

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 16:42:12

Уникальный программный ключ:
d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	
1	Лабораторная работа № 1. Опыт холостого хода трансформатора. Опыт короткого замыкания трансформатора.	
2	Лабораторная работа №2. Определение коэффициента трансформации трансформатора	
3	Лабораторная работа № 3. Регистрация и отображение на компьютере тока включения однофазного трансформатора на холостом ходу	
4	Лабораторная работа № 4 Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания однофазного трансформатора	
5	Лабораторная работа № 5. Определение группы соединений обмоток трехфазного трансформатора	
6	Лабораторная работа № 6. Определение уравнительного тока, вызванного неравенством коэффициентов трансформации	
7	Лабораторная работа № 7. Возбуждение самовозбуждение генератора постоянного тока с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением .	
8	Лабораторная работа № 8. Снятие характеристики холостого хода $E_0=f(I_f)$ генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие характеристики короткого замыкания $I_K=f(I_f)$ генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие внешней $U=f(I)$, регулировочной $I_f=f(I)$ и нагрузочной $U=f(I_f)$ характеристик генератора постоянного тока с независимым / параллельным возбуждением	
9	Лабораторная работа № 9. Пуск в ход двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Определение механической характеристики $n=f(M)$ двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением. Определение рабочих характеристик $n=f(P_2)$, $M=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$ двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.	

Введение

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с конструкцией электрических машин, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электрических машин, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях.

В предлагаемом методическом указании описано девять лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

Лабораторная работа №1

Тема: Опыт холостого хода трансформатора. Опыт короткого замыкания трансформатора.

Цель работы: освоить методику проведения опыта холостого хода, опыта короткого замыкания.

Формируемые компетенции:

ОПК-3. Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин.

ИД-5_{ОПК-3} Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик.

Теоретическая часть:

Трансформатор - это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения при неизменной частоте.

Так как электрическая энергия на пути от источника до потребителя несколько раз трансформируется, то установленная мощность всех трансформаторов в несколько раз превышает суммарную мощность всех источников электроэнергии.

По назначению трансформаторы подразделяются на силовые, сварочные и измерительные, по конструкции - на стержневые и броневые.

По числу фаз трансформаторы подразделяются на однофазные и трехфазные, а по способу охлаждения - на сухие и масляные.

Простейший однофазный трансформатор состоит из двух основных частей: магнитопровода (сердечника) и обмоток. Сердечник набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,5мм, с обеих сторон покрытых электрохимическим лаком для уменьшения потерь в стали на вихревые токи. Кроме того, электротехническая сталь имеет повышенное удельное сопротивление и

малые потери на гистерезис. Сердечник служит для усиления электромагнитной связи между обмотками.

На сердечнике располагаются обмотки. Обмотка, подключаемая к питающей сети, называется *первичной*, а обмотка, к которой подключаются потребители переменного тока, называется *вторичной* обмоткой (рис. 1.1).

Если к первичной обмотке, имеющей число витков w_1 подвести переменное напряжение $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, то по ней начнет протекать ток i_1 , который будет отставать от u_1 на 90° , этот ток создаст в сердечнике переменный магнитный поток, также изменяющийся по синусоидальному закону $\phi_0 = \Phi_{0m} \cdot \cos \omega t$.

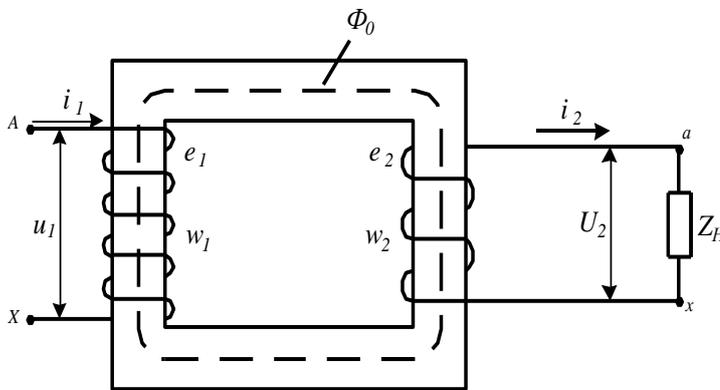


Рисунок 1.1 - Схема трансформатора

Магнитный поток, замыкаясь по сердечнику, будет наводить в первичной и вторичной обмотках э.д.с., пропорциональные числам витков:

$$e_1 = w_1 \frac{d\phi_0}{dt} = w_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{0m} \sin \omega t = E_{1M} \cdot \sin \omega t$$

$$e_2 = w_2 \frac{d\phi_0}{dt} = w_2 \cdot \omega \cdot \Phi_{0m} \sin \omega t = E_{2M} \cdot \sin \omega t .$$

Действующие значения этих э.д.с. будут равны:

$$E_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi_{0m}; \quad E_2 = 4,44 \cdot w_2 \cdot f \cdot \Phi_{0m}$$

Отношение этих э.д.с. называется коэффициентом трансформации:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} .$$

Если $U_2 > U_1$, то трансформатор повышающий, а если $U_2 < U_1$ – то понижающий. В паспорте трансформатора указывается обычно не коэффициент трансформации, а отношение высшего напряжения к низшему.

При построении векторных диаграмм напряжений и токов трансформатора могут возникнуть затруднения с выбором масштаба напряжений первичной и вторичной обмоток, т.к. $U_1 = kU_2$, а диаграммы должны быть в одном масштабе. Поэтому вместо реального трансформатора обычно рассматривают так называемый *приведенный* трансформатор, у которого одна обмотка (обычно вторичная) приведена к другой, т.е. её параметры пересчитаны таким образом, чтобы это не отразилось на энергетических процессах в трансформаторе. Приведенное напряжение и другие параметры вторичной обмотки обозначаются $U_2', I_2', r_2', x_2', z_2'$.

Если $U_2' = kU_2 = U_1$ и $w_2' = kw_2 = w_1$, то ток I_2' определится из условия постоянства потокосцеплений $I_2 w_2 = I_2' w_2'$, откуда

$$I_2' = \frac{I_2 w_2}{w_2'} = \frac{I_2 w_2}{w_1} = \frac{I_2}{k}.$$

Аналогично, приведенное сопротивление $r_2' = k^2 r_2$ определяется из равенства потерь мощности во вторичной обмотке до приведения и после приведения:

$$I_2^2 r_2 = (I_2')^2 r_2',$$

$$\text{откуда } r_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 \cdot r_2 = \left(\frac{I_2 \cdot k}{I_2} \right)^2 \cdot r_2 = k^2 r_2.$$

Аналогично, $x_2' = k^2 x_2$ и $z_2' = k^2 z_2$.

Сумма $r_1 + r_2' = r_\kappa$ называется активным сопротивлением короткого замыкания, а $x_1 + x_2' = x_\kappa$ – индуктивным сопротивлением короткого замыкания и $z_1 + z_2' = z_\kappa$ – полным сопротивлением короткого замыкания.

Режим работы, при котором вторичная обмотка разомкнута, т.е. нагрузка трансформатора отсутствует, называется режимом *холостого хода*. При этом магнитный поток создается намагничивающей силой первичной обмотки:

$$F_0 = I_0 w_1,$$

где I_0 – ток холостого хода.

Величина намагничивающей силы F_0 является постоянной и зависит от размеров и материала сердечника.

Режим работы, при котором во вторичную обмотку включена нагрузка, называется *рабочим режимом* или *режимом нагрузки*. При работе в режиме нагрузки каждая из обмоток трансформатора создает свою намагничивающую силу, причем намагничивающая сила вторичной обмотки будет направлена навстречу намагничивающей силе первичной обмотки:

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \quad \text{или} \quad \dot{I}_0 \cdot w_0 = \dot{I}_1 \cdot w_1 + \dot{I}_2 \cdot w_2.$$

Таким образом, магнитный поток, создаваемый вторичной обмоткой, размагничивает магнитный поток, созданный первичной обмоткой. Так как магнитный поток трансформатора по величине постоянен, то намагничивающая сила первичной обмотки увеличивается только на такую величину, чтобы геометрическая сумма $\dot{I}_1 w_1$ и $\dot{I}_2 w_2$ оставалась практически постоянной. Следовательно, при увеличении тока во вторичной обмотке ток первичной обмотки увеличивается настолько, чтобы намагничивающая сила $\dot{I}_0 w_0$ поддерживалась постоянной. При увеличении нагрузки трансформатора напряжение вторичной обмотки снижается на величину ΔU , которое у малых трансформаторов может быть определено путем испытаний под нагрузкой трансформатора и непосредственным измерением ΔU . Трансформатор большой мощности нагрузить и испытать под нагрузкой очень сложно и неэкономично, поэтому для них ΔU определяют расчетным путем. Нагрузка трансформатора может быть чисто *активной* (освещение), при которой $\cos \varphi_2 = 1$, 0 , и смешанной – *активно-индуктивной (R-L)* или *активно-емкостной (R-C)*, при которых $\cos \varphi_2 < 1,0$.

Зависимость напряжения вторичной обмотки от тока нагрузки, т.е. $U_2=f(I_2)$, при постоянном по величине напряжении первичной обмотки U_1 и постоянном значении коэффициента мощности $\cos \varphi_2$, называется *внешней характеристикой трансформатора* (рис. 1.2).

Напряжение на вторичной обмотке при холостом ходе, т.е. при $I_2 = 0$, называется *номинальным* напряжением. При нагрузке напряжение будет изменяться на величину ΔU :

$$\Delta U = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}}.$$

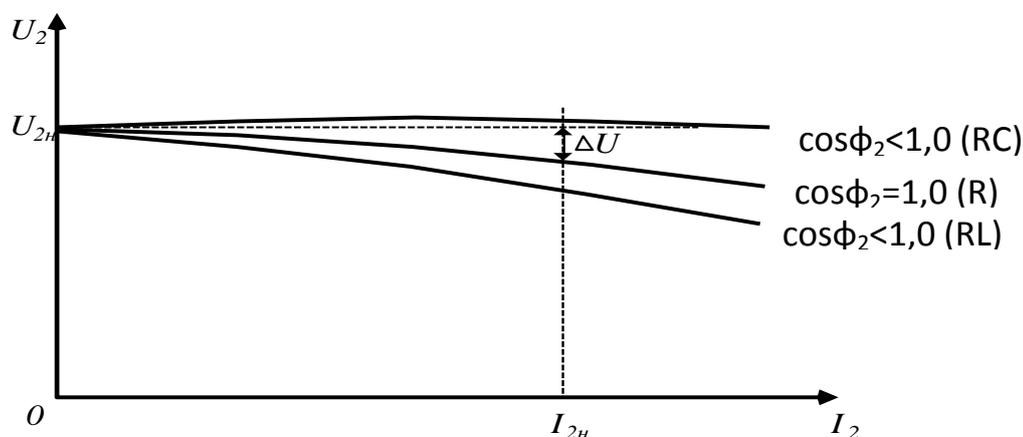


Рисунок 1.2 – Внешняя характеристика трансформатора

Для определения величины ΔU расчетным путем необходимо выполнить два опыта: опыт холостого хода и опыт короткого замыкания.

Опыт *холостого хода* выполняется для определения номинального напряжения вторичной обмотки U_{2H} , тока холостого хода I_0 и потерь мощности холостого хода P_0 . Так как при холостом ходе ток $I_2 = 0$, а ток $I_1 = I_0$ и составляет несколько процентов от тока I_{1H} , то потери в обмотке при холостом ходе малы и можно считать, что потери холостого хода – это потери в стали сердечника.

Опыт *короткого замыкания*, при котором вторичная обмотка замкнута накоротко ($z_H = 0$), выполняется при пониженном напряжении U_{1KH} . При этом напряжение повышается от нуля до значения U_{1KH} , при котором ток замкнутой накоротко вторичной обмотки равен номинальному току I_{2H} . Так как это

напряжение составляет несколько процентов от номинального, то и магнитный поток, пропорциональный напряжению, очень мал и потерями в стали можно пренебречь и считать, что потери при опыте короткого замыкания – это потери в меди обмоток трансформатора.

Зная U_{1KH} и потери P_{KH} можно определить z_K , r_K , x_K :

$$z_K = \frac{U_{1KH}}{I_{1H}}; \quad r_K = \frac{P_{KH}}{I_{1H}^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2},$$

где $r_K = r_1 + r_2'$ и $x_K = x_1 + x_2'$ - активное и реактивное сопротивления короткого замыкания.

Изменение напряжения под нагрузкой ΔU можно определить по формуле:

$$\Delta U = \beta \cdot (U_{ка} \cdot \cos \varphi_2 + U_{кр} \cdot \sin \varphi_2),$$

где $U_{ка} = I_{1H} \cdot r_K$ - активная составляющая напряжения короткого замыкания;

$U_{кр} = I_{1H} \cdot x_K$ - реактивная составляющая напряжения короткого замыкания;

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} - \text{коэффициент нагрузки трансформатора};$$

значениями $\cos \varphi_2$ и $\sin \varphi_2$ задаемся.

Зная U_{2H} и ΔU при различных значениях β и заданном характере нагрузки, можно определить значение U_2 при нагрузке и построить внешние характеристики трансформатора расчетным путем.

Важной характеристикой трансформатора является его КПД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P}.$$

КПД можно определить путем непосредственного измерения мощностей P_2 и P_1 или расчетным путем, зная одну из его мощностей и сумму потерь в нем. Первый метод применяют при испытании маломощных трансформаторов, т.к. в этом случае нет проблем с нагрузкой трансформатора реостатами. В мощ-

ных трансформаторах КПД определяют путем измерения или расчета потерь в нем и полезной нагрузочной мощности $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$. Величина КПД зависит от нагрузки (рис 1.3).

КПД имеет максимум при относительной нагрузке $\frac{P_2}{P_{2н}} \approx 0,7$, когда постоянные потери (P_0) равны переменным потерям (P_K).

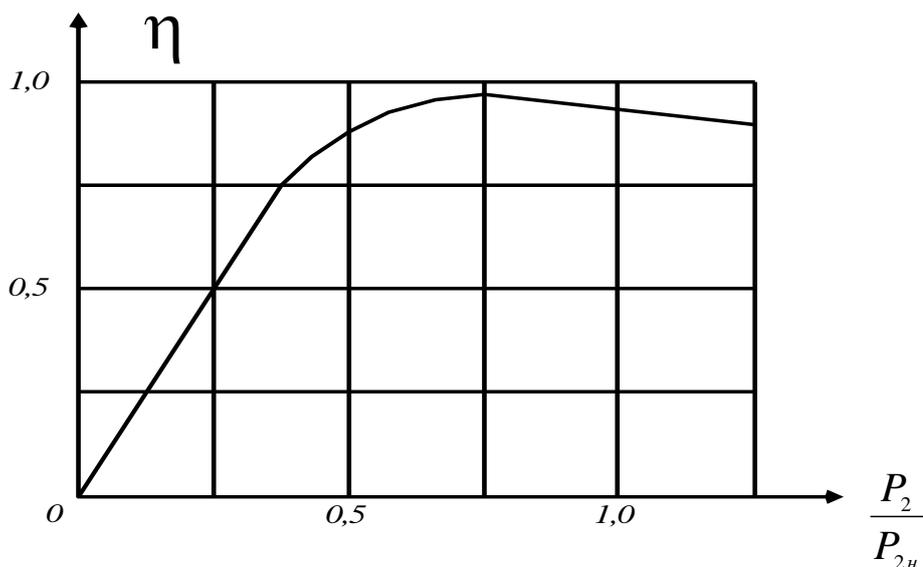


Рисунок 1.3 – Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

Сопротивления схемы замещения трансформатора принято определять экспериментально из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Опыт холостого хода.

Схема опыта приведена на рис.1.4,а. Условия проведения опыта:

- вторичная обмотка w_2 разомкнута;
- на первичную обмотку w_1 подается номинальное напряжение $U_{1ном}$.

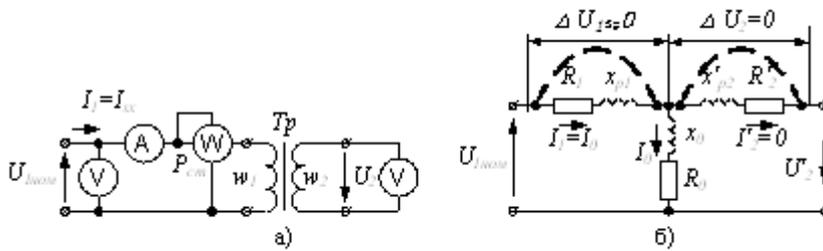


Рисунок 1.4 – Принципиальная электрическая схема(а) опыта холостого хода и схема замещения (б) трансформатора для опыта

Подключенными приборами измеряются: напряжения U_1 и U_2 первичной и вторичной обмоток, ток холостого хода $I_1 = I_{xx}$ первичной обмотки и потребляемая активная мощность P_1 . Так как ток во вторичной обмотке нулевой, а ток первичной обмотки I_{xx} мал, то потерями мощности в активных сопротивлениях обмоток можно пренебречь. Магнитный поток в сердечнике номинальный, так как к трансформатору приложено номинальное напряжение $U_{ном}$. Измеренная активная мощность P_1 является номинальной мощностью потерь в стали $P_1 = P_{ст.ном}$.

Схема замещения для опыта представлена на рис.1.4,б.

Так как в разомкнутой вторичной обмотке ток нулевой, то нулевым будет падение напряжения $\Delta U_2 = 0$ на внутреннем сопротивлении обмотки. Вследствие этого внутреннее сопротивление вторичной обмотки можно считать нулевым. У реальных трансформаторов внутренние сопротивления x_{p1} и R_1 первичной обмотки намного меньше сопротивлений x_0 и R_0 цепи намагничивания: $R_1 \ll R_0$ и $x_{p1} \ll x_0$. Поэтому внутренними сопротивлениями первичной обмотки можно пренебречь и считать их нулевыми. На схеме замещения внутренние сопротивления обоих обмоток показаны закороченными.

По измеренным значениям рассчитывают:

1) сопротивления R_0 и x_0 цепи намагничивания по формулам

$$R_0 = \frac{P_1}{I_1^2}, \quad z_0 = \frac{U_1}{I_1}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}$$

2) коэффициент трансформации

$$k_{mp} = \frac{U_1}{U_2}$$

Опыт короткого замыкания.

Схема опыта приведена на рис.1.5,а. Условия проведения опыта:

- вторичная обмотка w_2 замкнута на амперметр с практически нулевым внутренним сопротивлением;

- на первичную обмотку w_1 подается пониженное напряжение $U_{кз}$ такой величины, при котором во вторичной обмотке протекает номинальный ток $I_{2ном}$.

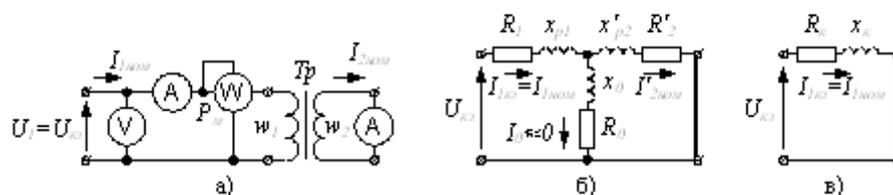


Рисунок 1.5 – Принципиальная электрическая схема (а) опыта короткого замыкания и схемы замещения (б,в) трансформатора для опыта

Подключенными приборами измеряются: напряжение U_1 первичной обмотки, токи I_1 и I_2 первичной и вторичной обмоток и потребляемая активная мощность P_1 . Напряжение короткого замыкания $U_{кз}$ мало и составляет всего 4...7% от номинального. Магнитный поток в магнитопроводе, который пропорционален $U_{кз}$, также очень мал и потери мощности в стали $P_{ст}$, которые пропорциональны $\Phi_{осн}^{1,6}$ и составляют $(0,04..0,07)^{1,6} = 0,006..0,01 = 0,6..1\%$, что является очень малой величиной. Поэтому потерями мощности в стали можно пренебречь.

При проведении опыта контролируется на равенство номинальному току I_2 вторичной обмотки. В силу свойства трансформатора трансформировать ток, номинальным будет также ток и первичной обмотки $I_{1ном}$. Значит измеренные потери мощности являются номинальными потерями в меди $P_{м.ном}$ обмоток.

В полной схеме замещения для опыта, представленной на рис.1.5,в, цепью намагничивания можно пренебречь, так как ток I_0 в ней намного меньше токов I_1 и I'_2 . Объединив, затем, активные R_1, R'_2 и реактивные сопротивления рассеяния x_{p1}, x'_{p2} обмоток в сопротивления, соответственно, R_k и x_k , получим простейшую схему замещения (рис.1.5,в) для опыта короткого замыкания.

По измеренным значениям рассчитывают:

1) сопротивления R_k и x_k короткого замыкания по формулам

$$R_k = \frac{P_1}{I_1^2}, \quad z_k = \frac{U_1}{I_1}, \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - R_k^2}$$

2) активные R_1, R'_2 и реактивные сопротивления рассеяния x_{p1}, x'_{p2} обмоток, принимаемые равными половине сопротивлений R_k и x_k короткого замыкания:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2}, \quad x_{p1} = x'_{p2} = \frac{x_k}{2}$$

и физические сопротивления вторичной обмотки:

$$R_2 = \frac{R'_2}{k_{mp}^2}, \quad x_{p2} = \frac{x'_{p2}}{k_{mp}^2}$$

Указание по технике безопасности:

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Перечень аппаратуры:

Обозначения	Наименования	ип	Параметры
A1	Регулируемый автотрансформатор	18.1	~0...240 В/2А;
A2	Трехфазная трансформаторная группа	47.1	3×80В·А,230В/242,235,230, 226,220,133,127В
P1	Блок мультиметров	08.2	3 мультиметра,~0...1000 В/ ~0...10 А/0...20 Мом

2Р	Измеритель мощностей	07.2	15;60;150;300;600 В/ 0,05; 0,1; 0,2; 0,5А.
----	----------------------	------	-----------------------------------------------

Описание электрической схемы соединений:

Автотрансформатор А1 используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы А2 является испытуемым. С помощью мультиметров блока Р1 контролируется ток и напряжение первичной обмотки испытуемого трансформатора. С помощью измерителя Р2 контролируется активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым трансформатором.

Опыт холостого хода выполняется по схеме (рис. 1.6.):

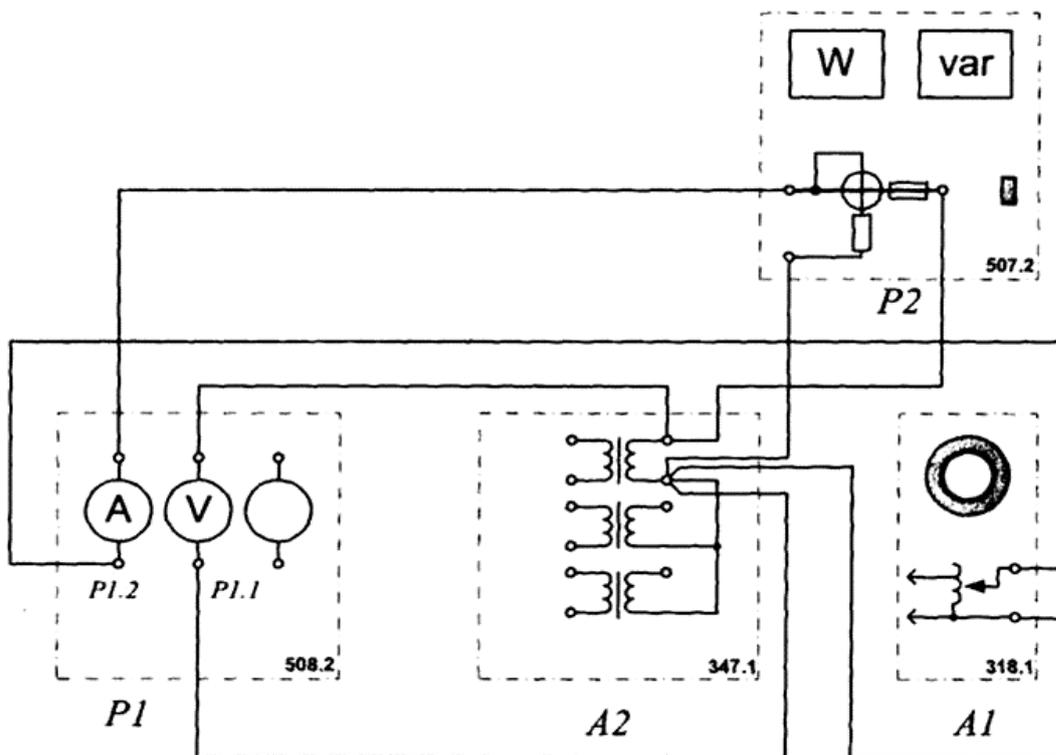


Рисунок 1.6 – Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента:

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.



- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора А1.
- Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220В» автотрансформатора А1 с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания напряжением 220 В.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1, измените напряжение U на выводах первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора в диапазоне 0...240 В и заносите показания вольтметра Р1.1 (напряжение U) и амперметра Р1.2 (ток I₀ первичной обмотки трансформатора), а также ваттметра и варметра измерителя Р2 (активная P₀ и реактивная Q₀ мощности, потребляемые трансформатором) в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

U, В										
I ₀ , мА										
P ₀ , Вт										
Q ₀ , Вт										

- Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя данные таблицы 1.1., вычислите соответствующие напряжению U значения коэффициента мощности по формуле:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}};$$

Занесите полученные результаты в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

U, В										
cos φ₀										

Используя данные таблиц 1.1. и 1.2 постройте искомые характеристики холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $\cos \varphi_0=f(U)$ однофазного трансформатора.

Опыт короткого замыкания

Перечень аппаратуры:

Обозначения	Наименование	Тип	Параметры
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.1	~0...240 В / 2А
A2	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3×80 В·А; 230В/242,235,230,226, 220,133,127 В
A13	Реостат	323.2	2×0...100 Ом/1А
P1	Блок мультиметра	508.2	3 мультиметра ~0...1000 В/~0...10А/ 0...20МОм
P2	Измеритель мощностей	507.2	15;60;150;300;600В/ 0,05;0,1;0,2;0,5А.

Описание электрической схемы соединений:

Автотрансформатор А1 используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы А2 является испытуемым. Реостат А13 ограничивает темп роста тока в обмотках испытуемого трансформатора. С помощью мультиметров блока Р1 контролируется напряжение первичной и вторичной обмоток испытуемого трансформатора. С помощью

измерителя P2 контролируются активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым трансформатором.

Опыт короткого замыкания выполняется по схеме (рис 1.7)

Указания по проведению эксперимента:

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.



- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE " автотрансформатора A1.

- Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220 В» автотрансформатора A1 с розеткой однофазной **трехпроводной** электрической сети питания напряжением 220 В.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора A1 в крайнее против часовой стрелки положение.

- В трехфазной трансформаторной группе A2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.

- Установите суммарное сопротивление реостата A13 равным, например, 100 Ом.

- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

например, 100 Ом.

- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.

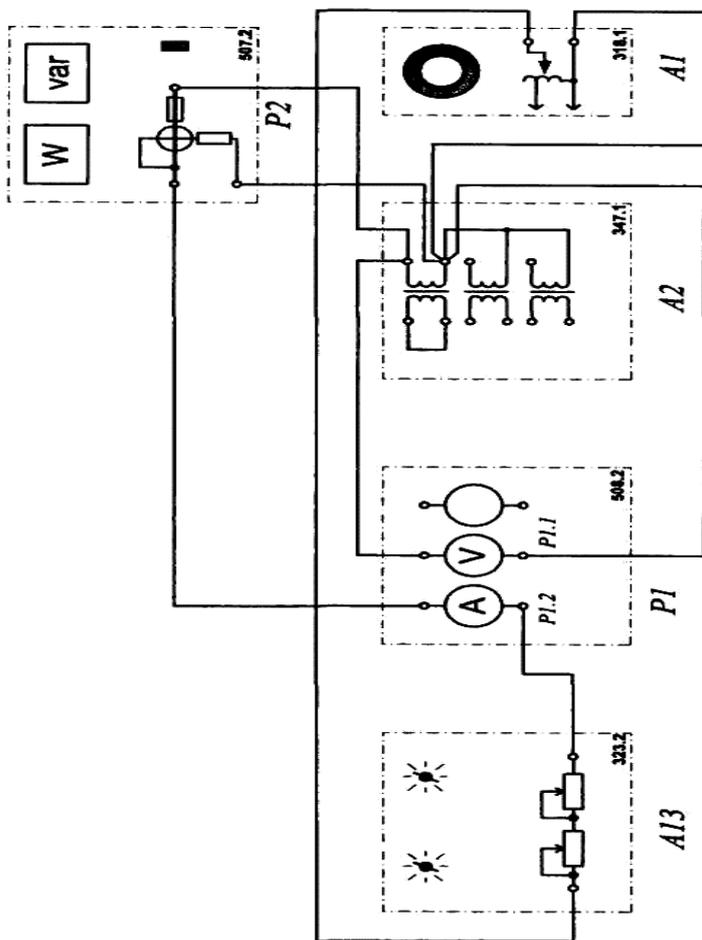


Рисунок 1.7 – Электрическая схема соединений.

- Используя данные таблиц 1.3 и 1.4 постройте искомые характеристики короткого замыкания $I_k=f(U)$, $P_k=f(U)$, $\cos\varphi_k=f(U)$ однофазного трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Что такое трансформатор?
2. Из чего состоит трансформатор?
3. Виды трансформаторов?
4. С какой целью выполняют опыт холостого хода?
5. Чем обусловлены потери мощности в режиме холостого хода?
6. Назовите условия проведения опыта холостого хода и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.
7. Поясните вид схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте холостого хода.
8. Назовите условия проведения опыта короткого замыкания и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.
9. Поясните вид схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте короткого замыкания.

Лабораторная работа №2

Тема: Определение коэффициента трансформации трансформатора

Цель работы: изучить способы определения коэффициента трансформации

Формируемые компетенции:

ОПК-3. Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин.

ИД-5_{ОПК-3} Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик.

Теоретическая часть:

Однофазный трансформатор содержит катушки с намотанными на них обмотками, которые посажены на замкнутый сердечник (магнитопровод) из электротехнической стали. Катушки называются первичной и вторичной обмотками, которые имеют, соответственно, w_1 и w_2 число витков (рис.2.1). Первичная обмотка одна-единственная, а вторичных обмоток может быть больше одной. Первичная обмотка подключается к источнику переменного напряжения (в сеть) U_1 . С вторичной обмотки снимается переменное напряжение U_2 . Трансформатор может работать как в режиме холостого хода (х.х.), когда вторичная обмотка разомкнута (рис.2.1,а), так и под нагрузкой, когда к вторичной обмотке подключено сопротивление нагрузки (нагрузка) z_H (рис.2.1,б).

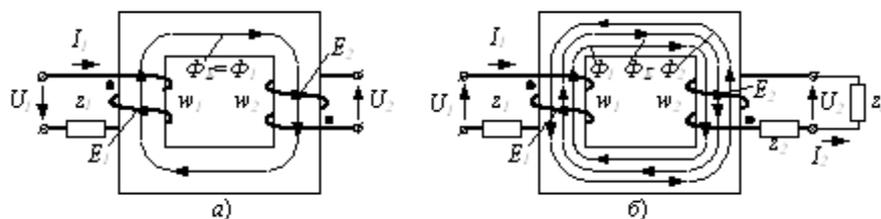


Рисунок 2.1 – Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход (а) и работа под нагрузкой (б)

Работа трансформатора на холостом ходу (рис.2.1,а).

Первичная обмотка w_1 подключена к сети с напряжением U_1 и так как из сети и обмотки образована замкнутая цепь, то по обмотке потечет переменный ток I_1 . Переменный ток I_1 создаст в катушке переменное магнитное поле Φ_1 , которое практически полностью будет сосредоточено в магнитопроводе. На магнитопроводе помещена вторичная обмотка w_2 и переменное магнитное поле Φ_1 пересекает контуры (витки) вторичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая сила (э.д.с.) E_2 . Концы вторичной обмотки выведены наружу трансформатора и на этих выводах будет присутствовать напряжение U_2 , которое в точности будет равно э.д.с. E_2 (так как вторичная обмотка разомкнута). Таким образом, в трансформаторе произошло преобразование переменных напряжений: U_1 преобразовалось в напряжение U_2 .

Одновременно переменное магнитное поле Φ_1 пересекает контуры (витки) первичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая сила (э.д.с.) E_1 . Так как общий (суммарный) магнитный поток Φ_Σ одинаков для витков обеих обмоток и, поэтому, в каждом витке обмоток индуцируется одинаковая по величине э.д.с., которую обозначим как $E_{\text{сум}}$. Э.д.с. обмоток будут прямо пропорциональны числам их витков w_1 и w_2 :

$$E_1 = E_{\text{сум}} w_1, \quad E_2 = E_{\text{сум}} w_2.$$

Из формулы следует, что отношение э.д.с. обмоток равно отношению их числа витков:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{E_{\text{сум}} w_1}{E_{\text{сум}} w_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Коэффициент трансформации.

Коэффициентом трансформации k_{mp} называют следующее отношение напряжений U_1 и U_2 на обмотках:

$$k_{mp} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Ввиду реальной (подтвержденной опытным путем) малости падения напряжения на внутреннем сопротивлении z_1 первичной обмотки, э.д.с. E_1 будет практически равной напряжению U_1 : $E_1 \approx U_1$. Для вторичной обмотки, тока в которой нет, напряжение U_2 будет точно равным э.д.с. E_2 : $U_2 = E_2$.

Формула коэффициента трансформации с учетом и примет вид:

$$k_{mp} = \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Из последней формулы следует, что коэффициент трансформации k_{mp} можно рассчитывать как конструктивную характеристику трансформатора (без подключения трансформатора к сети). Это удобно.

Если $U_2 > U_1$, то трансформатор называют повышающим и его $k_{mp} < 1$. Если $U_2 < U_1$, то трансформатор называют понижающим и его $k_{mp} > 1$.

К выводам вторичной обмотки подключается нагрузка z_n (рис.2.1,б).

В подключенной к сети первичной обмотке протекает переменный ток I_1 , который создаст в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ_1 . Переменный магнитный поток Φ_1 будет пересекать витки вторичной обмотки и, поэтому, в ней наведется переменная э.д.с. E_2 . Так как вторичная обмотка вместе с сопротивлением z_n образуют замкнутый контур, то в контуре и в самой вторичной обмотке потечет переменный ток I_2 . Переменный ток I_2 создаст во вторичной катушке и в магнитопроводе переменное магнитное поле Φ_2 . Если напряжение U_1 синусоидально, то синусоидален созданный им ток I_1 , синусоидально поле Φ_1 , синусоидальны э.д.с. E_2 и ток I_2 и, наконец, синусоидально поле Φ_2 . Определенное по правилу Ленца магнитное поле Φ_2 будет находиться в противофазе с полем Φ_1 . Этот факт на рис.1.1,б отражен тем, что потоки Φ_1 и Φ_2 направлены

в магнитопроводе встречно.

Два встречных магнитных потока создадут одно суммарное поле:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 - \Phi_2.$$

Суммарное поле Φ_{Σ} наводит в обеих обмотках э.д.с. E_1 и E_2 .

При реальных малых внутренних сопротивлениях z_1 и z_2 обмоток трансформатора различия между э.д.с. E_1 и E_2 и соответствующими напряжениями U_1 и U_2 незначительны (2..3%) независимо от степени загрузки трансформатора. Поэтому, при постоянном действующем значении сетевого напряжения U_1 действующее значение э.д.с. E_1 также будет постоянным. Если э.д.с. E_1 создается переменным магнитным полем Φ_{Σ} , то при постоянстве действующего значения э.д.с. E_1 , также будет постоянна амплитуда магнитного потока Φ_{Σ} . Это явление, наблюдающееся в трансформаторе, называется *принципом постоянства магнитного поля* в сердечнике трансформатора.

Так как Φ_{Σ} связан с потоками Φ_1 и Φ_2 соотношением, то при возрастании тока I_2 вторичной обмотки и создаваемого им магнитного потока Φ_2 должен увеличиться магнитный поток Φ_1 . Это возможно только одним путем – увеличением потребляемого из сети тока I_1 . Значит, I_1 отслеживает изменения тока I_2 : если I_2 изменится, вслед за ним пропорционально изменится ток I_1 . Описанное явление называется трансформацией токов в трансформаторе. Числовой характеристикой взаимозависимости токов является коэффициент трансформации токов:

$$k_{mp.I} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Числовое значения коэффициента трансформации токов для нагруженного трансформатора практически совпадает с базовым определением коэффициента трансформации через напряжения обмоток: $k_{mp.I} \cong k_{mp.U}$. Приравняв два и определения коэффициента трансформации (через токи и напряжения обмоток), получим:

$$k_{mp.I} \cong k_{mp} \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow U_2 I_2 \cong U_1 I_1.$$

Из последнего равенства цепи (1.7) следует вывод: полные мощности первичной и вторичной обмоток практически одинаковы. Это значит, что в трансформаторе не происходит преобразования мощности, а преобразуются только напряжения и токи.

Указание по технике безопасности:

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Перечень аппаратуры

Обо значения	Наименования	ип	Параметры
A1	Регулируемый автотрансформатор	18.1	~0...240 В/2А
A2	Трехфазная трансформаторная группа	47.1	3×80 В·А 230 В/242,235,230 226,220,133,127В
P1	Блок мультиметров	08.2	3 мультиметра ~0...1000 В/ ~0...10 А/ 0...20 Мом

Описание электрической схемы соединений

Автотрансформатор А1 используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы А2 является испытуемым. С помощью мультиметров блока Р1 контролируются напряжения первичной и вторичной обмоток испытуемого трансформатора. Опыт выполняется по схеме

(рис2.2.)

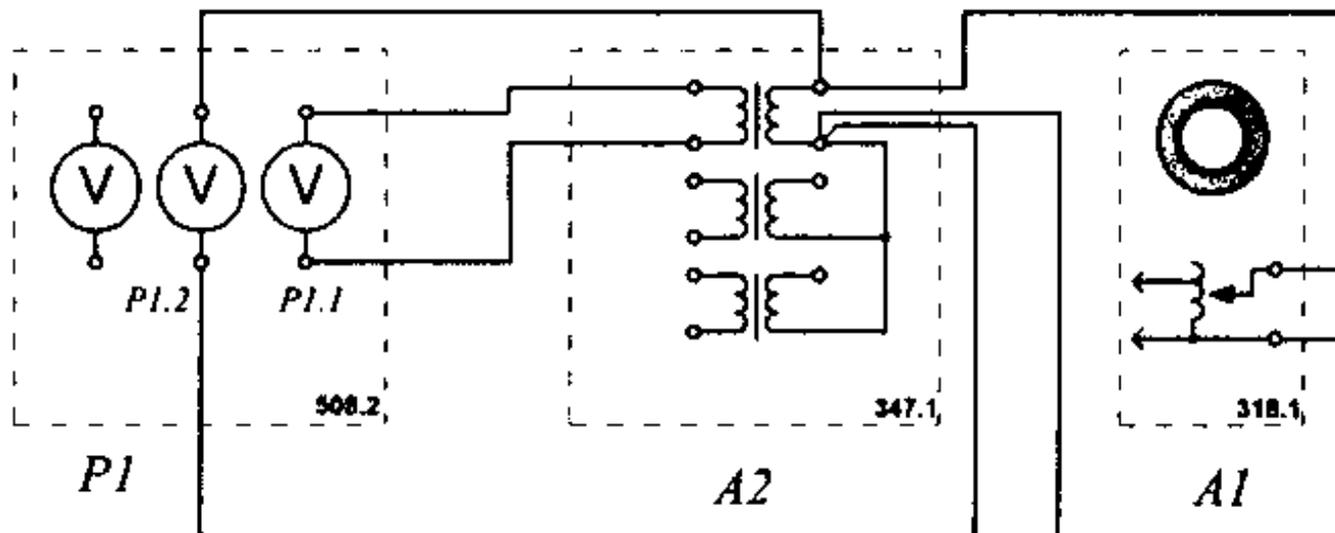


Рисунок 2.2. Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания. 
2. Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" автотрансформатора A1.
3. Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания
4. «220В» автотрансформатора A1 с розеткой однофазной **трехпроводной** электрической сети питания напряжением 220 В.
5. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
6. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора A1 в крайнее против часовой стрелки положение.
7. В трехфазной трансформаторной группе A2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.
8. Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и авто-

трансформатора А1.

9. Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.

10. Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1, выставьте напряжение U_1 на его выходе (выводах первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора) равным, например 220 В.

11. Измерьте с помощью мультиметра блока Р1 напряжение U_2 на выводах вторичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора.

12. Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и автотрансформатора А1.

13. Вычислите искомый коэффициент трансформации однофазного трансформатора по формуле

$$K_{\text{тр}} = U_1 / U_2.$$

Контрольные вопросы

1. Поясните устройство трансформатора, назначение катушек и магнитопровода.

2. Объясните принцип действия трансформатора.

3. Почему в первичной обмотке, подключенной к сети, возникает э.д.с E_1 ? В каком соотношении находится э.д.с E_1 с напряжением сети U_1 ?

4. Что такое коэффициент трансформации $k_{\text{тр}}$ и какие варианты расчета его существуют?

5. Как создается суммарный магнитный поток Φ_{Σ} ?

6. Объясните принцип постоянства суммарного магнитного потока Φ_{Σ} .

7. Что такое коэффициент трансформации токов?

8. Объясните принцип постоянства полной мощности трансформатора.

Лабораторная работа №3

Тема: Регистрация и отображение на компьютере тока включения однофазного трансформатора на холостом ходу

Цель работы: изучить особенности токов включения однофазного трансформатора на холостом ходу

Формируемые компетенции:

ОПК-3. Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин.

ИД-5_{ОПК-3} Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик.

Теоретическая часть:

Однофазный трансформатор содержит катушки с намотанными на них обмотками, которые посажены на замкнутый сердечник (магнитопровод) из электротехнической стали. Катушки называются первичной и вторичной обмотками, которые имеют, соответственно, w_1 и w_2 число витков (рис.3.1). Первичная обмотка одна-единственная, а вторичных обмоток может быть больше одной. Первичная обмотка подключается к источнику переменного напряжения (в сеть) U_1 . С вторичной обмотки снимается переменное напряжение U_2 . Трансформатор может работать как в режиме холостого хода (х.х.), когда вторичная обмотка разомкнута (рис.3.1,а), так и под нагрузкой, когда к вторичной обмотке подключено сопротивление нагрузки (нагрузка) z_n (рис.3.1,б).

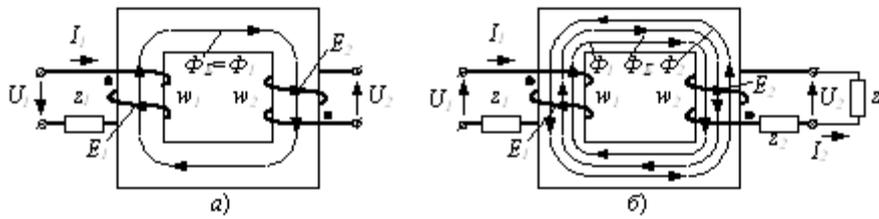


Рисунок 3.1- Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход(а) и работа под нагрузкой (б)

Работа трансформатора на холостом ходу (рис.3.1,а).

Первичная обмотка w_1 подключена к сети с напряжением U_1 и так как из сети и обмотки образована замкнутая цепь, то по обмотке потечет переменный ток I_1 . Переменный ток I_1 создаст в катушке переменное магнитное поле Φ_1 , которое практически полностью будет сосредоточено в магнитопроводе. На магнитопроводе помещена вторичная обмотка w_2 и переменное магнитное поле Φ_1 пересекает контуры (витки) вторичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая сила (э.д.с.) E_2 . Концы вторичной обмотки выведены наружу трансформатора и на этих выводах будет присутствовать напряжение U_2 , которое в точности будет равно э.д.с. E_2 (так как вторичная обмотка разомкнута). Таким образом, в трансформаторе произошло преобразование переменных напряжений: U_1 преобразовалось в напряжение U_2 .

Одновременно переменное магнитное поле Φ_1 пересекает контуры (витки) первичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая сила (э.д.с.) E_1 . Так как общий (суммарный) магнитный поток Φ_Σ одинаков для витков обеих обмоток и, поэтому, в каждом витке обмоток индуктируется одинаковая по величине э.д.с., которую обозначим как E_{sum} . Э.д.с. обмоток будут прямо пропорциональны числам их витков w_1 и w_2 :

$$E_1 = E_{\text{sum}} w_1, \quad E_2 = E_{\text{sum}} w_2.$$

Переходные процессы при включении трансформатора в сеть

При включении трансформатора на холостом ходу вторичная обмотка

разомкнута и схема замещения трансформатора (рис.3.2,а) будет такой же, как в опыте холостого хода.

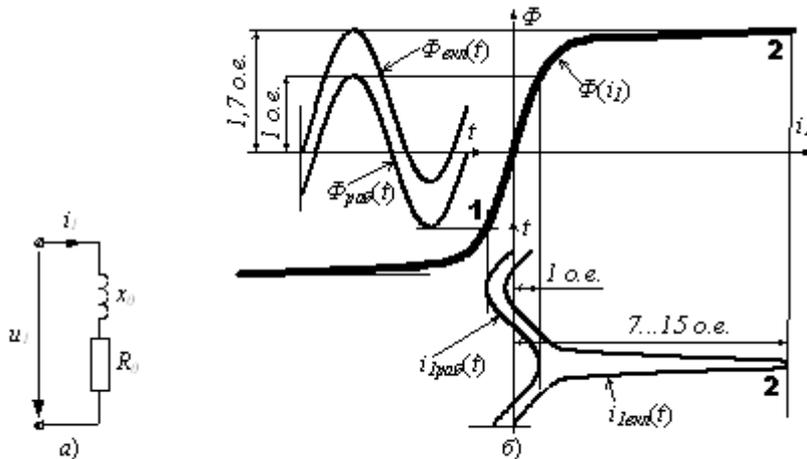


Рисунок 3.2- Процессы при включения трансформатора на холостом ходу: схема замещения (а) и графики сигналов (б)

Дифференциальное уравнение трансформатора

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = L_0 \frac{di_1}{dt} + R_0 i_1$$

При синусоидальном входном напряжении u_1 потокосцепление ψ и магнитный поток Φ в сердечнике будут синусоидальными. Но ток i_1 из-за насыщения стали магнитопровода будет несинусоидальным. Используя определение потокосцепления $\psi = w\Phi = L_0 i_1$, перепишем в виде

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = w \frac{d\Phi}{dt} + \frac{R_0}{L_0(i_1)} w\Phi,$$

где индуктивность $L_0(i_1)$ при постоянстве потокосцепления $\psi = L_0 i_1$ зависит обратно пропорционально от тока i_1 .

Индуктивность L_0 мала на участках насыщения магнитопровода (рис.4.3,б). В переходных процессах значение магнитного потока $\Phi(t)$ только очень малую часть периода его изменения заходит на участок насыщения магнитопровода. Поэтому, оправдано использование в расчетах ненасыщенного значения индуктивности L_0 : $L_0(i_1) \rightarrow L_0(0) \equiv L_0$.

Решение дифференциального уравнения

$$\Phi = \frac{U_{1m}}{w} \left[\sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) - \sin(\alpha_0 - \varphi) \cdot e^{-\frac{R_0}{L_0} t} \right]$$

Из-за апериодической (экспоненциальной) составляющей решения график потокосцепления $\Phi(t)$ сместится в худшем случае на 70...80% ,т.е. амплитудное значение $\Phi(t)$ вырастет в 1,7...1,8 раз. На рис.4.3,б как раз показано изменение амплитуды $\Phi(t)$ в 1,7 раза с образованием графика $\Phi_{вкл}(t)$. Построения с использованием кривой намагничивания $\Phi(i_1)$ стали магнитопровода графика тока $i_{1вкл}(t)$ дали искаженной график тока с амплитудой превышающей амплитуду тока рабочего режима $i_{1раб}(t)$ в 7...15 раз. Затухание амплитуды магнитного потока $\Phi_{вкл}(t)$ до значения $\Phi_{раб}(t)$ происходит с постоянной времени $T_0=L_0/R_0$. У трехфазных силовых трансформаторов большой мощности (сотни-тысячи киловатт) постоянная времени T_0 велика и равна нескольким секундам. Поэтому, при включении таких трансформаторов импульсы тока $i_{1вкл}(t)$ существуют достаточно долго, в течение нескольких единиц-десятков секунд и могут стать причиной отключения трансформатора устройствами его защиты по току короткого замыкания. Для того, чтобы при включении трансформатора длительно действующие импульсы тока не приводили к отключению трансформатора, должна быть применена специальная защита, различающая токи короткого замыкания и импульсы тока при включении на холостом ходу.

Указание по технике безопасности:

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Перечень аппаратуры

Обо-	Наименование	Параметры
G1	Трехфазный ис-	~400 В / 16 А
A2	Трёхфазная	3x80

A3	Блок измерительных трансформаторов то-	01.1	3 трансформатора напряжения 600 В / 3 В;3
A4	Коннектор	30	8 аналог, диф. входов;
A5	Персональный компьютер	50	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора ин-

Описание электрической схемы соединений

Источник G1- источник синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы A2 является испытуемым. Измерительный трансформатор тока (трансдуктор) в блоке A3 обеспечивает гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразует ток первичной обмотки испытуемого трансформатора в пропорциональное ему нормированное напряжение. Через аналоговый вход АСН0-АСН8 коннектора A4 измеряемое напряжение вводится в компьютер A5.

Схема для регистрации тока включения трансформатора на холостом ходу представлена на рис 3.3

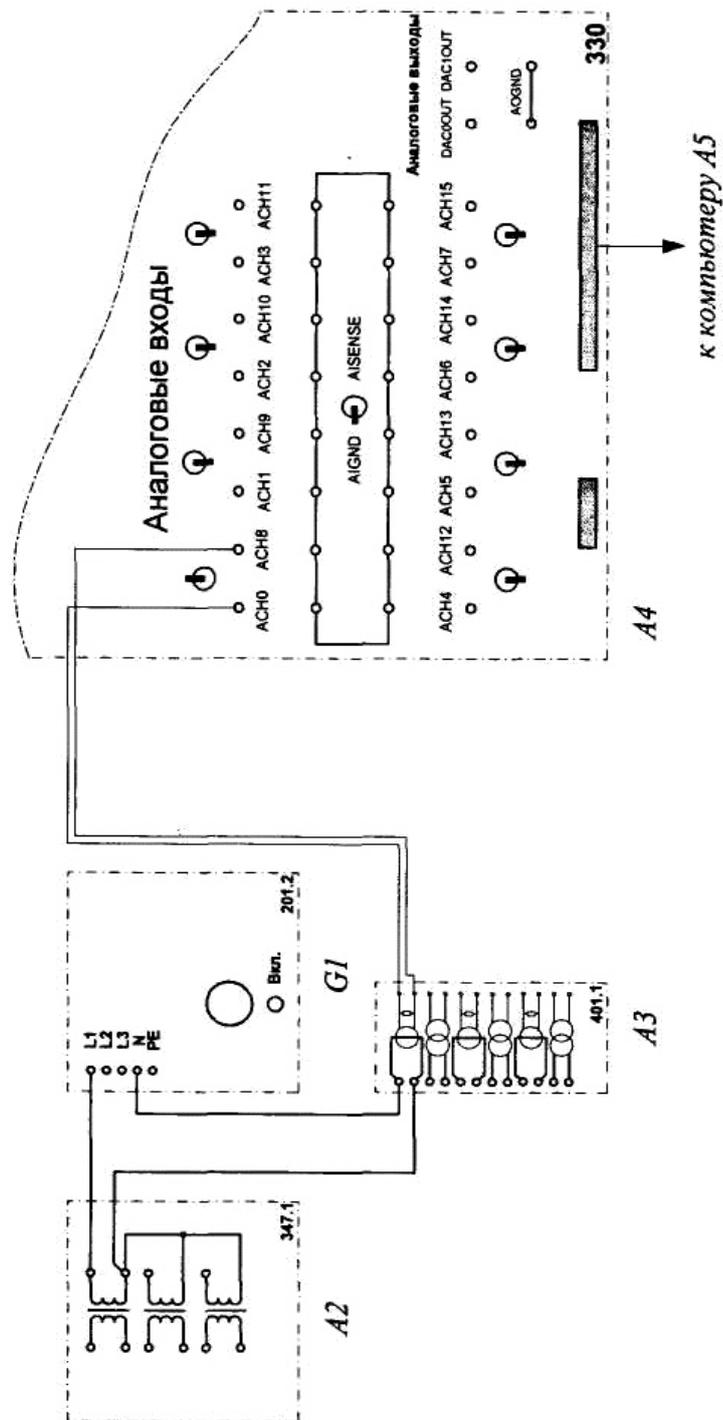


Рис. 3.3. Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного  чника питания G1.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите программу "Многоканальный осциллограф". Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.
- Включите автоматические выключатели и устройство защитного отключения источника G1.
- Включите ключ-выключатель источника G1.
- Нажмите кнопку «ВКЛ» включения сканирования первого канала виртуального осциллографа.
- Нажмите кнопку "ВКЛ" источника G1 и через 1-2 секунды после этого остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».
- Нажмите на кнопку-гриб источника G1.
- Используя возможности программы "Многоканальный осциллограф", проанализируйте полученную временную зависимость тока включения однофазного трансформатора без нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Обоснуйте вид схемы замещения трансформатора при его включении, составьте по схеме дифференциальное уравнение и обоснуйте правомерность использования в расчетах ненасыщенного значения индуктивности L_0 .
2. Как выглядят графики магнитного потока и тока трансформатора при его включении?
3. Почему мощные силовые трансформаторы должны быть предусмотрены меры от отключения защитой при его вводе в работу?

Лабораторная работа №4

Тема: Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания однофазного трансформатора

Цель работы: изучить кривые токов короткого замыкания однофазного трансформатора

Формируемые компетенции:

ОПК-3. Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин.

ИД-5_{ОПК-3} Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик.

Теоретическая часть:

Однофазный трансформатор содержит катушки с намотанными на них обмотками, которые посажены на замкнутый сердечник (магнитопровод) из электротехнической стали. Катушки называются первичной и вторичной обмотками, которые имеют, соответственно, w_1 и w_2 число витков (рис.4.1). Первичная обмотка одна-единственная, а вторичных обмоток может быть больше одной. Первичная обмотка подключается к источнику переменного напряжения (в сеть) U_1 . С вторичной обмотки снимается переменное напряжение U_2 . Трансформатор может работать как в режиме холостого хода (х.х.), когда вторичная обмотка разомкнута (рис.4.1,а), так и под нагрузкой, когда к вторичной обмотке подключено сопротивление нагрузки (нагрузка) z_n (рис.4.1,б).

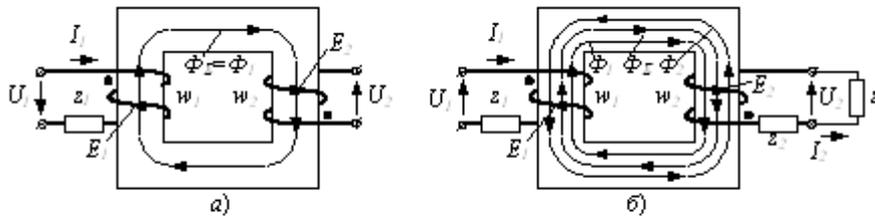


Рисунок 4.1- Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход(а) и работа под нагрузкой (б)

При коротком замыкании по обмоткам трансформатора протекают большие токи, в сравнении с которыми ток I_0 цепи намагничивания чрезвычайно мал. Поэтому можно в расчетах использовать простейшую схему замещения трансформатора. Схема трансформатора в режиме к.з. представлена на рис.4.2. В расчетах используется мгновенное значение напряжения u_1 питания трансформатора, и для тока к.з. $i_{кз}$ рассчитывается также мгновенное значение. До момента к.з. трансформатор работал вхолостую.

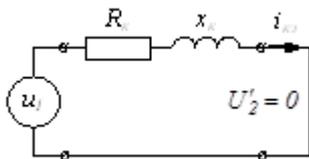


Рисунок 4.2- Расчетная схема к.з трансформатора

Дифференциальное уравнение схемы имеет вид

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = L_k \frac{di_{кз}}{dt} + R_k i_{кз}$$

Общее решение дифференциального уравнения равно сумме принужденной составляющей i_{np} и свободной $i_{св}$:

$$i_{кз} = i_{np} + i_{св}$$

Принужденная составляющая тока $i_{св}$ является током установившегося режима. Ток i_{np} определяется для установившегося режима схемы, и при входном синусоидальном напряжении u_1 ток также синусоидальный, но отстающий от напряжения на электрический угол:

$$\varphi = \arctg \frac{x_k}{R_k} \quad i_{np} = \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi)$$

Вид свободной составляющей тока $i_{св}$ к.з. зависит от корней характери-

стического уравнения, составленного на основе дифференциального уравнения :

$$L_k p + R_k = 0 \Rightarrow p = -\frac{R_k}{L_k} \Rightarrow i_{cb} = C \cdot e^{-\frac{R_k t}{L_k}}$$

Общее решение в соответствии с (5.4) и с учетом найденных значений i_{np} и i_{cb} имеет вид

$$i_{кз} = \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) + C \cdot e^{-\frac{R_k t}{L_k}}$$

Постоянную интегрирования C находим из начального условия: в момент времени $t=0$ ток трансформатора нулевой (до к.з. трансформатор работал вхолостую):

$$0 = \frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\omega 0 + \alpha_0 - \varphi) + C \cdot e^{-\frac{R_k 0}{L_k}} \Rightarrow C = -\frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\alpha_0 - \varphi)$$

Общее решение примет вид

$$i_{кз} = \frac{U_{1m}}{z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) - \sin(\alpha_0 - \varphi) \cdot e^{-\frac{R_k t}{L_k}} \right]$$

Вид графика тока к.з., построенного по выражению (5.6), зависит от начальной фазы α_0 напряжения сети u_1 в момент короткого замыкания (рис.5.7).

При $\alpha_0 - \varphi = 0$ ток к.з. $i_{кз}$ не будет содержать свободной составляющей, так как $\sin(\alpha_0 - \varphi) = 0$. Ток к.з. станет сразу установившимся с амплитудой U_{1m}/z_k и действующим значением U_1/z_k (рис.1.20,а) Произведем оценку этого тока:

$$\begin{aligned} I_{кз,уст} &= \frac{U_1}{z_k} = \frac{U_1 I_{1,НОМ}}{z_k I_{1,НОМ}} = \frac{U_1 I_{1,НОМ}}{U_{кз}} = \frac{U_1}{U_{кз}} I_{1,НОМ} = \\ &= \frac{U_1}{(0,045 \dots 0,07) U_1} I_{1,НОМ} = (14 \dots 22) I_{1,НОМ} \end{aligned}$$

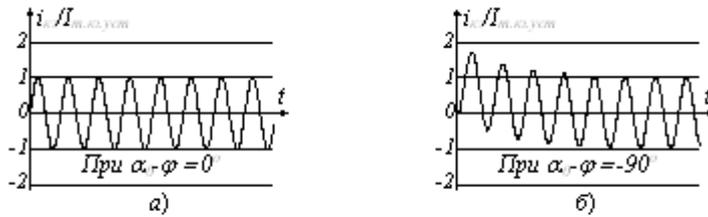


Рисунок 4.3- Ток короткого замыкания только с принужденной составляющей (а) и с максимальным действием свободной составляющей (б)

Установившийся ток к.з. трансформатора в 14...22 раза больше номинального и он опасен для трансформатора, так как:

- приводит к быстрому разогреву обмоток и обугливанию изоляции провода обмоток;
- сопровождается большими динамическими усилиями притяжения соседних витков обмоток (усилия увеличиваются в $14^2 \dots 22^2 \approx 200 \dots 500$ раз) и приводит к механическому разрушению (растрескиванию) изоляции.

Трансформатор должен быть немедленно отключен от сети.

При $\alpha_0 - \varphi = -90^\circ$ ток к.з. $i_{кз}$ будет содержать свободную составляющую с максимальной ее интенсивностью, так как $\sin(\alpha_0 - \varphi) = -1$. Синусоидальная (принужденная) составляющая тока к.з. будет максимально смещена вверх (рис.5.7,б). Максимальное значение тока к.з., образуемое в этом случае, называется ударным током $I_{y\partial}$. Ток к.з. достигает наибольшего (ударного) значения примерно в тот момент времени $t_{y\partial}$, когда будет максимум принужденной составляющей при $\sin(\omega t_{y\partial} + \alpha_0 - \varphi) = 1$:

$$I_{y\partial} = \sqrt{2} I_{кз.уст} \left(1 + e^{-\frac{R_k t_{y\partial}}{L_k}} \right)$$

Значение выражения, заключенного в скобки в , для существующих трансформаторов составляет $\approx 1,7 \dots 1,8$. С учетом оценки значение ударного тока составляет

$$I_{y\partial} = \sqrt{2} I_{1.ном} (14 \dots 22) \cdot (1,7 \dots 1,8) = (34 \dots 59) I_{1.ном}$$

Протекание столь большого тока по обмоткам трансформатора сопровождается большими динамическими усилиями притяжения соседних витков обмоток, а в защитной аппаратуре, отключающей трансформатор от сети, интенсивно обгорают контакты. Поэтому, выбор отключающих автоматов защиты должен вестись с учетом ударного тока I_{y0} .

Указание по технике безопасности:

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Т	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	2	-400 В / 16 А
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	47.1	3x80 В- А;230В/242,235, 230, 226 220 133 127 В
A3	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	01.1	3 трансформатора напряжения 600 В / 3 В; 3 трансформатора тока
A4	Коннектор	30	3 8 аналог, диф. вхо- дов;2 аналог, выхо- дов;8 цифр выходов/ IBM совместимый,
A5	Персональный компьютер	50	5 Win-dows 9*,монитор, мышь, клавиатура, плата
A6	Трехполюсный выключатель	3	~400 В / 10 А
A13	Реостат	3	2x0...100 Ом/1 А

Описание электрической схемы соединений

Источник G1- источник синусоидального напряжения промышленной частоты (4.4). Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы A2 является испытуемым. Измерительный трансформатор тока (трансдуктор) в блоке A3 обеспечивает гальваническую развязку силовой и измерительной

цепей и преобразует ток первичной обмотки испытуемого трансформатора в пропорциональное ему нормированное напряжение. Через аналоговый вход АСН0-АСН8 коннектора А4 измеряемое напряжение вводится в компьютер А5. Выключатель А6 выполняет роль короткозамыкателя. Реостат А13 ограничивает ток короткого замыкания.

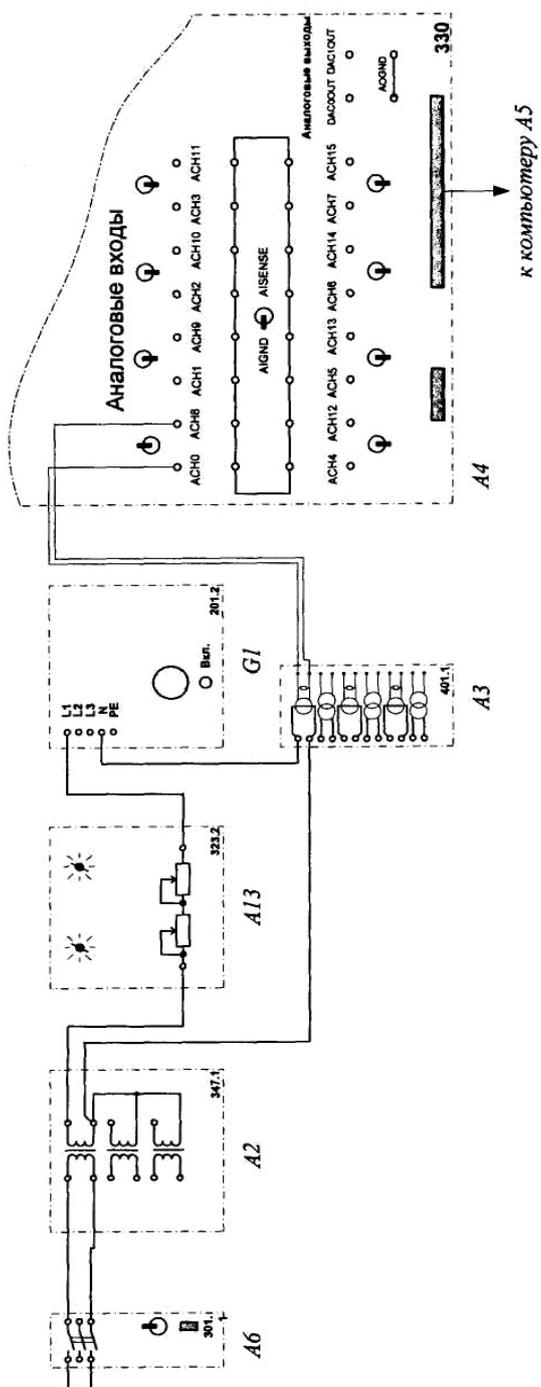


Рисунок 4.4.- Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- В трехфазной трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.
- Установите суммарное сопротивление реостата А13 равным, например, 150 Ом.
- Переключатель режима работы трехфазного выключателя А6 переведите в положение «РУЧН.».
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите прикладную программу «Многоканальный осциллограф». Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателя А6.
- Включите источник G1.
- Нажмите кнопку «ВКЛ» включения сканирования первого канала виртуального осциллографа.
- Нажмите кнопку «ВКЛ» и спустя 1 с (**не более**) - кнопку «ВЫКЛ» выключателя А6 и еще через 1 с после этого остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф».
- Нажмите на кнопку-гриб источника G1 и отключите выключатель «СЕТЬ» выключателя А6.
- Используя возможности программы «Многоканальный осциллограф», проанализируйте полученную временную зависимость тока короткого замыкания.

Контрольные вопросы

1. Как выглядит схема замещения трансформатора в режиме к.з.?
2. Как рассчитывают принужденную $i_{пр}$ и свободную $i_{св}$ составляющие тока к.з.?
3. Каковы оценки значения установившегося тока к.з. и чем он опасен для трансформатора?
4. Каковы оценки значения ударного тока к.з. и чем он опасен для трансформатора и защитной аппаратуры?

Лабораторная работа №5

Тема: _Определение группы соединений обмоток трехфазного трансформатора

Цель работы: изучить работу трансформаторов с различными группами соединения

Формируемые компетенции:

ОПК-3. Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин.

ИД-5_{ОПК-3} Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик.

Теоретическая часть:

В сетях электроснабжения на подстанциях устанавливается не менее двух трехфазных трансформаторов, что дает следующие преимущества (в сравнении с использованием для электропитания только одного трансформатора):

1). Повышается надежность электроснабжения за счет резервирования при использовании более одного трансформатора.

2). Обеспечивается экономичная работа трансформаторной подстанции, в которой загрузка параллельно работающих трансформаторов может поддерживаться на уровне максимально приближенной к загрузке $0,7...0,8$, на которой к.п.д. трансформатора максимально. Так, если нагрузка двух параллельно работающих трансформаторов составляет $0,35...0,4$, то при выводе из работы одного трансформатора, оставшийся в работе трансформатор загрузится до $0,7...0,8$.

3). Исключается перегрузка трансформаторов. Так, если работающие трансформаторы нагружены токами, превышающими номинальные, то можно ввести дополнительно в работу еще один трансформатор, который возьмет на себя часть тока нагрузки, разгрузив от токов другие трансформаторы.

Для реализации параллельной работы трехфазных трансформаторов

должны быть выполнены следующие условия (рис.5.1):

1). Должны быть одинаковыми высокое (ВН) и низкое напряжение (НН) трансформаторов и, следовательно, коэффициенты трансформации. При невыполнении этого условия к замкнутой цепи, состоящей из параллельно включенных, например, двух трансформаторов, с разными напряжениями U_{21} и U_{22}

вторичных обмоток, прикладывается разностное напряжение $\Delta U_2 = U_{21} - U_{22}$ (рис.6.1,а). Напряжением ΔU_2 в замкнутой цепи создается уравнительный ток $I_{ур}$, который разогревает обмотки обоих трансформаторов даже на холостом ходу их. Так, если ΔU_2 составляет всего лишь $(0,04...0,07)U_{2ном}$, то уравнительный ток равен номинальному току. В этом случае к трансформатору нельзя подключать никакой нагрузки.

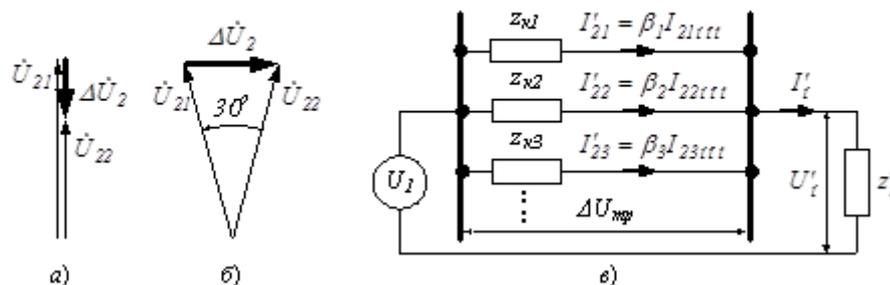


Рисунок 5.1-Векторные диаграммы вторичных напряжений параллельно работающих трансформаторов при неравенстве вторичных напряжений (а), несовпадении групп соединения(б) и схема к расчету при неравенстве напряжений короткого замыкания (б)

2). Должны быть одинаковые группы соединения обмоток трансформаторов: либо все трансформаторы должны иметь группу 0, либо 11. У трансформаторов с группами 0 и 11 сдвиг между линейными напряжениями вторичных обмоток составляет 30° . При невыполнении этого условия к замкнутой цепи, состоящей из параллельно включенных, например, двух трансформаторов, с равными напряжениями U_{21} и U_{22} вторичных обмоток, прикладывается разностное напряжение $\Delta U_2 = U_{21} - U_{22}$, которое составляет $0,52 \cdot U_{2ном}$, где $0,52 = 2 \cdot \sin 15^\circ$ (рис.5.1,б). При таком ΔU_2 по обмоткам обоих трансформаторов протекает уравнительный ток $I_{ур}$ близкий к току короткого замыкания.

3). При подключении к общим шинам подстанции чередование фаз

трансформаторов должно быть одинаковым, например, к шине A , подключать все выводы обмоток, отмеченные буквой A . Также должно быть одинаковое чередование фаз и во вторичной цепи параллельно включенных трансформаторов. При невыполнении этого условия создается режим короткого замыкания трансформаторов. Трансформаторы будут отключены защитой.

4). Напряжения короткого замыкания $U_{кз}$ должно быть одинаковым у всех трансформаторов. При невыполнении этого условия коэффициенты загрузки β параллельно работающих трансформаторов будут разными и, следовательно, часть трансформаторов будут недогружены, а другие – будут перегружены. Для пояснения этого явления приведем расчеты по схеме, приведенной на рис.5.1,в.

Трансформаторы, которые считаем загруженными, изображены простейшей схемой замещения в виде сопротивления $z_{\varrho} = R_{\varrho} + jx_{\varrho}$ короткого замыкания. Из схемы (рис.5.1,в) следует:

- падение напряжения ΔU_{mp} для всех трансформаторов одинаковое;
- для каждого трансформатора напряжение ΔU_{mp} вычисляется по формуле

$$\begin{aligned}\Delta U_{mp} &= z_{к1} I'_{21} = z_{к1} \beta_1 I'_{21ном} = z_{к1} I'_{21ном} \beta_1 = U_{кз1} \beta_1, \\ \Delta U_{mp} &= z_{к2} I'_{22} = z_{к2} \beta_2 I'_{22ном} = z_{к2} I'_{22ном} \beta_2 = U_{кз2} \beta_2, \\ \Delta U_{mp} &= z_{к3} I'_{23} = z_{к3} \beta_3 I'_{23ном} = z_{к3} I'_{23ном} \beta_3 = U_{кз3} \beta_3,\end{aligned}$$

где β – коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению тока I'_2 трансформатора к его номинальному значению $I'_{2н}$;

$z_{\varrho} I'_{2н}$ равно напряжению короткого замыкания $U_{кз}$ трансформатора (рис.1.5,в).

Если напряжения короткого замыкания $U_{кз1}$, $U_{кз2}$ и $U_{кз3}$ всех параллельно работающих трансформаторов одинаковые, то при одном и том же значении ΔU_{mp} из (6.2) следует совпадение коэффициентов загрузки трансформаторов:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$$

Вводная часть.

Явления, которые будут рассмотрены ниже основаны на учете нелинейности кривой намагничивания стали магнитопровода трехфазного трансформатора. Эти рассмотрения предваряем следующими положениями:

- ввиду малости отличия напряжения на обмотке трансформатора U и индуцируемой в ней переменным магнитным потоком э.д.с. E , принимаем $U \approx E$;

- мгновенное значение э.д.с. e , индуцируемой переменным магнитным потоком Φ и поток связаны зависимостью

$$e(t) = -w \frac{d\Phi(t)}{dt}.$$

- если магнитный поток $\Phi(t)$ изменяется по гармоническому закону (синусоидален), то в соответствии с (6.3) также синусоидальна э.д.с. $e(t)$ и при несинусоидальном потоке $\Phi(t)$ также несинусоидальная э.д.с. $e(t)$;

- несинусоидальный поток $\Phi(t)$ или ток $i(t)$ в обмотке трансформатора представляем в виде суммы гармонических составляющих, в которых содержится основная гармоника с частотой питающего трансформатор напряжения (50 Гц) и ближайшая гармоника с утроенной частотой 150 Гц .

Пусть ток $i(t)$ в обмотке трансформатора синусоидален (рис.5.2,а). Используя кривую намагничивания магнитопровода трансформатора, строим график изменения во времени магнитного потока $\Phi(t)$:

- задаемся одинаковым временем по осям t для графиков $i(t)$ и $\Phi(t)$, отложив точки 1 и 2 на одинаковых расстояниях от относительно точек $0_{i(t)}$ и $0_{\Phi(t)}$ начала отсчета по времени для графиков $i(t)$ и $\Phi(t)$;

- по точке 1 находим значение тока $i(t)$ в точке 3, затем находим точку 4 на графике $\Phi(i)$;

- на пересечении линий 2-5 и 4-5 находим точку графика $\Phi(t)$.

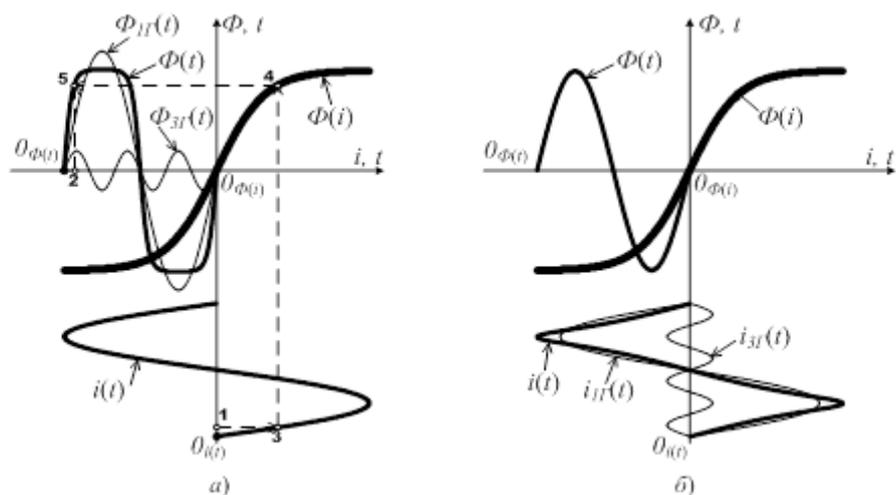


Рисунок 5.2- Графики сигналов магнитного потока $\Phi(t)$ и порождающего его тока $i(t)$ при синусоидальном токе (а) и магнитном потоке (б)

По построениям получен несинусоидальный график $\Phi(t)$. В соответствии с (6.3) индукционная э.д.с. $e(t)$ будет несинусоидальной и, следовательно, будет несинусоидальным напряжением $u(t)$ на обмотке трансформатора. Несинусоидальный поток $\Phi(t)$ может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих $\Phi_{1Г}(t)$ и $\Phi_{3Г}(t)$. Точно также напряжение $u(t)$ может быть представлено в виде суммы гармонических составляющих $u_{1Г}(t)$ и $u_{3Г}(t)$.

Пусть магнитный поток $\Phi(t)$ в магнитопроводе трансформатора синусоидален (рис.5.2,б). В соответствии с индукционной э.д.с. $e(t)$ будет синусоидальной и, следовательно, будет синусоидальным напряжением $u(t)$ на обмотке трансформатора. Используя кривую намагничивания магнитопровода трансформатора, строим график изменения во времени тока $i(t)$ в обмотке трансформатора.

По построениям получен несинусоидальный график $i(t)$. Несинусоидальный ток $i(t)$ может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих $i_{1Г}(t)$ и $i_{3Г}(t)$.

Считаем линейные и фазные напряжения первичных обмоток синусоидальными. Определим форму вторичного напряжения трансформатора при заданной схеме соединения его обмоток.

1. Схема соединения обмоток

Так как по линейным и нулевому проводу к первичной обмотке трансформатора подведено синусоидальное напряжение, то и в соответствии с (6.3) будет синусоидальным магнитный поток $\Phi(t)$. Этим потоком во вторичной обмотке будет наведена синусоидальная э.д.с. и, следовательно, фазные и линейные напряжения на вторичной обмотке будут синусоидальными. В соответствии с рис 5.3,б токи первичных обмоток $i(t)$ будут несинусоидальными и в них будут присутствовать гармонические токи $i_{1r}(t)$ и $i_{3r}(t)$. Сумма первых гармоник $i_{1r}(t)$, сдвинутых относительно друг друга на 120° электрических градусов, будет равна нулю. Третьи гармоники $i_{3r}(t)$ будут синфазными и их сумма не будет нулевой. Суммарный ток третьих гармоник потечет по нулевому проводу. Следовательно, режим синусоидальных магнитных потоков $\Phi(t)$ осуществим, а на вторичной обмотке напряжения будут идеальными по форме – синусоидальными. Однако такое включение на практике не применяется, так как первичное напряжение, приходящее с линий электропередачи, всегда подводится с помощью трех линейных проводов, а нулевого провода в сети просто нет.

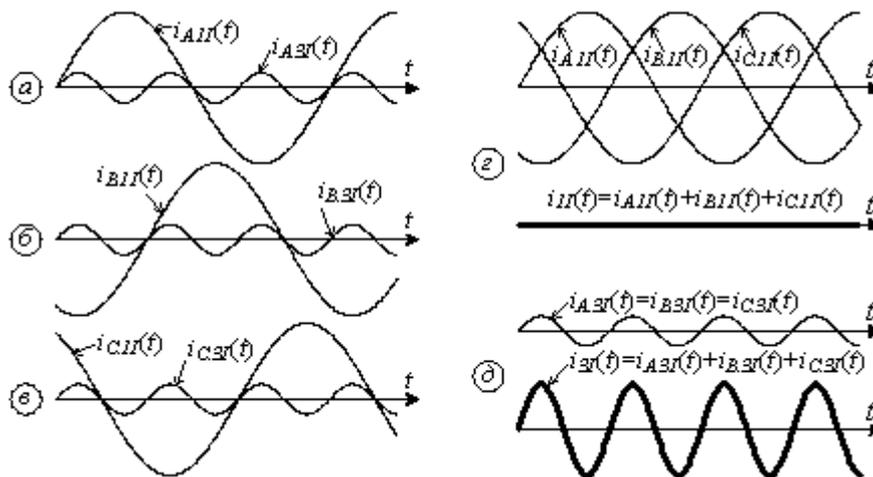


Рисунок 5.3- Гармонически составляющие токов фазы А(а), фазы В(б), фазы С(в) и суммы первых (г) и третьих (д) гармонических составляющих

2. Схема соединения обмоток Y/Y (группа 0).

Так как линейного провода нет, то к трансформатору подводятся только линейные синусоидальные напряжения. Докажем, что токи первичных обмоток

будут синусоидальными. Предположим обратное – токи первичных обмоток несинусоидальные. Тогда в таких токах помимо основной гармоники должна существовать третья гармоника (рис.5.3,б). Третьи гармоники будут синфазными и сумма их не будет нулевой. Однако для суммарного тока третьих гармоник нет провода, по которому он потёк бы. Следовательно, третьих гармоник в первичных токах не может быть и первичные токи только синусоидальные. При синусоидальных первичных токах магнитные потоки обмоток будут несинусоидальными (рис.5.3,а). В соответствии с во вторичных обмотках будут наведены несинусоидальные э.д.с., а вторичные напряжения будут несинусоидальными. Недостатком трансформатора с соединением обмоток Y/Y (группа 0) в том, что со вторичной обмотки к потребителям подается несинусоидальное (искаженное по форме) трехфазное напряжение.

2. Схема соединения обмоток Y/Δ (группа 11).

Так же как и предыдущем случае с группой 0 во вторичных обмотках индуцируются несинусоидальные фазные э.д.с. Сумма первых гармоник указанных э.д.с., сдвинутых относительно друг друга на 120° электрических градусов, будет равна нулю. Третьи гармоники э.д.с. будут синфазными и их сумма не будет нулевой. Суммарная э.д.с. третьей гармоники создаст в замкнутой цепи вторичных обмоток контурный ток, который создаст в сердечниках трансформатора магнитные потоки утроенной частоты. Эти потоки, в соответствии с правилом Ленца будут находиться в противофазе к магнитным потокам третьей гармоники, сформировавшиеся в первичной обмотке. Так эти потоки третьих гармоник практически равны друг другу, то они практически взаимно компенсируются. В итоге, в сердечнике трансформатора останется только поток первой гармоник и, следовательно, вторичные напряжения будут синусоидальными.

Из рассмотренных вариантов схем включения и питания обмоток трансформатора предпочтительной является схема Y/Δ с группой 11. Именно такие трансформаторы целесообразно ставить на вводе подстанции.

Указание по технике безопасности:

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование		Параметры
G1	Трехфазный источник		~ 400 В / 16 А
A2	Трёхфазная трансфор-		3x80 В·А; 230 В/242,235,
A3	Блок измерительных трансформаторов тока и	01.1	3 трансформатора напряжения 600В/3В; 3 транс-
A4	Коннектор	30	8 аналог. диф. входов; 2 аналог, выходов; 8 цифр,
A5	Персональный компьютер	50	ВМ совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, кла-

Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. Трёхфазная трансформаторная группа A2 является испытуемой. Измерительные трансформаторы напряжения в блоке A3 обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют первичное и вторичное линейные напряжения испытуемого трансформатора в пропорциональные им нормированные напряжения. Через аналоговые входы АСН0-АСН8 и АСН1-АСН9 коннектора A4 измеряемые напряжения вводятся в компьютер A5.

Электрическая схема соединений представлена на рис. 5.4.

Схема соединений

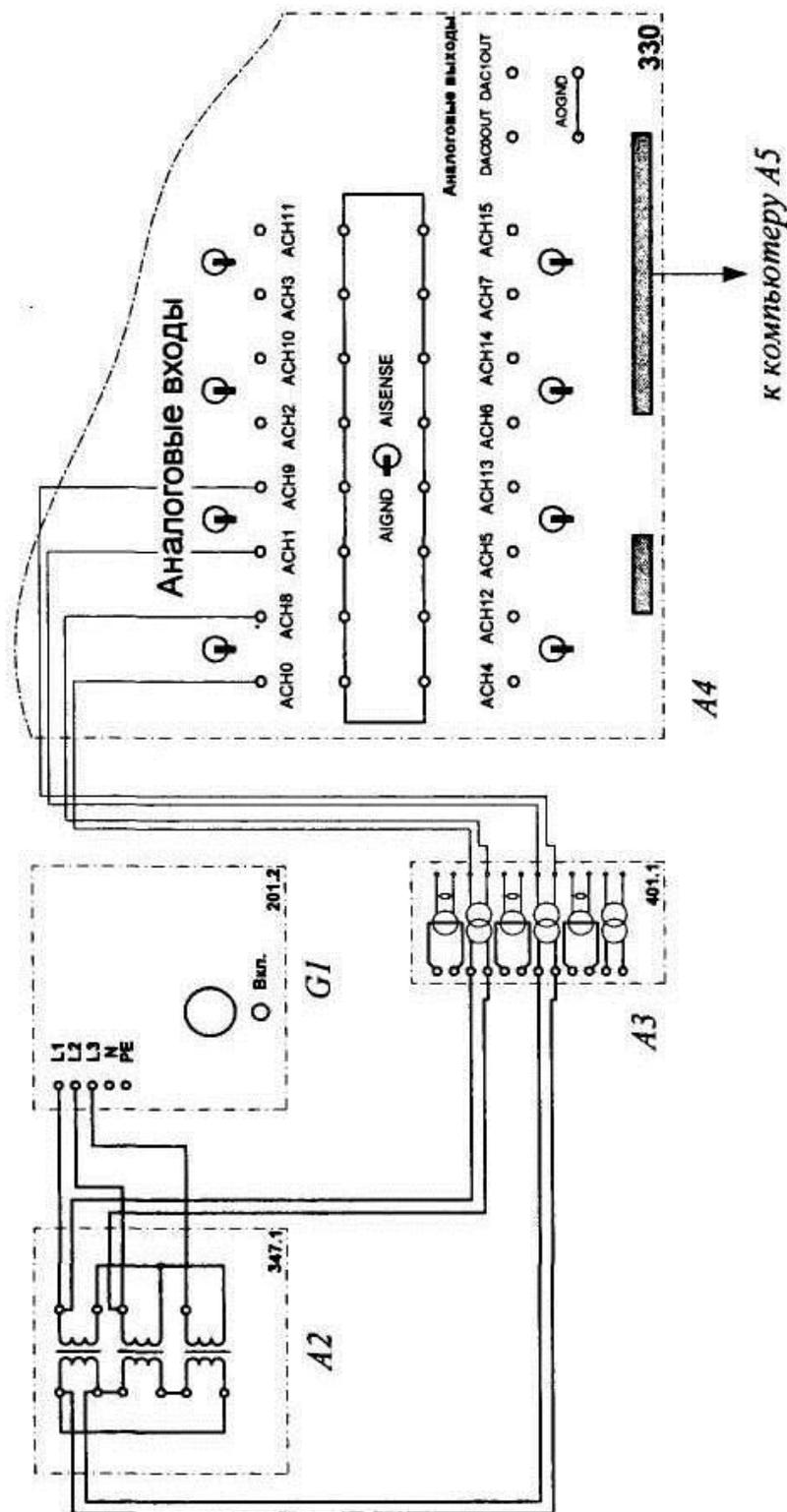


Рисунок 5.4- Схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземле  устройств, использу-

емых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- В трехфазной трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 220В.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите прикладную программу "Многоканальный осциллограф".
- Включите источник G1.
- Нажмите кнопки «ВКЛ» включения сканирования первого и второго каналов виртуального осциллографа.
- Используя возможности программы "Многоканальный осциллограф", определяйте взаимный фазовый сдвиг между кривыми регистрируемых напряжений и по нему определяйте группу соединений обмоток трехфазного трансформатора.
- По завершении эксперимента отключите источник G1.

Контрольные вопросы

1. Почему при синусоидальном токе в обмотке трансформатора магнитный поток, э.д.с. и напряжение обмотки несинусоидальное?
2. Почему при синусоидальном магнитном потоке в магнитопроводе трансформатора э.д.с., напряжение обмотки будут синусоидальными, а ток - несинусоидальным?
3. Обоснуйте синусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y .
4. Обоснуйте несинусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y .
5. Обоснуйте синусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ .

Лабораторная работа №6

Тема: Определение уравнивающего тока, вызванного неравенством коэффициентов трансформации

Цель работы: изучить условия появления уравнивающего тока

Теоретическая часть:

Основные теоретические сведения.

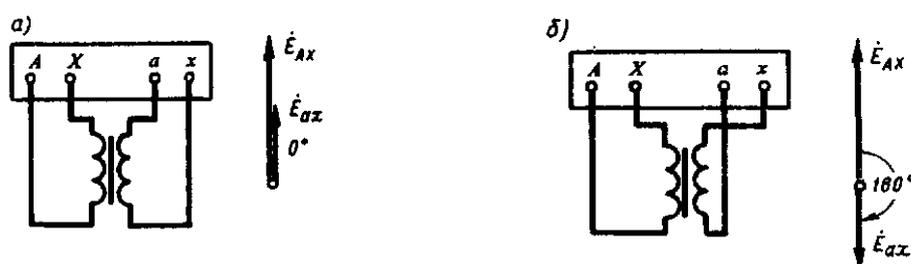


Рис. 6.1. Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов:

a — группа I/I — 0; *б* — группа I/I — 6.

До сих пор при построении векторных диаграмм трансформатора считалось, что ЭДС фазы обмотки ВН \dot{E}_{Ax} и обмотки НН \dot{E}_{ax} совпадают по фазе. Но это справедливо лишь при условии намотки первичной и вторичной обмоток трансформатора в одном направлении и одноименной маркировке выводов этих обмоток, как показано на рис.7.1, *a*. Если же в трансформаторе изменить направление обмотки НН или же переставить обозначения ее выводов, то ЭДС \dot{E}_{ax} окажется сдвинутой по фазе относительно ЭДС \dot{E}_{Ax} на 180° (рис. 7.1, *б*). Сдвиг фаз между ЭДС \dot{E}_{Ax} и \dot{E}_{ax} принято выражать группой соединения. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360° , а кратность сдвига составляет 30° , то для обозначения группы соединения принят ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,8,9, 10, 11 и 0.

Угол смещения вектора линейной ЭДС обмотки НН по отношению к вектору линейной ЭДС обмотки ВН определяют умножением числа, обознача-

ющего группу соединения, на 30° . Угол смещения отсчитывают от вектора ЭДС обмотки ВН по часовой стрелке до вектора ЭДС обмотки НН. Например, группа соединения 5 указывает, что вектор ЭДС НН отстает по фазе от вектора ЭДС ВН на угол $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$.

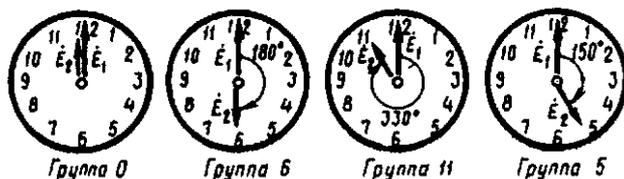


Рис. 6.2. Сравнение положения стрелок часов с обозначением групп соединения.

Для лучшего понимания принятого обозначения групп соединения пользуются сравнением с часами. При этом вектор ЭДС обмотки ВН соответствует минутной стрелке, установленной на цифре 12, а вектор ЭДС обмотки НН — часовой стрелке (рис.6.2). Так же необходимо иметь в виду, что совпадение по фазе векторов ЭДС \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} , эквивалентное совпадению стрелок часов на циферблате, обозначается группой 0 (а не 12). Кроме того, следует помнить, что за положительное направление вращения векторов ЭДС принято их вращение против часовой стрелки.

Таким образом, в однофазном трансформаторе возможны лишь две группы соединения: группа 0, соответствующая совпадению по фазе \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} , и группа 6, соответствующая сдвигу фаз между \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} на 180° . Из этих групп ГОСТ предусматривает лишь группу 0, она обозначается $Y/Y-0$.

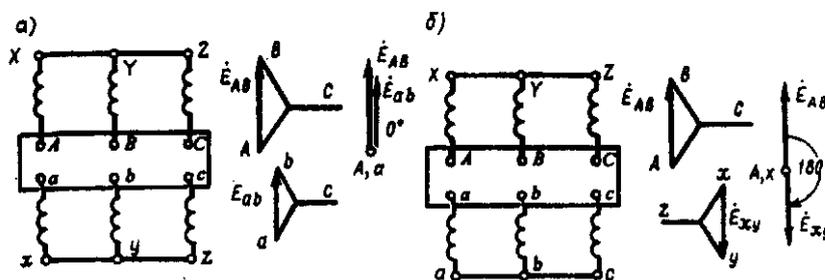


Рис. 6.3. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: а — для группы $\Delta/\Delta-0$; б — для группы $Y/Y-6$

Применением разных способов соединения обмоток в трехфазных трансформаторах можно создать 12 различных групп соединения. Рассмотрим в качестве примера схему соединений «звезда—звезда» (рис. 6.3, а). Векторные

диаграммы ЭДС показывают, что сдвиг между линейными ЭДС \dot{E}_{AB} и \dot{E}_{ab} в данном случае равен нулю. В этом можно убедиться, совместив точки A и a при наложении векторных диаграмм ЭДС обмоток ВН и НН. Следовательно, при указанных схемах соединения обмоток имеет место группа 0; обозначается $Y/Y-0$. Если же на стороне НН в нулевую точку соединить зажимы a , b и c , а снимать ЭДС с зажимов x , y и z , то ЭДС \dot{E}_{ab} изменит фазу на 180° и трансформатор будет принадлежать группе 6 ($Y/Y-6$) (рис.6.3,б).

При соединении обмоток «звезда—треугольник», п, имеет место группа 11 ($Y/\Delta-11$). Если же поменять местами начала и концы фазных обмоток НН, то вектор \dot{E}_{ab} повернется на 180° и трансформатор будет относиться к группе 5 ($Y/\Delta-5$) (рис. 6.4, б).

При одинаковых схемах соединения обмоток ВН и НН, например Y/Y и Δ/Δ , получают четные группы соединения, а при 62 неодинаковых схемах, например Y/Δ или Δ/Y , — нечетные.

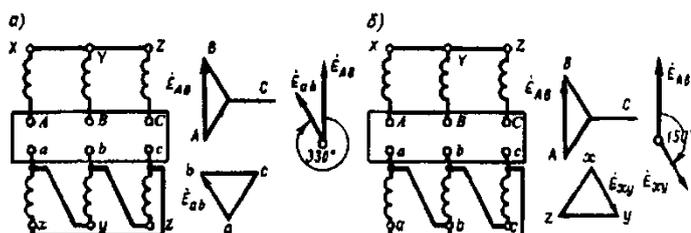


Рис. 6.4. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: a — для группы $Y/\Delta-11$; b — для группы $Y/\Delta-5$.

Рассмотренные четыре группы соединения (0, 6, 11 и 5) называют *основными*. Из каждой основной группы соединения методом круговой перемаркировки выводов на одной стороне трансформатора, например на стороне НН (без изменения схемы соединения), можно получить по две производные группы. Например, если в трансформаторе с группой соединения $Y/Y-0$ выводы обмотки НН перемаркировать и вместо последовательности abc принять последовательность cab , то вектор ЭДС \dot{E}_{ab} повернется на 120° , при этом получим группу соединения $Y/Y-4$. Если же выводы обмоток НН перемаркировать в последовательность bca , то вектор E_{ab} повернется еще на 120° , а всего на 240° ; получим группу $Y/Y-8$.

Аналогично от основной группы 6 путем круговой перемаркировки получают производные группы 10 и 2, от основной группы II — производные группы 3 и 7, от основной группы 5 — производные группы 9 и 1.

Основные группы соединения имеют некоторое преимущество перед производными, так как предусматривают одноименную маркировку выводов обмоток, расположенных на одном стержне. Это уменьшает вероятность ошибочных присоединений. Однако не все группы соединения имеют практическое применение в трехфазных трансформаторах. ГОСТ определяет схемы и группы соединения, применяемые для силовых двухобмоточных трансформаторов общепромышленного назначения (рис. 6.5).

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				$\frac{Y}{Y} - 0$
				$\frac{Y}{\Delta} - 11$
				$\frac{Y}{\Delta} - 11$
				$\frac{Y}{\Delta} - 11$
				$\frac{\Delta}{Y} - 11$

Рисунок 6.5. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов.

Соединяя обмотки НН в зигзаг в сочетании с соединением обмотки ВН в звезду или треугольник, можно получить практически любой угол сдвига фаз

между ЭДС обмоток ВН и НН. Этого достигают разделением обмотки НН на две части с различным соотношением витков в этих частях.

При изготовлении или в процессе эксплуатации трансформаторов иногда возникает необходимость в опытной проверке группы соединения. Существует несколько методов такой проверки, но наиболее распространены методы фазометра и вольтметра.

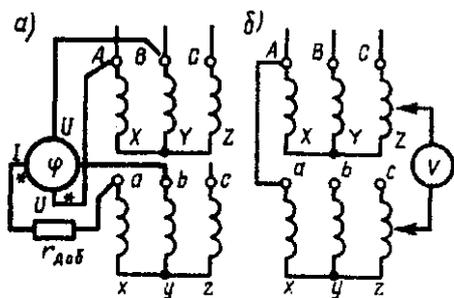


Рис. 6.6. Проверка группы соединения Y/Y—0 методами фазометра (а) и вольтметра (б).

Метод фазометра. Основан на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями (ЭДС) обмоток ВН и НН с помощью фазометра φ , включенного по схеме, показанной на рис. 6.6, а. Параллельную обмотку фазометра $U—U$ подключают к стороне ВН, а последовательную обмотку $I—I$ — к стороне НН. Для ограничения тока в последовательной обмотке ее подключают через добавочное сопротивление $\Gamma_{доб}$. Затем трансформатор включают в сеть с симметричным трехфазным напряжением. Для удобства измерений желательно, чтобы фазометр имел полную (360°) шкалу.

Метод вольтметра. Непосредственного измерения угла фазового сдвига между линейными напряжениями (ЭДС) этот метод не дает. Это *косвенный* метод и основан на измерении вольтметром напряжений (ЭДС) между одноименными выводами обмоток ВН и НН. Если проверяют группу соединения Y/Y—0 (рис. 6.6, б), то, соединив проводом выводы A и a , измеряют напряжение U_{b-v} (между выводами b и B) и U_{c-c} (между выводами c и C). Если предполагаемая группа соединения Y/Y—0 соответствует фактической, то напряжение (В)

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}(k_n - 1), \quad (2.1)$$

где $k_L = U_{AB}/U_{ab}$ — отношение линейных напряжений (ЭДС) ВН и НН, т. е. коэффициент трансформации линейных напряжений (ЭДС),

Если проверяют группы соединения 6, 11 или 5, то для проверки измеренных значений напряжений пользуются формулами:

группа Y/Y—6

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{xy} (k_L + 1);$$

группа Y/Δ — 11

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab} (1 - \sqrt{3}k_L + k_L^2);$$

группа Y/Δ — 5

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab} (1 + \sqrt{3}k_L + k_L^2);$$

Здесь U_{ab} и U_{xy} — линейные напряжения на выводах обмоток НН, В.

Если условия равенства напряжений по приводимым формулам не соблюдаются, то это свидетельствует о нарушениях в маркировке выводов трансформатора.

Указание по технике безопасности:

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование		Параметры
G1	Трёхфазный источник пита-		~ 400 В / 16 А
A2, A7	Трёхфазная трансформаторная группа	47.1	3x80В·А; 230В/242,2 35, 230, 226,
A10	Активная нагрузка		220
PI	Блок мультиметров	08.2	3мультиметра ~ 0...10 00 В / ~ 0...10А/

Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной

частоты. По одному из однофазных трансформаторов трехфазных трансформаторных групп А2, А7 включаются на параллельную работу на активную нагрузку А10. С помощью мультиметров блока Р1 контролируется токи нагрузки параллельно включенных трансформаторов

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания. 
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключателями номинальных напряжений блоков А2 и А7 установите коэффициенты трансформации трансформаторов, например, равными соответственно 230/230В и 230/220 В.
- Установите переключателями активную нагрузку в фазах блока А10, например, равной 30 %.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров Р1.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Включите источник G1.
- С помощью амперметров Р1.1 и Р1.2 измерьте токи I_1 и I_2 нагрузки параллельно включенных однофазных трансформаторов.
- Отключите источник G1.
- Уравнительный ток, вызванный неравенством коэффициентов трансформации параллельно включенных однофазных трансформаторов, определяйте по формуле

$$I_y = |(I_{11} - I_{12}) / 2|.$$

Электрическая схема соединений представлена на рис. 7.1.

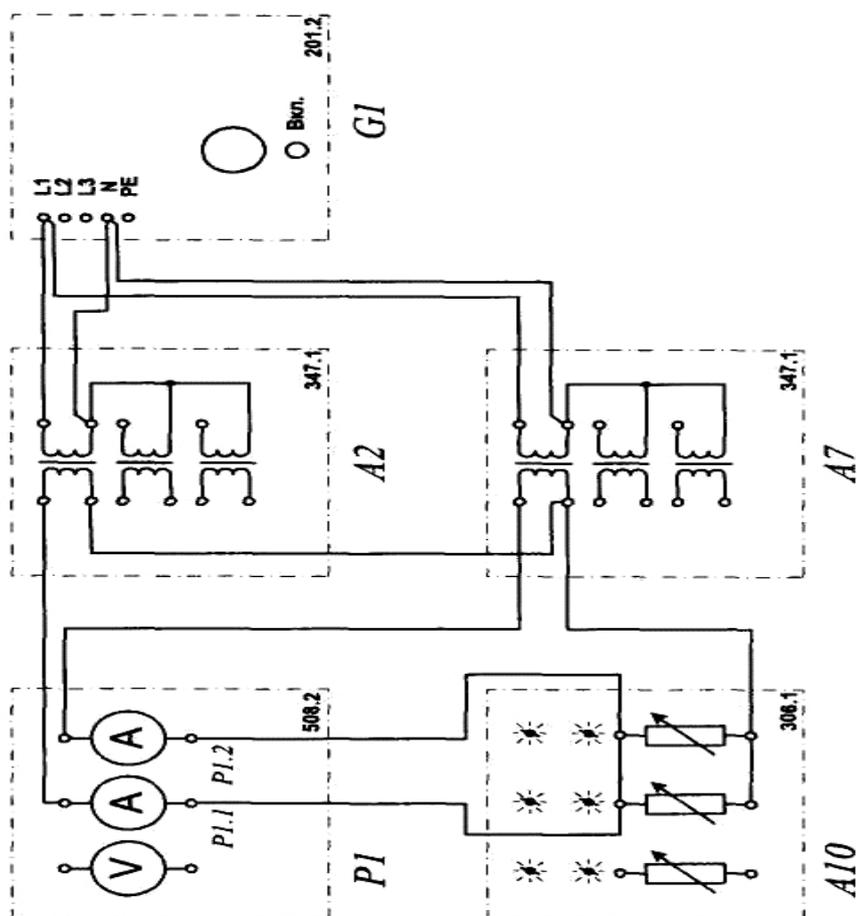


Рисунок 6.6- Схема соединения

Подтверждение недопустимости параллельной работы трехфазных трансформаторов с различными группами соединений обмоток

Перечень аппаратуры

Обо	Наименование		Параметры
G1	Трехфазный источник		~ 400 В / 16 А
A2, A7	Трёхфазная трансформаторная груп-	47.1	3x80В·А; 230В/242, 235, 230, 226,
P1	Блок мультиметров	08.2	3 мультиметра ~0...1000В/ ~ 0...10А /

Описание электрической схемы соединений

Источник G1 – источник синусоидального напряжения промышленной части. Обмотки трехфазных трансформаторных групп А2 и А7 (трехфазных трансформаторов) Соединены соответственно по схеме Y/Y и Y/Δ. С помощью мультиметров блока P1 контролируется напряжения между одноименными фазами трехфазных трансформаторов.

Опыт выполняется по схеме рис. 8.3.

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфаз  источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- В трехфазных трансформаторных группах А2 и А7 переключателями установите желаемые номинальные вторичные напряжения трансформаторов, например, 127 и 230 В.
- Включите источник G1.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- С помощью вольтметров P1.1 и P1.2 измерьте напряжения U_1 и U_2 .
- Отключите источник G1.
- Рассчитайте ожидаемую кратность уравнивающего тока I_y (по отношению к номинальному току трансформаторов I_H) при включении на параллельную работу испытуемых трехфазных трансформаторов с данными группами соединения обмоток по формуле

$$I_y / I_H = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot 100 / (2 \cdot 230 \cdot U_K),$$

где U_K - напряжение короткого замыкания трансформаторов, %.

- По ожидаемой величине кратности уравнивающего тока сделайте вывод о недопустимости параллельной работы трансформаторов с различными группами соединения обмоток.

Опыт выполняется по схеме рис. 6.7.

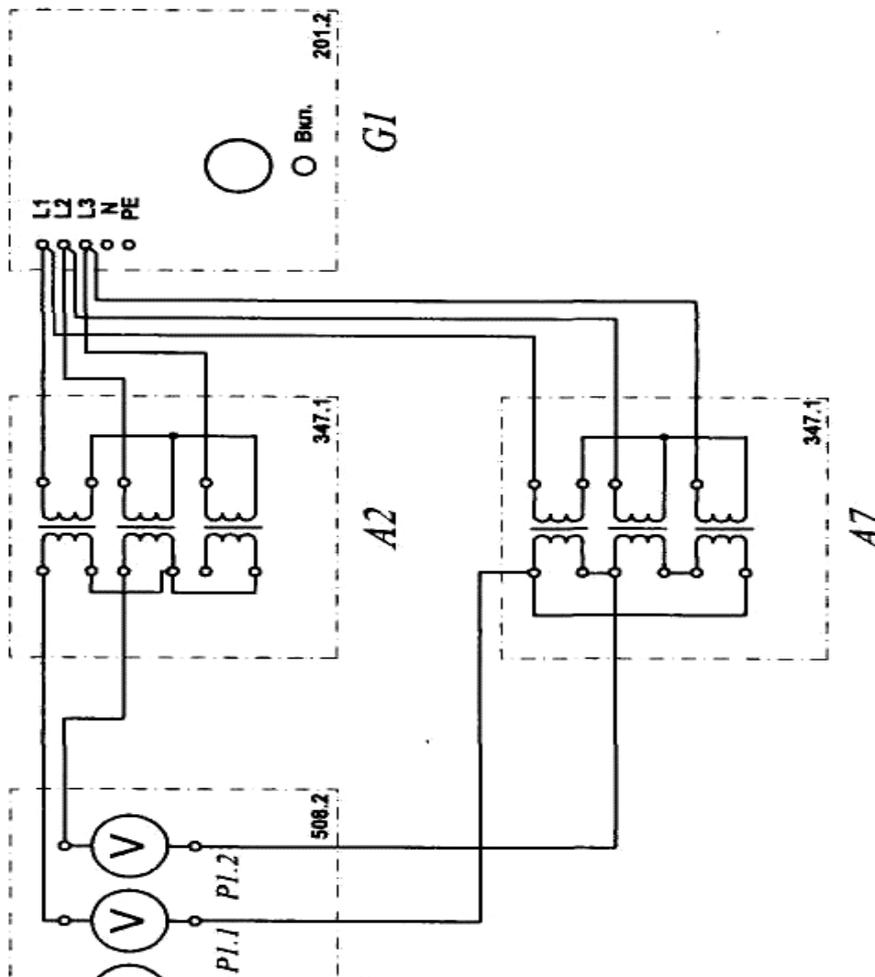


Рис. 6.7. Электрическая схема соединений

Контрольные вопросы

1. С какой целью применяют параллельную работу трансформаторов?
2. Каковы условия включения трансформаторов на параллельную работу?
3. Почему не допускается включение на параллельную работу трансформаторов с разными группами соединения, даже при одинаковых вторичных напряжениях?

4. Каковы допуски на различие коэффициентов трансформации и напряжений к.з. для трансформаторов, включаемых на параллельную работу?

5. Какие преимущества у схемы электропитания, состоящей из параллельно работающих трансформаторов?

6. Назовите условия параллельной работы трехфазных трансформаторов и приведите их обоснование.

Лабораторная работа 7

Тема: Возбуждение самовозбуждение генератора постоянного тока с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере . Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением .

Цель работы: Провести эксперимент возбуждения самовозбуждения генератора постоянного тока с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением .

Формируемые компетенции:

ОПК-3. Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин.

ИД-5_{ОПК-3} Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик.

Теоритическая часть

Генератор постоянного тока (ГПТ) состоит из тех же элементов, что и ДПТ (рис 7.1).

Назначением обмотки возбуждения является создание постоянного магнитного поля в зазоре между статором и якорем. Якорь ГПТ приводится во вращение сторонним двигателем, например, дизелем.

Принцип действия ГПТ состоит в следующем: в проводниках якоря, перемещающихся (вращающихся) в магнитном поле обмотки возбуждения $\Phi_{ОВ}$ наводится э.д.с. E . Направление э.д.с. E определяется правилом правой руки. Э.д.с. E снимается со щеток и выводится на клеммы генератора.

Если к клеммам ГПТ подключить нагрузку R_H , замкнув ключ SA , то в нагрузке потечет ток якоря $I_Я$, которым будет создано на сопротивлении нагрузки R_H напряжение $U_Я$. Направление тока $I_Я$ совпадает с направлением э.д.с. E .

Уравнение цепи якоря, оставленное по 2-му закону Кирхгофа, имеет

ВИД:

$$E = U_{\beta} + R_{\beta} I_{\beta} \Rightarrow U_{\beta} = E - R_{\beta} I_{\beta} \Rightarrow U_{\beta} = c_{\phi} \omega - R_{\beta} I_{\beta}$$

Уравнения ГПТ и ДПТ одинаковые по структуре и отличаются только знаком тока I_{β} .

Помимо основного эффекта – получения э.д.с. E , в ГПТ существует *побочный эффект* – возникновение тормозящего момента M_T , направлено навстречу моменту $M_{\text{диз}}$ дизеля. Тормозящий момент M_T возникает за счет взаимодействия проводников обмотки якоря, обтекаемых током I_{β} нагруженного генератора, и магнитного поля обмотки возбуждения $\Phi_{\text{ОВ}}$. Направление момента M_T определенное по правилу левой руки, будет противоположным направлению момента $M_{\text{диз}}$, и если $M_{\text{диз}}$ заставляет якорь вращаться с частотой ω , то момент M_T будет направлен навстречу вращению. Величина тормозного момента M_T прямо пропорциональна коэффициенту магнитного потока c_{ϕ} ГПТ и току якоря I_{β} :

$$M_T = c_{\phi} I_{\beta}$$

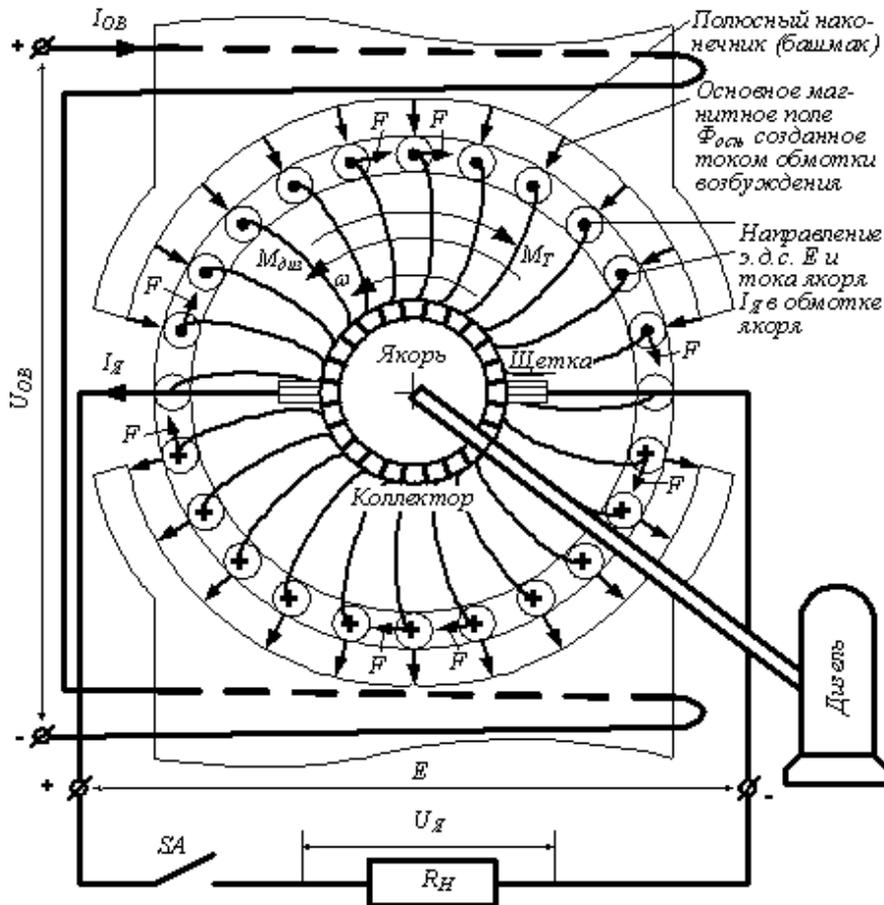


Рисунок 7.1- Устройство и принцип действия генератора постоянного тока

Дизель развивает момент $M_{\text{диз}}$ за счет сжигания в нем топлива, что является расходом тепловой энергии W_T . ГПТ вращается с постоянной частотой ω благодаря тому, что дизелем постоянно поддерживается равенство моментов: $M_{\text{диз}} = M_T$. Возникновение момента M_T связано с током I_{β} . Этим током в

сопротивлении R_H выделяется электрическая энергия $W_{\dot{\gamma}} = R_H I_{\beta}^2 t$. Энергия $W_{\dot{\gamma}}$ может взята только из тепловой W_T . Если якорь ГПТ приводится во вращение водяной турбиной падающим на нее потоком воды, то для вращения ГПТ расходуется механическая энергия. Значит, в ГПТ происходит преобразование в электрическую энергию энергии другого вида от устройства, способного вращать якорь ГПТ.

Указание по технике безопасности:

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	ип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	01.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	06.1	0...250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель синхронной машины	09.2	– 0...40 В / 3,5 А
G4	Машина постоянного тока	01.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых перемещений	04	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока		100 Вт / ~ 230 В /

		02.1	1500 мин ⁻¹
А4	Трёхфазная трансформаторная группа	47.1	3×80 В·А /230 В/242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В
А4	Коннектор	30	8 аналог. диф. входов;2 аналог. выходов;8 цифр. входов /выходов
А5	Персональный компьютер	50	IBM совместимый, Windows 9*, Монитор,мышь, клавиатура,плата сбора информации PCI-6023E,(PCI-6024E)
А6, А8	Трёхполюсный выключатель	01.1	~ 400 В / 10 А
А9	Реостат для цепи ротора машины переменного тока	07.1	3 × 0...40 Ом / 1 А
А11	Реостат возбуждения машины постоянного тока	08.1	0...2000 Ом 0,1...0,5 А
А12	Блок датчиков тока и напряжения	02.3	3 датчика напряжения ±100; 1000 В / ±5 В; 3 датчика тока ±1; 5 А / ±5 В
Р3	Указатель частоты вращения	06.2	- 2000...0...2000 мин ⁻¹

Описание электрических схем соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением. (рис 7.2(а);7.2(б);7,3)

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

Реостат A11 служит для изменения сопротивления в цепи возбуждения генератора G4.

Датчики тока и напряжения в блоке A12 обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют ток возбуждения и э.д.с. испытуемого генератора G4 в пропорциональные им нормированные напряжения.

Через аналоговые входы АСН0-АСН8 и АСН1-АСН9 коннектора A4 напряжения, пропорциональные току возбуждения и э.д.с. испытуемого генератора G4 вводятся в компьютер A5.

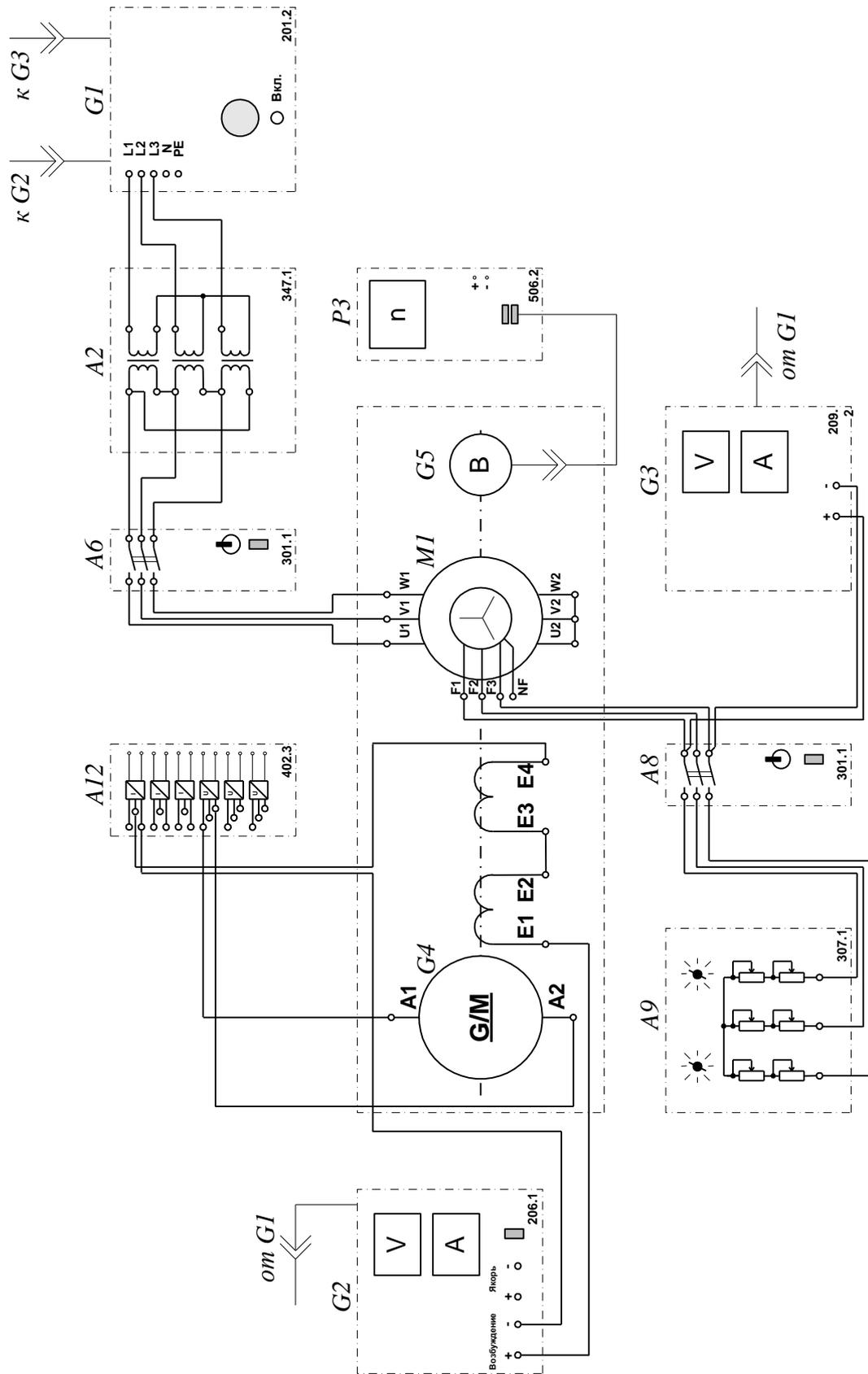


Рисунок 7.2(а) Электрическая схема соединений (вариант 1)

Электрическая схема соединений (продолжение)

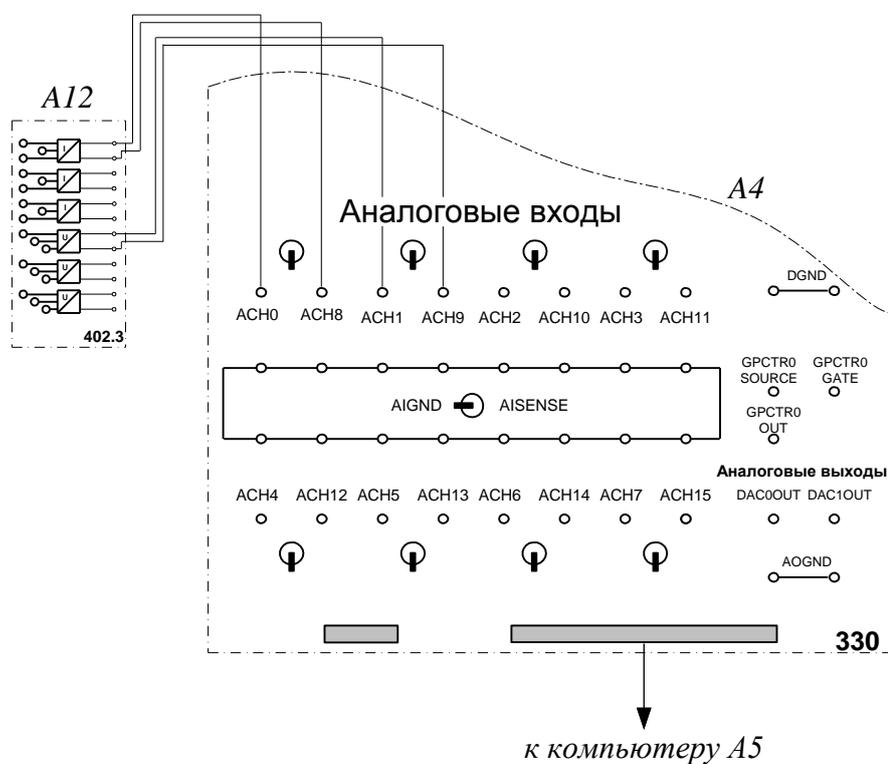


Рисунок 7.3- Электрическая схема соединений (продолжение)

Указания по проведению эксперимента

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).

Соедините гнезда защитного заземления " \oplus " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (вариант1 при возбуждении генератора G4 от независимого источника G2 / вариант 2 при самовозбуждении генератора G4).

Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.

В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.

Установите в каждой фазе реостата A3 суммарное сопротивление 8 Ом.

Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6, A8, указателя частоты вращения P3 и блока A12 датчиков тока и напряжения.

Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A5 и запустите прикладную программу «Многоканальный осциллограф». Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.

Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».

Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равное 20 В.

Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться и стрелка указателя P3 должна отклониться вправо.

Нажмите кнопку «ВКЛ» возбудителя G3. Двигатель M1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.

Отключите выключатель A8 кнопкой «ОТКЛ».

Нажмите кнопки «ВКЛ» включения сканирования первого и второго каналов виртуального осциллографа.

При возбуждении генератора G4 от независимого источника G2 (**вариант 1 электрической схемы соединений**) включите у него выключатель «СЕТЬ», нажмите кнопку «ВКЛ.» и через 3с остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».

При самовозбуждении генератора G4 (**вариант 2 электрической схемы соединений**) замкните проводником его цепь возбуждения и через 3с остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».

У источника G2 нажмите кнопку «ОТКЛ.» и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель А6 нажатием кнопки «ОТКЛ.». Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей А6 и А8, указателя частоты вращения Р3 и блока А12 датчиков тока и напряжения.

Используя возможности программы “Многоканальный осциллограф”, проанализируйте полученные временные зависимости тока возбуждения и э.д.с. генератора постоянного тока при его возбуждении / самовозбуждении.

Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	ип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	01.2	~ 400 В / 16 А
G3	Возбудитель синхронной машины	09.2	– 0...40 В / 3,5 А
G4	Машина постоянного тока	01.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждении)
G5	Преобразователь угловых перемеще-		6 вых. каналов / 2500

	ний	04	импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	02.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин ⁻¹
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	47.1	3×80 В·А / 230 В/242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A4	Коннектор	30	8 аналог. диф. входов;2 аналог. выходов;8 цифр. входов /выходов
A5	Персональный компьютер	50	IBM совмести- мый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI-6023E (PCI-6024E)
A6, A8	Трёхполюсный выключатель	01.1	~ 400 В / 10 А
A12	Блок датчиков тока и напряжения	02.3	3 датчика напряжения ±100; 1000 В / ±5 В; 3 датчика тока ±1; 5 А / ±5 В
P3	Указатель частоты вращения	06.2	- 2000...0...2000 мин ⁻¹

Описание электрических схем соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.(рис 7.4;7.5)

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

Датчик тока в блоке A12 обеспечивает гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразует ток короткого замыкания испытуемого генератора G4 в пропорциональное ему нормированное напряжение.

Через аналоговые входы АСН0-АСН8 коннектора A4 напряжение, пропорциональное току короткого замыкания испытуемого генератора G4 вводится в компьютер A5.

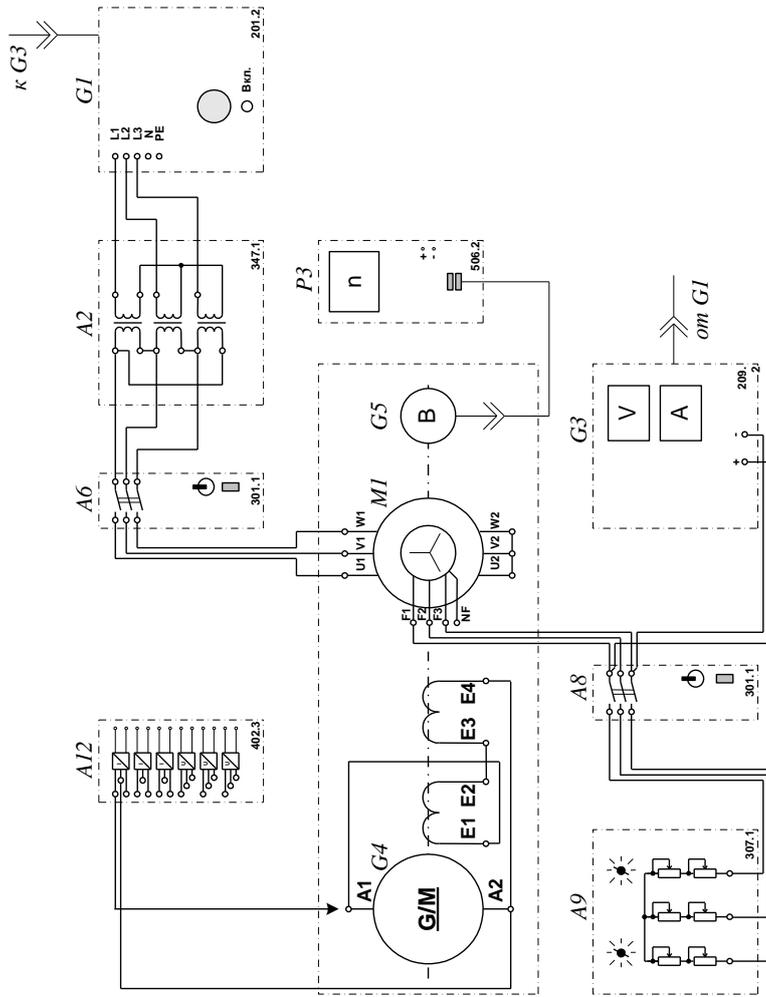


Рисунок 7.4 Электрическая схема соединений

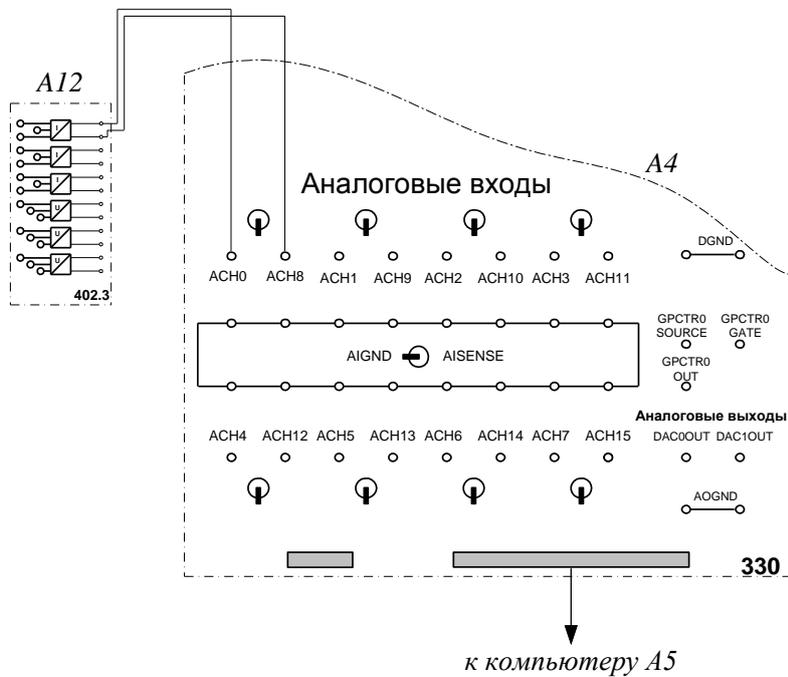


Рисунок 7.5 Электрическая схема соединений (продолжение)

Указания по проведению эксперимента

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).

Соедините гнезда защитного заземления " \oplus " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

Переключатели режима работы возбудителя G3 и выключателей А6 и А8 установите в положение «РУЧН.».

Регулировочную рукоятку возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.

В трехфазной трансформаторной группе А2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.

Установите в каждой фазе реостата А3 суммарное сопротивление 8 Ом.

Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей А6, А8, указателя частоты вращения Р3 и блока А12 датчиков тока и напряжения.

Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5 и запустите прикладную программу «Многоканальный осциллограф». Настройте программу для запоминания, например, последних 5 секунд процесса.

Включите выключатель А8 кнопкой «ВКЛ».

Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатель «СЕТЬ» возбуждителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение, равное 20 В.

Включите выключатель А6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 должен начать вращаться и стрелка указателя Р3 должна отклониться вправо.

Нажмите кнопку «ВКЛ» возбуждителя G3. Двигатель М1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.

Отключите выключатель А8 кнопкой «ОТКЛ».

Нажмите кнопку «ВКЛ» включения сканирования первого канала виртуального осциллографа.

Закоротите проводником якорную обмотку генератора G4 и через 3с остановите сканирование данных программой «Многоканальный осциллограф» нажатием на виртуальную кнопку «Остановить».

Отключите выключатель А6 нажатием кнопки «ОТКЛ». Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель «СЕТЬ» возбуждителя G3, выключателей А6 и А8, указателя частоты вращения Р3 и блока А12 датчиков тока и напряжения.

Используя возможности программы “Многоканальный осциллограф”, проанализируйте полученную временную зависимость тока короткого замыкания генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия ГПТ и вид уравнения электрического состояния его якорной цепи.
2. Какой побочный эффект возникает в нагруженном ГПТ?
3. Поясните физику преобразования энергии сторонних механизмов, вращающих якорь ГПТ, в энергию электрическую.

Лабораторная работа 8

Тема: Снятие характеристики холостого хода $E_0=f(I_f)$ генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие характеристики короткого замыкания $I_K=f(I_f)$ генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Снятие внешней $U=f(I)$, регулировочной $I_f=f(I)$ и нагрузочной $U=f(I_f)$ характеристик генератора постоянного тока с независимым / параллельным возбуждением

Цель работы: Определить характеристики холостого хода $E_0=f(I_f)$ генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Определить характеристики короткого замыкания $I_K=f(I_f)$ генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Определить внешней $U=f(I)$, регулировочной $I_f=f(I)$ и нагрузочной $U=f(I_f)$ характеристик генератора постоянного тока с независимым / параллельным возбуждением

Формируемые компетенции:

ОПК-3. Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин.

ИД-5_{ОПК-3} Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик.

Теоритическая часть

Вводная часть.

Свойства генераторов постоянного тока обусловлены в основном способом питания обмотки возбуждения. В зависимости от этого различают следующие типы генераторов:

- 1) с независимым возбуждением - обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника постоянного тока;
- 2) с параллельным возбуждением - обмотка возбуждения подключена к обмотке якоря параллельно с нагрузкой;
- 3) с последовательным возбуждением - обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой;

4) со смешанным возбуждением - имеются две обмотки возбуждения: одна подключена параллельно нагрузке, а другая - последовательно с ней.

Генераторы рассматриваемых типов имеют одинаковое устройство и отличаются лишь выполнением обмотки возбуждения. Обмотки независимого и параллельного возбуждения, имеющие большое число витков, изготавливают из провода малого сечения; обмотку последовательного возбуждения, имеющую небольшое число витков, - из провода большого сечения. Генераторы малой мощности иногда выполняют с постоянными магнитами. Свойства таких генераторов близки к свойствам генераторов с независимым возбуждением.

Основными характеристиками, определяющими свойства генераторов постоянного тока, являются характеристики: холостого хода, внешняя, регулировочная и нагрузочная.

Основная часть.

В генераторе с независимым возбуждением ток возбуждения I_B создается сторонним источником напряжения U_B и не зависит от тока якоря I_A . Ток якоря I_A равен току нагрузки I_H . Величина тока I_B определяется только положением регулировочного реостата R_{PB} , включенного в цепь обмотки возбуждения (рис.8.1(а)). Обычно ток возбуждения невелик и составляет 1...3% от номинального тока якоря.

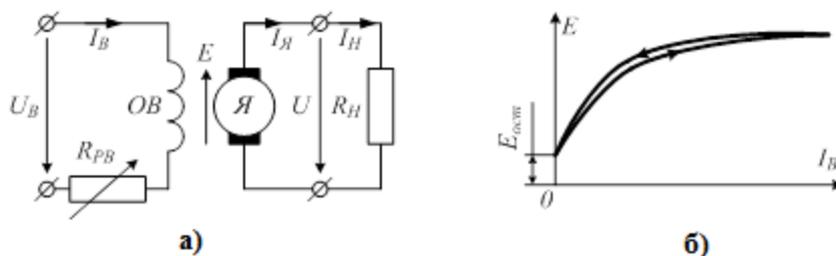


Рисунок 8.1 – Схема ГИТ с независимым возбуждением (а) и характеристика холостого хода генератора

Характеристикой холостого хода (рис.8.1(б)) называют зависимость

э.д.с. E от тока возбуждения I_B для ненагруженного ГПТ ($I_A=0$) при постоянной частоте вращения $\omega=const$. При холостом ходе машины, когда цепь нагрузки разомкнута, напряжение U на зажимах обмотки якоря равно ЭДС $E=c_\phi\omega$ и зависит только от величины магнитного потока Φ_B , т.е. от тока возбуждения I_B . Поэтому характеристика холостого хода $E=f(I_B)$ подобна магнитной характеристике $\Phi_B=f(I_B)$. Расхождение ветвей $E=f(I_B)$ объясняется наличием гистерезиса в магнитопроводе машины. Обычно гистерезисом пренебрегают и используют среднюю линию между ветвями гистерезисной кривой. При $I_B=0$ в обмотке якоря потоком остаточного магнетизма индуцируется остаточная э.д.с. $E_{ост}$, которая составляет 2...4% от $E_{ном}$.

Внешней характеристикой (рис.8.2,а) называют зависимость $U=f(I_A)$ напряжения U нагруженного генератора от тока нагрузки I_H , равного току якоря I_A при постоянной частоте вращения $\omega=const$ и постоянном токе возбуждения $I_B=const$. В режиме нагрузки напряжение генератора равно

$$U = E(\hat{\Phi}_\Sigma) - R_\beta I_\beta = E(I_A, I_B) - R_\beta I_\beta,$$

где $E(\Phi_\Sigma)=E(I_B, I_A)$ – э.д.с. ГПТ, зависящая от суммарного магнитного потока (рис.3.6), состоящего из основного потока $\Phi_{осн}$ ОВ и потока $\Phi_{рЯ}$ реакции якоря, причем каждый из названных потоков зависит, соответственно, от тока возбуждения I_B и якоря I_A .

С увеличением нагрузки напряжение U уменьшается по двум причинам:

- 1) из-за увеличения падения напряжения $\Delta U_1=R_\beta I_\beta$ на сопротивлении R_β обмотки якоря;
- 2) из-за уменьшения ЭДС E в результате размагничивающего действия реакции якоря, что показано как понижение напряжения U на ΔU_2 .

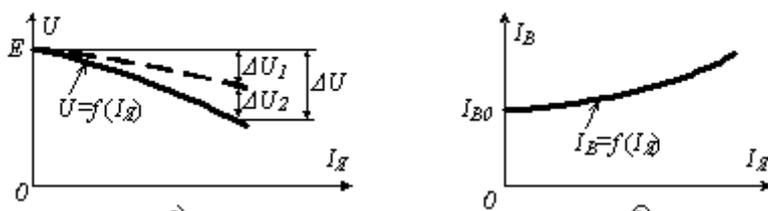


Рисунок 8.2- Внешняя (а) и регулировочная (б) характеристика ГПТ

Изменение напряжения при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки для генераторов с независимым возбуждением составляет 5...15%.

Регулировочной характеристикой (рис.8.2,б) называют зависимость между токами I_A и I_B , показывающая то, каким образом следует регулировать ток возбуждения I_B , чтобы поддерживать постоянным напряжение U генератора при изменении тока нагрузки I_A . Очевидно, что в случае падающей внешней характеристики (8.2,а) по мере роста нагрузки нужно увеличивать э.д.с. E , что, в свою очередь, в соответствии с пропорциональной зависимостью между э.д.с. и током возбуждения (рис.8.1(б)), нужно увеличивать ток возбуждения I_B .

В генераторе с параллельным возбуждением ток возбуждения I_B создается э.д.с. E , индуцируемой в якоре генератора (рис.8.3,а). Обычно ток возбуждения I_B невелик и составляет 1...3% от номинального тока якоря. Поэтому, ток нагрузки I_H можно считать равным току якоря I_A . В цепь обмотки возбуждения может быть включен регулировочный реостат возбуждения R_{PB} , с помощью которого устанавливают величину э.д.с. E_0 холостого ГПТ.

Э.д.с. E_0 на выходе ГПТ образуется в процессе его самовозбуждения (рис.8.3,б) при отключенной электрической нагрузке – на холостом ходу. На рисунке показаны график I холостого хода ГПТ, который будет таким же, как и ГПТ с независимым возбуждением, и график 2, связывающий между собой напряжение U и ток I_B ОВ зависимостью

$$I_B = \frac{U}{R_{OB} + R_{PB}} = \frac{E_0}{R_{OB} + R_{PB}}$$

В режиме холостого хода, при котором происходит самовозбуждение,

напряжение U равно э.д.с. E_0 холостого хода ГПТ.

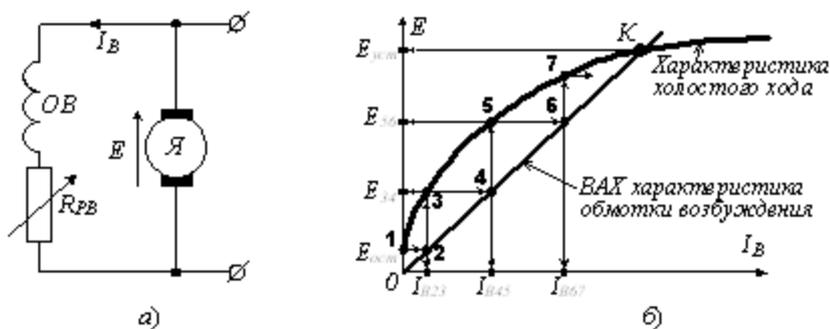


Рисунок 8.3- Схема ГПТ с параллельным возбуждением (а) и процесс самовозбуждения

Процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением состоит из следующих стадий:

1). Точка 1 – начало процесса. На клеммах ГПТ индуцируется остаточная э.д.с. $E_{ост}$. Остаточная э.д.с., приложенная к обмотке возбуждения, создает в ней ток I_{B23} , величиной

$$I_{B23} = \frac{E_{ост}}{R_{OB} + R_{PB}}.$$

3). Током I_{B23} в обмотке возбуждения создается магнитное поле, которое будучи направленным согласно с $\Phi_{ост}$, создаст э.д.с. E_{34} , определяемую точкой 2.

4). Э.д.с. E_{34} , приложенная к обмотке возбуждения, создает в ней ток I_{B45}

$$I_{B45} = \frac{E_{34}}{R_{OB} + R_{PB}}$$

5). Током I_{B45} в обмотке возбуждения создается магнитное поле, которое будучи направленным согласно с $\Phi_{ост}$, создаст э.д.с. E_{34} , определяемую точкой 5.

Описанные процессы будут повторяться до тех пор, пока будет достигнута точка K пересечения графиков холостого хода ГПТ и вольтамперной характеристики ОБ (3.35). На клеммах ГПТ установится э.д.с. $E_{уст}$ (далее – просто E).

Очевидно, что положение точки K зависит от наклона характеристик графика цепи ОВ. Чем больше сопротивление регулировочного реостата возбуждения R_{PB} , тем круче будет подъем графика цепи ОВ, тем ниже будет располагаться точка пересечения K и тем меньше будет значение э.д.с. E .

Учитывая изложенное, можно сформулировать три условия самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением:

- 1) должна быть остаточная намагниченность $\Phi_{ост}$ стали магнитопровода;
- 2) должно быть согласное с $\Phi_{ост}$ включение ОВ по создаваемому ею магнитному потоку;
- 3) должно быть не слишком большим собственное сопротивление $R_{ОВ}$ обмотки возбуждения, чтобы при самовозбуждении без сопротивления R_{PB} э.д.с. E было бы не меньше номинального $E_{ном}$.

Внешняя характеристика ГПТ имеет вид, представленный на рис 8.4. На ней помимо составляющих ΔU_1 и ΔU_2 падения напряжения ΔU ГПТ, имеется третья составляющая ΔU_3 , обусловленная тем, что из-за снижения напряжения U понижается напряжение на обмотке возбуждения, снижается ток I_B возбуждения и снижается э.д.с. E .

Если замкнуть накоротко клеммы ГПТ с параллельным возбуждением, то исчезнет напряжение на ОВ, исчезнет ток возбуждения и магнитный поток возбуждения и останутся только остаточный поток $\Phi_{ост}$ и остаточная э.д.с. $E_{ост}$. Ввиду малости $E_{ост}$, которая составляет 2...4% от $E_{ном}$, ток короткого замыкания $I_{Я.КЗ}$ будет не выше номинального тока ГПТ. Значит для ГПТ с параллельным возбуждением не опасен режим короткого замыкания.

3и его рабочие характеристики

В генераторе со смешанным (*компаундным*) возбуждением поток создается двумя обмотками – шунтовой (ОВШ) и серийной (ОВС) (рис.8.5,а). Применяется только параллельно-последовательное возбуждение с $\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} \pm \Phi_C$ с преобладанием магнитного потока $\Phi_{Ш}$ шунтовой ОВ над магнитным потоком Φ_C серийной ОВ.

Рисунок 8.5 – Схема ГПТ со смешанным возбуждением (а) и внешние характеристики (б)

На рис.8.5,б приведена внешняя характеристика 2, созданная только шунтовой обмоткой возбуждения. Эта характеристика взята с рис.8.5,а.

Для обоснования формы внешней характеристики 4, созданной только серийной обмоткой возбуждения, используем характеристику холостого хода 5, которая имеет такой же вид, как у ГПТ с независимым возбуждением (рис.8.1). Ток нагрузки является током якоря I_A и одновременно током возбуждения I_B . При увеличении тока якоря I_A увеличивается э.д.с. E , так как с ростом тока увеличивается магнитный поток ОВС, но и одновременно растет падение напряжения ΔU на сопротивлении провода ОВС. На участке изменения тока якоря I_A от нулевого значения до некоторого граничного значения $I_{ГР}$, рост э.д.с. E превышает рост падения напряжения ΔU и, поэтому, график 4 возрастающий. После тока $I_{ГР}$ на характеристике 5 холостого хода начинается участок насыщения, в результате чего э.д.с. E практически перестаёт расти, а рост ΔU продолжается. Поэтому на графике 4 после тока $I_{ГР}$ имеется ниспадающий участок.

При согласном включении ОВШ и ОВС их магнитные потоки складываются ($\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} + \Phi_C$) и, соответственно, внешние характеристики 2 и 4 складываются, образуя характеристику 1. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что выходное напряжение U практически неизменно во всем диапазоне изменения тока нагрузки. Такие ГПТ применяются в автономных источниках электроэнергии, состоящими из одного-единственного генератора.

При встречном включении ОВШ и ОВС их магнитные потоки вычитаются ($\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} - \Phi_C$) и, соответственно, также вычитаются внешние характеристики 2 и 4, образуя характеристику 3. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что при коротком замыкании ГПТ ($U=0$) ток ограничен некоторым допустимым значением $I_{КЗ}$. Такие ГПТ применяются в качестве свароч-

ных, для которых режим короткого замыкания является нормальным, рабочим.

В сетях электроснабжения постоянного тока устанавливается не менее двух ГПТ, что дает следующие преимущества (в сравнении с использованием для электропитания только одного ГПТ):

1). Повышается надежность электроснабжения за счет резервирования при использовании более одного ГПТ.

2). Обеспечивается экономичная работа параллельно работающих ГПТ, в которой нагрузка ГПТ может поддерживаться на уровне, обеспечивающем максимальный к.п.д. Так, если нагрузка двух параллельно работающих ГПТ составляет $0,35...0,4$, то при выводе из работы одного ГПТ, оставшийся в работе ГПТ загрузится до $0,7...0,8$, при которой к.п.д. генератора максимально.

3). Исключается перегрузка ГПТ. Так, если работающие ГПТ нагружены токами, превышающими номинальные, то можно ввести дополнительно в работу еще один ГПТ, который возьмет на себя часть тока нагрузки, разгрузив от токов другие ГПТ.

Различают параллельную работу ГПТ:

- на сеть бесконечной мощности;
- соизмеримой между собой мощности.

Для параллельной работы используют преимущественно ГПТ с независимым возбуждением.

Для ГПТ, вводимых в параллель, должны быть выполнены ряд условий. Для ГПТ, работающих в параллель, должны быть выполнены условия нагружения.

Параллельная работа ГПТ на сеть бесконечной мощности.

Схема параллельной работы ГПТ с сетью бесконечной мощности приведена на рис.8.6,а.

При введении ГПТ для работы параллельно с сетью с напряжением U_C должны быть выполнены следующие условия:

1. ГПТ должен быть разгруженным.
2. Полярность напряжения подключаемого генератора должна совпадать с полярностью напряжения на шинах сети.
3. Э.д.с. E ГПТ должна быть равна напряжению U_C сети.

При соблюдении указанных условий ГПТ включается с помощью SA безударно, означаящее следующее: ток якоря $I_{Я}$ ГПТ в момент включения нулевой. Внешняя характеристика 3 подключенного ГПТ совпадает при токе $I_{Я}=0$ с характеристикой 1 сетевого напряжения постоянного уровня (рис.8.6,б).

Рисунок 8.6- Схема параллельной работы ГПТ на сеть бесконечной мощности (а) и внешних характеристики (б)

Далее нужно нагрузить введенный в работу ГПТ, соблюдая следующие условия нагружения:

1. Ток якоря $I_{Я}$ ГПТ не должен превышать максимально допустимого.
2. Нагрузочный ток $I_{ЯН}$ ГПТ должен быть таким, чтобы ток каждого генератора из группы всех параллельно работающих, был бы прямо пропорционален номинальной мощности генератора.

Для нагружения ГПТ нужно увеличить его напряжение возбуждения. Внешняя характеристика 3 такого ГПТ сместится параллельно вверх в положение 2 (рис.3.30,б). Точкой пересечения графиков 1 и 2 определится ток нагрузки $I_{ЯН}$ ГПТ.

Параллельная работа ГПТ соизмеримой мощности.

Схема параллельной работы ГПТ соизмеримой мощности приведена на рис.8.7,а. Пусть сначала на нагрузку работал только ГПТ1. Назовем его ведущим генератором и он изначально обеспечивал в сети уровень заданный напряжения $U_{зад}$, равный, например номинальному напряжению на нагрузке. Ток ведущего ГПТ1 составлял $I_{ЯН}$ (рис.8.7,б), который определяется точкой пересечения графиков $U_{зад}$ и 1 . Далее на сеть подключается ГПТ2, который назовем ведомым. Условия включения ГПТ2 такие же, как и при включении

его на сеть бесконечной мощности. Два условия нагружения ГПТ2, применяемые в сети бесконечной мощности, должны быть дополнены третьим – напряжение сети должно остаться неизменным, равным $U_{зад}$.

Пусть ГПТ2 введен в работу с внешней характеристикой 2. Ток нагрузки $I_{Я2H}$ ведомого генератора будет нулевым.

Для нагружения ГПТ2 нужно увеличить его ток возбуждения. Внешняя характеристика сместится параллельно в положение 2'. ГПТ2 возьмет на себя ток $I'_{Я2H}$, ток $I'_{Я1H}$ ведущего ГПТ2 уменьшится, так как сумма токов обоих генераторов должна остаться постоянной и равной току I_H , потребляемому нагрузкой:

$$I_H = I'_{\beta 1f} + I'_{\beta 2f} = const \Rightarrow I'_{\beta 2f} = I_H - I'_{\beta 1f}$$

До нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 имело вид

$$U_{\zeta\alpha\alpha} = E_1 - R_{\beta 1} I'_{\beta 1f}$$

Рисунок 8.7- Схема параллельной работы соизмеримых по мощности ГПТ (а) и внешних характеристик (б)

После нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 примет вид

$$U'_{\zeta\alpha\alpha} = E_1 - R_{\beta 1} I'_{\beta 1f}$$

Так как ток ГПТ понизился с $I_{Я1H}$ до $I'_{Я1H}$, то из сопоставления формул (3.37) и (3.38) при $E_1 = const$ следует, что напряжение сети U повысится с $U_{зад}$ до $U'_{зад}$.

Для понижения напряжения сети нужно уменьшить ток возбуждения ведущего ГПТ1. Это снизит его э.д.с. E_1 до такого значения E'_1 , что напряжение сети останется равным $U_{зад}$:

$$U_{\zeta\alpha\alpha} = E'_1 - R_{\beta 1} I'_{\beta 1f}$$

Это приведет к параллельному смещению внешней характеристики ГПТ1 в положение 1'.

Одновременными регулировками напряжений возбуждения обоих генераторов добиваются того, чтобы токи обоих генераторов, например, одинаковой мощности, были бы одинаковыми

$$I'_{\beta 1i} = I'_{\beta 2i}$$

Указание по технике безопасности:

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А

Перечень аппаратуры

Обо- значение	Наименование	ип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	01.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	06.1	– 0...250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель синхронной ма- шины	09.2	– 0...40 В / 3,5 А
G4	Машина постоянного тока	01.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых пе- ремещений	04	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	02.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин ⁻
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	47.1	3×80 В·А / 230 В/242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A8	A6, Трёхполюсный выключатель	01.1	~ 400 В / 10 А
A9	Реостат для цепи ротора ма-		3 × 0...40 Ом /

	шины переменного тока	07.1	1 А
P1	Блок мультиметров	08.2	3 мультиметра 0...1000 В / 0...10 А / 0...20 МОм
P3	Указатель частоты вращения	06.2	- 2000...0...2000 мин ⁻¹

Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.(рис 8.7)

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток возбуждения I_f и э.д.с. E_0 испытуемого генератора G4.

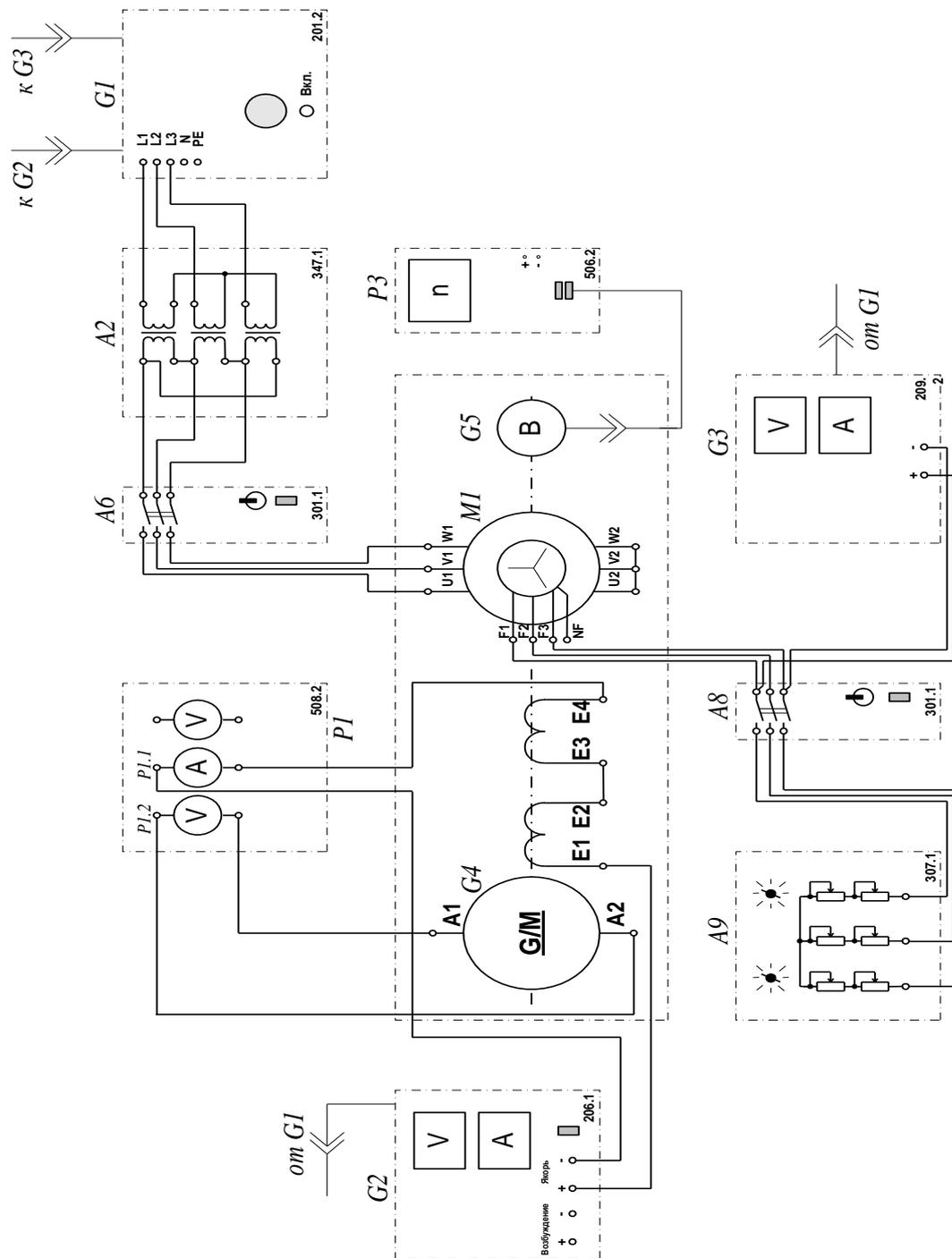


Рисунок 8.7 Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).
- Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
- Установите в каждой фазе реостата A3 сопротивление 8 Ом.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1, указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равным 20 В.
- Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться.
- Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель M1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.
- Отключите выключатель A8 кнопкой «ОТКЛ».

- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.

- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменяйте ток возбуждения I_f генератора G4 в диапазоне 0...0,2 А и заносите показания амперметра P1.1 (ток I_f) и вольтметра P1.2 (э.д.с. E_0 генератора G4) в таблицу 1.1

Таблица 1.1.

I_f, A										
E_0, B										

- По завершении эксперимента у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель A6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.

- Используя результаты табл. 1.1, постройте искомую характеристику холостого хода $E_0=f(I_f)$.

Снятие характеристики короткого замыкания $I_K=f(I_f)$ генератора постоянного тока с независимым возбуждением.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	ип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания		~ 400 В / 16 А

		01.2	
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	06.1	– 0...250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель синхронной машины	09.2	– 0...40 В / 3,5 А
G4	Машина постоянного тока	01.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбужде- ние)
G5	Преобразователь угловых перемеще- ний	04	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного ток	02.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин ⁻¹
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	47.1	3×80 В·А / 230 В/242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6, A8	Трёхполюсный выключатель	01.1	~ 400 В / 10 А
A9	Реостат для цепи ротора машины пе- ременного тока	07.1	3 × 0...40 Ом / 1 А
P1	Блок мультиметров	08.2	3 мультиметра 0...1000 В / 0...10 А / 0...20 МОм
P3	Указатель частоты вращения	06.2	- 2000...0...2000 мин ⁻¹

Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. (ри

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток возбуждения I_f и ток I_k якорной обмотки испытуемого генератора G4.

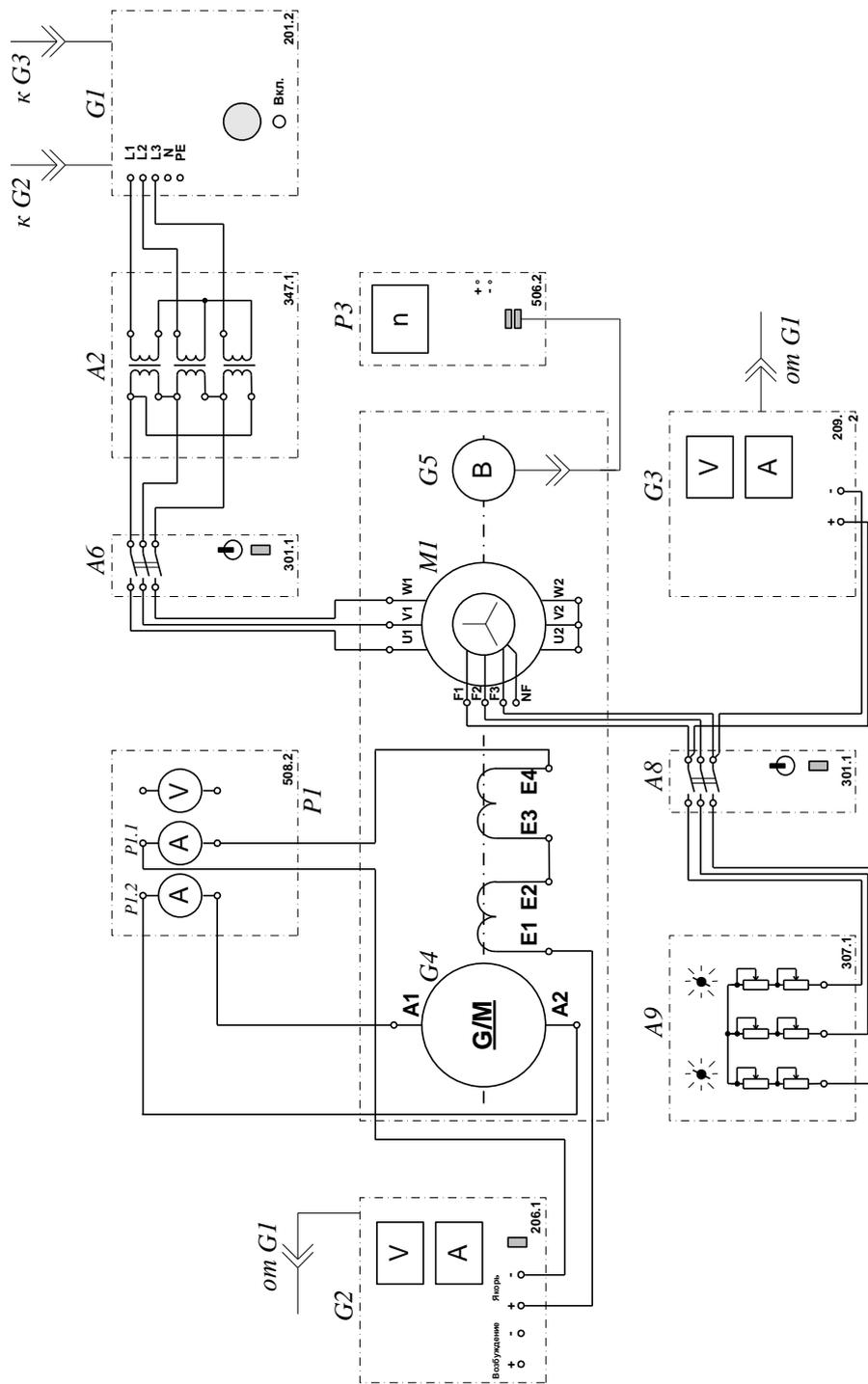


Рисунок 8.8 Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).
- Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
- Установите в каждой фазе реостата A3 сопротивление 8 Ом.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1, указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равным 20 В.
- Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться и стрелка указателя частоты должна отклониться **влево**.
- Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель M1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.
- Отключите выключатель A8 кнопкой «ОТКЛ».

- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.

- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменяйте ток возбуждения I_f генератора G4 в диапазоне 0...0,15 А и заносите показания амперметров P1.1 (ток I_f) и P1.2 (ток I_K) в таблицу 1.2.

Таблица 1.2.

I_f, A										
I_K, A										

- По завершении эксперимента у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель A6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.

- Используя результаты табл. 1.2, постройте искомую характеристику короткого замыкания $I_K=f(I_f)$.

Снятие внешней $U=f(I)$, регулировочной $I_f=f(I)$ и нагрузочной $U=f(I_f)$ характеристик генератора постоянного тока с независимым / параллельным возбуждением

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	ип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	01.2	~ 400 В / 16 А

G2	Источник питания двигателя постоянного тока	06.1	– 0...250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель синхронной машины	09.2	– 0...40 В / 3,5 А
G4	Машина постоянного тока	01.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых перемещений	04	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	02.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин ⁻¹
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	47.1	3×80 В·А / 230 В / 242, 235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6, A8	Трёхполюсный выключатель	01.1	~ 400 В / 10 А
A9	Реостат для цепи ротора машины пере- менного тока	07.1	3 × 0...40 Ом / 1 А
A10	Активная нагрузка	06.1	220 В / 3×0...50 Вт;
A11	Реостат возбуждения машины постоянно- го тока	08.1	0...2000 Ом / 0.3 А
A13	Реостат	23.2	2×0...100 Ом / 1 А
P1	Блок мультиметров	08.2	3 мультиметра 0...1000 В / 0...10 А / 0...20 МОм
3	Указатель частоты вращения	06.2	-2000...0...2000 мин ⁻¹

Описание электрических схем соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.(рис 8.9(1,2);8.10)

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Активная нагрузка A10 используется для нагружения генератора G4.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6 и позволяет снимать требуемые характеристики генератора G4 при постоянстве частоты вращения n .

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

Реостат A11 ограничивает ток в цепи возбуждения генератора постоянного тока G4.

Реостат A13 повышает дискретность изменения тока возбуждения генератора G4.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток возбуждения I_f , ток I и напряжение U якорной обмотки испытуемого генератора G4.

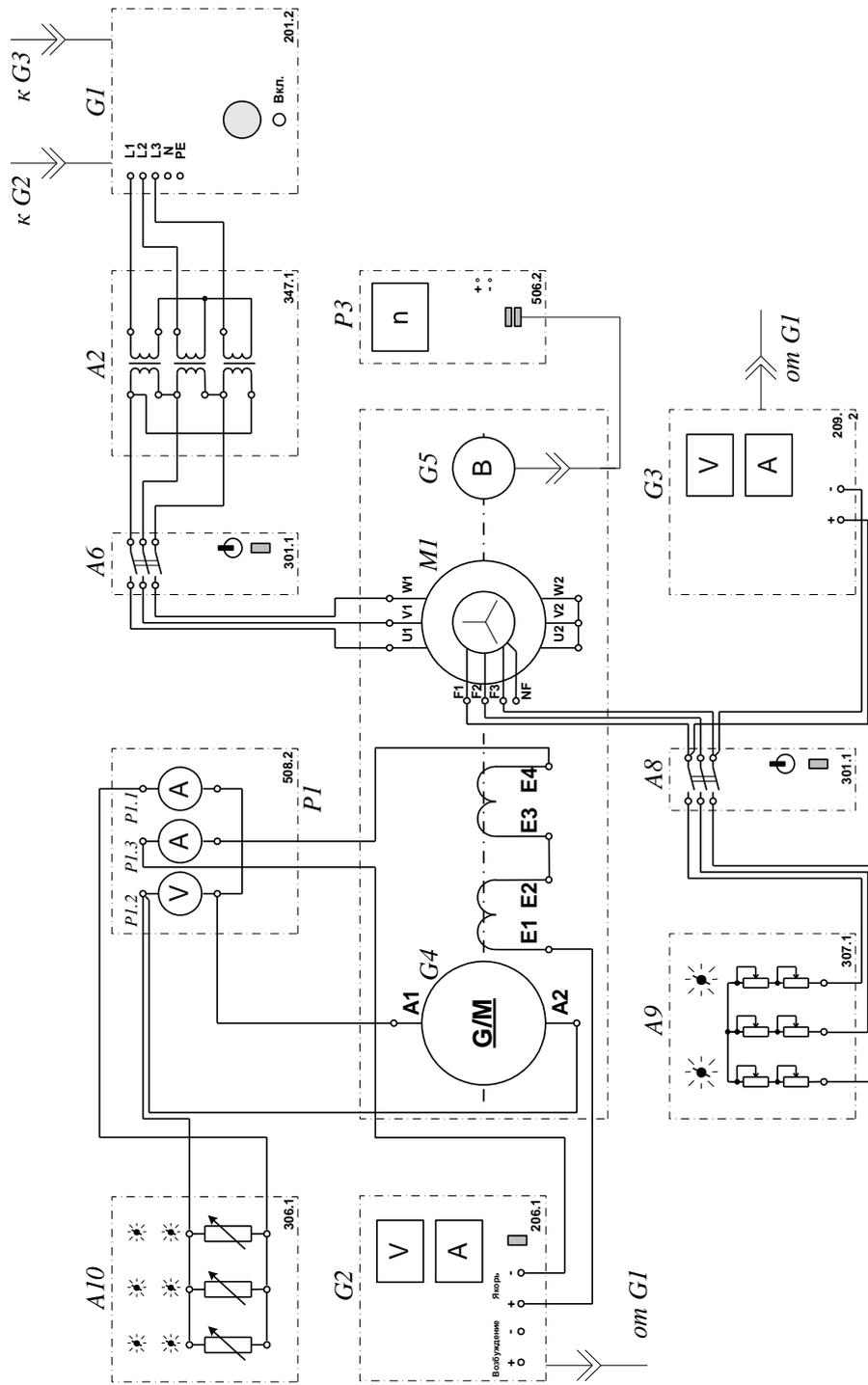


Рисунок 8.9 (а)- Электрическая схема соединений (вариант 1)

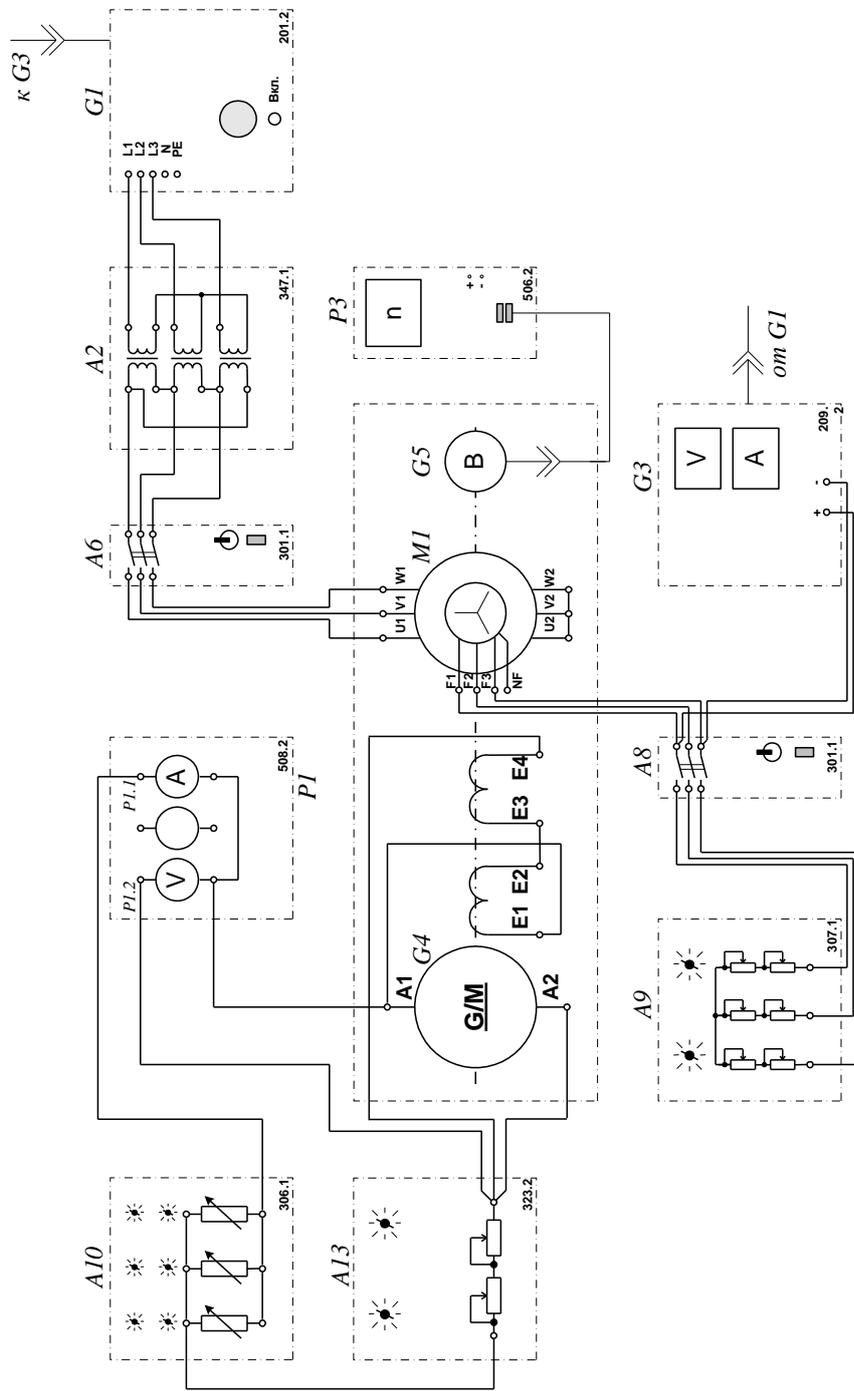


Рисунок 8.9 (2) - Электрическая схема соединений (вариант 2)

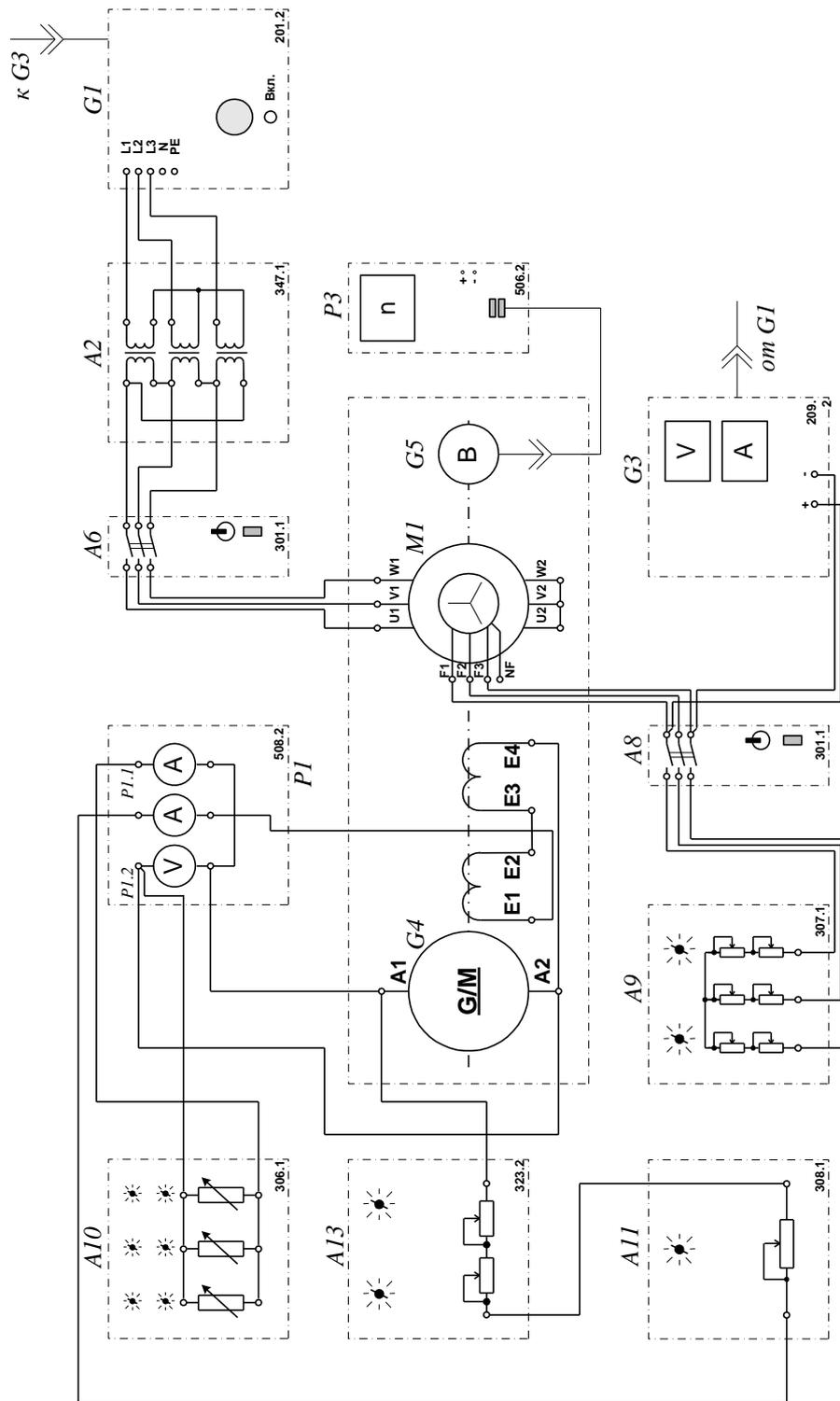


Рисунок 8.10- Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).
- Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.

Генератор постоянного тока с независимым возбуждением

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений **(вариант 1)**.
- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 установите в положение "0"
- В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
- Установите в каждой фазе реостата A3 сопротивление 8 Ом.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1, указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».

• Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

• Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равным 20 В.

• Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться.

• Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель M1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью. Частота его вращения n должна достичь 1500 мин^{-1} .

• Отключите выключатель A8 кнопкой «ОТКЛ».

• Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.

• Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите и поддерживайте неизменным в ходе эксперимента ток возбуждения I_f , равным, например, 0,1 А.

• Перемещая регулировочные рукоятки нагрузки A10, изменяйте ток I якорной обмотки генератора G4 и заносите показания амперметра P1.1 (ток I) и вольтметра P1.2 (напряжение U якорной обмотки генератора G4) в таблицу 1.3.1

Таблица 1.3.1

I, А										
U, В										

• Верните регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 в положение "0".

• Установите путем регулирования тока возбуждения I_f напряжение U якорной обмотки генератора G4, равным, например, 140 В.

•Перемещая регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 по часовой стрелке и поддерживая путем регулирования тока возбуждения I_f напряжение U якорной обмотки неизменным и равным 140 В, изменяйте ток I якорной обмотки генератора G4 и заносите показания амперметров P1.1 (ток I) и P1.3 (ток I_f) в таблицу 1.4.1

Таблица 1.4..1

I, A										
I_f, A										

•Меняя положение регулировочных рукояток активной нагрузки А10 и поддерживая путем регулирования тока возбуждения I_f ток I якорной обмотки неизменным и равным, например, 0,15 А, изменяйте напряжение U якорной обмотки генератора G4 и заносите показания вольтметра P1.2 (напряжение U) и амперметра P1.3 (ток I_f) в таблицу 1.5.1

Таблица 1.5.1

I_f, A										
U, B										

•По завершении эксперимента у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель А6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей А6 и А8, блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.

- Используя данные табл. 1.3.1...1.3.3 постройте:
 - внешнюю характеристику $U = f(I)$ при $n = \text{const}$, $I_f = \text{const}$ (табл. 1.3.1.);
 - регулировочную характеристику $I_f = f(I)$ при $n = \text{const}$, $U = \text{const}$ (табл. 1.3.2.);
 - нагрузочную характеристику $U = f(I_f)$ при $n = \text{const}$, $I = \text{const}$ (табл. 1.3.3.).

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (**вариант 2**).
- Переключатели режима работы возбудителя G3 и выключателей A6 и A8 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 установите в положение "0".
- В трехфазной трансформаторной группе A2 установите номинальное напряжение вторичных обмоток трансформаторов равным 230 В.
- Установите в каждой фазе реостата A3 сопротивление 8 Ом.
- Установите суммарное сопротивление реостата A13, равным 200 Ом и закоротите его проводником.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1, указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».

• Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

• Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равным 20 В.

• Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться и стрелка указателя частоты P3 должна отклониться вправо.

• Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель M1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью. Частота его вращения n должна достичь 1500 мин^{-1} .

• Отключите выключатель A8 кнопкой «ОТКЛ». В результате генератор постоянного тока G4 должен самовозбудиться.

• Перемещая регулировочные рукоятки нагрузки A10 по часовой стрелке, изменяйте ток I якорной обмотки генератора G4 и заносите показания амперметра P1.1(ток I) и вольтметра P1.2 (напряжение U якорной обмотки генератора G4) в таблицу 1.3.2.

• Перенесите закоротку с реостата A13 на активную нагрузку A10.

• Уменьшая сопротивление реостата A13 до нуля, продолжайте заносить показания амперметра P1.1(ток I) и вольтметра P1.2 (напряжение U якорной обмотки генератора G4) в таблицу 1.3.2.

Таблица 1.3.2.

II, А										
UU, В										

• Отключите выключатель A6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Двигатель M1 должен остановиться.

- Нажмите кнопку "ОТКЛ." возбудителя G3.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (**вариант 3**).
- Установите сопротивления реостата возбуждения A11 и реостата A13, равными 0 Ом.
- Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».
- Включите выключатель A6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель M1 должен начать вращаться и стрелка указателя частоты P3 должна отклониться вправо.
- Нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3. Двигатель M1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью. Частота его вращения n должна достичь 1500 мин^{-1} .
- Отключите выключатель A8 кнопкой «ОТКЛ». В результате генератор постоянного тока G4 должен самовозбудиться.
- Установите, изменяя сопротивления реостата возбуждения A11 и реостата A13, напряжение U якорной обмотки генератора G4, например, на уровне 90 В.
- Перемещая регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 и поддерживая путем изменения сопротивления реостата возбуждения A11 и реостата A13 напряжение U якорной обмотки неизменным и равным 90 В, изменяйте ток I якорной обмотки генератора G4 и заносите показания амперметров P1.1 (ток I) и P1.3 (ток I_f) в таблицу 1.4.2.

Таблица 1.4.2.

I, A										
I_f, A										

- Меняя положение регулировочных рукояток активной нагрузки A10 и поддерживая путем изменения сопротивления реостата возбуждения

A11 и реостата A13 ток I якорной обмотки неизменным и равным, например, 0,15 А, изменяйте напряжение U якорной обмотки генератора G4 и заносите показания вольтметра P1.2 (напряжение U) и амперметра P1.3 (ток I_f) в таблицу 1.5.2.

Таблица 1.5.2.

I_f, A										
U, V										

• По завершении эксперимента отключите выключатель A6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3, выключателей A6 и A8, блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.

• Используя данные табл. 1.3.2...1.5.2 постройте:

- внешнюю характеристику $U = f(I)$ при $n = \text{const}$, $I_f = \text{const}$ (табл. 1.3.2.);
- регулировочную характеристику $I_f = f(I)$ при $n = \text{const}$, $U = \text{const}$ (табл. 1.4.2.);
- нагрузочную характеристику $U = f(I_f)$ при $n = \text{const}$, $I = \text{const}$ (табл. 1.5.6.).

Контрольные вопросы

1. Назовите условия введения ГПТ для работы параллельно с сетью бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.

2. Назовите условия нагружения ГПТ, работающего на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.

3. Как регулируется возбуждение параллельно работающих ГПТ, работающих на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности?

4. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с последовательным возбуждением.

5. В каких установках применяют компаундные ГПТ с разными схемами включения шунтовой и серийной обмоток возбуждения?

6. Как классифицируется ГПТ в зависимости от способа возбуждения?

7. Пояснить внешний вид характеристики холостого хода.

8. Пояснить внешний вид внешней характеристики.

9. Пояснить внешний вид регулировочной характеристики.

10. Назовите условия введения ГПТ для работы параллельно с сетью бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.

11. Назовите условия нагружения ГПТ, работающего на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.

12. Как регулируется возбуждение параллельно работающих ГПТ, работающих на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности?

13. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с последовательным возбуждением.

14. В каких установках применяют компаундные ГПТ с разными схемами включения шунтовой и серийной обмоток возбуждения?

15. Как классифицируется ГПТ в зависимости от способа возбуждения?

16. Пояснить внешний вид характеристики холостого хода.

17. Пояснить внешний вид внешней характеристики

18. Пояснить внешний вид регулировочной характеристики.

Лабораторная работа №9

Тема: Пуск в ход двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Определение механической характеристики двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением. Определение рабочих характеристик $n=f(P_2)$, $M=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$ двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Цель работы: Определить механические характеристики $n=f(M)$ двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением. Определить рабочие характеристики $n=f(P_2)$, $M=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$ двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Формируемые компетенции:

ОПК-3. Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин.

ИД-5_{ОПК-3} Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик.

Теоритическая часть

Все процессы, происходящие в машинах постоянного тока (МПТ), могут быть объяснены с использованием четырех правил, характеризующих электромагнитные явления (приложение А):

1) правило получения электрического тока – "Нужно в замкнутый контур K поместить источник э.д.с. E . В таком контуре потечет ток I ";

2) правило получения магнитного поля – "Нужно в проводнике создать электрический ток I . Вокруг такого проводника будет образовано магнитное поле Φ ";

3) правило получения механической силы – "Нужно проводник с током I поместить в магнитное поле Φ . На такой проводник будет действовать механическая сила F ";

4) правило получения индукционной э.д.с. E – "При всяком изменении магнитного поля Φ , пронизывающем контур K , в контуре наводится э.д.с. E ; направление индукционной э.д.с. определяется правилом Ленца, причем перед применением правила контур с э.д.с. надо замкнуть".

Четвертое правило применительно к МПТ можно заменить на более простое правило правой руки (рис.9.1), причем процедура определения направления индукционной э.д.с. E существенно проще правила Ленца.

Рисунок 9.1- К выводу правила правой руки из явления электромагнитной индукции (а) и правило правой руки (б)

Пусть контур (рис.9.1,а), вращающийся с частотой ω в магнитном поле, характеризуемым индукцией B поля, за время dt повернется на угол $d\alpha$, причем $d\alpha = \omega \cdot dt$. При поперечном D и продольном l размерах контура изменение площади dS , которую пронизывают линии магнитного поля индукцией B , за время dt будет равно

$$dS = l \cdot D \cdot d\alpha = l \cdot D \cdot \omega \cdot dt ,$$

а изменение $d\Phi$ магнитного потока Φ за то же время dt составит

$$d\Phi = \hat{A} \cdot dS = \hat{A} \cdot l \cdot D \cdot \omega \cdot dt$$

В контуре в соответствии с явлением электромагнитной индукции наведётся э.д.с. E_2 , равная

$$E_2 = \frac{d\hat{O}}{dt} = \frac{\hat{A} \cdot l \cdot D \cdot \omega \cdot dt}{dt} = \hat{A} \cdot l \cdot D \cdot \omega = 2 \cdot \hat{A} \cdot l \cdot \underbrace{\frac{D}{2}}_v \cdot \omega = 2 \cdot \hat{A} \cdot l \cdot v,$$

где v - линейная скорость перемещения проводника относительно поля.

При вращении контура относительно поля перемещаются два продольных проводника l , и, поэтому в каждом из них будет наведена э.д.с. E , составляющая ровно половину э.д.с. E_2 . Учитывая это, в каждом из проводников контура, перемещающемся в магнитном поле, будет наведена э.д.с., равная

$$E = \hat{A} \cdot l \cdot v$$

Формулой установлено правило получения индукционной э.д.с. E в МПТ: "В проводнике, перемещающемся со скоростью v в магнитном поле с индукцией B , наводится э.д.с. E ".

Направление э.д.с. E , определенное с помощью правила Ленца будет таким, как показано на рис.9.1,а.

Построения, приведенные на рис.9.1,а и вид формулы), приводят к правилу правой руки (рис.9.1,б): "Правую руку нужно расположить так, чтобы в ладонь входили линии магнитного поля Φ , а большой отогнутый палец указывал на направление перемещения проводника в поле, то на направление э.д.с. укажут остальные четыре пальца".

Отмечаем, что правило правой руки не является универсальным, каким является правило Ленца, применительно к базовому определению получения индукционной э.д.с., но его применение при анализе МПТ является более простым и, поэтому, предпочтительным.

Основная часть.

Двигатель постоянного тока (ДПТ) содержит (рис.9.2):

- обмотку возбуждения (ОВ), расположенную на статоре; к ОВ приложено постоянное напряжение возбуждения $U_{ОВ}$, которое создаёт в ней

постоянный ток I_{OB} , который создает постоянное магнитное поле возбуждения Φ_{OB} ; с помощью полюсных наконечников, называемых из-за их формы, полюсными башмаками, вдоль их создается постоянное по величине магнитное поле, направленное к центру или от центра ДПТ; это поле называется основным $\Phi_{осн}$;

- ротор, называемый в ДПТ якорем; к обмотке якоря через расположенные на нем пластины коллектора и прилегающие к пластинам щетки, подводится внешнее постоянное напряжение, называемое напряжением якоря $U_{Я}$; это напряжение создает в обмотке якоря постоянный ток якоря $I_{Я}$.

Принцип действия ДПТ состоит в следующем: на проводники якоря, обтекаемые током $I_{Я}$, помещенные в магнитное поле Φ_{OB} обмотки возбуждения, действуют механические силы F . Направление сил F определяется правилом левой руки, что отображено на рис.9.2.

Проводники обмотки якоря укладываются в пазы якоря и подключаются к пластинам коллектора таким образом, что в частях обмотки якоря, расположенных по разные стороны относительно щеток, токи имеют одно и то же направление. Благодаря такому исполнению якоря, силы F , действующие на все проводники якорной обмотки, создают одинаковые по направлению вращающие моменты, следовательно, складываются и этим заставляют ротор вращаться в одну сторону, например против часовой стрелке, как показано на рис.9.2. Направление вращения якоря с частотой ω совпадает с направлением момента M . Если изменить полярность приложенного к якорю напряжения $U_{Я}$, то изменится направления тока $I_{Я}$ во всех проводниках обмотки якоря, и ДПТ будет вращаться в другую сторону.

Рисунок 9.1 –Устройство и принцип действия генератора постоянного

тока

Помимо основного эффекта – получения вращающего момента M , в ДПТ существует *побочный эффект* – возникновение в якоре э.д.с. вращения E . Эта э.д.с. возникает за счет того, что проводники якоря перемещаются в магнитном поле обмотки возбуждения Φ_{OB} . Направление э.д.с. вращения E , определенное по правилу правой руки, противоположно току $I_{Я}$. Так как ток $I_{Я}$ создается приложенным к якору ДПТ напряжением $U_{Я}$, то направления $I_{Я}$ и $U_{Я}$ совпадают, а э.д.с. вращения E направлена навстречу к $U_{Я}$. Поэтому э.д.с. вращения E называют также *противо-э.д.с.* Установленное соотношение между направлениями E и $U_{Я}$ позволяет записать следующее уравнение цепи якоря ДПТ:

$$U_{\beta} - E = R_{\beta} I_{\beta} \quad \Rightarrow \quad U_{\beta} = E + R_{\beta} I_{\beta}$$

В соответствии с (9.2) э.д.с. вращения E прямо пропорционально индуктивности B магнитного поля возбуждения, размерам обмотки D и l и частоте вращения ω якоря. Указанную пропорциональность принято записывать в виде

$$E = c_{\phi} \omega,$$

где c_{ϕ} – коэффициент магнитного потока ДПТ.

Уравнение якорной цепи ДПТ примет вид

$$U_{\beta} = c_{\phi} \omega + R_{\beta} I_{\beta}$$

Указание по технике безопасности:

Указание по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение .

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	ип	Параметры
-------------	--------------	----	-----------

G1	Трехфазный источник питания	01.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	06.1	– 0...250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель синхронной машины	09.2	– 0...40 В / 3,5 А
G5	Преобразователь угловых перемещений	04	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
G6	Машина переменного тока	02.1	100 Вт / ~ 230 В /1500 мин ⁻¹
M2	Машина постоянного тока	01.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
A4	Коннектор	30	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выходов; 8 цифр. входов / выходов
A5	Персональный компьютер	50	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI-6023E (PCI-6024E)
A6	Трехполюсный выключатель	01.1	~ 400 В / 10 А
A10	Активная нагрузка	06.1	220 В / 3×0...50 Вт;
A12	Блок датчиков тока и напряжения	02.3	3 датчика напряжения ±100; 1000 В / ±5 В; 3 датчика тока ±1; 5 А / ±5 В
A13	Реостат		2×0...100 Ом / 1 А

		23.2	
P3	Указатель частоты вращения	06.2	-2000...0...2000 мин ⁻¹

Описание электрических схем соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.(рис 9.3 (1,2,3);рис 9.4)

Источник питания G2 двигателя постоянного тока используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением и для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с параллельным / последовательным возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Синхронный генератор G6 питает активную нагрузку A10, выступая в качестве нагрузочной машины.

Реостат A13 ограничивает пусковой ток двигателя M2.

Выключатель A6 предназначен для шунтирования реостата A13 после разгона двигателя M2.

Датчики тока и напряжения в блоке A12 обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют ток и напряжение якорной обмотки испытуемого двигателя M2 в пропорциональные им нормированные напряжения.

Через аналоговые входы АСН0-АСН8, АСН1-АСН9, АСН2-АСН10, АСН3-АСН11 коннектора А4 напряжения, пропорциональные току и напряжению якорной обмотки, току обмотки возбуждения и частоте вращения испытуемого двигателя М2, вводятся в компьютер А5.

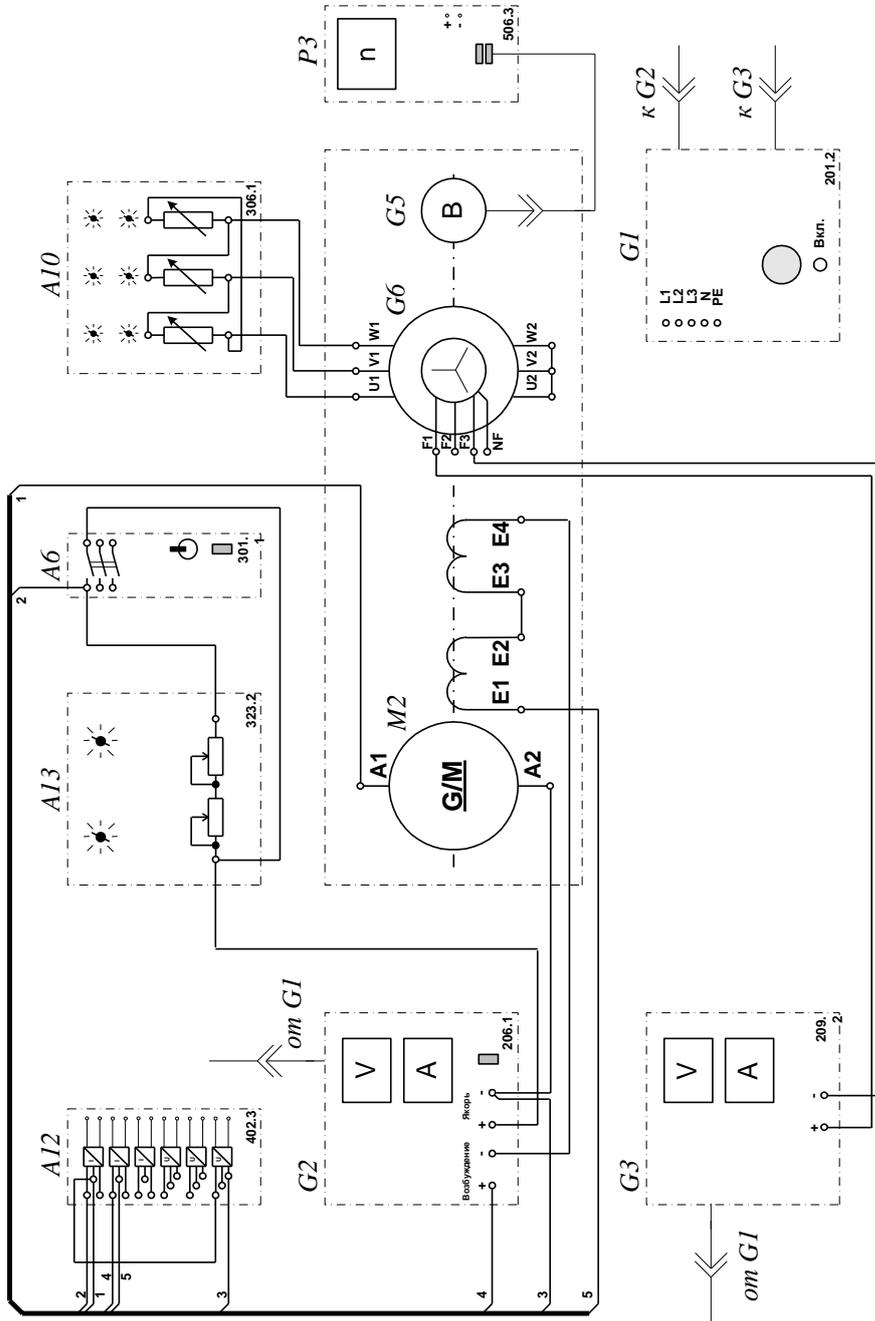


Рисунок 9.3 (1) -Электрическая схема соединений (вариант 1)

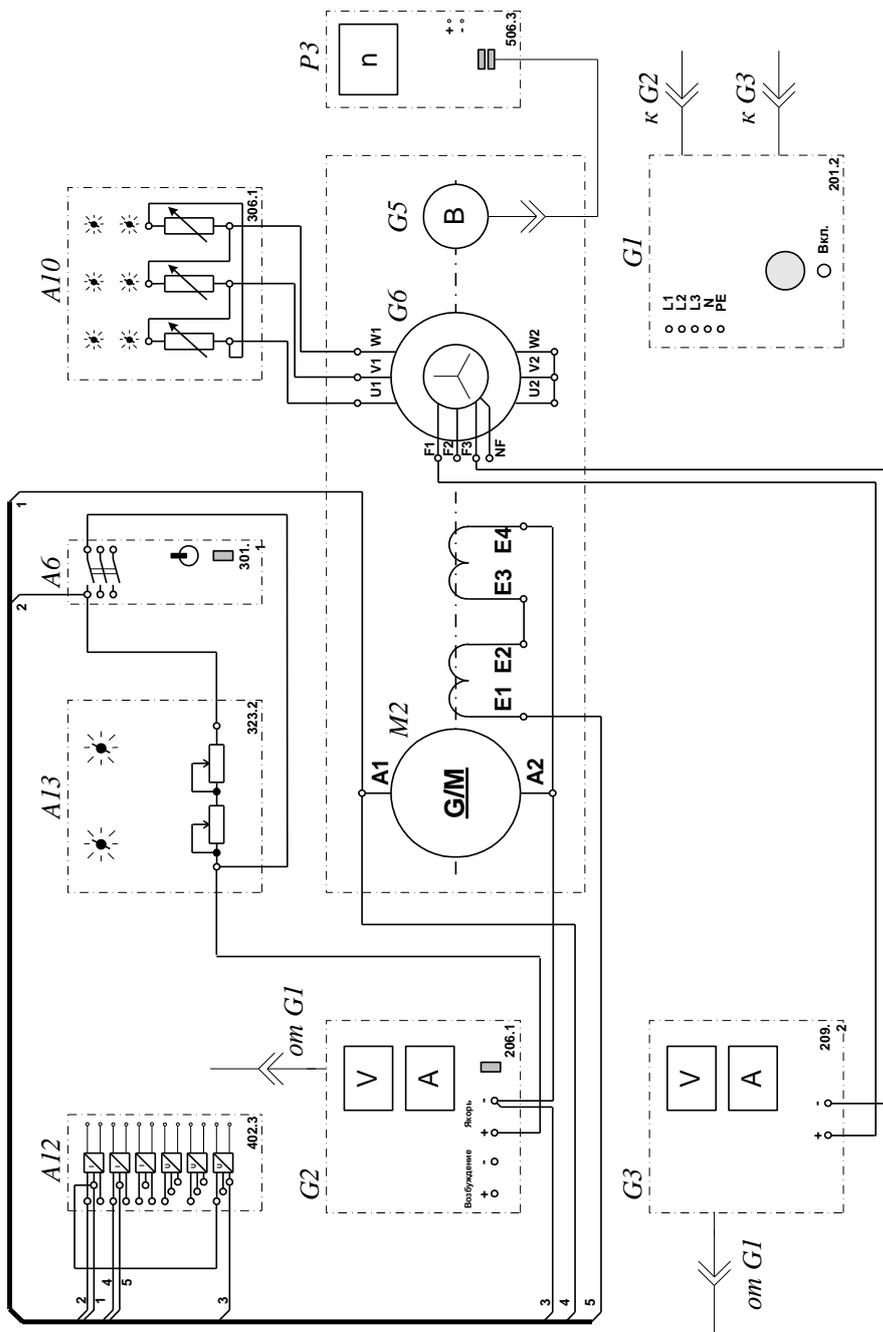


Рисунок 9.3(2) - Электрическая схема соединений (вариант 2)

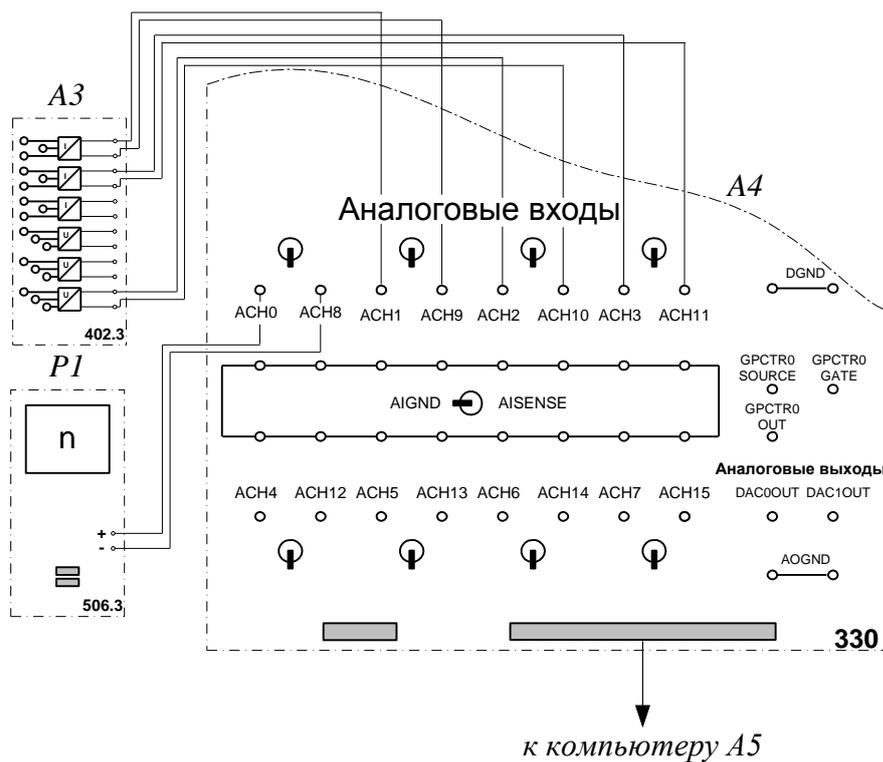


Рисунок 9.4 - Электрическая схема соединений (продолжение)

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (стр. 14).
- Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» трехфазного источника питания G1.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (**вариант 1 для исследования двигателя с независимым возбуждением**) / (**вариант 2 для исследования двигателя с параллельным возбуждением**) / (**вариант 3 для исследования двигателя с последовательным возбуждением**).

- Переключатели режима работы источника G2, возбудителя G3 и выключателя А6 установите в положение «РУЧН.».

- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.

- Установите суммарное сопротивление реостата А3 равным, например, 100 Ом.

- Установите в каждой фазе активной нагрузки А10 суммарную ее величину 100 %.

- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А5, и запустите прикладную программу «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока».

- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателя А6, блока датчиков тока и напряжения А12, указателя частоты вращения Р3.

- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

- Включите выключатель «СЕТЬ» источника G2 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе «ЯКОРЬ» напряжение, например, равное 200 В.

- Включите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение, например, равное 10 В.

- Нажмите на виртуальную кнопку «Запустить» на экране компьютера.

- Нажмите последовательно кнопки «ВКЛ.» возбудителя G3, источника G2, спустя, например, 2 с выключателя А6 и не позднее, чем через 10 с, остановите сбор данных нажатием на виртуальную кнопку «Остановить». В результате должен осуществиться двухступенчатый пуск нагруженного двигателя постоянного тока М2 и должны записаться в компьютер данные о режимных параметрах на интервале пуска.

- Остановите запись процессов, нажав на виртуальную кнопку «Остановить».

- Нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника G1.

- Отключите выключатель «СЕТЬ» возбудителя G3, источника G2, выключателя А6, блока датчиков тока и напряжения А12 и указателя частоты вращения Р3.

- Используя возможности программы «Регистратор режимных параметров машины постоянного тока», проанализируйте отображенные на мониторе компьютера механическую характеристику и временные зависимо-

сти тока якорной обмотки, электромагнитного момента, частоты вращения двигателя постоянного тока при пуске его в ход.

Определение механической характеристики $n=f(M)$ двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением

Определение механической характеристики $n=f(M)$ двигателя постоянного тока с независимым / параллельным / последовательным возбуждением

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	ип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	01.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	06.1	– 0...250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель синхронной машины	09.2	– 0...40 В / 3,5 А
G5	Преобразователь угловых перемещений	04	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
G6	Машина переменного тока	02.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин ⁻¹
M2	Машина постоянного тока	01.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)

A10	Активная нагрузка	06.1	220 В / 3×0...50 Вт;
P1	Блок мультиметров	08.2	3 мультиметра 0...1000 В / 0...10 А / 0...20 МОм
P3	Указатель частоты вращения	06.2	-2000...0...2000 мин ⁻¹

Описание электрических схем соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания G2 двигателя постоянного тока используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением и для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с параллельным / последовательным возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Синхронный генератор G6 питает активную нагрузку A10, выступая в качестве нагрузочной машины.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются напряжение и ток
 ток якорной обмотки двигателя M2.

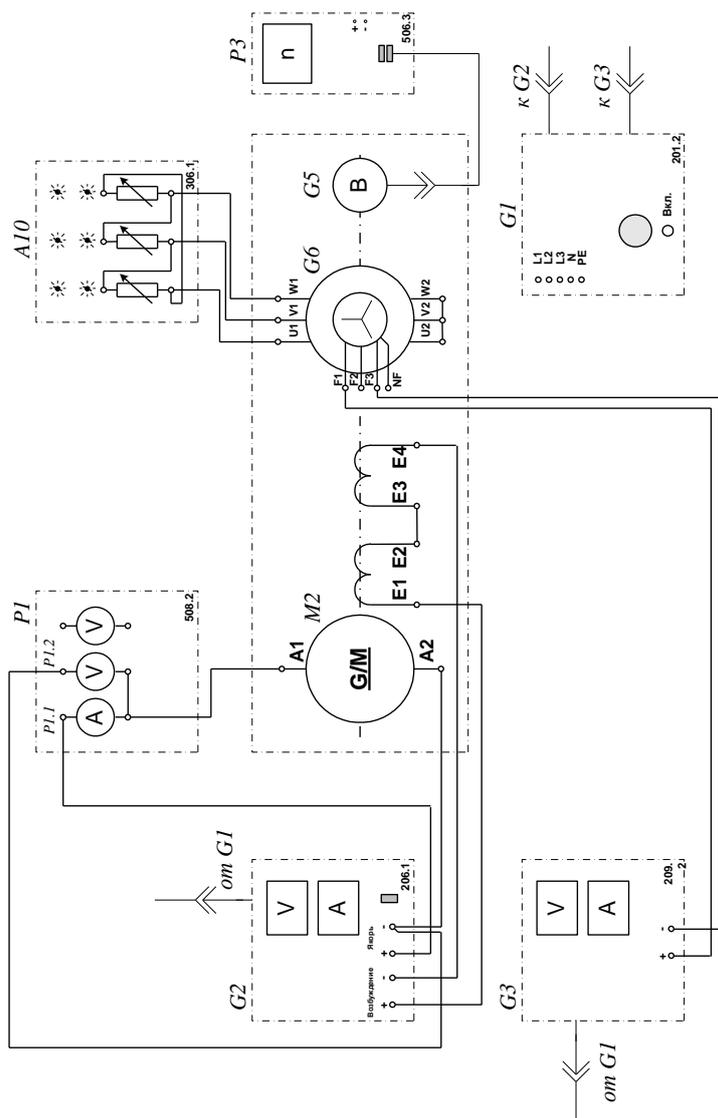


Рисунок 9.5 (1) -Электрическая схема соединений (вариант 1)

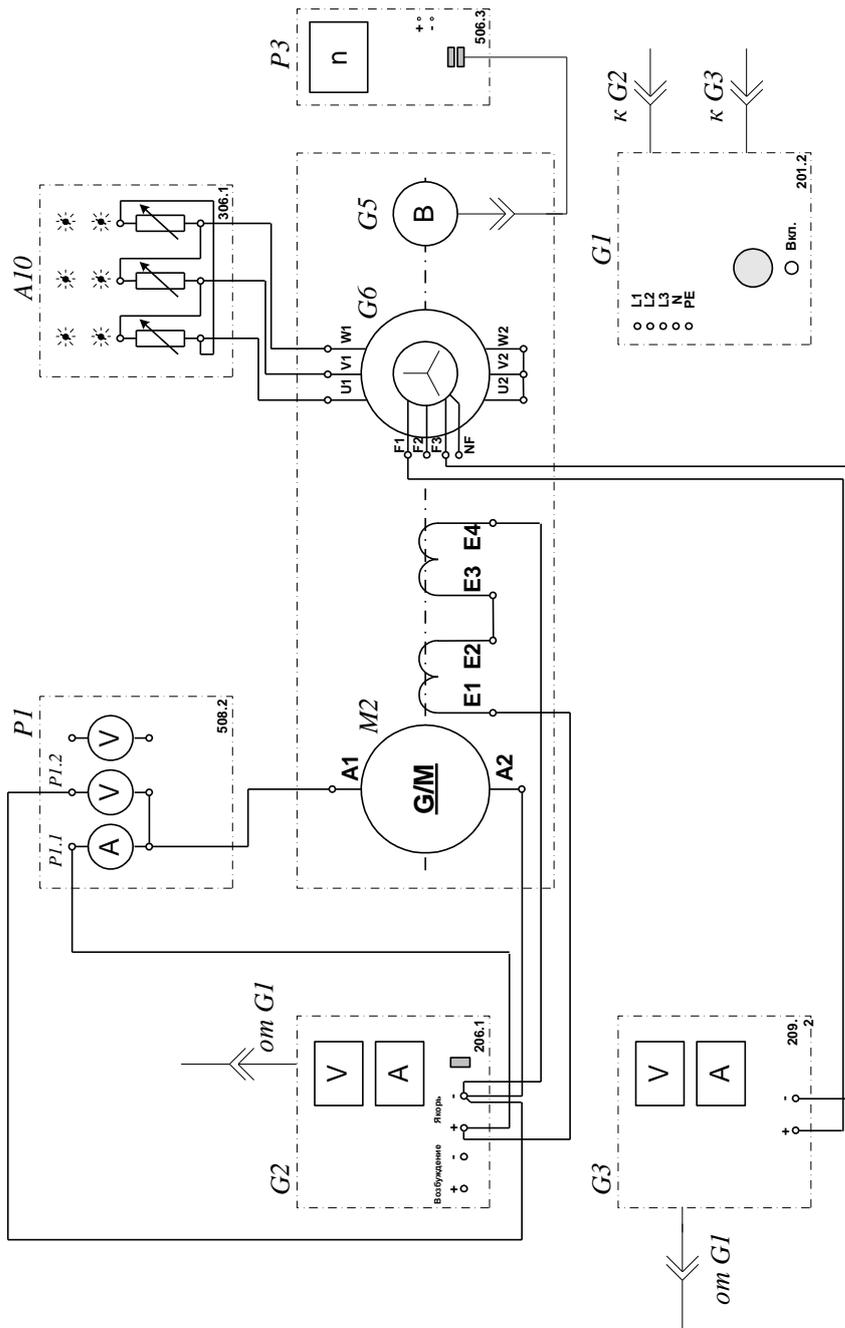


Рисунок 9.5(2)- Электрическая схема соединений (вариант 2)

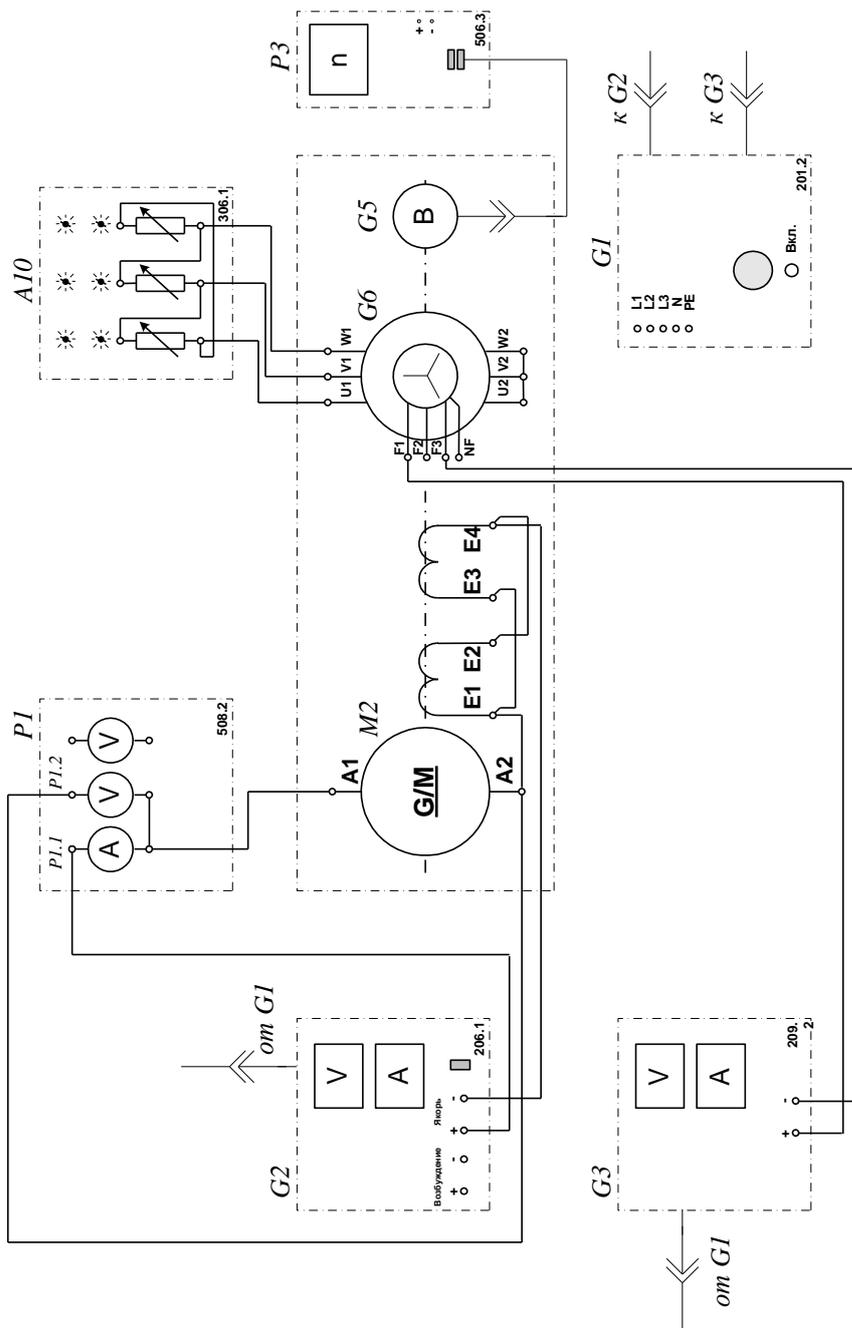


Рисунок 9.5(3)- Электрическая схема соединений (вариант 3)

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (Приложение Б).
- Соедините гнезда защитного заземления "" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений **(вариант 1 для исследования двигателя с независимым возбуждением) / (вариант 2 для исследования двигателя с параллельным возбуждением) / (вариант 3 для исследования двигателя с последовательным возбуждением).**
- Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 суммарную ее величину 100 %.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P3.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 до частоты вращения n , например, равной 1500 мин^{-1} .

Н·м										
------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

•Используя данные таблицы 3.2.2 постройте искомую статическую механическую характеристику $n=f(M)$ двигателя постоянного тока.

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	ип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	01.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	06.1	– 0...250 В / 3 А (якорь) / – 200 В / 1 А (возбуждение)
G3	Возбудитель синхронной машины	09.2	– 0...40 В / 3,5 А
G5	Преобразователь угловых перемещений	04	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
G6	Машина переменного тока	02.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин ⁻¹
M2	Машина постоянного тока	01.2	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
A10	Активная нагрузка	06.1	220 В / 3×0...50 Вт;
P1	Блок мультиметров	08.2	3 мультиметра 0...1000 В / 0...10 А / 0...20 МОм
P2	Измеритель мощностей	07.2	15; 60; 150; 300; 600 В / 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.

Р3	Указатель частоты вращения	06.2	мин ⁻¹	-2000...0...2000
----	----------------------------	------	-------------------	------------------

Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.(рис 9.6)

Источник питания G2 двигателя постоянного тока используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока M2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока G6, работающей в режиме синхронного генератора.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения Р3 электромашинного агрегата.

Синхронный генератор G6 питает активную нагрузку А10, выступая в качестве нагрузочной машины.

Измеритель мощностей Р2 служит для измерения активной мощности синхронного генератора G6.

С помощью мультиметров блока Р1 контролируются интересующие напряжения и токи.

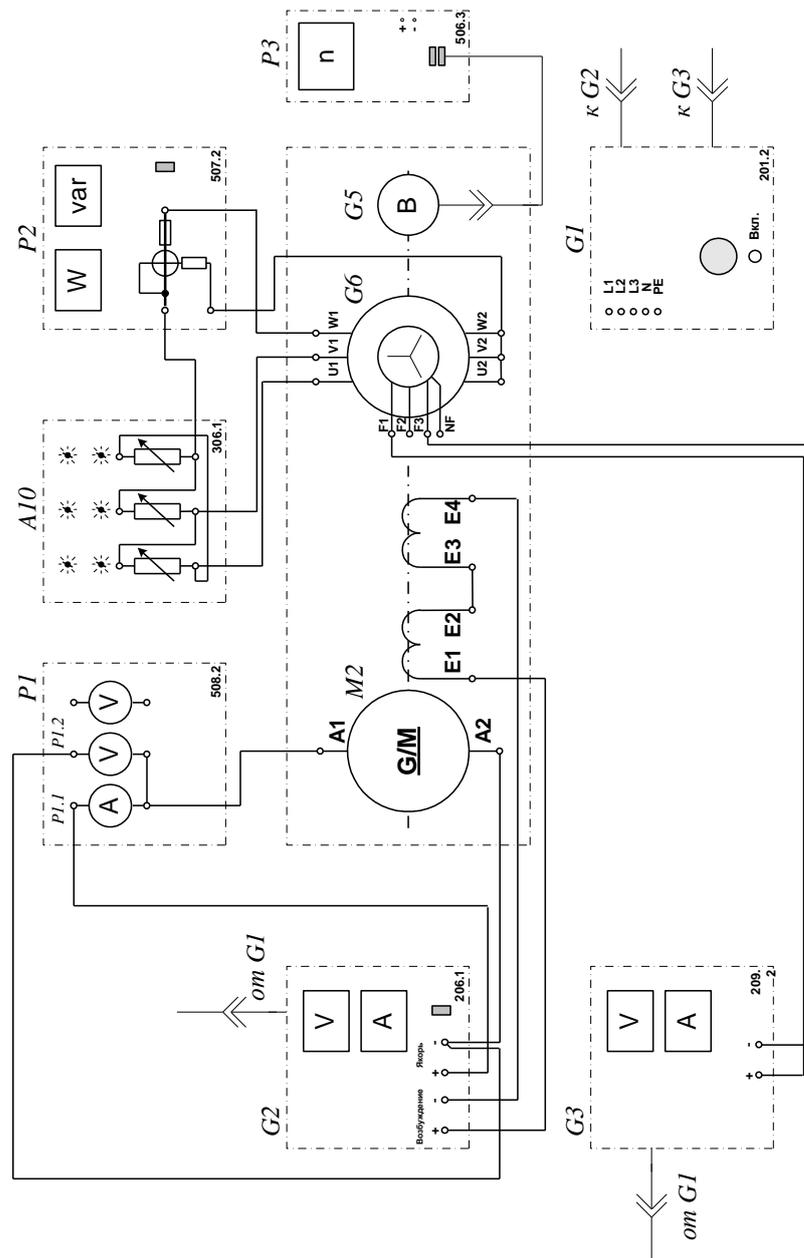


Рисунок 9.6- Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока.
- Соедините гнезда защитного заземления "III" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений. (Приложение Б)
- Переключатели режима работы источника G2 и возбудителя G3 установите в положение "РУЧН."
- Регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора.
- Установите в каждой фазе активной нагрузки A10 суммарную ее величину 100 %.
- Измерьте одним из мультиметров активное сопротивление r_c статорной обмотки генератора G6 (должно быть примерно равно 21 Ом).
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и измерителя мощностей P2.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, разгоните двигатель M2 до частоты вращения n , например, равной 1500 мин^{-1} .
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя G3.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток якоря $I_{я}$ двигателя M2 в диапазоне $0 \dots 1 \text{ А}$ и заносите показания ваттметра измерителя P2 (активная мощность P'_2 , потребляемая одной фазой синхронного генератора G6), амперметра P1.1 (ток $I_{я}$), вольтметра P1.2 (напряжение $U_{я}$ якорной обмотки двигателя M2), вольтметра P1.3 (напряжение возбуждения U_f двигателя M2) и указателя P3 (частота вращения n) в таблицу 1..

Таблица 1.3.

P'_2 , Н·м										
$I_{я}$, А										
$U_{я}$, В										
U_f , В										
n , мин^{-1}										

- По завершении эксперимента сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой

стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб.

•Используя данные таблицы 1.3 и измеренное значение активного сопротивления r_f обмотки возбуждения двигателя M2 для каждого значения частоты вращения n вычислите и занесите в табл. 3.3.2 значения:

– полезной активной мощности двигателя M2 по формуле

$$P_2 = 3P_2', \text{ [Вт];}$$

– активной мощности, потребляемой из сети двигателем M2

$$P_1 = U_{я} I_{я} + \frac{U_f^2}{r_f}, \text{ [Вт];}$$

– электромагнитного момента двигателя M2 по формуле

$$M = \frac{60}{2\pi n} (U_{я} - 65 I_{я}) I_{я}, \text{ [Н} \cdot \text{м];}$$

– коэффициента полезного действия двигателя M2 по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100, \text{ [%],}$$

Таблица 1.4.

nn, мин⁻¹										
PP₂, Вт										
PP₁, Вт										
MM, Н·м										
ηn, %										

•Используя данные таблицы 1.4 постройте искомые рабочие характеристики $n = f(P_2)$, $M = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ двигателя постоянного тока.

Контрольные вопросы

1. Составьте уравнения цепи обмотки возбуждения и якоря.
2. Выведите выражения ЭМХ и МХ ДПТ.
3. Какие характеристики ДПТ называются естественными, а какие искусственными?
4. Как влияют дополнительные сопротивления $R_{д\dot{я}}$ и $R_{д\dot{в}}$ на наклон и частоту холостого хода ЭМХ и МХ?
5. Приведите выражения ЭМХ и МХ в общем виде.
6. Приведите выражения ЭМХ и МХ для линейного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.
7. Приведите выражения ЭМХ и МХ для насыщенного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.
8. Какие недостатки и достоинства имеют серийные ДПТ?
9. Какие способы включения шунтовой и серийной обмоток применяются в компаундном ДПТ?
10. Поясните особенности МХ компаундного ДПТ с параллельно-последовательным возбуждением.
11. Поясните особенности МХ компаундного ДПТ с последовательно-параллельным возбуждением.

Приложение А

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

13. Категорически запрещается:

– трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;

– производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;

– заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест

– без разрешения преподавателя или лаборанта;

– отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;

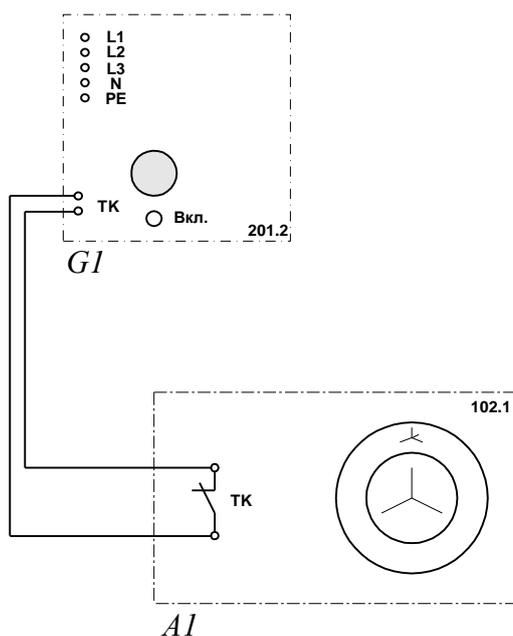
– перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни

Приложение Б

Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока



Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
A1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / 230 В ~ / 1500 мин⁻¹
G1	Трехфазный источник пита- ния	201.2	400 В ~ / 16 А

Перечень основной и дополнительной литературы

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>