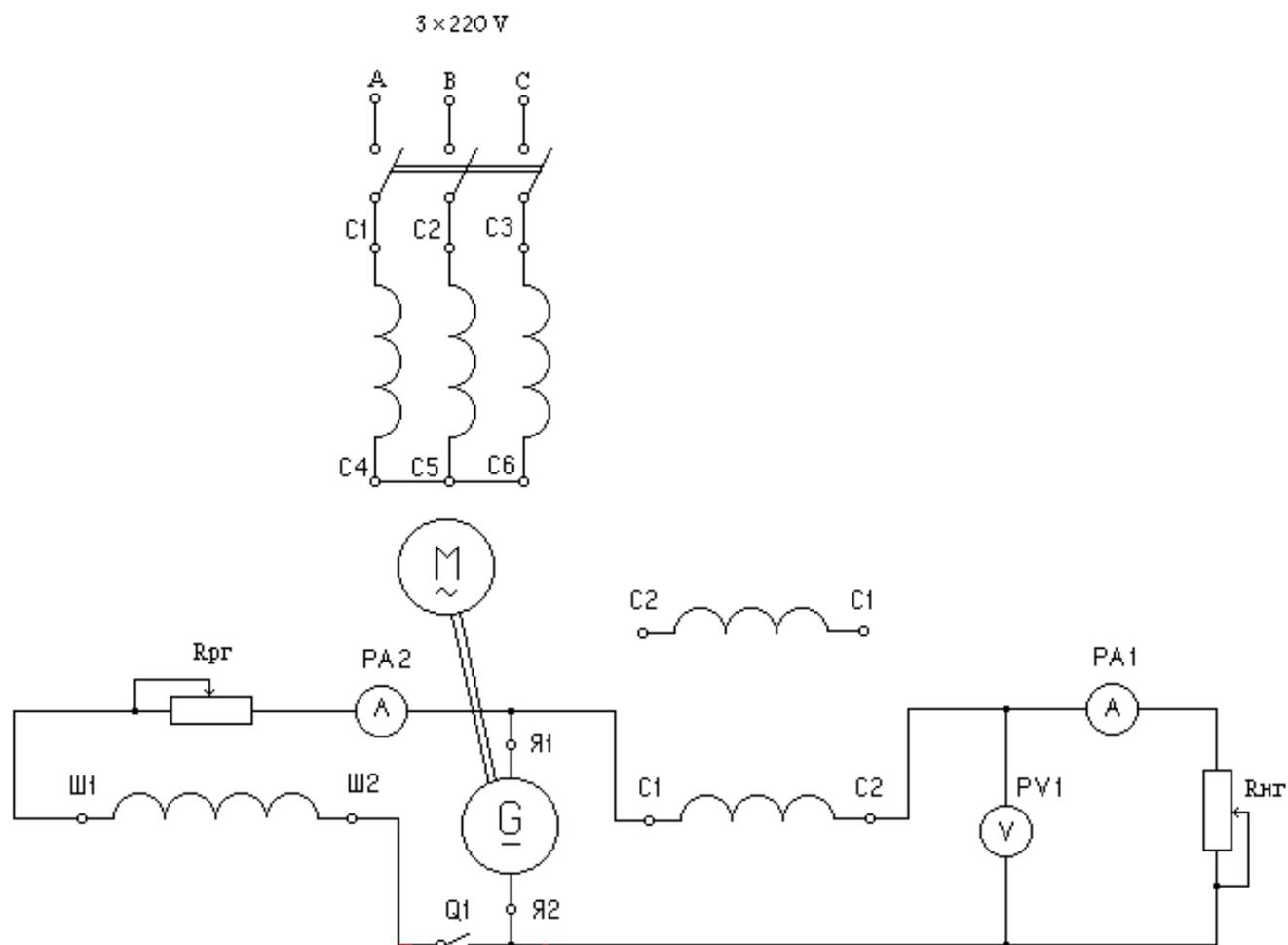


Рисунок 1 – Электрическая схема генератора со смешанным возбуждением

### Внешняя характеристика

При согласном включении зажим Я1 соединяют с началом последовательной обмотки С1. Внешняя характеристика при встречном включении определяется при измененной полярности подключения последовательной обмотки - см. рисунок 1. Обычно у генераторов общего применения обмотки включают согласно. Встречное включение применяется в специальных генераторах, например сварочных. Результаты опыта занести в таблицу 1.

Таблица 1 - Внешняя характеристика при согласном и встречном включении обмоток возбуждения

Согласное включение		Встречное включение	
$U, B$	$I_a, A$	$U, B$	$I_a, A$

## Построение внешних характеристик генератора с различными схемами включения обмоток возбуждения

На одном графике (см. рисунок 2) построить х.х.х. и вольт - амперную характеристику обмотки возбуждения. Пересечение этих характеристик определяет величину напряжения при самовозбуждении без нагрузки. Сравнить полученное значение установившегося напряжения и экспериментальные данные самовозбуждения в режиме холостого хода.

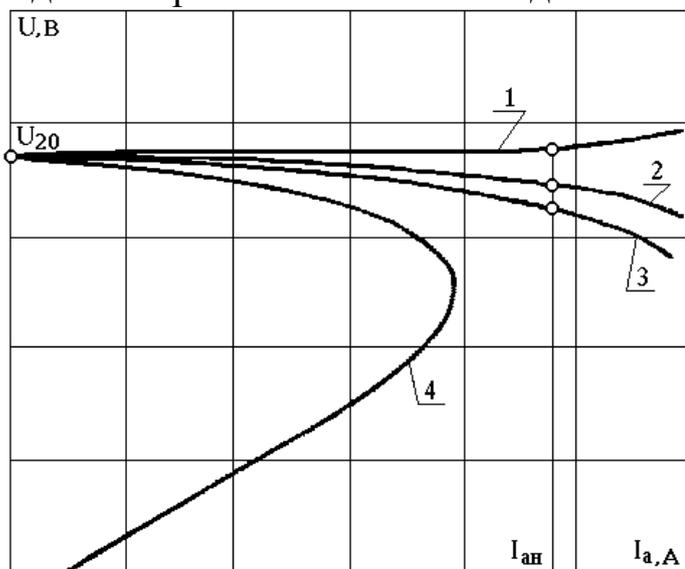


Рисунок 2 – Внешние характеристики с разными схемами возбуждения:

- 1 – смешанное согласное
- 2 – независимое
- 3 – параллельное
- 4 – смешанное встречное

Построить графики нагрузочной и регулировочных характеристик.

На одном графике построить внешние характеристики генераторов с параллельным, смешанным согласным и смешанным встречным включением обмоток возбуждения. Определить и выполнить сравнительный анализ номинального изменения напряжения для различных схем возбуждения:

$$\Delta U\% = [(U_{20} - U_{ном}) / U_{ном}] 100\%$$

### Вопросы по работе

1. Как влияет последовательная обмотка ГПТ со смешанным возбуждением на характер изменения внешней характеристики в зависимости от схемы её подключения?
2. По какой причине ГПТ с последовательным возбуждением не получили практического применения?
3. Почему при согласном включении обмоток возбуждения напряжение практически не изменяется под нагрузкой?
4. Как отличить параллельную обмотку возбуждения от последовательной?
5. Почему в сварочных генераторах требуется резко падающая внешняя характеристика?
6. Объяснить вид внешней характеристики при встречном включении обмоток.
7. В какой из двух схем (рис.1) требуется наибольшее увеличение тока в параллельной обмотке, чтобы сохранить неизменным напряжение генератора при увеличении тока нагрузки?
8. В какой из обмоток возбуждения протекает наименьший (наибольший) ток?

9. Можно ли поменять местами обмотки возбуждения?

10. В чём недостаток смешанного возбуждения?

## Лабораторное занятие 5

### Исследование двигателя постоянного тока независимого возбуждения

*Цель:* изучить конструкцию и характеристики двигателя постоянного тока.

#### Порядок работы

1. Ознакомиться с конструкцией и номинальными данными исследуемого двигателя.
2. Собрать электрическую схему для снятия характеристик двигателя.
3. Выполнить пуск двигателя.
4. Выполнить реверс двигателя.
5. Определить экспериментальным путем следующие характеристики:
  - 5.1. Рабочие характеристики
  - 5.2. Механические характеристики
  - 5.3. Регулировочные характеристики
6. По данным испытаний двигателя построить:
  - 6.1. Рабочие характеристики
  - 6.2. Механические характеристики
  - 6.3. Регулировочные характеристики
7. Оформить отчёт

#### Методические указания

Двигатели постоянного тока (ДПТ) обладают большим пусковым моментом и обладают возможностью плавного регулирования в широком диапазоне частоты вращения. Двигатели постоянного тока принято классифицировать, как и генераторы, по способу возбуждения. Характеристики двигателей параллельного возбуждения и независимого возбуждения практически не отличаются, поскольку в них ток возбуждения не зависит от тока якоря. Двигатели последовательного возбуждения имеют целый ряд особенностей в пусковых и эксплуатационных характеристиках. В данной работе исследуется двигатель с независимым возбуждением. Как правило, двигатели независимого и параллельного возбуждения снабжаются последовательной стабилизирующей обмоткой.

Полезной мощностью двигателей является полезная механическая мощность на валу. Полезной мощности соответствует полезный момент:

$$M_2 = P_2 / \omega, \quad (1)$$

где  $P_2$  – полезная мощность на валу,

$\omega = \pi n / 30$  – угловая частота вращения,

$n$  – количество оборотов в минуту.

В установившемся режиме ( $n = const$ ) электромагнитный момент электродвигателя уравновешен статическим моментом  $M_{ст}$

$$M = - M_{cm} = - (M_o + M_2) = C_m I_a \Phi, \quad (2)$$

$$I_a \Phi,$$

где  $M_o$  – момент холостого хода,

$C_m$  – конструктивный коэффициент,

$I_a$  – ток якоря,

$\Phi$  – магнитный поток

Уравнение напряжения для цепи якоря электродвигателя:

$$U = E_a + I_a R_a \quad (3)$$

где  $E_a = C_e n \Phi$  – противо-ЭДС якоря,

$C_e$  – конструктивный коэффициент,

$R_a$  – суммарное сопротивление цепи якоря.

Из (3) можно выразить частоту вращения:

$$n = (U - I_a R_a) / (C_e \Phi) \quad (4)$$

Из последней формулы следуют три возможных способа регулирования частоты вращения:

- 1) изменением величины напряжения;
- 2) изменением суммарного сопротивления в цепи якоря;
- 3) изменением магнитного потока.

При пуске двигателя  $n = 0$ ,  $E_a = 0$  и пусковой ток  $I_n = U / R_a$ . Обычно  $R_a$  мало и пусковой ток значительно превышает номинальный:  $I_n \approx (10.. .50)$

$I_{ном}$ . Различают:

1. Прямой пуск;
2. Пуск с пусковыми сопротивлениями;
3. Пуск при пониженном напряжении.

В данной работе применяется пуск при пониженном напряжении.

Для изменения направления вращения (реверса) двигателя необходимо изменить знак электромагнитного момента. Из выражения (2) следует, что для изменения направления действия (знака) момента необходимо либо изменить направление тока якоря (при наличии добавочных полюсов и компенсационной обмотки направление тока должно измениться и в этих обмотках), либо направление тока в обмотке возбуждения.

Собрать электрическую схему двигателя – рисунок 1. Цепь обмотки электромагнитного тормоза должна быть обесточена – ключ Q выключен. Включить обмотку возбуждения на номинальное напряжение двигателя. При помощи индукционного регулятора подать пониженное напряжение в цепь якоря  $\approx$

(15..20) % от  $U_{ном}$ . Плавно повышая напряжение до номинального значения, развернуть якорь.

Выполнить опыт реверсирования двигателя.

### Пуск и реверс электродвигателя

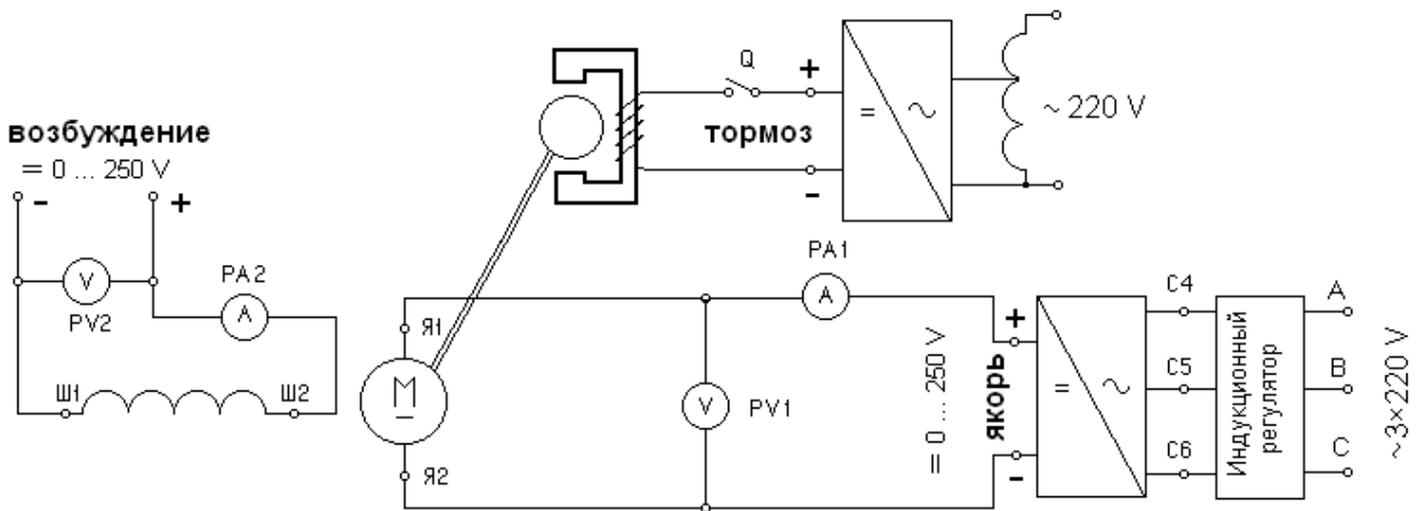


Рисунок 1 – Электрическая схема двигателя с независимым возбуждением

### Рабочие характеристики

Рабочими характеристиками двигателя постоянного тока называют зависимости потребляемой мощности  $P_1$ , тока якоря  $I_a$ , момента  $M$ , коэффициента полезного действия (КПД)  $\eta$  и частоты вращения  $n$  от полезной мощности  $P_2$  при работе с номинальным напряжением  $U_{ном}$  и постоянном токе возбуждения  $I_e$ :

$$P_1, I_a, M, \eta, n = f(P_2) \text{ при } U=U_{ном} \text{ и } I_e = const$$

Для определения характеристик изменяют тормозной момент на валу двигателя, изменяя величину тока в цепи тормоза. Определить 5-6 экспериментальных точек. Частота вращения ротора определяется при помощи механического тахометра. Величину момента определяют по шкале тормоза.

Экспериментальные данные и расчётные величины заносятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Рабочие характеристики

Опыт			Расчёт		
$n, об/мин$	$I_a, A$	$M, Нм$	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	$\eta$

### Механические характеристики

Выражая ток  $I_a$  из уравнения (2) и подставляя его в уравнение (4), получаем механическую характеристику – зависимость  $n = f(M)$ :

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_a}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2} \cdot M$$

Механическую характеристику снимают для следующих случаев:

1. Естественная характеристика – при  $U = U_{ном}$  и  $I_{вном} = const$ .  
Характеристика строится по данным Таблицы 1.
2. При пониженном напряжении якоря. Определяется при  $U < U_{ном}$  (величина устанавливается по указанию преподавателя)
3. При ослабленном потоке возбуждения.  
Снимается при  $U = U_{ном}$  и  $I_{\epsilon} = (0,8.. 0,9) I_{вном}$ .
4. При добавочном сопротивлении в цепи якоря.  $U = U_{ном}$  и  $I_{\epsilon} = const$ .

Характеристики п.п. 2. . 4 снимаются по той же методике, что и рабочие характеристики. Результаты занести в таблицу 2. По результатам опытов на одном графике строятся все механические характеристики.

Таблица 2 - Механические характеристики

<i>n, об/мин</i>	<i>M, Нм</i>	<i>Примечание</i>
		$U = U_{ном}$ $I_{вном} = const$ .
		$U < U_{ном}$ , $I_{вном} = const$
		$U = U_{ном}$ $I_{\epsilon} = (0,8.. 0,9) I_{вном}$
		$R_{доб} =$

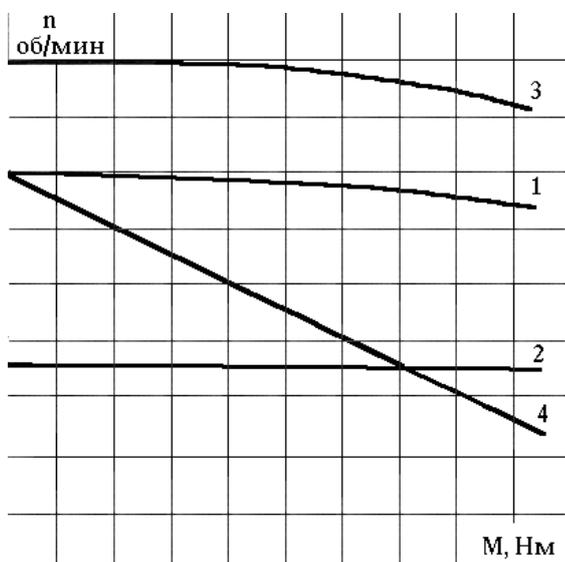


Рисунок 2 – механические характеристики:

- 1 – естественная
- 2 – при пониженном напряжении
- 3 – при ослабленном потоке
- 4 – с добавочным сопротивлением

## Регулировочные характеристики

Регулировочные характеристики (рисунок 3) показывают, как изменять напряжение при постоянном возбуждении или изменять ток возбуждения при постоянном напряжении, чтобы поддерживать частоту вращения постоянной при изменении нагрузки (момента) на валу:

1.  $U = f(M)$  при  $I_{\phi} = const, n = const$
2.  $I_{\phi} = f(M)$  при  $U = const, n = const$

Результаты опытов занести в таблицу 3:

Таблица 3 – Регулировочные характеристики

$U, В$	$M, Нм$	Примечание
		$I_{\phi} = const$ $n = const$
$I_{\phi}, А$	$M, Нм$	$U = const$ $n = const$

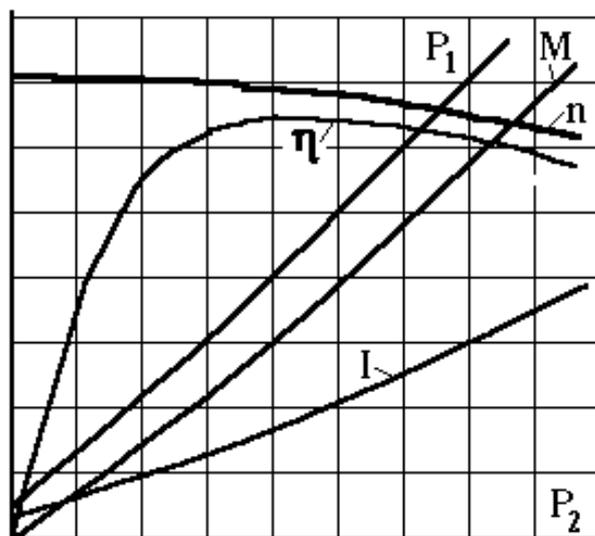
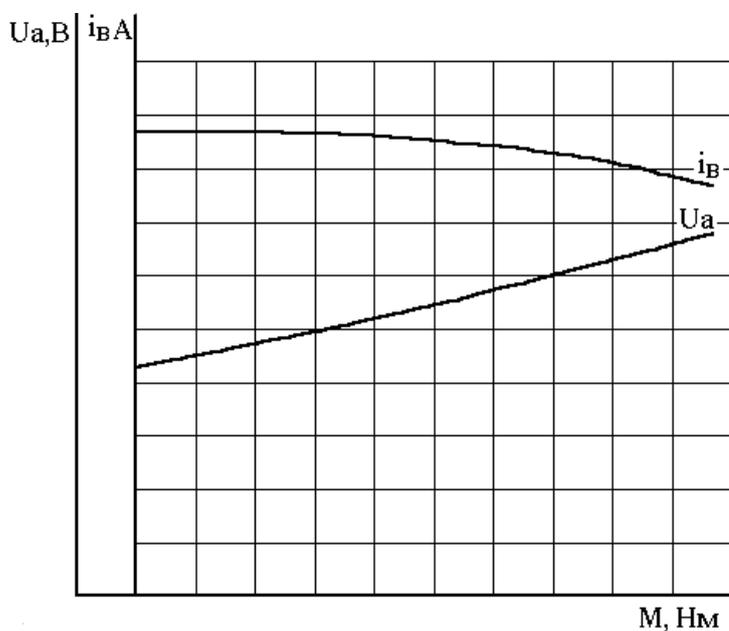


Рисунок 3 – Регулировочные характеристики    Рисунок 4 – рабочие характеристики

### Обработка опытных данных

По результатам измерений п. 5.1 необходимо выполнить расчеты  $P_1$ ,  $P_2$  и  $\eta$ . Потребляемая из сети электрическая мощность:  $P_1 = U I_a + U_{\phi} I_{\phi}$

Полезная мощность:  $P_2 = M \omega$ ,

где  $M$  – полезный момент на валу, Н·м, определяется по верхней шкале электромагнитного тормоза  $M = (\text{количество делений}) \cdot 0,736$ .

КПД:  $\eta = P_2 / P_1$ .

По результатам измерений и расчётов строятся рабочие характеристики (см. рисунок 4).

## Вопросы по работе

1. Объяснить принцип действия двигателя постоянного тока.
2. Что понимают под «КПД двигателя»?
3. Каким образом регулируют частоту вращения вверх и вниз от номинальной частоты?
4. Назвать способы ограничения пускового тока.
5. Пояснить вид регулировочных характеристик.
6. Пояснить вид рабочих характеристик.
7. Пояснить вид механических характеристик.
8. Почему характеристики двигателей с независимым и параллельным возбуждением практически совпадают?
9. Какую роль играет последовательная обмотка?
10. Какой вид будет иметь механическая характеристика при встречном включении параллельной и последовательной стабилизирующей обмоток возбуждения?

## Лабораторное занятие 6

### Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

*Цель:* изучить конструкцию и экспериментальное определение характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

#### Порядок работы

1. Ознакомиться с конструкцией и номинальными данными исследуемого двигателя.
2. Собрать электрическую схему для снятия характеристик двигателя.
3. Выполнить пуск двигателя.
4. Определить экспериментальным путем механические характеристики двигателя:
  - 4.1 Механическая естественная характеристика.
  - 4.2 Механические характеристики при ослабленном магнитном потоке.
5. Оформить отчёт.

#### Методические указания

В данной работе исследуется двигатель параллельного возбуждения. Разделение двигателей постоянного тока на двигатели независимого и параллельного тока несущественно т.к. ток возбуждения не зависит от тока якоря в обеих схемах возбуждения. По условию обеспечения статической устойчивости практически все указанные двигатели снабжаются последовательной стабилизирующей обмоткой, которая включается согласно с параллельной обмоткой (её МДС составляет до 10% от параллельной обмотки возбуждения). В данной работе стабилизирующая обмотка отсутствует.

#### Пуск двигателя

Бросок пускового тока из-за малого сопротивления якоря может превысить

номинальный в 10-50 раз. Для снижения пускового тока последовательно с обмоткой якоря включают пусковое сопротивление  $R_n$ . Обмотка возбуждения включается на номинальное напряжение. Пуск производят при отключенном ключе  $Q$  тормоза. После разворота якоря пусковое сопротивление шунтируют ключом  $Q1$ .

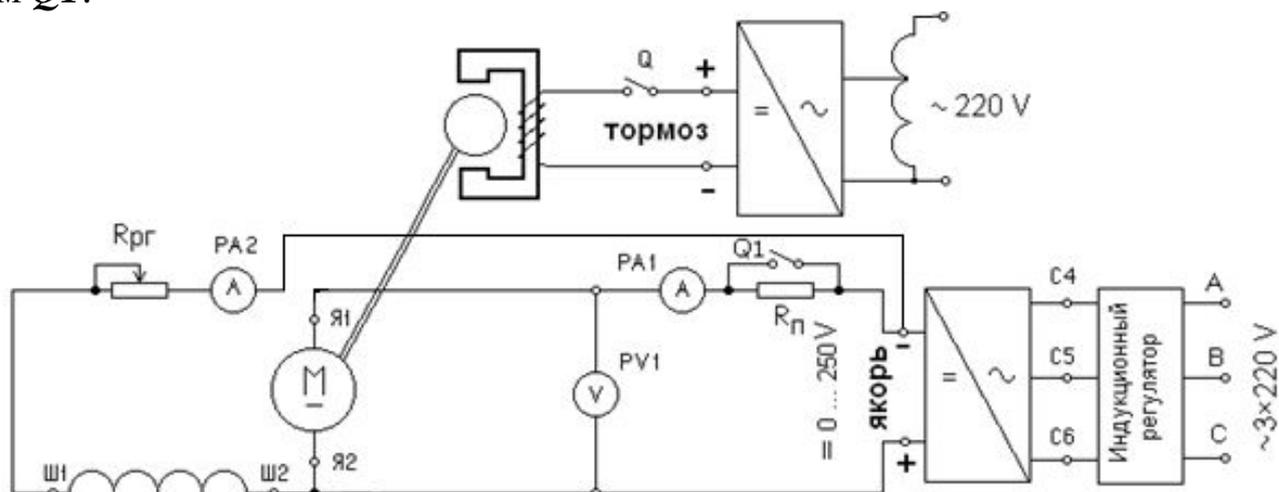


Рисунок 1 – электрическая схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

### Механическая естественная характеристика

Механическая естественная характеристика снимается при минимальном сопротивлении в цепи обмотки возбуждения  $R_{pg}$ . Включают ключ  $Q$ , плавно изменяя ток электромагнитного тормоза, нагружают двигатель. Результаты заносят в таблицу 1. Электромагнитный момент определяют, как в предыдущей работе.

Таблица 1 – естественная механическая характеристика

$n, об/мин$	$M, Нм$	Примечание
		$R_{pg} \rightarrow min$

### Механические характеристики при ослабленном магнитном потоке

Характеристики снимают, увеличивая сопротивление в цепи обмотки возбуждения. При увеличении сопротивления, уменьшается ток возбуждения  $I_b$  и, следовательно, магнитный поток. При отсутствии пускового сопротивления в цепи якоря  $R_n = 0$  и постоянном напряжении  $U = const$  частота вращения якоря изменяется в соответствии с выражением:

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_a}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2} \cdot M$$

Двигатели общего применения по условиям коммутации допускают регулирование частоты вращения путём ослабления магнитного потока в пределах 1:2. Результаты экспериментов занести в таблицу 2

Таблица 2 – Механические характеристики при ослабленном потоке

$I, A$	$n, об/мин$	$M, Нм$	Примечание
			$R_{pe} \rightarrow min$

### Вопросы по работе

1. Объяснить назначение пускового сопротивления в цепи якоря  $R_n$ .
2. Почему при пуске устанавливают минимальное значение регулировочного сопротивления  $R_{pe}$  в цепи возбуждения.
3. С какой целью в двигателях независимого и параллельного возбуждения устанавливают последовательную обмотку с небольшой величиной МДС?
4. Почему при пуске двигателя при отсутствии пускового реостата  $R_n$  пусковой ток значительно превышает номинальный?
5. До какой величины допускается увеличение тока якоря при пуске?
6. При каких условиях увеличение момента на валу двигателя приводит к увеличению частоты вращения?
7. Что понимают под естественной механической характеристикой двигателя?
8. Почему в цепи возбуждения нельзя устанавливать предохранитель или выключатель?
9. В чём двигатель параллельного возбуждения имеет преимущество перед двигателем независимого возбуждения?
10. Почему уровень ослабления магнитного потока в двигателях общего применения ограничен условиями коммутации?

### Лабораторное занятие 7

#### Исследование двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

*Цель:* изучить конструкцию и экспериментальное определение характеристик двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

#### Порядок работы

1. Ознакомиться с конструкцией и номинальными данными исследуемого двигателя.
2. Собрать электрическую схему для снятия характеристик двигателя.
3. Выполнить пуск двигателя.
4. Определить встречное и согласное подключение обмоток возбуждения.
5. Определить экспериментальным путем механические характеристики двигателя:
  - 5.1. Механическая естественная характеристика.
  - 5.2 Механические характеристики при ослабленном магнитном потоке.
6. Оформить отчёт.

#### Методические указания

В данной работе исследуется двигатель смешанного возбуждения.



## Механическая характеристика при встречном включении обмоток возбуждения

Для выполнения эксперимента собирают схему (рис.1), соответствующую встречному включению обмоток возбуждения. В цепи обмотки электромагнитного тормоза включают ключ  $Q$ . Эксперимент выполняют по методике согласного включения обмоток возбуждения. Результаты измерения заносят в таблицу 2.

Таблица 2 – Механическая характеристика при встречном включении обмоток возбуждения

<i>n, об/мин</i>	<i>M, Нм</i>	<i>Примечание</i>
		$R_{pz} = const$

### Обработка опытных данных

По результатам измерений п. 5.1, 5.2 на одном графике построить механические характеристики при согласном и встречном включении обмоток возбуждения. Сделать вывод по результатам экспериментов.

### Вопросы по работе

1. В чём конструктивное различие параллельной и последовательной обмоток?
2. Где размещены обмотки возбуждения?
3. Какая из обмоток возбуждения имеет большую магнитодвижущую силу?
4. Можно ли в электрической схеме двигателя поменять местами обмотки возбуждения?
5. Какую роль играет последовательная обмотка?
6. Почему характеристики двигателей с независимым и параллельным возбуждением практически совпадают?
7. Пояснить вид механических характеристик.
8. Каким образом последовательная обмотка компенсирует размагничивающее действие реакции якоря?
9. Как зависит ток в обмотке возбуждения от тока сети?
10. В чём двигатели смешанного возбуждения имеют преимущество перед двигателем независимого возбуждения?

### Лабораторное занятие 8

Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

*Цель:* изучить конструкцию и эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

### Порядок работы

1. Собрать электрическую схему для снятия характеристик трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Произвести прямой пуск двигателя.
3. Выполнить реверс двигателя.
4. Определение рабочих характеристик электродвигателя.

Выписать номинальные данные электродвигателя  $P_H, M_H, n_H, U_H, I_H$  и генератора  $U_H, I_H$ . Собрать схему для исследования характеристик электродвигателя (рис.1), подбирая приборы с учётом диапазонов измеряемых электрических величин.

Произвести *прямой пуск* двигателя. Кратность пускового тока достигает 5...7, поэтому количество пусков не должно превышать 3-4 в течение одного часа. Перед пуском необходимо зашунтировать токовые обмотки ваттметра  $PW$  и амперметра  $PA2$  при помощи переносной перемычки. После пуска шунт необходимо снять. При пуске двигателя ключ в цепи возбуждения генератора  $Q_2$  должен быть отключен. Для возбуждения генератора направление вращения двигателя должно совпадать со стрелкой, прикреплённой на корпусе генератора. Если это условие не выполняется необходимо выполнить реверс двигателя.

*Реверс* производить путем перемены мест у любых двух фаз.

*Рабочими характеристиками* асинхронного двигателя называют зависимости потребляемой мощности  $P_1$ , тока статора  $I_1$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , момента на валу  $M$ , скольжения  $S$  и К.П.Д  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  при работе с номинальным напряжением  $U_{1н}$  и частотой сети  $f_{1н}$ .

Для определения рабочих характеристик возбуждают генератор постоянного тока для чего включают ключ  $Q_2$  и при помощи регулировочного реостата в цепи возбуждения генератора  $R_{p2}$  устанавливают номинальное напряжение якоря  $U_G = 230 В$ , которое во всех опытах поддерживают постоянным. Изменяя сопротивление нагрузочного резистора  $R_{н2}$ , увеличивают ток якоря генератора  $I_G$ . Увеличение тока якоря приведет к увеличению электромагнитного момента генератора, который будет тормозным моментом для электродвигателя. Нагружая, таким образом, двигатель, определить несколько экспериментальных точек. Сопротивление нагрузочного резистора  $R_{н2}$  изменяется ступенчато при помощи переключателей, установленных на лабораторном стенде, при выполнении экспериментов необходимо помнить, что ток генератора не должен превышать своего номинального значения:  $I_G \leq I_{Гн}$ .

Частота вращения ротора  $n_2$  определяется при помощи механического тахометра. Экспериментальные данные и расчётные величины заносят в таблицу 1.

Таблица 1 – экспериментальные и расчётные данные

Опыт					Расчет				
$P_1,$ $Вт$	$I_1,$ $А$	$n_2,$ $об/мин$	$U_G,$ $В$	$I_G,$ $А$	$P_2,$ $Вт$	$M,$ $Н·м$	$\cos \varphi$	$S$	$\eta$

*Примечание.* Напряжение сети  $U_1 = 220 В$ , номинальное напряжение и ток генератора  $U_{ГН} = 230 В, I_{ГН} = 4,35 А$ ,

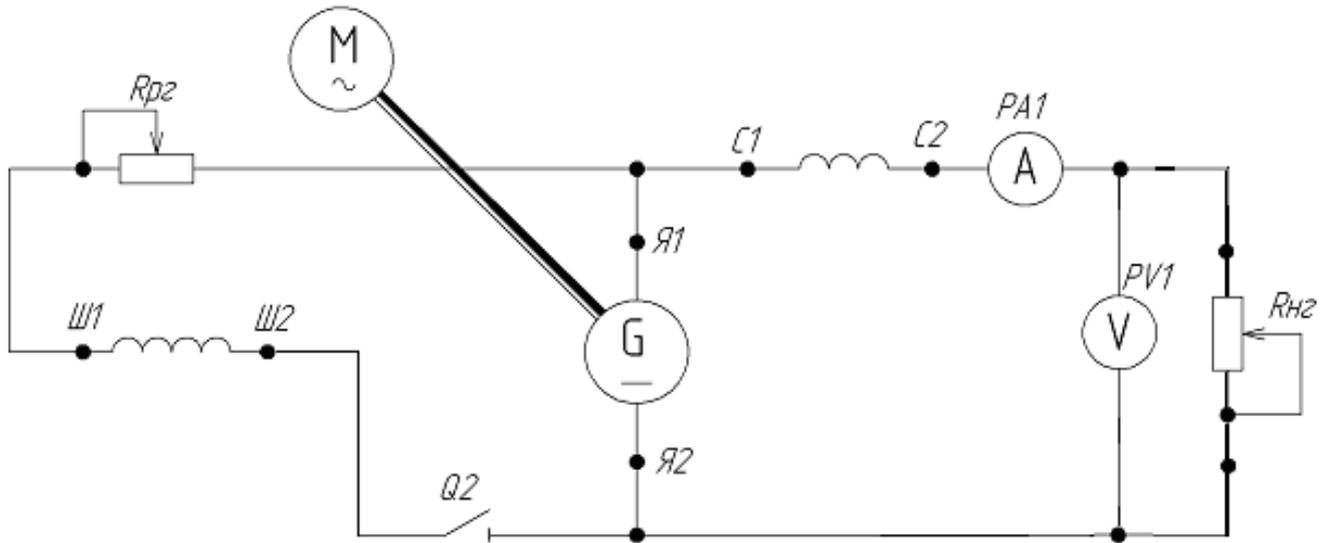
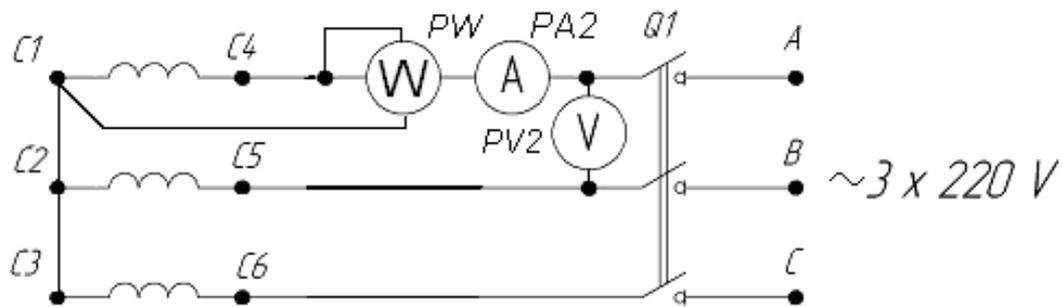


Рисунок 1 – электрическая схема испытаний асинхронного двигателя.

### Расчёт рабочих характеристик

$$\eta = \sqrt{\frac{U_{ГН} \cdot I_{Г}}{P_1}} \quad \text{– приближенное значение К.П.Д., полученное из предположения, что } \eta_2 = \eta_{\partial},$$

$$P_1 = 3 \cdot P_{\phi}, \quad \text{– электрическая мощность двигателя, потребляемая из сети, Вт}$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta \quad \text{– механическая мощность на валу двигателя, Вт}$$

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} \quad \text{– угловая частота вращения ротора, рад/с;}$$

$$n_2 \text{ – частота вращения ротора, об/мин;}$$

$$M = \frac{P_2}{\omega_2} \quad \text{– момент на валу, Нм.}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1}, \quad \text{где } U_1 \text{ – линейное напряжение сети, В; } I_1 \text{ – ток двигателя, А.}$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{– скольжение,}$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad \text{– частота вращения магнитного поля,}$$

$f_1 = 50$  Гц – частота сети,  
 $p$  – число пар полюсов,

### Вопросы по работе

1. Как изменится пусковой момент и пусковой ток, если обмотку статора соединить в звезду?
2. Как соединить обмотку статора, если напряжение сети 380 Вольт, а номинальное напряжение электродвигателя 380/220 Вольт?
3. Чему равно скольжение при пуске и холостом ходе? При каких условиях скольжение равно 0?
4. Почему обычно не учитывают магнитные потери в роторе электродвигателя?
5. Допускается ли эксплуатация электродвигателя при нагрузке большей номинальной?
6. Какой параметр электродвигателя характеризует его перегрузочную способность?
7. Что понимают под кратностью пускового тока и кратностью пускового момента?
8. Как изменится момент электродвигателя, если напряжение сети уменьшится на 10%?
9. Чему равна частота тока ротора при пуске и номинальной нагрузке?
10. Объяснить, почему высокий К.П.Д. электродвигателя возможен только при наличии жесткой механической характеристики?

### Лабораторное занятие 9

#### Исследование асинхронного двигателя с фазным ротором

*Цель:* изучить конструкцию и эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.

#### Порядок работы

1. Собрать электрическую схему для снятия характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором.
2. Произвести пуск двигателя.
3. Определить рабочие характеристики двигателя методом непосредственной нагрузки.

#### Методические указания

Выписать номинальные данные двигателя. Собрать схему для исследования характеристик электродвигателя (рис.1), учитывая диапазоны измеряемых электрических величин.

Произвести *пуск* электродвигателя при полностью включенном пусковом реостате в цепи ротора  $R_{пуск}$ , что соответствует положению переключателя  $Q_2$  «отключено». Переключатель в цепи тормоза  $Q_3$  при пуске должен быть разомкнут. После разворота двигателя закоротить контактные кольца, переведя переключатель  $Q_2$  в положение «включено».

Установить на щите распределительного устройства (РУ) постоянное напряжение  $\approx 0$  В. Подать постоянное напряжение на стенд, замкнуть ключ  $Q_3$  в цепи тормоза. Изменяя ток в обмотке электромагнитного тормоза при помощи головного индукционного регулятора РУ, создают тормозной момент на валу исследуемого двигателя.

Измерить потребляемую мощность  $P_1$ , ток статора  $I_1$ , частоту вращения ротора  $n_2$ , момент на валу двигателя  $M$ .

**Рабочими характеристиками** асинхронного двигателя называют зависимости потребляемой мощности  $P_1$ , тока статора  $I_1$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , момента на валу  $M$ , скольжения  $S$  и К.П.Д.  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  при работе с номинальным напряжением  $U_n$  и частотой сети  $f_1$ .

Момент двигателя  $M$  определяют по углу отклонения противовеса тормоза от вертикальной линии, частота вращения  $n_2$  ротора определяется при помощи механического тахометра.

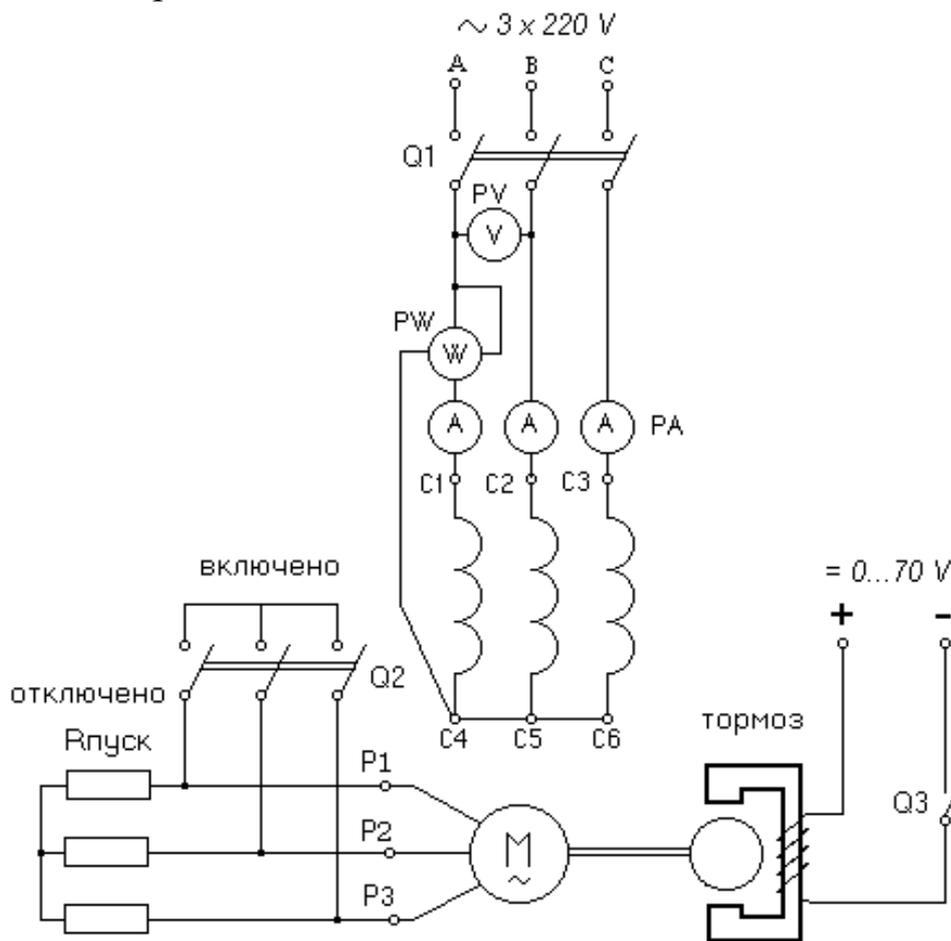


Рисунок 1 – Электрическая схема испытаний асинхронного электродвигателя с фазным ротором

Экспериментальные данные и расчетные величины заносят в таблицу 1.

После окончания последнего опыта, уменьшить до  $0$  постоянное напряжение на РУ, после чего разомкнуть ключ  $Q_3$ , затем  $Q_1$ , после остановки ротора перевести выключатель  $Q_2$  в положение «отключено».

Таблица 1 – Экспериментальные и расчётные данные

Опыт				Расчет			
$P_1, Вт$	$I_1, А$	$n_2, об/мин$	$M, Нм$	$P_2, Вт$	$\cos\varphi$	$S$	$\eta$

**Примечание.** Напряжение сети  $U_c = 220 В$ .

### Расчёт рабочих характеристик

Измерение момента на валу электродвигателя  $M$  осуществляется непосредственно при помощи тормозного устройства (электромагнитного тормоза). Величина тормозного момента задаётся током в обмотке тормоза. Показание момента снимают по верхней шкале устройства, проградуированной в  $кГ\cdot м$  (для перевода в  $Н\cdot м$  – умножить измеренное количество делений на коэффициент  $0,736$ ).

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} \quad - \text{угловая частота вращения ротора, рад/с}$$

$$P_2 = M \cdot \omega_2 \quad - \text{механическая мощность на валу двигателя, Вт}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad - \text{коэффициент полезного действия,}$$

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 \cdot I_1} \quad - \text{коэффициент мощности,}$$

где  $U_1$  – напряжение сети, В,  
 $P_1$  – потребляемая из сети мощность двигателя, Вт, (при использовании сдвоенного ваттметра мощность трёх фаз непосредственно снимается с прибора, при включении ваттметра в одну фазу – показания прибора  $PW$  умножают на 3)  
 $I_1$  – среднее значение тока в фазах А, В и С.

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad - \text{скольжение,}$$

где  $n_1$  – частота вращения магнитного поля.

### Вопросы по работе

1. Сколько пар полюсов и число фаз имеет ротор АД с фазным ротором?
2. По каким параметрам АД с фазным ротором превосходит, по каким уступает АД с КЗ ротором?
3. Почему после разворота двигателя пусковой реостат необходимо зашунтировать?

4. Какой способ регулирования частоты вращения является специфическим для АД с фазным ротором?
5. Какие недостатки имеет способ регулирования частоты вращения АД с фазным ротором при помощи регулировочных реостатов?
6. Можно ли использовать пусковой реостат для регулирования частоты вращения?
7. Что понимают под кратностью пускового момента?
8. Каким образом поддерживать высокий момент на протяжении всего процесса разворота двигателя до номинальной частоты вращения?
9. Что понимают под перегрузочной способностью двигателя?
10. Объяснить, почему при больших значениях скольжения КПД падает?

## Лабораторное занятие 10 Индукционный регулятор

*Цель:* изучить конструкцию и эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.

### Порядок работы

1. Ознакомится с конструкцией индукционного регулятора, записать его паспортные данные, а также данные измерительных приборов
2. Собрать схему по рисунку 1.
3. Выполнить опыт х. х. индукционного регулятора
4. Экспериментально определить внешнюю характеристику индукционного регулятора
5. Построить график зависимости напряжения на выходе индукционного регулятора от угла поворота ротора
6. По данным опыта начертить векторную диаграмму напряжений и график зависимости  $U_{20} = f(\alpha p)$
7. Определить номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

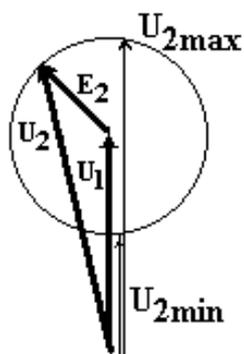
### Методические указания

Индукционный регулятор представляет собой заторможенную асинхронную машину с фазным ротором. Ротор машины заторможен посредством червячной передачи, позволяющей вращением маховика, укрепленного на червяке, плавно поворачивать ротор (см. рисунок 2).

Индукционный регулятор предназначен для плавного регулирования напряжения в схемах переменного тока. На рисунке 1 представлена схема включения индукционного регулятора, из которой видно, что обмотки статора и ротора имеют автотрансформаторную связь. Обмотка статора разомкнута, а обмотки ротора соединены звездой. Возможна также схема, когда разомкнутыми являются обмотки ротора.

При включении индукционного регулятора в сеть напряжением  $U_1$  токи в обмотке ротора создают вращающееся магнитное поле, которое, сцепляясь с обмотками ротора и статора, наводит в них ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  соответственно. ЭДС ротора  $E_1$  находится в противофазе с напряжением сети и уравновешивает его:

$E_1 \approx -U_1$ . Выходное напряжение  $U_{20}$  равно геометрической сумме ЭДС статора  $E_2$  и напряжения сети:



$$U_{20} = U_1 + E_2 \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - угол поворота обмоток ротора относительно обмоток статора.

Рисунок 1 – векторная диаграмма индукционного регулятора

Уравнение (1) иллюстрируется векторной диаграммой напряжений индукционного регулятора, построенного для одной фазы в режиме х. х. (рисунок 1). Задаваясь значением угла поворота  $\alpha$ , можно по (1) определить напряжение на выходе индукционного регулятора для любого положения ротора. При повороте ротора на угол от нуля до  $180^\circ$  напряжение на выходе регулятора плавно изменяется от  $U_{2\text{наиб}}$  до  $U_{2\text{наим}}$ .

Уравнение (1) справедливо для двухполюсного регулятора ( $p = 1$ ), в общем случае уравнение напряжений для индукционного регулятора имеет вид:

$$U_\delta = U_1 + E_2 \cos(\alpha p), \quad (2)$$

где  $p$  – число пар полюсов

### Опыт холостого хода

Собирают электрическую схему согласно рисунку 2. Положение ротора при включении регулятора в сеть должно соответствовать отметке «ПУСК», нанесённой на верхней крышке регулятора. Нагрузка  $R_H$  должна быть отключена. Включают индукционный регулятор в сеть на номинальное напряжение  $U_1$ .

Поворачивая ротор, через 10 геометрических градусов измеряют напряжение на входе регулятора  $U_1$  (вольтметр  $V_1$ ), ЭДС на статоре  $E_2$  (вольтметр  $V_2$ ) и напряжение на выходе регулятора  $U_\delta$  (вольтметр  $V_3$ ). Полученные значения величин должны удовлетворять уравнению  $U_2 = U_1 + E_2$ .

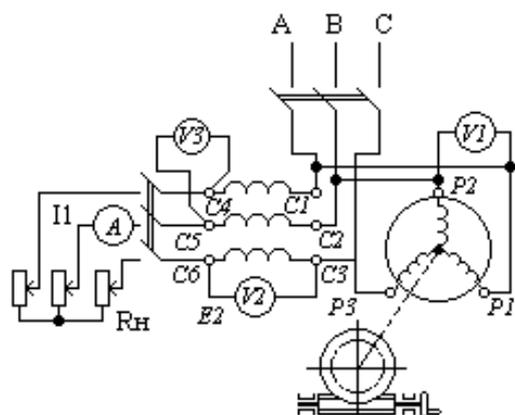


Рисунок 2 – Схема индукционного регулятора

Полученные данные заносят в таблицу 1.

Таблица 1 – экспериментальные данные исследования индукционного регулятора

$\alpha$ , геометр. градусы								
$\alpha p$ , электрич. градусы								
$U_3, B$								
$U_2, B$								
$U_1, B$								

По полученным данным строят график  $U_\delta = f(\alpha p)$  для режима х. х. регулятора. На этой же координатной сетке строят график  $U_2 = f(\alpha p)$ , где  $U_2$  – напряжение на выходе регулятора, полученное в результате расчёта по (2)

### Внешняя характеристика

Установив на выходе индукционного регулятора напряжение  $U_\delta = 220 B$ , подключают к регулятору нагрузку (включают рубильник 2). Постепенно увеличивают нагрузку через приблизительно одинаковые интервалы тока  $I_2$ .

Определяют номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U = U_2 - U_{2ном} / U_{2ном} * 100, \quad (3)$$

где  $U_{2ном}$  – напряжение на выходе регулятора при номинальной нагрузке  $I_{2ном}$ .

### Обработка опытных данных

Привести опытную и полученную расчётом зависимости напряжения на выходе индукционного регулятора от угла поворота ротора  $U_2 = f(\alpha p)$ .

Привести внешнюю характеристику регулятора.

### Вопросы по работе

1. Объясните устройство индукционного регулятора.
2. Почему поворот ротора вызывает изменение напряжения на выходе индукционного регулятора?
3. Сколько раз напряжение на выходе шестиполюсного индукционного регулятора достигнет наибольшего значения за один оборот ротора?
4. Какой вид имеют внешние характеристики индукционного регулятора при различном характере нагрузки?
5. В чём недостатки индукционного регулятора как источника регулируемого напряжения.
6. Указать по рис.1 какой вольтметр показывает изменяющуюся в функции угла поворота ЭДС?
7. Какой диапазон угла поворота ротора. Чем конструктивно ограничен угол поворота ротора.
8. Какая обмотка создаёт основной магнитный поток?
9. Каким образом можно сохранить неизменным фазу вторичного напряжения относительно первичного?
10. Где применяется индукционный регулятор?

# Лабораторное занятие 11

## Исследование однофазного трансформатора

*Цель:* изучить конструкцию, методики определения параметров и характеристик трансформаторов.

### Порядок работы

1. Ознакомиться с конструкцией и номинальными данными исследуемого трансформатора.
2. Определить коэффициент трансформации.
3. Снять характеристику холостого хода (х. х. х.).
4. Снять характеристику короткого замыкания (х.к.з.).
5. Выполнить опыт нагрузки.
6. Определить параметры трансформатора.
7. Рассчитать внешнюю характеристику трансформатора.

### Методические указания

Исследуемый в данной лабораторной работе однофазный двухобмоточный трансформатор имеет магнитопровод стержневой конструкции, который навит из ленты электротехнической стали. На стороне высокого напряжения имеется ряд отпаек.

Трансформатор предназначен для длительной работы с номинальными величинами, к важнейшим из которых относится номинальная мощность, напряжения и токи обмоток высокого и низкого напряжения.

Номинальная мощность однофазного трансформатора – полная электрическая мощность:

$$S_{ном} = U_{Iном} I_{Iном} \quad (1)$$

Обмотки однофазных трансформаторов выполняют на одну и ту же мощность. Номинальное напряжение первичной обмотки должно соответствовать напряжению первичной сети. За номинальное напряжение вторичной обмотки принимают напряжение при холостом ходе, т.е.

$$U_{2ном} = U_{20} \quad (2)$$

Номинальный ток любой обмотки определяется по её номинальной мощности и напряжению:

$$I_{Iном} = S_{ном} / U_{Iном} ; I_{2ном} = S_{ном} / U_{2ном} \quad (3)$$

Под нагрузкой вторичное напряжение изменяется. Определить изменение напряжения можно по следующему выражению:

$$\Delta U_2 = (I_2 z_k / k^2) \cos \varphi_2 + (I_2 x_k / k^2) \sin \varphi_2 , \quad (4)$$

где  $I_2$  – действующее значение тока нагрузки,

$z_k$  – активное сопротивление короткого замыкания,

$k$  – коэффициент трансформации,

$x_k$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Напряжение, при котором ток короткого замыкания равен номинальному току, называется напряжением короткого замыкания. В относительных

величинах напряжение короткого замыкания равно сопротивлению короткого замыкания:

$$u_{k*} = (I_{ном} Z_k / U_{ном}) = Z_{k*} \quad (5)$$

Напряжение короткого замыкания может выражаться в % от  $U_{ном}$ :

$$u_{k\%} = 100 u_{k*} \quad (6)$$

### Определение коэффициента трансформации

Коэффициент трансформации определяется в режиме холостого хода при номинальном первичном напряжении  $U_{ном}$  по схеме, изображённой на рисунке 1. Номинальное напряжение выставляется при помощи индукционного регулятора напряжения (выходное напряжение регулятора берётся с любых зажимов С4 ... С6, например, С4 и С6). Коэффициент трансформации:

$$k = w_1/w_2 = E_1/E_2 \approx U_{ном} / U_{20}$$

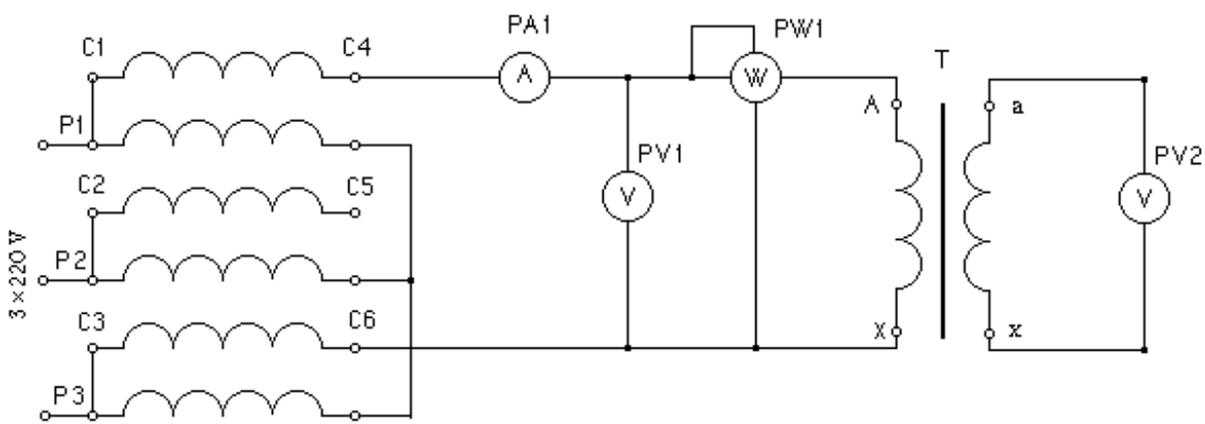


Рисунок 1 - схема определения коэффициента трансформации и х.х.х.

### Характеристика холостого хода

Режим холостого хода – режим при разомкнутой вторичной обмотке, т.е.  $I_2 = 0$ . Характеристика снимается при изменении первичного напряжения  $U_1$  от 0 до  $1,1 U_{ном}$ . Опыт холостого хода проводят по схеме, изображённой на рисунке 1. Во время опыта определяют ток и потери холостого хода. Коэффициент мощности определяют расчетом:

$$\cos \varphi_2 = p_0 / (U_{10} I_2)$$

По результатам опыта строят характеристики х.х.  $I_0, p_0, \cos \varphi_0 = f(U_{10})$

Таблица 1 – Опыт холостого хода

$U_{10}, B$	$I_0, A$	$p_0, Вт$	$\cos \varphi_0$

### Характеристика короткого замыкания

Режим короткого замыкания - это режим при закороченной вторичной обмотке. Характеристика снимается по схеме (рисунок 2). До проведения опыта снижают напряжение на первичной обмотке до 0. На отключенном

трансформаторе через амперметр закорачивают вторичную обмотку. Включают трансформатор в работу и плавно повышают напряжение на первичной обмотке, контролируя токи первичной и вторичных обмоток:  $I_{1ном} \geq I_{1к}$ ,  $I_{2ном} \geq I_{2к}$ .

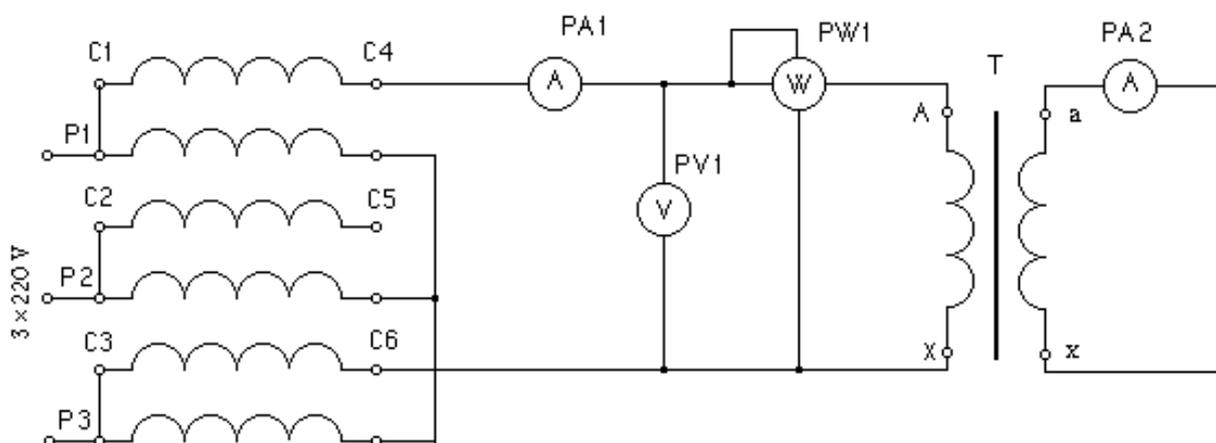


Рисунок 2 - схема для определения х.к.з.

При номинальных токах  $I_{1ном}$ ,  $I_{2ном}$  фиксируют напряжение на первичной обмотке, которое называется напряжением короткого замыкания. Рассчитывают  $\cos \varphi_k$  и напряжение короткого замыкания в % от  $U_{1ном}$ :

$$\cos \varphi_k = p_k / (U_{1к} I_{1к}),$$

$$u_k \% = (U_{1к} / U_{1ном}) 100\%.$$

По результатам опыта строят характеристики к.з.:  $I_{1к}, p_k, \cos \varphi_k = f(U_{1к})$

Таблица 2 – Опыт короткого замыкания

$U_{1к}, В$	$I_{1к}, А$	$I_{2к}, А$	$p_k, Вт$	$\cos \varphi_k$

### Опыт нагрузки

Опыт нагрузки проводят по схеме 3. Нагрузку изменяют от 0 до номинального значения. Первичное напряжение поддерживают постоянным. Результаты измерений и расчетов сводят в таблицу 3.

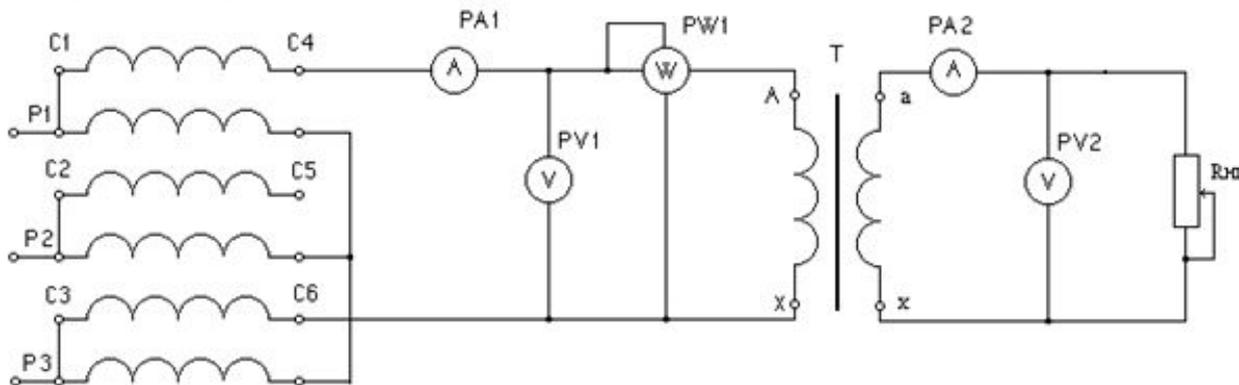


Рисунок 3 – Опыт нагрузки

Таблица 3 – Опыт нагрузки

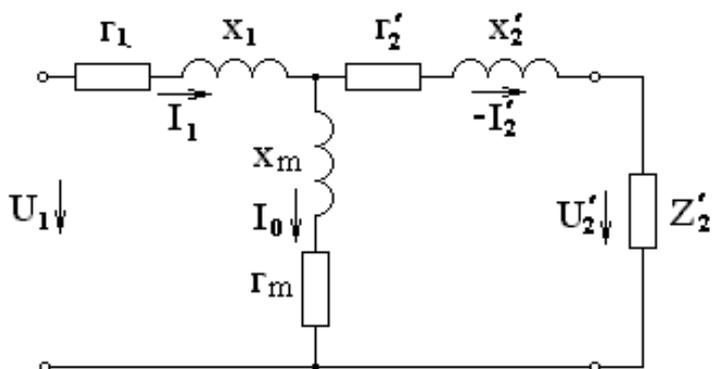
Опытные данные						Расчетные данные	
$U_1, B$	$I_1, A$	$p_1, Вт$	$U_2, B$	$I_2, A$	$p_2, Вт$	$\eta$	$\cos \varphi_2$

Данные опыта строят в функции коэффициента нагрузки  $\beta = I_1 / I_{ном}$ . КПД определяют согласно ГОСТ косвенным методом по данным опытов х.х. и к.з.:

$$\eta = 1 - (p_0 + \beta^2 p_k) / (\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_k) \quad (7)$$

Потери короткого замыкания  $p_k$  в формуле (7) определяют по опыту к.з. для  $I_{ном}$ . Потери х.х.  $p_0$  определяют по опыту х.х. для  $U_{ном}$ .

### Определение параметров трансформатора



Параметры Т-образной схемы замещения определяют по результатам опытов х.х. и к.з. Полная схема замещения приведена на рисунке 4.

Рисунок 4 – Полная схема замещения

Для режима х.х. и к.з. схема замещения упрощается. Для х.х.  $I_2 = 0$ . Параметры ветви намагничивания определяют по опыту х.х. при  $U_{ном}$ . Полагают, что электрическими потерями в обмотке можно пренебречь, а сопротивление рассеяния первичной обмотки  $x_1 \ll$  главного индуктивного сопротивления  $x_m$ , определяемого потоком взаимной индукции первичной и вторичных обмоток.

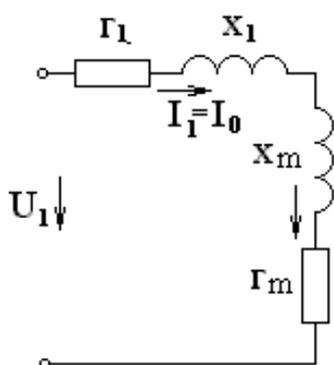


Рисунок 5 – Схема замещения при х.х.

$$Z_0 = U_{ном} / I_0 \approx Z_m$$

$$r_0 = p_0 / I_0^2 \approx r_m$$

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \approx x_m$$

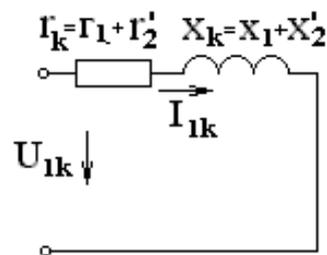


Рисунок 6 - схема замещения при к.з.

$$Z_k = U_{1k} / I_{1ном}$$

$$r_k = p_k / I_{1ном}^2 \approx r_1 + r_2'$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \approx x_1 + x_2'$$

В режиме к.з.  $Z_m \gg Z_2'$  и током через намагничивающую ветвь можно пренебречь.

### Расчет внешней характеристики трансформатора

Внешняя характеристика – это зависимость  $U_2 = f(I_2)$  или  $U_2 = f(\beta)$ . Для её расчета задаются величинами тока нагрузки (или  $\beta$ ) и по выражению (4) при  $\cos\varphi = \text{const}$  определяют  $\Delta U_2$ . Внешняя характеристика рассчитывается по следующему выражению:

$$U_2 = U_{ном} / k - \Delta U_2 \quad (8)$$

Результаты расчета сопоставить с данными опыта нагрузки.

### Вопросы по работе

1. Объяснить физический смысл параметров Т-образной схемы замещения.
2. Объяснить причину изменения коэффициента мощности в опыте х.х., сравнить характер изменения  $\cos\varphi$  в опытах х.х. и к.з.
3. Почему КПД трансформатора определяют косвенным методом?
4. Объяснить физический смысл потерь короткого замыкания и холостого хода.
5. При каком  $\beta$  КПД трансформатора достигает максимума?
6. Почему принято в трансформаторах определять номинальное напряжение вторичной обмотки в режиме холостого хода?
7. Что понимают под «напряжением короткого замыкания»?
8. Как определить изменение напряжения при помощи  $u_k\%$ ?
9. Рассчитать индукцию в сердечнике трансформатора, если число витков первичной обмотки  $w_1=256$ , сечение магнитопровода  $2,59 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , а напряжение 220 В.
10. Как изменится ток холостого хода при уменьшении (увеличении) количества витков первичной обмотки?

### Лабораторное занятие 12

#### Исследование трехфазного трансформатора методом холостого хода и короткого замыкания

*Цель:* изучить конструкцию, методики определения параметров трансформатора по опытам холостого хода и короткого замыкания; характеристик трехфазных трансформаторов.

#### Порядок работы

1. Ознакомиться с конструкцией и номинальными данными исследуемого трансформатора
2. Определить коэффициент трансформации.
3. Определить параметры трансформатора.
4. Построить векторные диаграммы трансформатора при х.х., к.з. и нагрузке.
5. Рассчитать изменение напряжения трансформатора при заданной нагрузке.

В данной работе исследуется трёхфазный двухобмоточный трансформатор с трёхстержневым магнитопроводом.

Номинальная мощность трёхфазных трансформаторов:

$$S_{ном} = \sqrt{3} U_{Iном} I_{Iном}, \quad (1)$$

где  $U_{Iном}$  – номинальное напряжение первичной обмотки,  $I_{Iном}$  – номинальный ток первичной обмотки.

Ток и напряжение в (1) – линейные величины.

Коэффициент трансформации для трёхфазных трансформаторов может рассчитываться как по фазным, так и по линейным значениям ЭДС. Для теории трансформаторов имеет значение определения коэффициента трансформации по фазным величинам. На практике коэффициент трансформации чаще определяют по измеренным линейным значениям ЭДС, при этом следует учитывать схему соединений обмоток на высоком (ВН) и низком (НН) напряжении. Например, для трансформатора, имеющего схему соединений обмоток Y/Δ, коэффициент трансформации определится так:

$$K = W_1/W_2 = E_{1л}/(\sqrt{3} E_{2л}) \approx U_{Iном}/(\sqrt{3} U_{2ном}) \quad (2)$$

Для схемы соединения обмоток Δ / Y:

$$K = W_1/W_2 = \sqrt{3} E_{1л}/E_{2л} \approx \sqrt{3} U_{Iном}/U_{2ном} \quad (3)$$

При использовании соединений Y/Y или Д/Д коэффициент трансформации определяется как для однофазного трансформатора.

Параметры схемы замещения трёхфазных трансформаторов определяются для фазы обмотки. При расчёте параметров необходимо учитывать схему соединений. При измерении величин токов и напряжений за расчетные величины принимают средние значения линейных токов и напряжений. При использовании двух ваттметров мощность трехфазной системы равна сумме показаний приборов. Двухэлементный ваттметр показывает сумму трёхфазной мощности.

### Определение коэффициента трансформации

Собрать схему соединений Y/Y по рисунку 1. Выставить номинальное напряжение на первичной обмотке. Рассчитать среднее значение линейных напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформатора. Коэффициент трансформации определить как  $K = U_{1лср}/U_{2лср}$

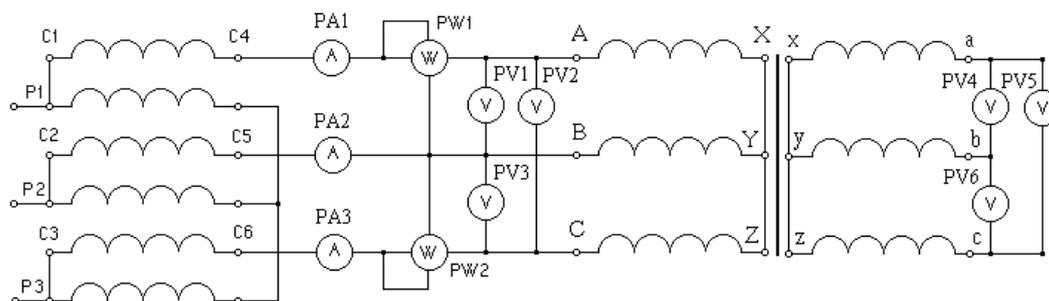


Рисунок 1 – Определение коэффициента трансформации и сопротивлений холостого хода

Таблица 1 – определение коэффициента трансформации

$U_{AB}$	$U_{AC}$	$U_{BC}$	$U_{1лсп}$	$U_{ab}$	$U_{ac}$	$U_{bc}$	$U_{2лсп}$

### Определение параметров схемы замещения трансформатора

Параметры схемы замещения трёхфазного трансформатора определяют по опытам холостого хода (х.х.) и короткого замыкания (к.з.). Внешне схема замещения не отличается от схемы замещения однофазного трансформатора – см. рисунок 2.

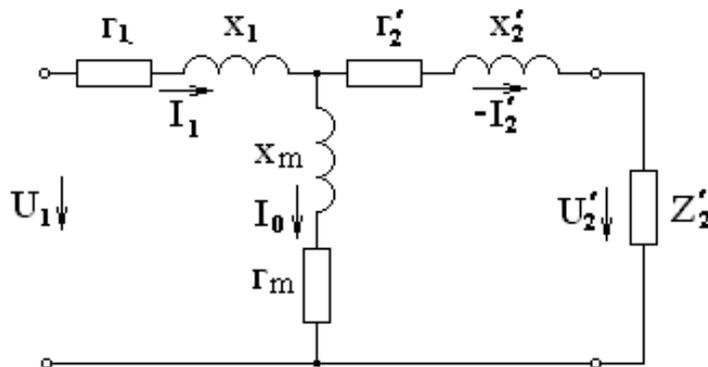


Рисунок 2 – схема замещения трансформатора

По данным опыта холостого хода определяют параметры ветви намагничивания  $r_m$  и  $x_m$ . По данным опыта короткого замыкания определяют сопротивления  $r_1$ ,  $r_2'$ ,  $x_1$  и  $x_2'$ .

Для определения параметров контура намагничивания используют схему опыта х.х. (см. рисунок 1). При отсутствии нагрузки ( $I_2 = 0$ ) схема замещения имеет следующий вид:

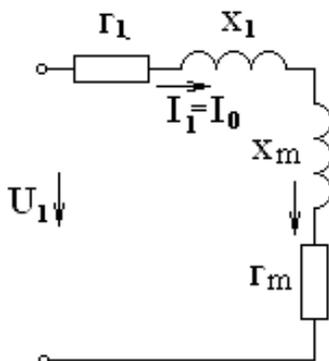


Рисунок 3 – Определение параметров намагничивающего контура

При соединении первичной обмотки в звезду:

$$Z_0 = U_{1ном} / (\sqrt{3} I_{0л})$$

$$r_0 = P_0 / (3 I_{0л}^2)$$

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$$

Пренебрегая сопротивлениями первичной обмотки, принимаем, что параметры холостого хода равны параметрам намагничивающего контура:

$$Z_0 \approx Z_m, r_0 \approx r_m, x_0 \approx x_m$$

При к.з. ( $U_2 = 0$ ) схема замещения примет следующий вид:

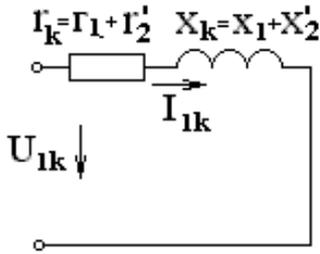


Рисунок 4 – Определение параметров к.з

Для проведения опыта к.з. собрать следующую схему:

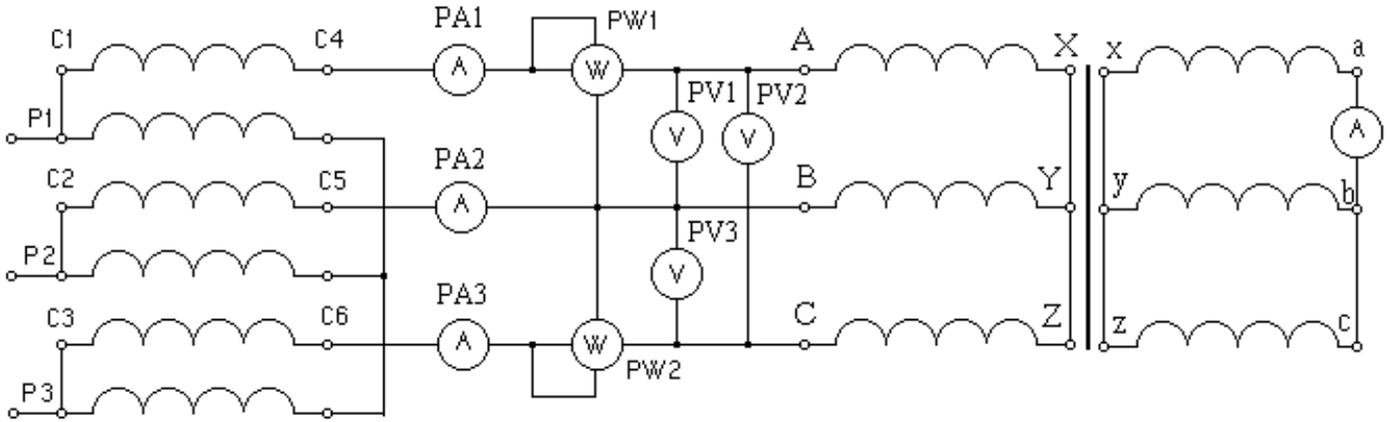


Рисунок 5 – Опыт короткого замыкания

При проведении опыта необходимо соблюдать осторожность. Убедиться, что регулятор на выходных зажимах имеет напряжение  $\approx 0$ . Закоротить вторичную обмотку, как показано на рисунке 5, и включить регулятор в сеть. Постепенно повышать напряжение, контролируя токи в обмотках. При  $I_k = I_{ном}$  записать напряжение и мощность к.з.:  $U_{1k}$  и  $P_k$ .

При соединении первичной обмотки в звезду параметры короткого замыкания будут следующими:

$$Z_k = U_{1k} / (\sqrt{3} I_{ном})$$

$$r_k = P_k / (3 I_{ном}^2)$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}$$

Сопротивление короткого замыкания:  $Z_k = Z_1 + Z_m Z_2' / (Z_m + Z_2')$ . Поскольку  $Z_m \gg Z_2'$ , то в знаменателе последнего выражения можно пренебречь сопротивлением вторичной обмотки. С достаточной точностью можно принять, что

$$Z_k = Z_1 + Z_2',$$

$$r_k = r_1 + r_2' \text{ и } x_k = x_1 + x_2'.$$

Полагая, что мощность к.з. распределяется примерно поровну между обмотками, сопротивления  $r_1, r_2'$  определяют следующим образом:

$$r_1 \approx r_k / 2$$

$$r_2' \approx r_k / 2$$

Полученные параметры схемы замещения необходимо привести к условной температуре 75°C:

$$r_{k75\%} = (1 + \alpha (75 - \upsilon)),$$

$$Z_{k75\%} = \sqrt{r_{k75\%}^2 + x_k^2},$$

где  $\alpha = 0,004$  - температурный коэффициент для меди и алюминия,  
 $\upsilon$  - температура окружающей среды во время опыта

При протекании по первичной обмотке трансформатора номинального  $I_k = I_{ном}$  определяют напряжение короткого замыкания:

$$u_{к\%} = (U_k / U_{ном}) 100\%$$

$$u_{ка75\%} = u_{к\%} \cos \varphi_k$$

$$u_{кр75\%} = u_{к\%} \sin \varphi_k$$

Величины напряжений короткого замыкания также приводят к рабочей температуре:

$$u_{k75\%} = (I_{ном} Z_{k75\%} / U_{ном}) 100\%$$

$$u_{ка75\%} = (I_{ном} r_{k75\%} / U_{ном}) 100\%$$

$$u_{кр75\%} = \sqrt{u_{k75\%}^2 - u_{ка75\%}^2}$$

### Векторные диаграммы трансформатора при х.х. и к.з.

Упрощенная векторная диаграмма х.х. строится без учета падений напряжений в первичной обмотке в следующем порядке. Уравнения напряжений первичной и вторичной обмоток:

$$\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_{10}$$

$$\underline{U}_2' = \underline{E}_{20}'$$

Откладывают векторы ЭДС  $\underline{E}_{10}$  и  $\underline{E}_{20}'$  ( см. рисунок 6). Изображающий амплитуду магнитного потока вектор  $\Phi_m$  опережает на 90 градусов ЭДС обмоток. Откладывают вектор  $-\underline{E}_{10}$ , равный первичному напряжению  $\underline{U}_1$ . Под углом  $\varphi_0$  к вектору  $\underline{U}_1$  откладывают вектор тока холостого хода  $\underline{I}_0$ . Реактивная составляющая тока  $\underline{I}_0$  совпадает по направлению с  $\Phi_m$ , а активная опережает  $\Phi_m$  на 90 градусов.

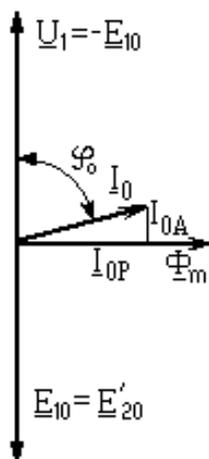
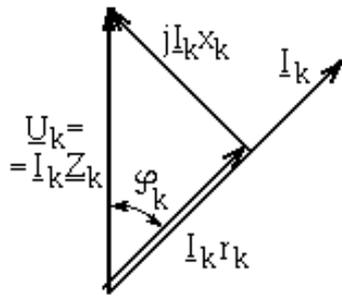


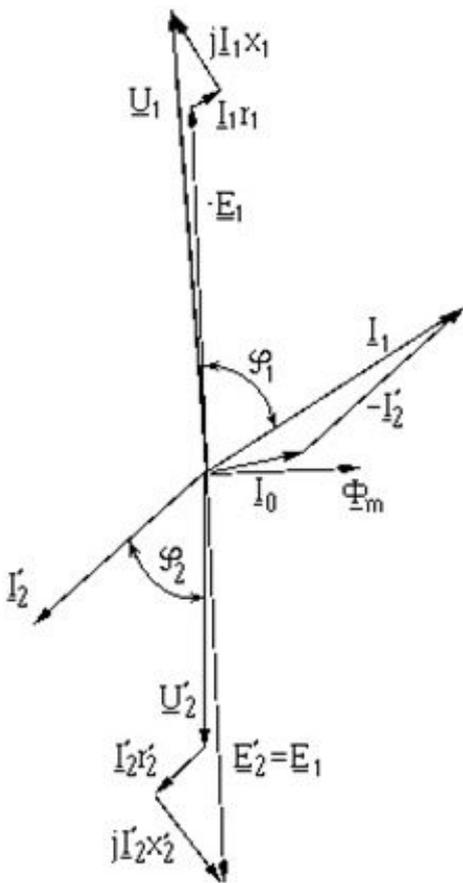
Рисунок 6 - векторная диаграмма х.х.



Векторная диаграмма к.з. приведена на рисунке 7. Построение векторной диаграммы проводят в следующем порядке. Вертикально откладывают вектор напряжения к.з.  $\underline{U}_k$ . Под углом  $\varphi_k$  откладывают вектор тока  $\underline{I}_k$ . Вектор падения напряжения на активном сопротивлении к.з. ( $\underline{I}_k r_k$ ), совпадает по направлению с вектором тока. Замыкает треугольник напряжений вектор падения напряжения на реактивном сопротивлении к.з. ( $j \underline{I}_k x_k$ ), который откладывают под прямым углом к вектору  $\underline{I}_k$ .

Рисунок 7 – Векторная диаграмма к.з.

### Векторная диаграмма при нагрузке трансформатора



Векторная диаграмма при симметричной нагрузке трехфазного трансформатора строится для одной фазы. Наиболее характерным является случай активно-индуктивной нагрузки. При построении диаграммы будем исходить из уравнений напряжений первичной и вторичной обмоток:

$$\underline{U}_1 \approx -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 r_1 + j \underline{I}_1 x_1, \quad (4)$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 r'_2 + j \underline{I}'_2 x'_2. \quad (5)$$

Примем вторичное напряжение равным номинальному значению. Величину и фазовый угол вторичного тока задаёт преподаватель. Откладываем вертикально вниз вектор  $\underline{U}'_2$ . Под углом  $\varphi_2$  откладываем вектор вторичного тока  $\underline{I}'_2$ . Согласно уравнению (5) находят вектор  $\underline{E}'_2$ . Вектор, изображающий амплитуду магнитного потока  $\Phi_m$ , опережает  $\underline{E}'_2$  на 90 градусов. Вектор  $-\underline{E}_1$  находится в противофазе по отношению к вектору  $\underline{E}'_2$ , а по амплитуде равен этому вектору.

Рисунок 8 – Векторная диаграмма при активно-индуктивной нагрузке

Находим первичный ток:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2),$$

где  $\underline{I}_0$  принимаем таким же, как в опыте х.х. при  $U_1 = U_{1 \text{ ном}}$ . По уравнению (4) достраиваем вектор первичного напряжения  $\underline{U}_1$ . Угол между первичным напряжением и током -  $\varphi_1$ .

## Расчёт изменения напряжения трансформатора

Расчёт выполнить при заданном преподавателем токе нагрузки по формуле:

$$\Delta U\% = \beta (u_{ка75\%} \cos \varphi_2 + u_{кр75\%} \sin \varphi_2), \quad (6)$$

где  $\beta = I_2 / I_{2ном}$

Задаваясь рядом значений  $\varphi_2$  от  $-90$  до  $+90$  градусов, находят зависимость

$$\Delta U\% = f(\varphi_2)$$

Результаты расчетов свести в таблицу 2. В отчете привести график

$$\Delta U\% = f(\varphi_2)$$

Таблица 2 - изменение напряжения трансформатора

$\varphi_2$	-90	-60	-30	0	30	60	90	<i>Примечание</i>
<i>Cos</i> $\varphi_2$								$I_2 =$
<i>Sin</i> $\varphi_2$								$u_{ка75\%} =$
$\Delta U\%$								$u_{кр75\%} =$

### Вопросы по работе

1. Что понимают под номинальной мощностью трёхфазного трансформатора?
2. Что понимают под номинальными токами обмоток трансформатора?
3. Объяснить, почему при определении коэффициента трансформации трёхфазного трансформатора необходимо учитывать схему соединений обмоток?
4. Можно ли использовать Т-образную схему замещения для анализа несимметричной нагрузке?
5. Как зависят потери х.х. и к.з. от напряжения?
6. Изменяются ли параметры схемы замещения, если вместо медных проводов использовать алюминиевые?
7. Как определить магнитные потери трансформатора?
8. Написать расчётные выражения для определения параметров схемы замещения при соединении первичной обмотки в треугольник.
9. Пояснить построение векторной диаграммы холостого хода, короткого замыкания и режима нагрузки.
10. Как изменится напряжение на вторичной обмотке, если ток будет опережающим по отношению к напряжению?

## Лабораторное занятие 13

### Группы соединений трёхфазных трансформаторов

*Цель:* изучить методику и приобрести практические навыки в определении групп соединений трёхфазных двухобмоточных трансформаторов.

### Порядок работы

1. Соединить обмотки по стандартной схеме Y/Δ - 11. Выполнить измерения и

- построить векторную диаграмму первичных и вторичных ЭДС.
2. Соединить обмотки по стандартной схеме  $Y/Y - 0$ . Выполнить измерения и построить векторную диаграмму первичных и вторичных ЭДС.
  3. Соединить трансформатор в заданную преподавателем группу соединений и доказать правильность соединения построением векторной диаграммы

### Методические указания

Понятие «группа соединений» вводится для оценки сдвига фаз первичных и вторичных линейных ЭДС трансформатора, измеренных на одноимённых зажимах. Группа соединений зависит от маркировки выводов обмотки и от схем соединений обмоток. Принято определять сдвиг фаз между ЭДС и, соответственно, группу соединений при помощи стрелок на циферблате часов. При этом вектор ЭДС обмотки ВН напряжения совмещают с минутной стрелкой, установленной на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки НН с часовой стрелкой. Цифра, характеризующая положение часовой стрелки, показывает группу соединений обмоток трансформатора. Для того, чтобы избежать разнобоя в схемах и группах соединений, ГОСТ 11677-85 определил следующие стандартные группы соединений обмоток трёхфазных двухобмоточных силовых трансформаторов:

$$Y/Y_0 - 0, Y_0/Y - 0, \Delta/\Delta - 0, \Delta/Y_0 - 11, Y/\Delta - 11, Y_0/\Delta - 11, Y/Z - 11.$$

Первыми в обозначении группы приводится соединение обмотки ВН, вторым – соединение обмотки НН. Индекс «0» обозначает наличие выведенной нейтральной точки обмоток. Группы соединений  $Y/Y_0 - 0, Y_0/Y - 0, \Delta/\Delta - 0$  называются *нулевыми*, другие – *одинадцатыми* группами.

При круговой перестановке фаз или перемаркировке начал и концов фазных обмоток можно получить другие группы соединений: при одинаковых схемах соединений обмоток (например  $\Delta/\Delta$ ) все четные группы – 2,4,6 и т.д., при разных (например  $Y/\Delta$ ) – все нечетные группы – 1,3,5... и т.д. При ремонте трансформатора могут произойти ошибочные пересоединения или перемаркировка зажимов трансформатора. При этом изменится сдвиг фаз между ЭДС обмоток ВН и НН на одноимённых зажимах трансформатора. Обязательным условием параллельной работы нескольких трансформаторов является одинаковые группы соединений обмоток трансформаторов. Поэтому перед первым включением трансформатора на параллельную работу проверяют его группу соединений.

### Экспериментальное подтверждение

теоретических положений о группе соединений  $Y/\Delta - 11$

1. Ознакомиться с номинальными параметрами исследуемого трансформатора.
2. Собрать стандартную группу соединений  $Y/\Delta - 11$  – рисунок 1.
3. Для совмещения потенциалов на векторной диаграмме соединить точки А и а.

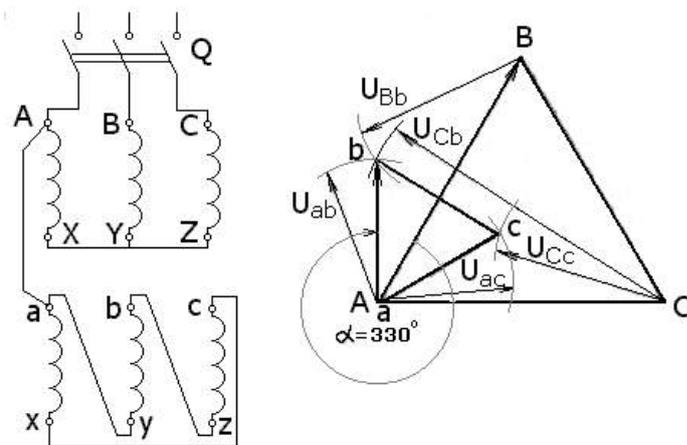


Рисунок 1– Группа соединений  $Y/\Delta - 11$ . Схема и векторная диаграмма ЭДС.

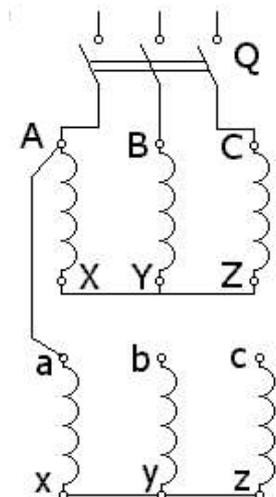
Подать напряжение на первичную обмотку. Измерить и записать в таблицу 1 величины напряжений:

Таблица 1 – Данные измерений для групп соединений  $Y/\Delta - 11$  и  $Y/Y - 0$

Соединения	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$U_{Bb}$	$U_{Cc}$	$U_{Vc}$	$U_{Cb}$
$Y/\Delta - 11$										
$Y/Y - 0$										

По полученным данным выполнить построение треугольника напряжений ABC и abc, приведённое на рисунке 1. Убедиться, что данная схема соединений соответствует 11 группе.

### Экспериментальное подтверждение теоретических положений о группе соединений $Y/Y - 0$



Стандартная группа  $Y/Y - 0$  приведена на рисунке 2. Собрать схему и измерить те же напряжения, что и в предыдущем опыте. Результаты измерений занести в таблицу 1. Построить векторную диаграмму напряжений и убедиться в правильности соединений.

Рисунок 2 – схема соединений  $Y/Y - 0$ .

### Экспериментальное определение произвольной группы соединений

По заданной преподавателем группе соединений выполнить маркировку зажимов трансформатора, выполнить измерения согласно таблице 1, построить векторную диаграмму и подтвердить построением заданную группу соединений. На рисунке 3 приведены два варианта реализации группы соединений  $Y/\Delta - 9$ .

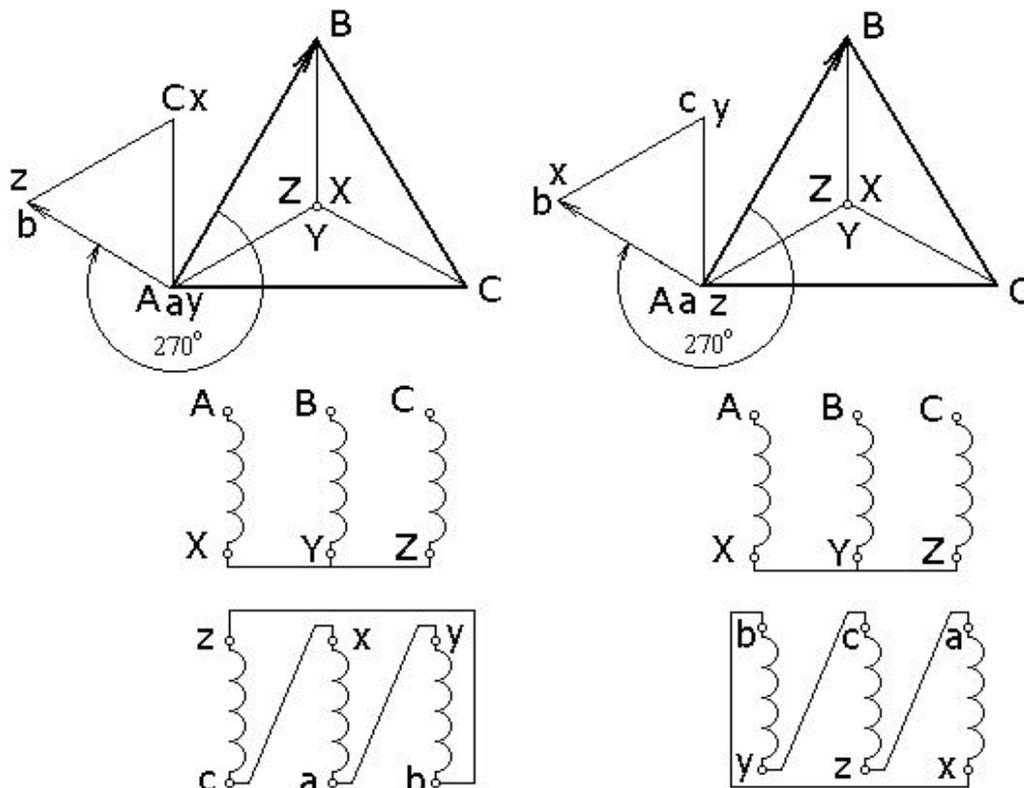


Рисунок 3 – построение группы Y/Δ – 9

Как следует из рисунка, девятая группа получена только за счёт изменения маркировки вторичной обмотки. При построении векторной диаграммы следует исходить из того, что обмотки, находящиеся на одинаковых стержнях, имеют параллельное расположение фазных ЭДС на плоскости, а положительное направление ЭДС принято от начала фазы к её концу, например, при первом способе реализации девятой группы на среднем стержне расположены фаза В на стороне ВН и фаза А на стороне НН. Поэтому на плоскости вектора, изображающие ЭДС фазы В на стороне ВН и А на стороне НН расположены вертикально. С другой стороны, поскольку выполнена перемаркировка начал и концов фаз на низкой стороне, вектора  $\underline{ВУ}$  и  $\underline{ax}$  направлены в противоположные стороны.

### Вопросы по работе

1. Что понимают под группой соединений?
2. Как определить группу соединений при помощи стрелок на часовом циферблате?
3. С какой целью ГОСТ определяет ограниченный круг стандартных групп соединений?
4. Можно ли включить на параллельную работу трансформаторы, имеющие одинаковые номинальные напряжения, одинаковые схемы соединений на ВН, но разные схемы на стороне НН?
5. Какие группы соединений возможны, если на стороне ВН обмотки соединены в «треугольник», а на НН в «звезду»?
6. Как изменится группа соединений, если перемаркировать начало и конец фаз обмоток НН?
7. Можно ли соединить на параллельную работу трансформаторы с «нулевой»

- «четвертой» группой соединений?
8. Какие группы соединений может иметь однофазный трансформатор?
  9. Каким образом получают схему «зигзаг»?
  10. Какие стандартные группы соединений имеют трёхобмоточные трансформаторы, трансформаторы с расщеплённой вторичной обмоткой?

## Лабораторное занятие 14

### Исследование характеристик синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку

*Цель:* изучить характеристики синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку.

#### Порядок работы

1. Собрать электрическую схему электроустановки исследования работы синхронного генератора.
2. Выполнить опыт холостого хода синхронного генератора.
3. Определить внешнюю характеристику синхронного генератора.
4. Определить регулировочную характеристику синхронного генератора.
5. Оформить отчёт.

#### Методические указания

Синхронный генератор может использоваться как автономный источник электрической энергии, например, в дизель-генераторной установке.

Характеристики явнополюсных и неявнополюсных генераторов в основном одинаковые. На характеристики машины заметное влияние оказывает реакция якоря. В зависимости от характера нагрузки реакция якоря может оказывать как размагничивающее, так и намагничивающее действие. При чисто активной нагрузке реакция якоря является поперечно размагничивающей, что приводит с ростом тока якоря к уменьшению магнитного потока и напряжения якоря. При чисто индуктивной нагрузке реакция якоря носит продольно размагничивающий характер, при чисто ёмкостной нагрузке – продольно намагничивающий. В данной работе используется активная нагрузка.

Электрическая схема исследования автономного режима работы синхронного генератора (СГ) включает две электрические машины: двигатель постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением и СГ (Рис.1). Якорь ДПТ управляется со стороны источника регулируемого постоянного напряжения (РН). РН состоит из индукционного регулятора (ИР) и выпрямителя В1. ИР получает питание от сети 3-х фазного напряжения 220 В. Синхронный генератор возбуждается от выпрямителя В2, который управляется автотрансформатором АТ.

#### Пуск агрегата

1. Проверить, что на выходе ИР напряжение отсутствует.
2. Подать напряжение на обмотку возбуждения ДПТ и установить номинальное значение напряжения  $U_{\text{в}}$  (напряжение регулируется на общелабораторном щите).

3. Включить РН, плавно увеличивая напряжение на выходе ИР, развернуть якорь до  $n=3000$  об/мин.
4. Регулируя ток в обмотке возбуждения СМ, установить номинальное напряжение якоря.
5. Во время работы при помощи ДПТ поддерживать частоту вращения 3000 об/мин или 50Гц.

### Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода – это зависимость напряжения якоря от тока возбуждения:

$$U_a = f(I_B) \text{ при } f=f_n \text{ и } n=const, I_a = 0/$$

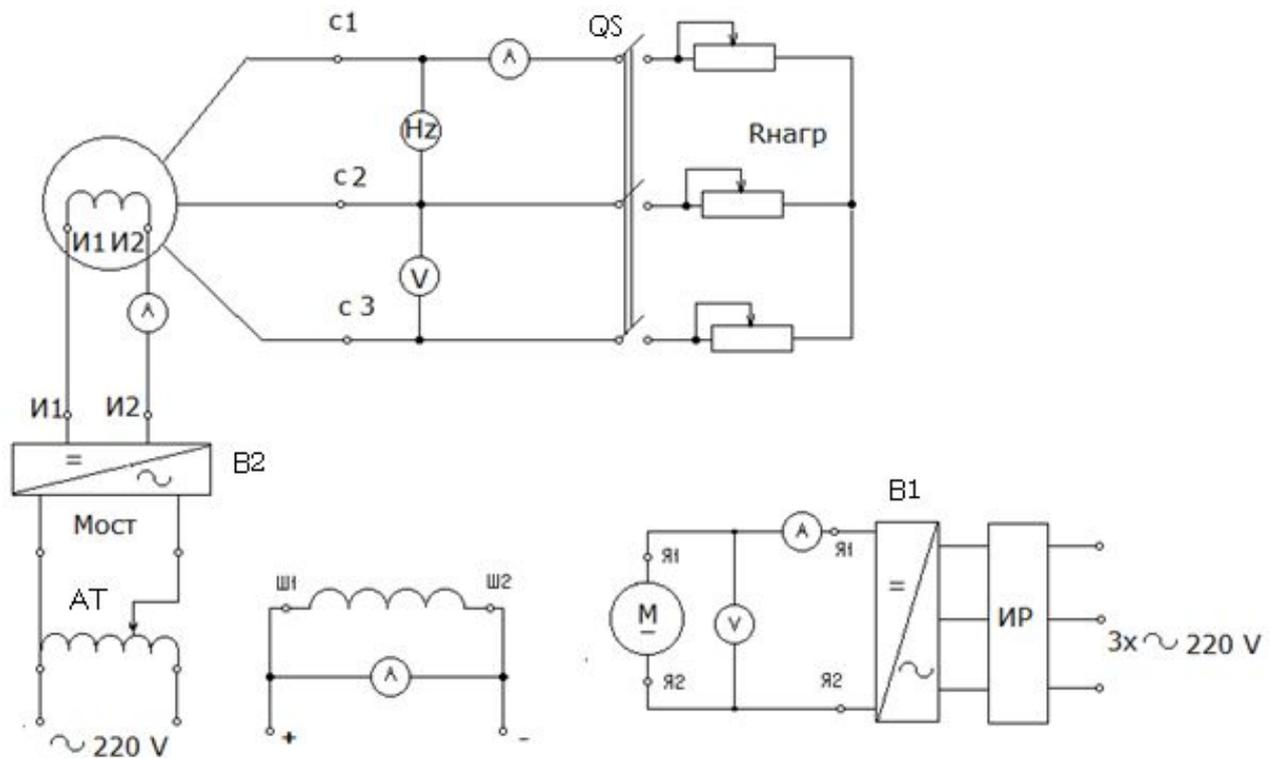


Рисунок 1– Электрическая схема исследования синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку

При снятии характеристики нагрузка отключена. Регулируя ток возбуждения  $I_B$ , устанавливают напряжение якоря  $250\text{ В}$ . Далее уменьшают ток возбуждения  $I_B$ , фиксируя напряжение якоря  $U_a$ . Частоту вращения ротора контролируют при помощи частотомера. При изменении тока возбуждения  $I_B$  частота вращения  $n$  может измениться, что требует управления со стороны РН. Результаты эксперимента записать в таблицу 1.

Таблица 1 – Опыт холостого хода

$U_a, \text{ В}$	$I_B, \text{ А}$

### Внешняя характеристика

Внешняя характеристика – это зависимость напряжения на обмотке якоря от тока нагрузки:

$$U_a = f(I_a) \text{ при } I_B = const, f = f_n \text{ и } \cos\varphi = const$$

При активной нагрузке на характер изменения напряжения существенное влияние оказывает размагничивающее действие реакции якоря, имеющей поперечную и сравнительно малую продольную составляющую. Для проведения опыта необходимо включить ключ  $QS$ . Изменяя величину сопротивления нагрузки  $R_{нагр}$ , увеличивают ток якоря СМ. Результаты опытов записать в таблицу 2. Во время работы необходимо следить за током якоря ДПТ, чтобы  $I_a \leq I_{ан}$ . Частоту поддерживают, управляя ДПТ.

Таблица 2 – Вешняя характеристика

$U_a, В$	$I_a, А$

### Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока якоря, при неизменном напряжении якоря:

$$I_b = f(I_a) \text{ при } U = const. f = fn \text{ и } \cos\varphi = const$$

Изменяя ток нагрузки при помощи  $R_{нагр}$ , поддерживают  $U_a = 220В$  при помощи изменения тока возбуждения  $I_b$ . Частоту вращения поддерживают при помощи двигателя ДПТ. Вид регулировочной характеристики также объясняется действием реакции якоря. Экспериментальные данные заносят в таблицу 3.

Таблица 3 – Регулировочная характеристика

$I_b, А$	$I_a, А$

### Вопросы по работе

1. Что понимают под терминами продольная и поперечная реакция якоря?
2. При каком характере нагрузки возникает размагничивающее действие реакции якоря?
3. При каком характере нагрузки возникает намагничивающее действие реакции якоря?
4. Как влияет размагничивающее действие реакции якоря на его напряжение?
5. В чём отличие действия реакции в явнополюсных и неявнополюсных генераторах?
6. Каким образом регулируют частоту вращения приводного двигателя?
7. Какие характеристики холостого хода называются нормальными?
8. Что понимают под номинальным током возбуждения?
9. Какова величина номинального изменения напряжения СГ?
10. Какая из регулировочных характеристик изменяется быстрее – при активной или индуктивной нагрузке?

## Содержание

Введение .....	3
Перечень практических занятий .....	3
Лабораторное занятие 1 .....	4
Лабораторное занятие 2 .....	7
Лабораторное занятие 3 .....	15
Лабораторное занятие 4 .....	19
Лабораторное занятие 5 .....	22
Лабораторное занятие 6 .....	27
Лабораторное занятие 7 .....	29
Лабораторное занятие 8 .....	31
Лабораторное занятие 9 .....	34
Лабораторное занятие 10 .....	37
Лабораторное занятие 11 .....	40
Лабораторное занятие 12 .....	44
Лабораторное занятие 13 .....	50
Лабораторное занятие 14 .....	54