

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна
Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета
Дата подписания: 23.08.2023 17:16:38
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

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

№ п/п	Стр.
	Введение
1.	Цель и задачи изучения дисциплины
2.	Оборудование и материалы
3.	Наименование лабораторных работ
4.	Содержание лабораторных работ
4.1	Лабораторная работа № 1. Опыт холостого хода трансформатора. Опыт короткого замыкания трансформатора.
4.2	Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента трансформации трансформатора.
4.3.	Лабораторная работа №3. Регистрация и отображение на компьютере тока включения однофазного трансформатора на холостом ходу.
4.4	Лабораторная я работа №4. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания однофазного трансформатора.
4.5	Лабораторная работа №5. Определение группы соединений обмоток трехфазного трансформатора.
4.6	Лабораторная работа № 6. Определение уравнительного тока, вызванного неравенством коэффициентов трансформации.
4.7	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.
4.8	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.
4.9	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.
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
5.2	Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
5.3	Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Введение

Лабораторные занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины «электрические машины», использование специального лабораторного оборудования и технических средств. Лабораторные занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Лабораторные занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении экспериментальных задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью лабораторных занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Дисциплина «Электрические машины» изучается студентами, обучающимися по направлению подготовки бакалавриата «13.03.02 Электроэнергетика и электротехника».

Целью изучения дисциплины является ознакомление студентов с основами теории и эксплуатационными характеристиками электрических машин и трансформаторов, а также теоретической базы и знаний в области электромеханического и статистического преобразования энергии, принципа действия основных видов электрических машин и трансформаторов и особенностей их применения.

Исходя из поставленных целей, задачами изучения дисциплины являются:

- получение практических навыков эксплуатации, и проектирования электрических машин в составе объектов электроэнергетики;
- знание материалов, применяемых при производстве генераторов и электрических двигателей;
- умение предотвращения аварии и выхода из строя электрической машины;
- умение принимать и обосновывать конкретные технические решения конструирования электроэнергетического оборудования.

2. Оборудование и материалы

Комплект учебно-лабораторного оборудования

«Энергосбережение в системах электроснабжения и электропотребления». Комплект учебно-лабораторного оборудования

«Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии». Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электрические станции и подстанции». Комплект учебно-лабораторного оборудования «Умная местная распределительная электрическая сеть». Научно-исследовательский комплекс «Оптимизация режимов работы электрических сетей с активными элементами, выполненными на базе силовых полупроводниковых преобразователей», исполнение стендовое компьютерное. Научно-исследовательский комплекс «Автоматизированные средства управления и защиты в системах электроснабжения промышленных предприятий», исполнение стендовое компьютерное. Научно-исследовательский комплекс

«Применение автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии с целью повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения», исполнение стендовое ручное. Комплект типового лабораторного оборудования «Теоретические основы электротехники». Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электротехнические материалы». Комплект типового лабораторного оборудования "Электротехнические машины». Комплект типового лабораторного оборудования Электротехнические машины». Лабораторное оборудование «Электроэнергетика-релейная защита и автоматика». Учебный стенд «Теория электрических цепей и основы электротехники».

3. Наименование лабораторных работ

№ Темы	ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна	и, их	Объем часов	Из них практическая подготовка,
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022				

			часов
4 семестр			
1	Лабораторная работа № 1. Опыт холостого хода трансформатора. Опыт короткого замыкания трансформатора Освоить методику проведения опыта холостого хода, опыта короткого замыкания.	1,5	—
2	Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента трансформации трансформатора Изучить способы определения коэффициента трансформации	1,5	—
3	Лабораторная работа № 3. Регистрация и отображение на компьютере тока включения однофазного трансформатора на холостом ходу Изучить особенности токов включения однофазного трансформатора на холостом ходу	—	—
4	Лабораторная работа № 4. Регистрация и отображение на компьютере тока короткого замыкания однофазного трансформатора Изучить кривые токов короткого замыкания однофазного трансформатора	—	—
5	Лабораторная работа № 5. Определение группы соединений обмоток трехфазного трансформатора. Изучить работу трансформаторов с различными группами соединения	—	—
6	Лабораторная работа № 6. Определение уравнивающего тока, вызванного неравенством коэффициентов трансформации. Изучить условия появления уравнивающего тока	—	—
7	Лабораторная работа № 7. Возбуждение самовозбуждение генератора постоянного тока	—	—
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН и отображением ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022			

	компьютере тока короткого замыкания генератора постоянного тока с параллельным возбуждением. 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		
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. 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	—	—
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 $n=f(M)$	—	—

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	/ параллельным / последовательным возбуждением. Определение рабочих характеристик $n=f(P_2)$, $M=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$ двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. 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.		
Итого 4 семестр		3	—
5 семестр			
19	Лабораторная работа №10. Пуск в ход трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым/фазным ротором и отображение режимных параметров на компьютере. Изучить режимы пуска в ход АД	1,5	—
20	Лабораторная работа № 11. Снятие и определение характеристик холостого хода $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$ и $\cos\varphi_0=f(U)$ трехфазного АД с короткозамкнутым ротором. Снятие и определение характеристик короткого замыкания $I_K=f(U)$, $P_K=f(U)$, $Z_K=f(U)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Снять и определить характеристики холостого хода.	1,5	—
21	Лабораторная работа № 12. Определение механической характеристики $n=f(M)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым / фазным ротором. Определение рабочих характеристик $I=f(P_2)$, $P_1=f(P_2)$, $s=f(P_2)$, $n=f(P_2)$.	—	—

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	короткозамкнутым / фазным ротором. Провести эксперимент и построить механическую характеристику АД.		
22	Лабораторная работа № 13. Снятие характеристики холостого хода $E_o = f(I_b)$ трехфазного синхронного генератора. Снятие характеристики короткого замыкания $I_{lk} = f(I_b)$ трехфазного синхронного генератора. Определить характеристики холостого хода $E_o = f(I_b)$ трехфазного синхронного генератора. Определить характеристики короткого замыкания $I_{lk} = f(I_b)$ трехфазного синхронного генератора	—	—
23	Лабораторная работа № 14. Снятие внешней $U = f(I_l)$, регулировочной $I_b = f(I_l)$ и нагрузочной характеристик трехфазного синхронного генератора в автономном режиме. Определить внешние $U = f(I_l)$, регулировочные $I_b = f(I_l)$ и нагрузочные характеристики трехфазного синхронного генератора в автономном режиме.	—	—
24	Лабораторная работа № 15. Подключение к сети трехфазного синхронного генератора методом точной синхронизации. Подключить к сети трехфазный синхронный генератор методом точной синхронизации.	—	—
25	Лабораторная работа № 16. Снятие угловых характеристик $P = f(\theta)$, $Q = f(\theta)$, $U = f(\theta)$ трехфазного синхронного генератора. Снятие U – образной характеристики $I = f(I_b)$ трехфазного синхронного генератора. Определить угловые характеристики $P = f(\theta)$, $Q = f(\theta)$, $U = f(\theta)$ трехфазного синхронного генератора.	—	—
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Регистрация и отображения на компьютере тока		—	—
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022			

	трехфазного короткого замыкания синхронного генератора. Рассмотреть регистрацию и отображение на компьютере тока трехфазного короткого замыкания синхронного генератора		
27	Лабораторная работа №18. Пуск в ход трехфазного синхронного двигателя с регистрацией и отображением режимных параметров на компьютере. Снятие угловых характеристик $P=f(\delta)$, $Q=f(\delta)$, $U=f(\delta)$ синхронного двигателя. Снятие U–образной характеристики $I=f(I_f)$ трехфазного синхронного двигателя. Определить угловые характеристики $P=f(\delta)$, $Q=f(\delta)$, $U=f(\delta)$ синхронного двигателя. Определить U–образные характеристики $I=f(I_f)$ трехфазного синхронного двигателя.	—	—
Итого за 5 семестр:		3	—
Итого		6	—

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа №1

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

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

Теоретическая часть:

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

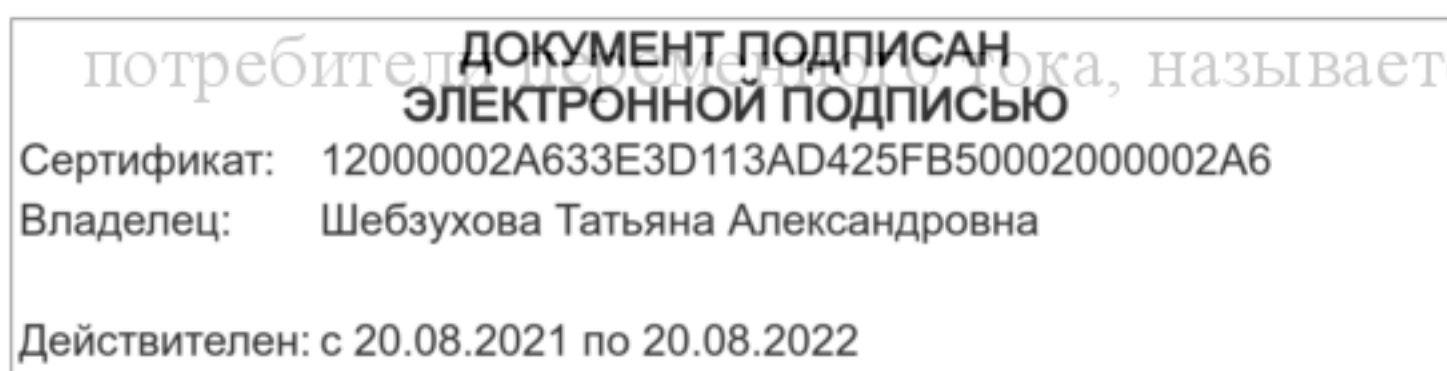
Так как электрическая энергия на пути от источника до потребителя несколько раз трансформируется, то установленная мощность всех трансформаторов в несколько раз превышает суммарную мощность всех источников электроэнергии.

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 электротехническим 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 потребитель 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 $\phi_0 = \Phi_{0m} \cdot \cos \omega t$.

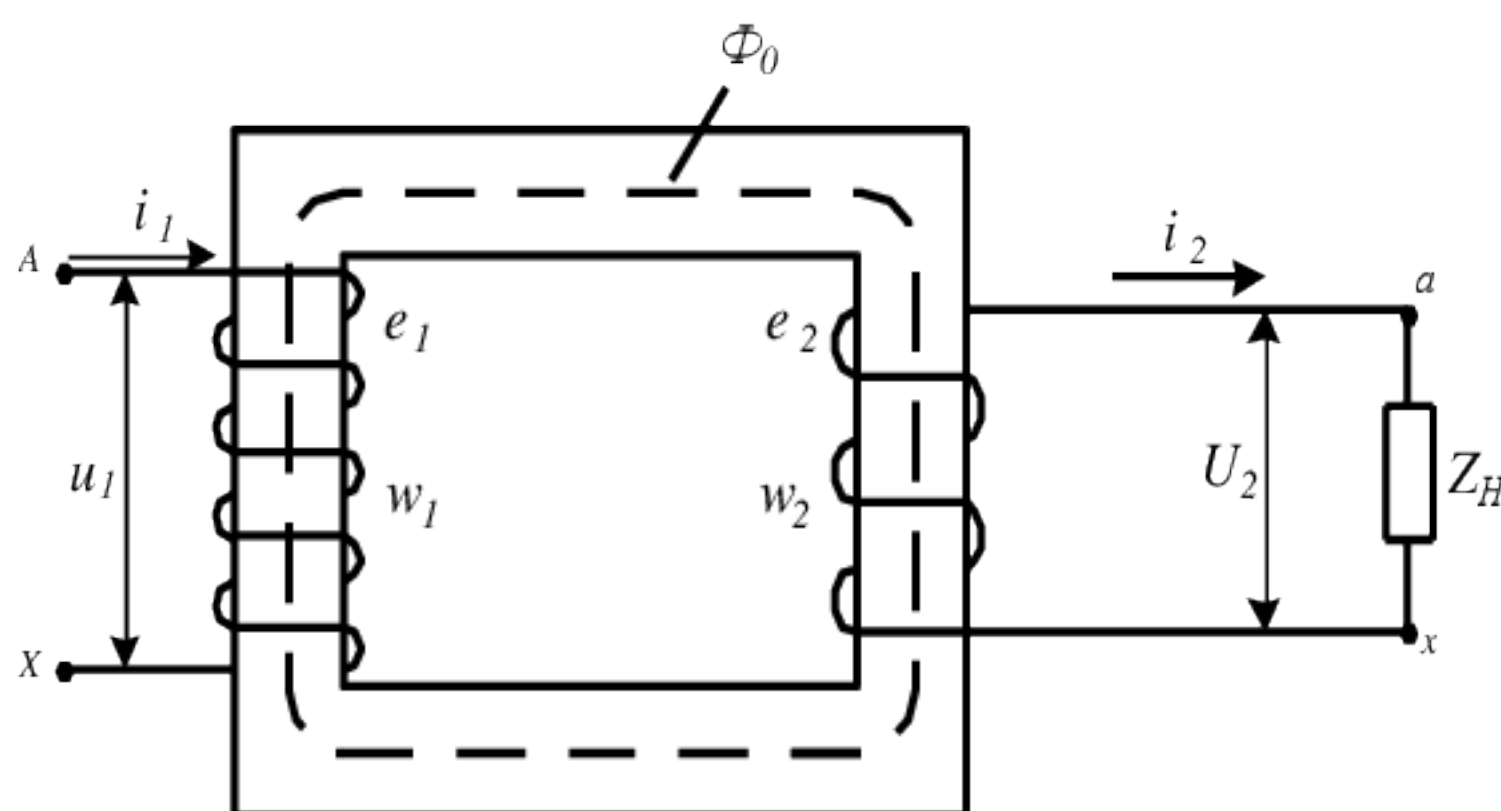


Рисунок 1.1 - Схема трансформатора

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

возникнут затруднения с выбором масштаба 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 $U_2' = \kappa U_2 = U_1$ и $w_2' = \kappa w_2 = w_1$, то ток I_2' определится из условия постоянства потокосцеплений $I_2 w_2 = I_2' w_2'$, откуда

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

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

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

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

Аналогично, $x_2' = \kappa^2 x_2$ и $z_2' = \kappa^2 z_2$.

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:

$$F_o = I_o w_1,$$

где ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 :

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

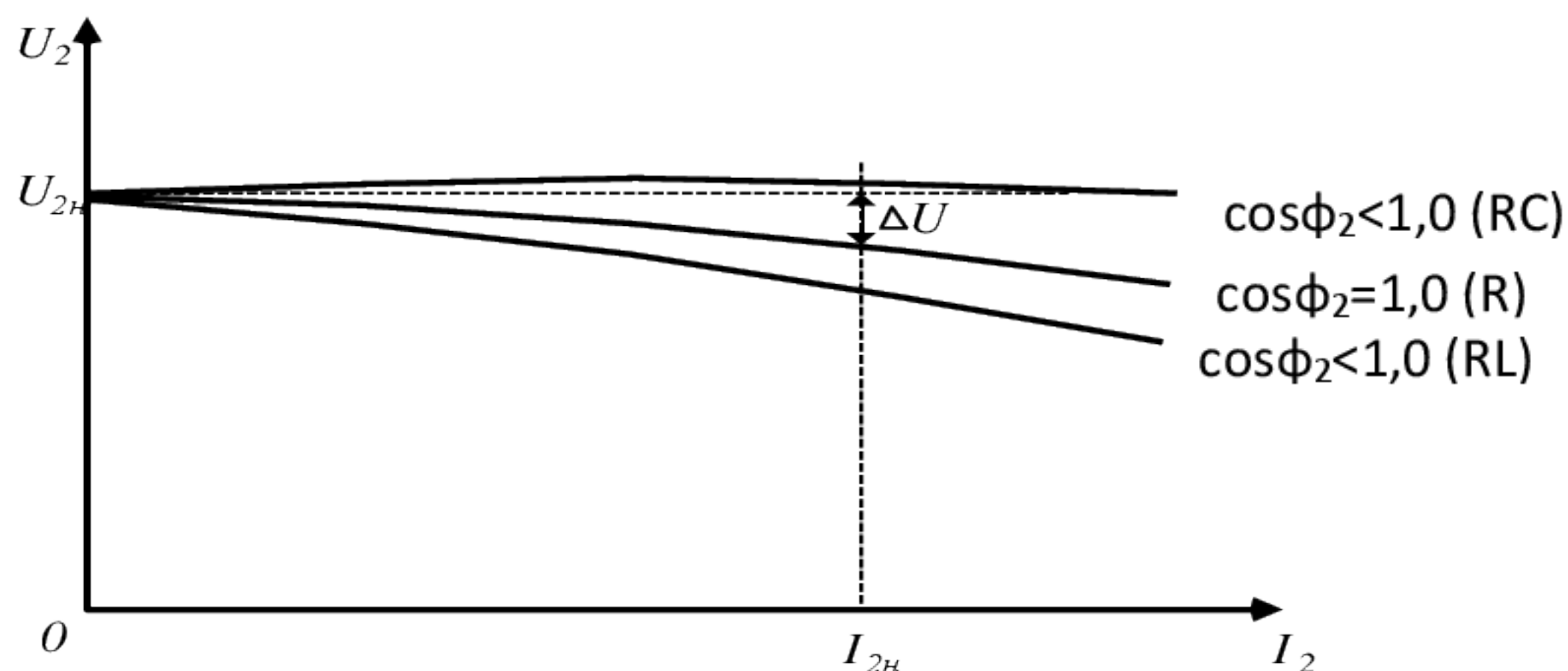


Рисунок 1.2 – Внешняя характеристика трансформатора

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. 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:

$$\Delta U = \beta \cdot (U_{\kappa a} \cdot \cos \varphi_2 + U_{\kappa p} \cdot \sin \varphi_2),$$

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

$U_{\kappa p} = I_{1H} \cdot x_K$ - 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 мощных 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).

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

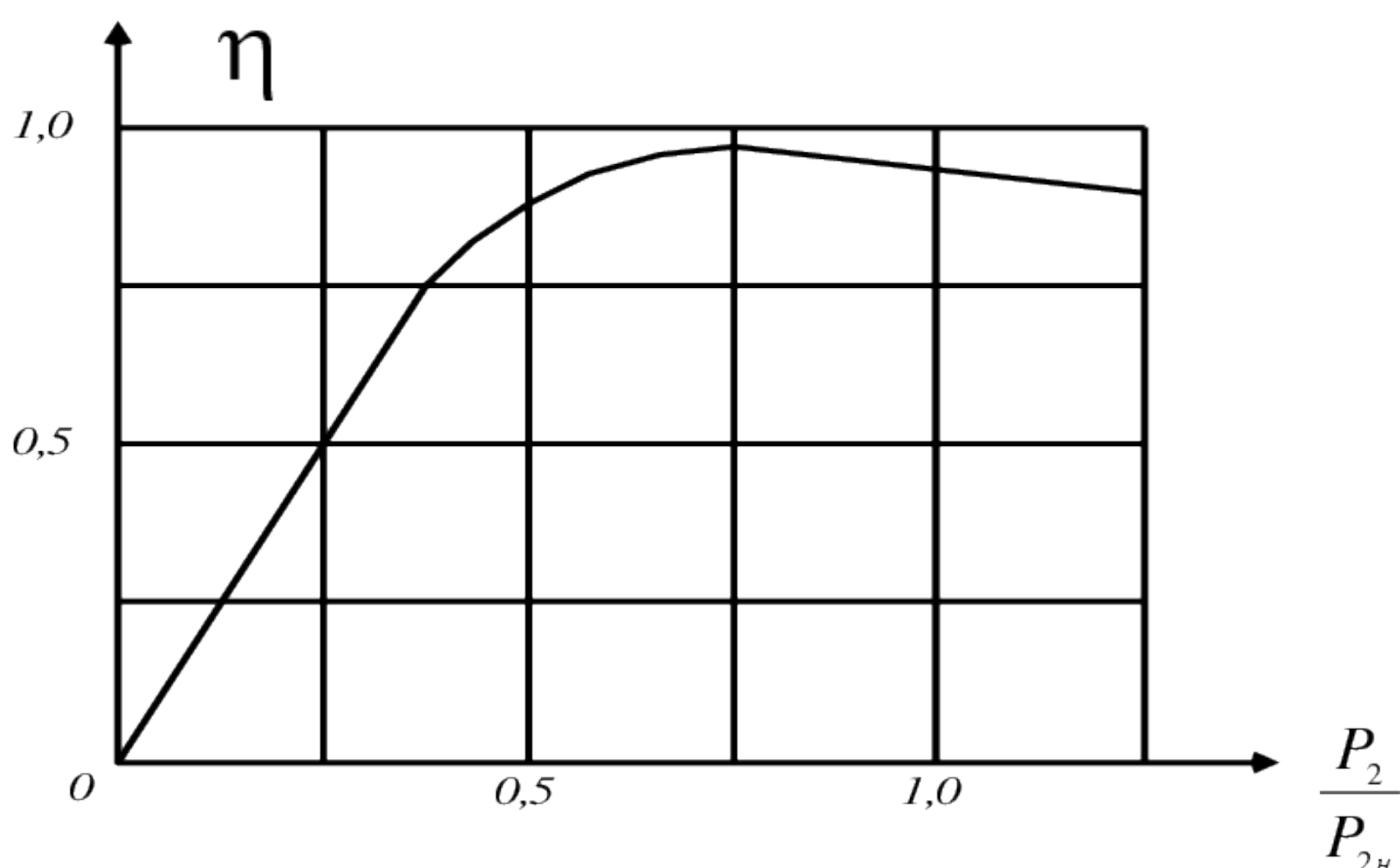


Рисунок 1.3 – Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

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 $U_{1ном}$.

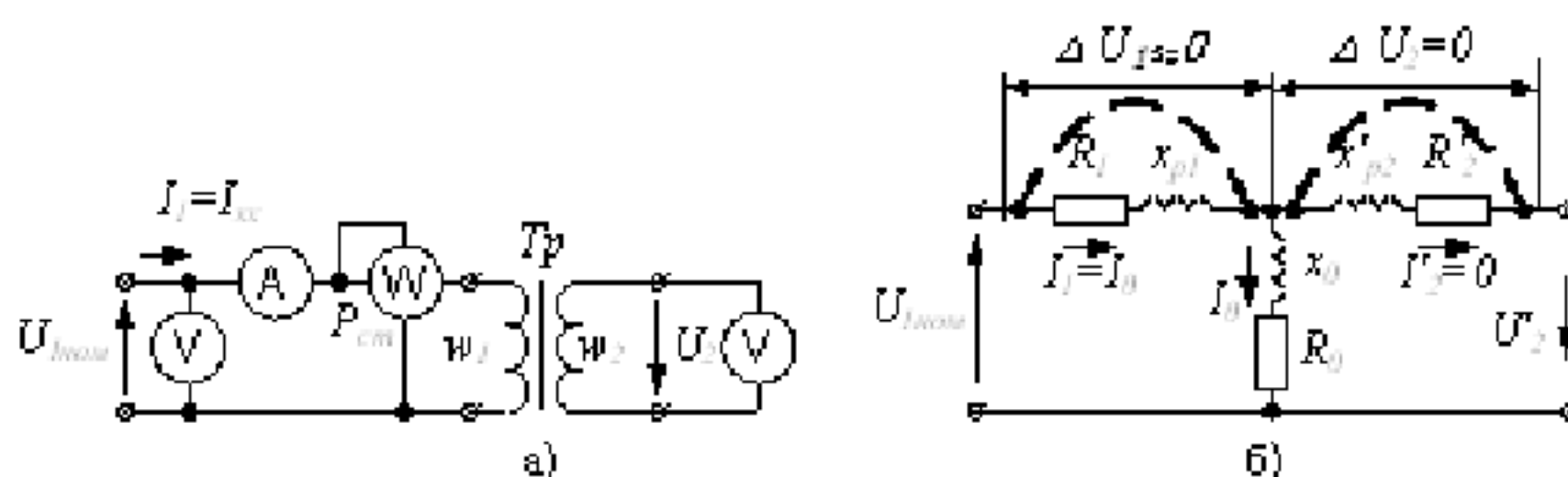


Рисунок 1.4 – Электрическая схема(а) опыта холостого хода и схема замещения трансформатора для опыта

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

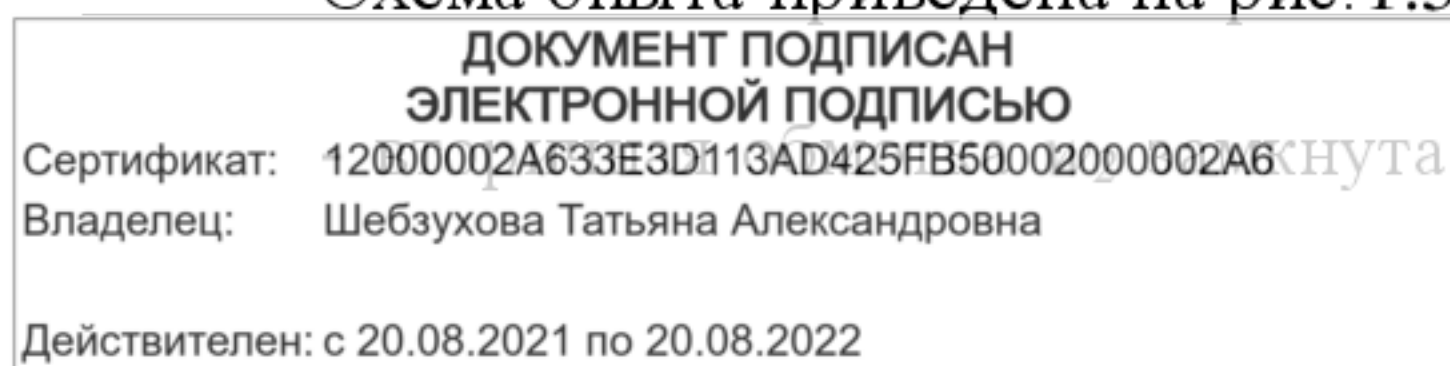
$$R_0 = \frac{P_1}{I_1^2}, \quad z_0 = \frac{U_1}{I_1}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}$$

- 2) коэффициент трансформации

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

Опыт короткого замыкания.

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



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 $I_{2ном}$.

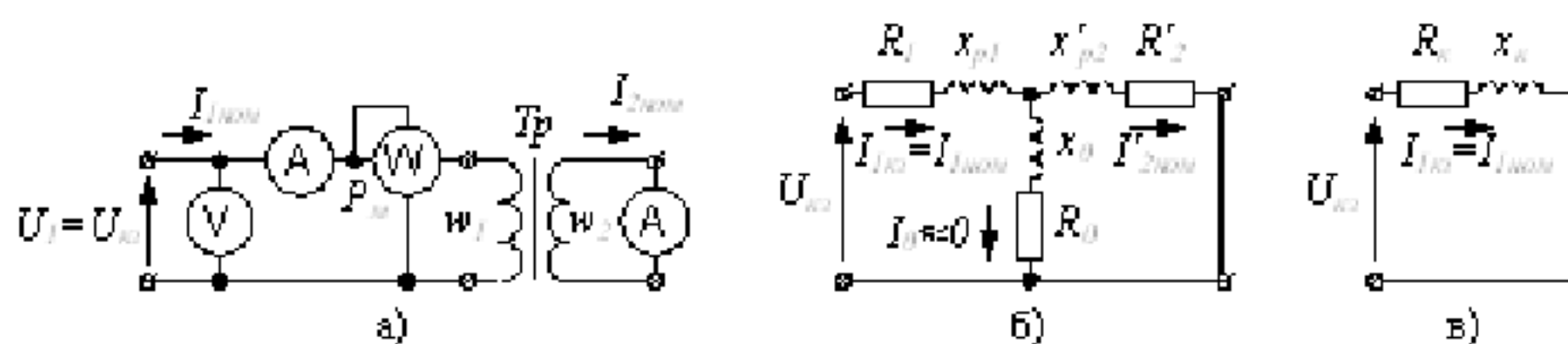


Рисунок 1.5 – Принципиальная электрическая схема (а) опыта короткого замыкания и схемы замещения (б,в) трансформатора для опыта

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 электрическую схему (рис. 1.5,в) для опыта короткого замыкания.

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

Описание электрической схемы соединений:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН	
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из

однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы A2 является испытуемым. С помощью мультиметров блока P1 контролируется ток и напряжение первичной обмотки испытуемого трансформатора. С помощью измерителя P2 контролируется активная и реактивная мощности, потребляемые испытуемым трансформатором.

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

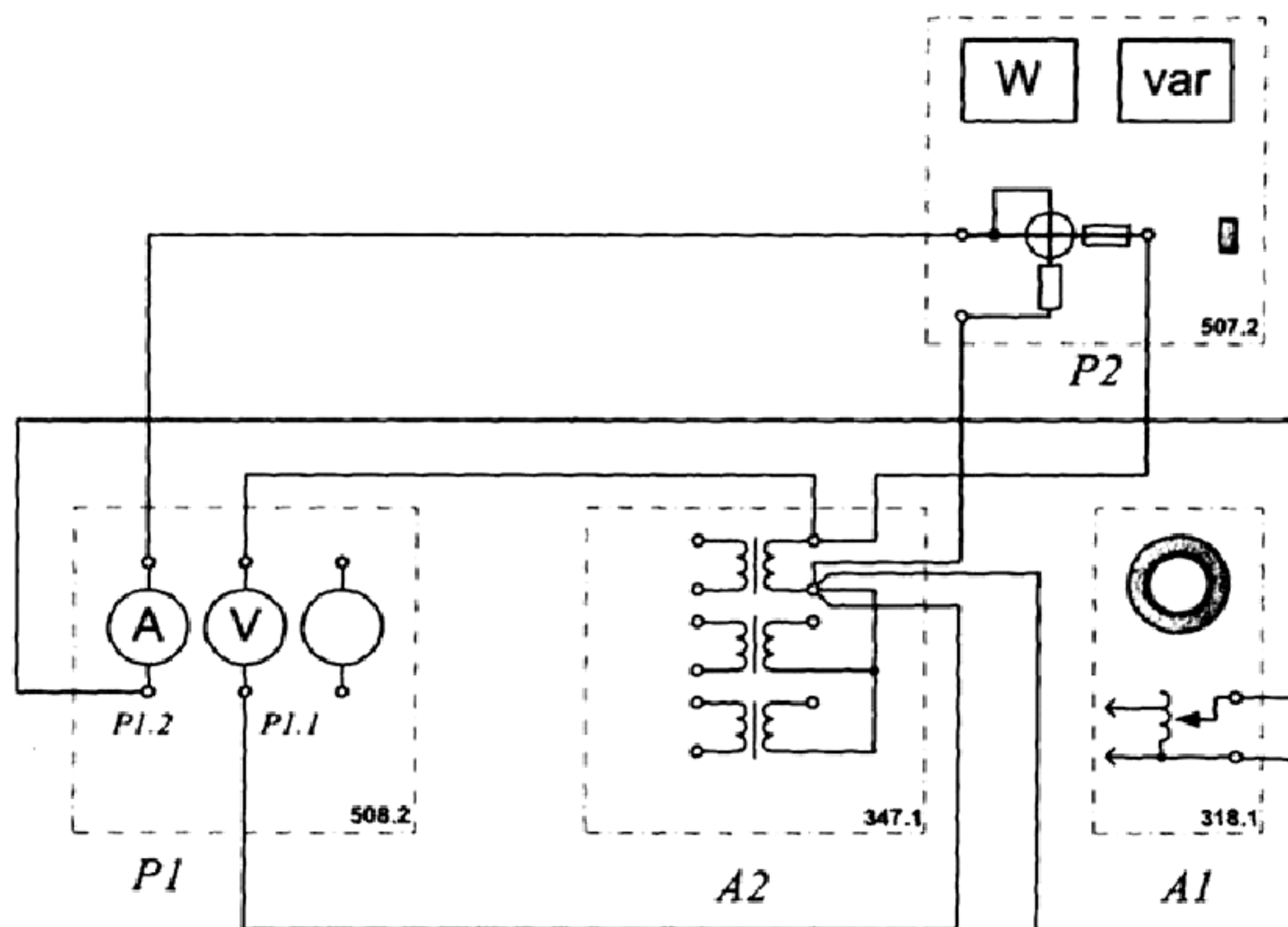


Рисунок 1.6 – Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента:

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

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

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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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, изменяйте 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 I_0 первичной обмотки трансформатора), а также ваттметра и варметра измерителя Р2 (активная P_0 и реактивная Q_0 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										

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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	$\sim 0 \dots 240 \text{ В} / 2 \text{ А}$
A2	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	$3 \times 80 \text{ В} \cdot \text{А};$ $230 \text{ В} / 242, 235, 230, 226,$ $220, 133, 127 \text{ В}$
A13	Реостат	323.2	$2 \times 0 \dots 100 \text{ Ом} / 1 \text{ А}$
P1	Блок мультиметра	508.2	3 мультиметра $\sim 0 \dots 1000 \text{ В} / \sim 0 \dots 10 \text{ А} /$ $0 \dots 20 \text{ МОм}$
P2	Измеритель мощностей	507.2	$15; 60; 150; 300; 600 \text{ В} /$ $0,05; 0,1; 0,2; 0,5 \text{ А}.$

Описание электрической схемы соединений:

Автотрансформатор A1 используется в качестве регулируемого источника синусоидального напряжения промышленной частоты. Один из однофазных трансформаторов трехфазной трансформаторной группы A2 является испытуемым. Реостат A13 ограничивает темп роста тока в обмотках испытуемого трансформатора. С помощью мультиметров блока P1 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)

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

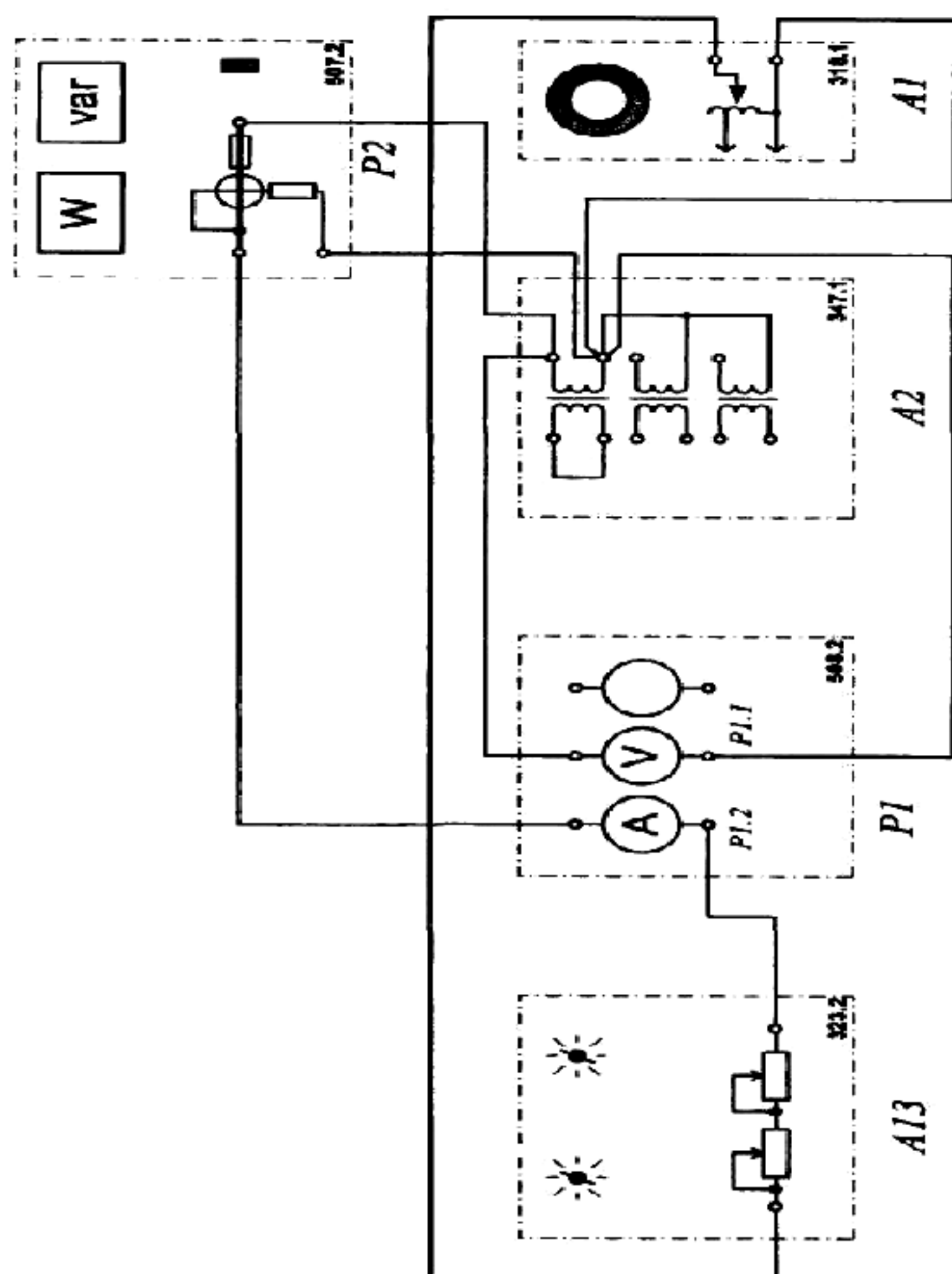
эксперимента:

- 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 «220 В» автотрансформатора А1 с розеткой однофазной **трехпроводной** электрической сети питания напряжением 220 В.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

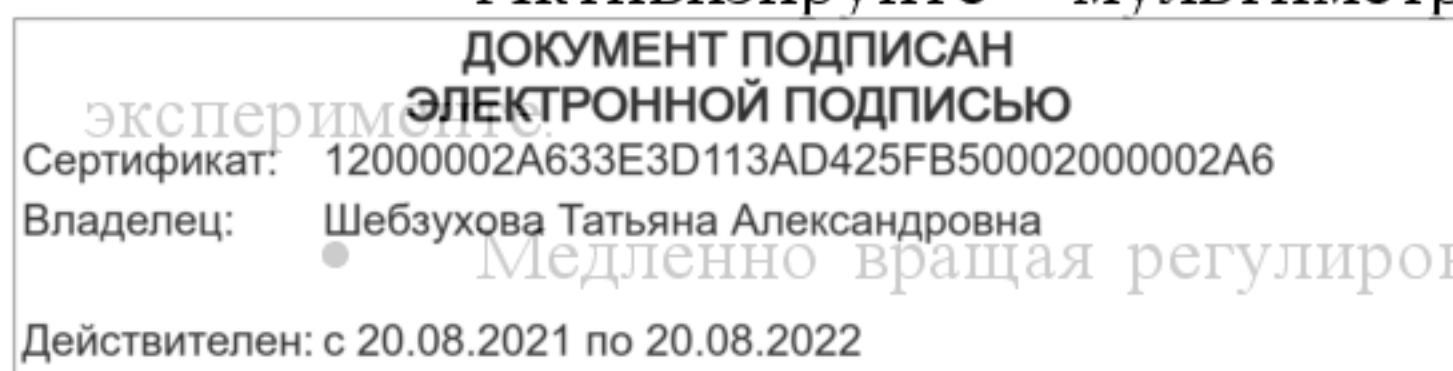
- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.

В трехфазной трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.

- Установите суммарное сопротивление реостата А13 равным, например, 100 Ом.

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

- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в



- Медленно вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора

А1 по часовой стрелке, увеличивайте ток I_k первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора до тех пор пока показания амперметра Р 1.2 не достигнут **0,5 А (не более!)** и заносите показания амперметра Р1.2 (ток I), вольтметра Р1.1 (напряжение U), а также ваттметра и варметра измерителя Р2 (активная P_k и реактивная Q_k **МОЩНОСТИ** , потребляемые трансформатором) в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

I_k, A										
U, B										
$P_k, Bт$										
$Q_k, Bт$										

- Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя данные таблицы 10.1, вычислите соответствующие напряжению U значения коэффициента мощности по формуле

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{P_k^2 + Q_k^2}};$$

Занесите полученные результаты в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

U, B										
$\cos \varphi_k$										

- 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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа №2

Тема: Определение коэффициента трансформации трансформатора

Цель работы: изучить способы определения коэффициента трансформации

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).

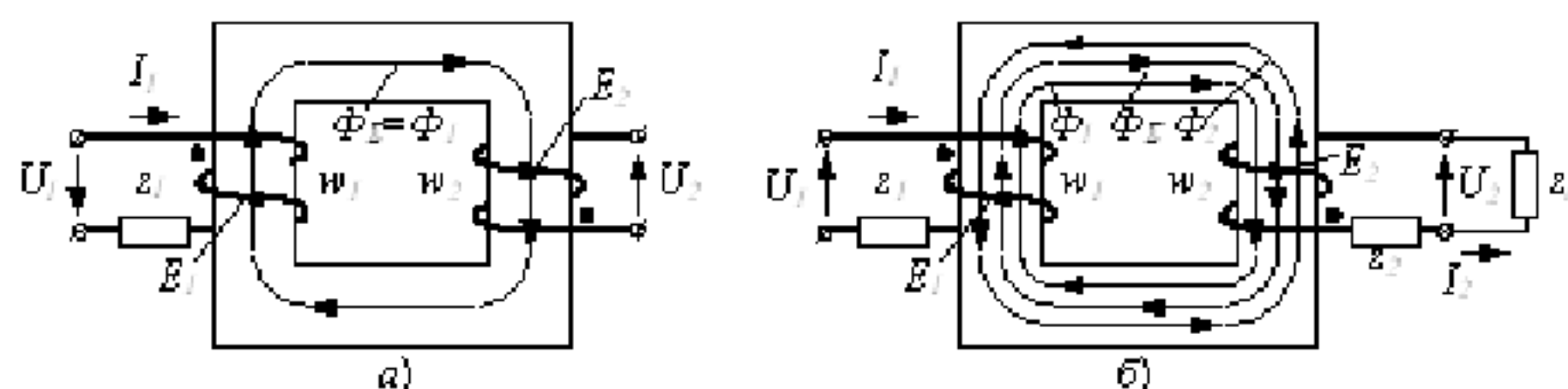


Рисунок 2.1 – Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход (а) и работа под нагрузкой (б)

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

Первичная обмотка w_1 подключена к сети с напряжением U_1 и так как из

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сети и обмотки разомкнутая цепь, то по обмотке потечет переменный ток I_1 . Переменный ток I_1 создаст в катушке переменное магнитное поле Φ_1 ,

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 обоих обмоток и, поэтому, в каждом витке обмоток индуцируется одинаковая по величине э.д.с., которую обозначим как $E_{\text{вит}}$. Э.д.с. обмоток будут прямо пропорциональны числам их витков w_1 и w_2 :

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

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

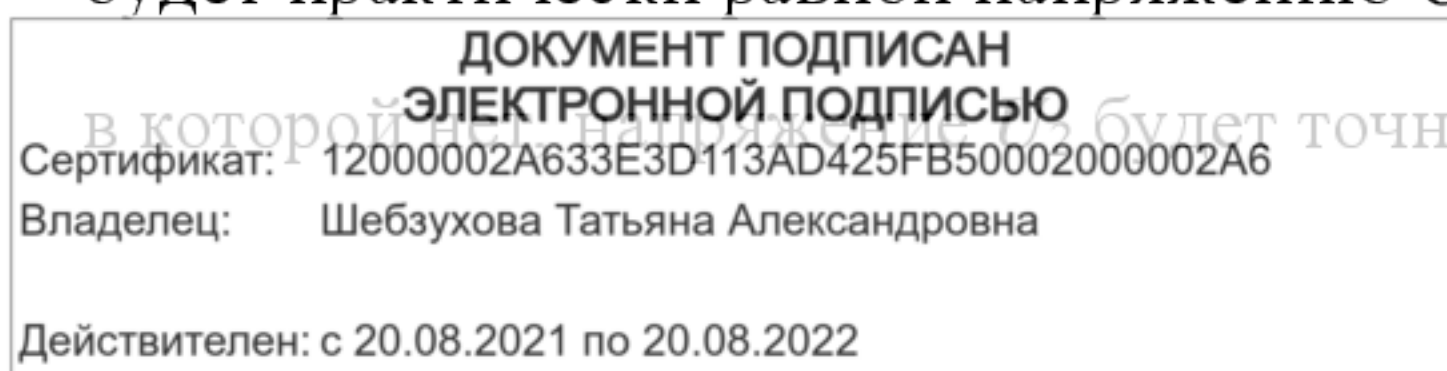
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{E_{\text{вит}} w_1}{E_{\text{вит}} w_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Коэффициент трансформации.

Коэффициентом трансформации $k_{\text{тр}}$ называют следующее отношение напряжений U_1 и U_2 на обмотках:

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_1}{U_2}.$$

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 синусоидальным будет созданный им ток I_1 , синусоидальным поле Φ_1 , синусоидальными э.д.с. E_2 и ток I_2 и, наконец, синусоидальным 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.

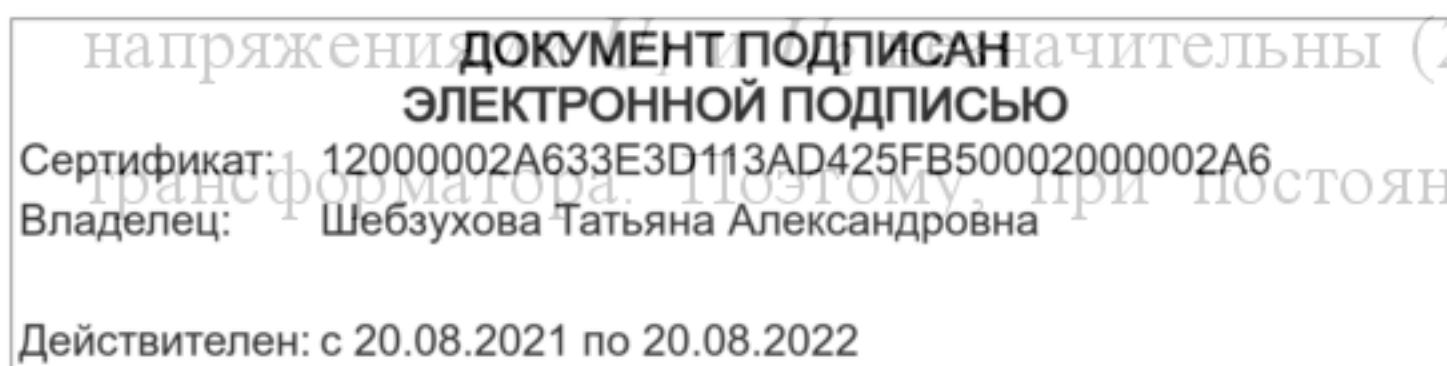
Два встречных магнитных потока создадут одно суммарное поле:

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

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:

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

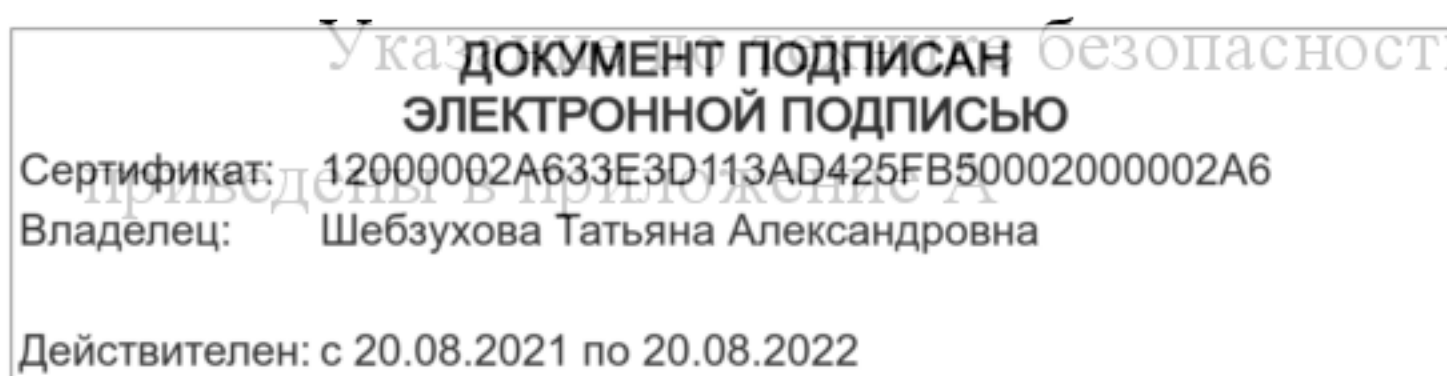
Числовое значения коэффициента трансформации токов для нагруженного трансформатора практически совпадает с базовым определением коэффициента трансформации через напряжения обмоток: $k_{mp.I} \cong k_{mp}$. Приравняв два и определения коэффициента трансформации (через токи и напряжения обмоток), получим:

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

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



Перечень аппаратуры

Обозначения	Наименования	инв.	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.)

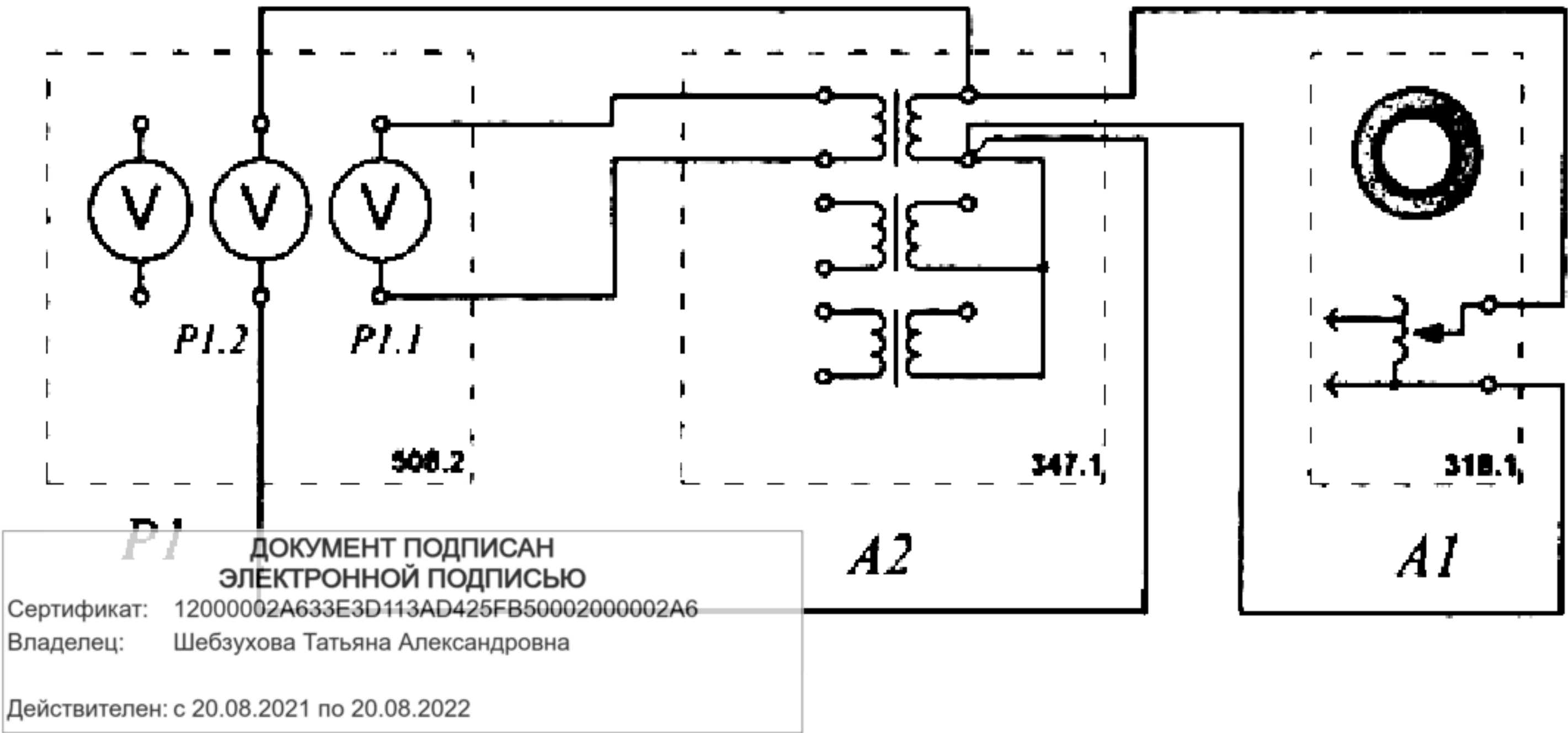
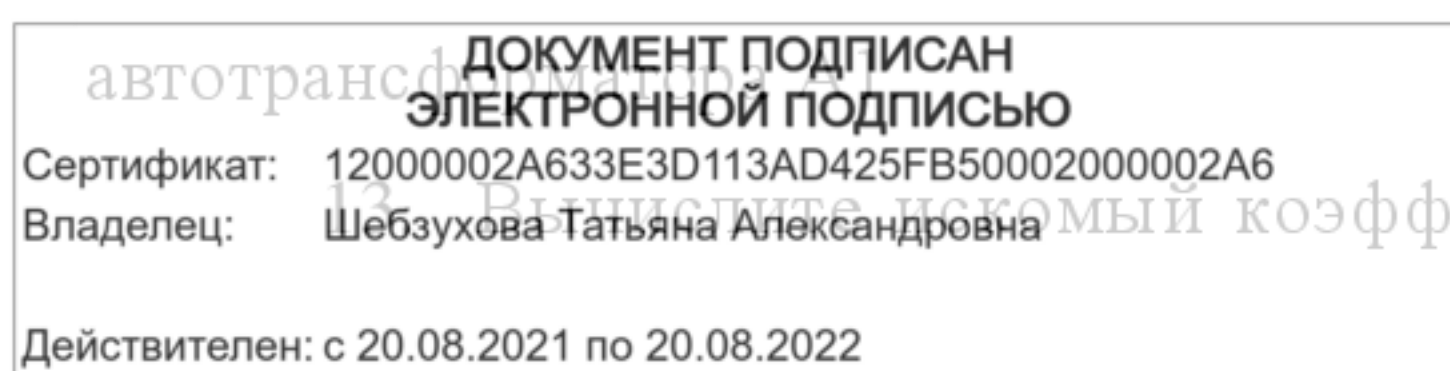


Рисунок 2.2. Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитан 
2. Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора А1.
3. Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания
4. «220В» автотрансформатора А1 с розеткой однофазной **трехпроводной** электрической сети питания напряжением 220 В.
5. Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
6. Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.
7. В трехфазной трансформаторной группе А2 переключателем установите желаемое номинальное вторичное напряжение трансформатора, например, 127 В.
8. Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и автотрансформатора 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



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.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

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_H (рис.3.1,б).

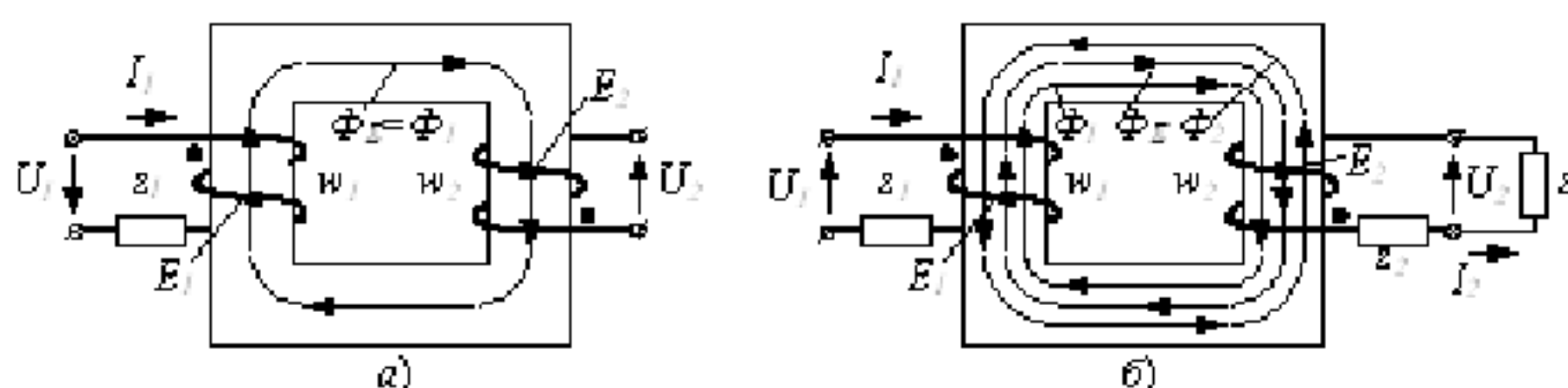
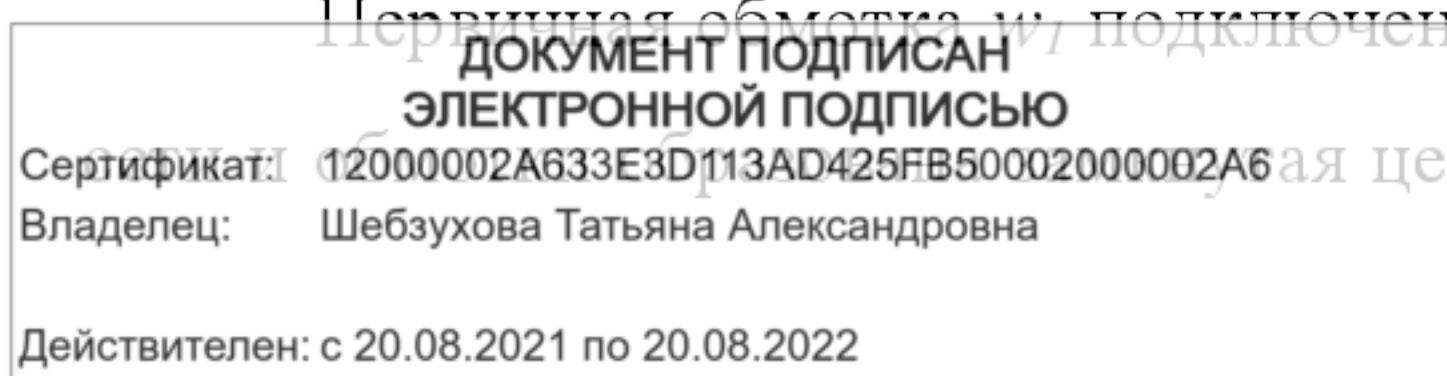


Рисунок 3.1- Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход(а) и работа под нагрузкой (б)

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

Первичная обмотка w_1 подключена к сети с напряжением U_1 и так как из



алая 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 $E_{\text{вит}}$. Э.д.с. обмоток будут прямо пропорциональны числам их витков w_1 и w_2 :

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

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.

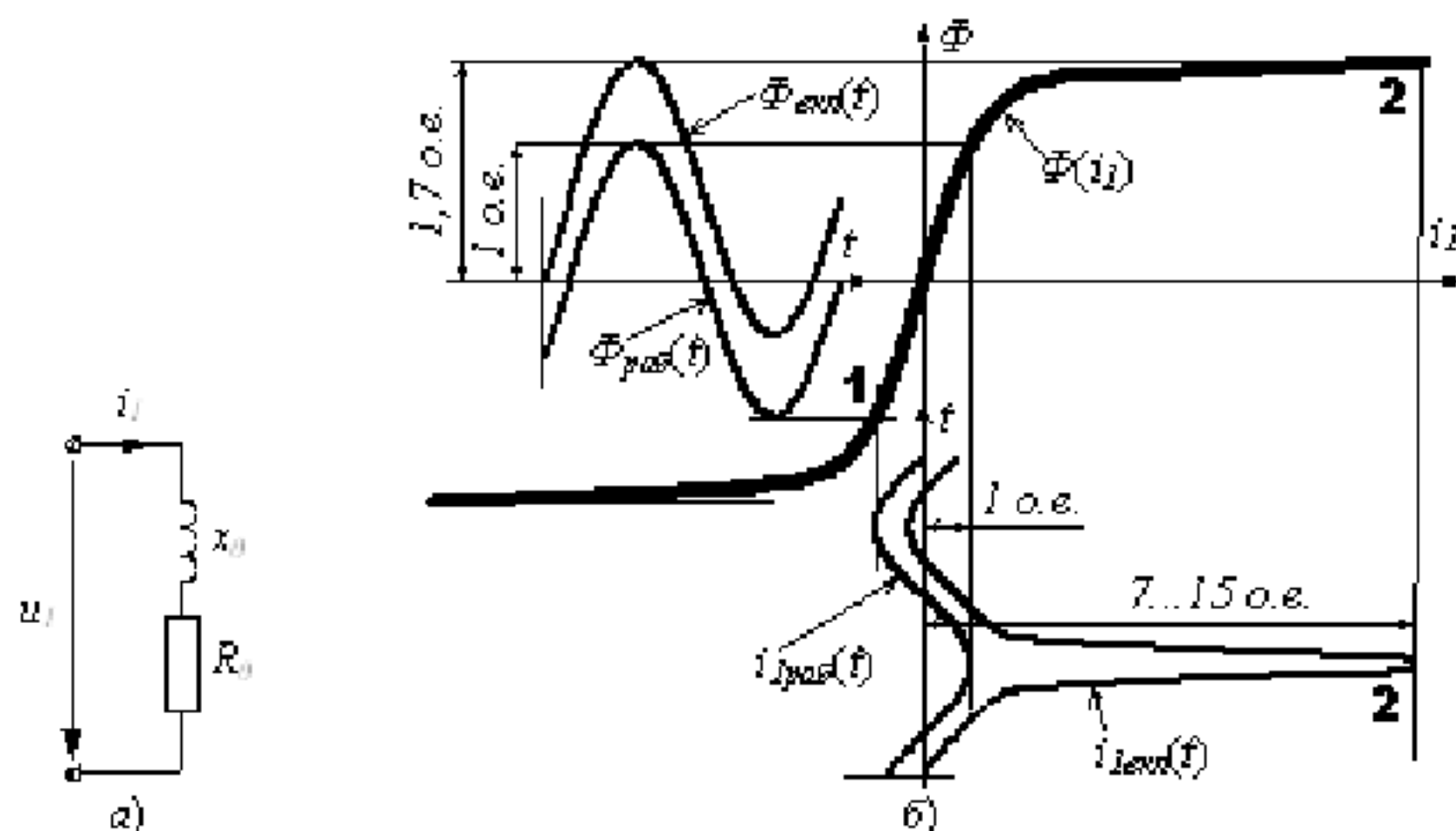


Рисунок 3.2- Процессы при включения трансформатора на холостом ходу: схема замещения (а) и графики сигналов (б)

Дифференциальное уравнение трансформатора

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

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

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

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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

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

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 $\Phi(i_l)$ стали магнитопровода графика тока $i_{лвкл}(t)$ дали искаженный график тока с амплитудой превышающей амплитуду тока рабочего режима $i_{лр\alpha б}(t)$ в 7...15 раз. Затухание амплитуды магнитного потока $\Phi_{вкл}(t)$ до значения $\Phi_{р\alpha б}(t)$ 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 $i_{лвкл}(t)$ 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

Обозн	Наименование		Параметры
G1	Трехфазный		~400 В / 16 А
	ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ		3x80
	Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6	47.1	В А 220В/242 225 220 226
	Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна		
	Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022		

A3	Блок измерительных	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

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

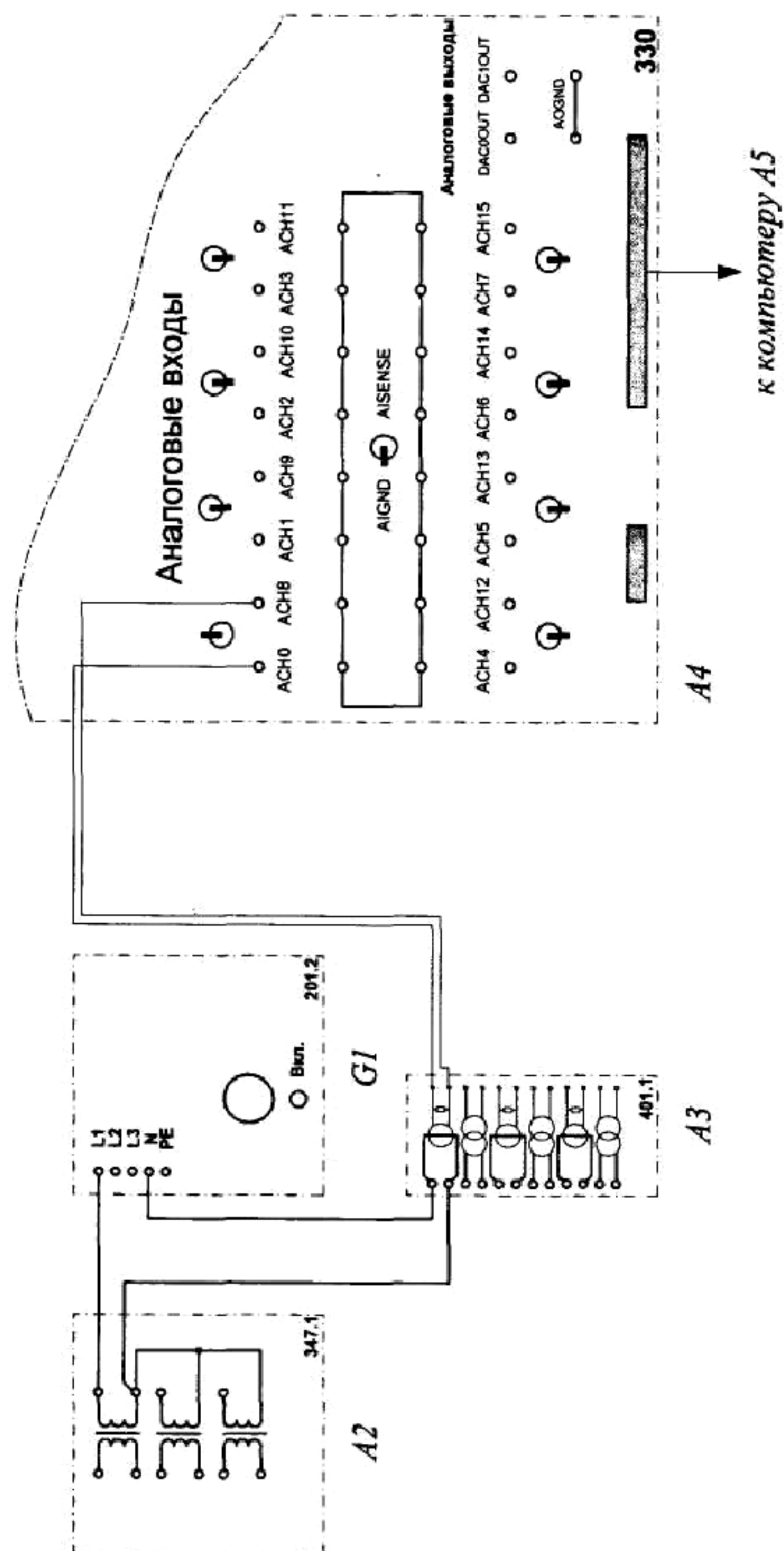


Рис. 3.3. Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
 ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

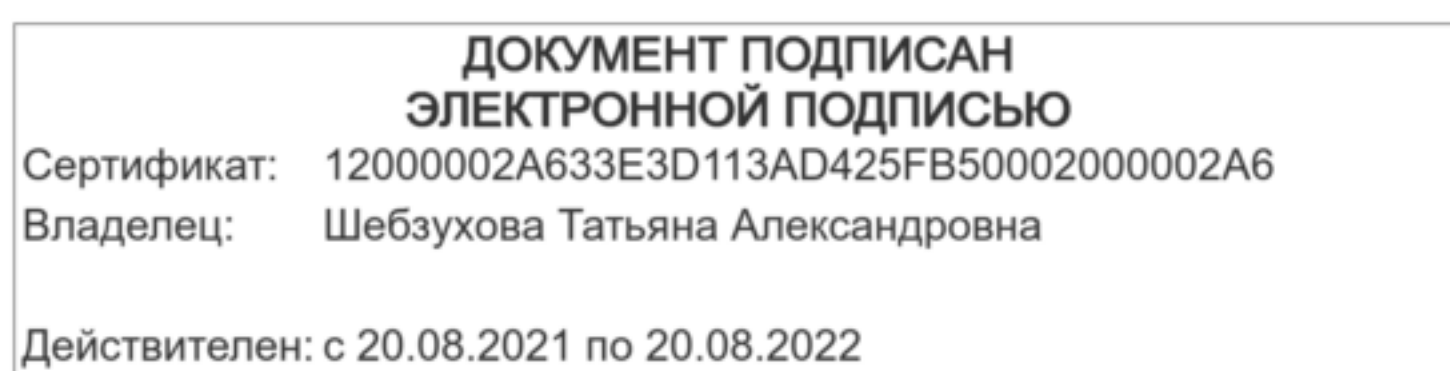
используемых в эксперименте, с гнездом защитного заземления "РЕ" трехфазного источника питания устройств,

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

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_H (рис.4.1,б).

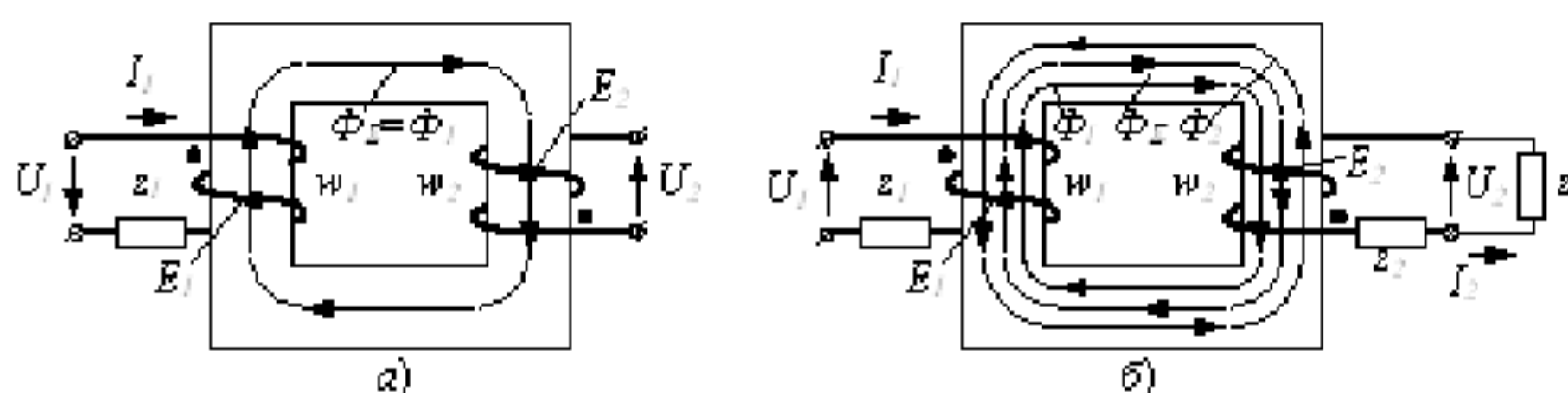


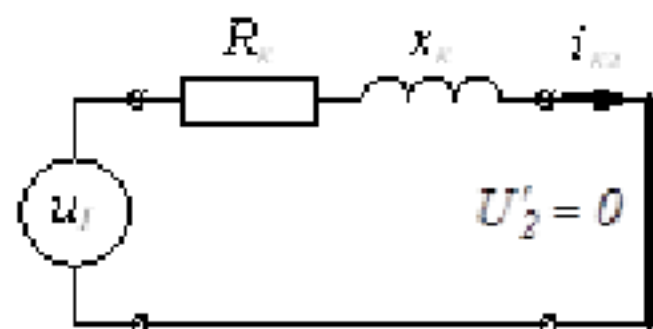
Рисунок 4.1- Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход(а) и работа под нагрузкой (б)

При коротком замыкании по обмоткам трансформатора протекают большие токи, в сравнении с которыми ток I_0 цепи намагничивания

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.

Дифференциальное уравнение схемы имеет вид

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = L_{\kappa} \frac{di_{\kappa z}}{dt} + R_{\kappa} i_{\kappa z}$$



Общее решение дифференциального уравнения равно сумме принужденной

Рисунок 4.2- Расчетная схема к.з трансформатора 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:

$$\varphi = \arctg \frac{x_{\kappa}}{R_{\kappa}} \quad i_{np} = \frac{U_{1m}}{z_{\kappa}} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi)$$

Вид свободной составляющей тока $i_{св}$ к.з. зависит от корней характеристического уравнения, составленного на основе дифференциального уравнения :

$$L_{\kappa} p + R_{\kappa} = 0 \Rightarrow p = -\frac{R_{\kappa}}{L_{\kappa}} \Rightarrow i_{св} = C \cdot e^{-\frac{R_{\kappa}}{L_{\kappa}} t}$$

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

$$i_{кз} = \frac{U_{1m}}{z_{\kappa}} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) + C \cdot e^{-\frac{R_{\kappa}}{L_{\kappa}} t}$$

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

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

Общее решение примет вид

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

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_{kz} 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:

$$I_{kz,ном} = \frac{U_1}{z_k} = \frac{U_1 I_{1,ном}}{z_k I_{1,ном}} = \frac{U_1 I_{1,ном}}{U_{kz}} = \frac{U_1}{U_{kz}} I_{1,ном} =$$

$$= \frac{U_1}{(0,045...0,07)U_1} I_{1,ном} = (14...22) I_{1,ном}$$

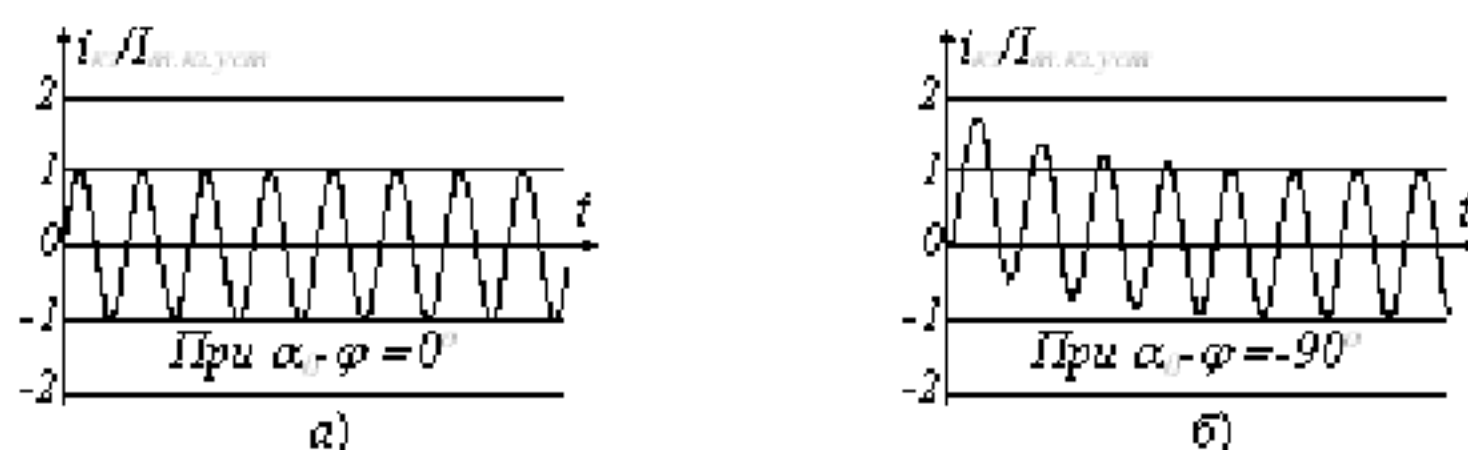


Рисунок 4.3- Ток короткого замыкания только с принужденной составляющей (а) и с максимальным действием свободной составляющей (б)

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 $14^2...22^2 \approx 200...500$ раз) и приводит к механическому разрушению (растрескиванию) изоляции.

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., образующееся 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 $I_{y\partial}$.

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	3	3x80 В- А; 230В/242,235, 230, 226 220 133 127 В

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

A3	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	01.1	4	3 трансформатора напряжения 600 В / 3 В; 3 трансформатора тока
A4	Коннектор	30	3	8 аналог, диф. входов; 2 аналог, выходов; 8 цифр
A5	Персональный компьютер	50	5	IBM совместимый, 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 A4 измеряемое напряжение вводится в компьютер A5. Выключатель A6 выполняет роль короткозамыкателя. Реостат A13 ограничивает ток короткого замыкания.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

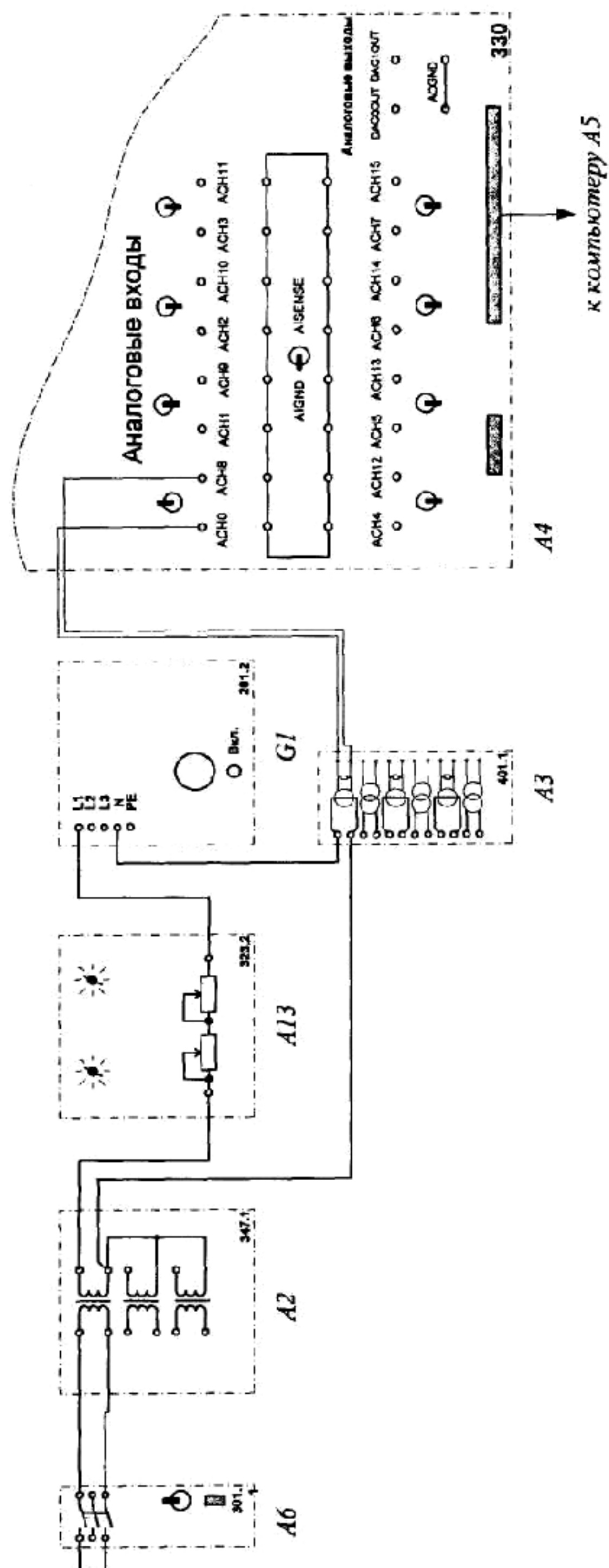


Рисунок 4.4.- Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного зазем  устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» трехфазного источника питания

G1.	ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
	ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
	Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
	Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Соединяем 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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

1. Как изменить номинальное напряжение 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

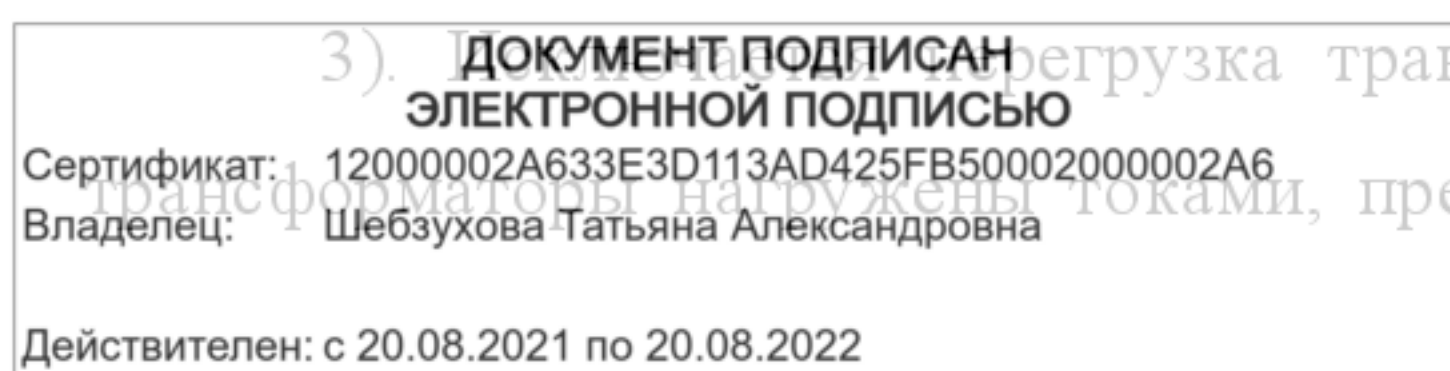
Теоретическая часть:

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). При увеличении нагрузки 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 уравнивающий 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 уравнивающий ток равен номинальному току. В этом случае к трансформатору нельзя подключать никакой нагрузки.

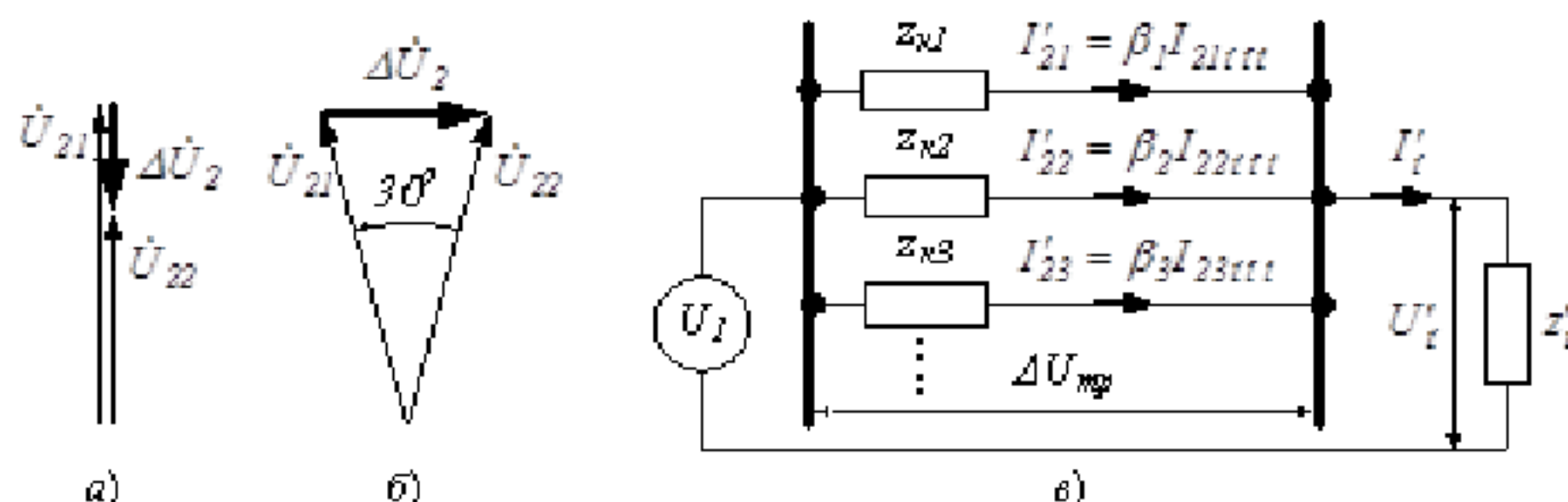


Рисунок 5.1-Векторные диаграммы вторичных напряжений параллельно работающих трансформаторов при неравенстве вторичных напряжений (а), несовпадении групп соединения(б) и схема к расчету при неравенстве напряжений короткого замыкания (б)

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 $\Delta \dot{U}_2 = \dot{U}_{21} - \dot{U}_{22}$, 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 А, подключать все выводы обмоток, отмеченные буквой А. 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.

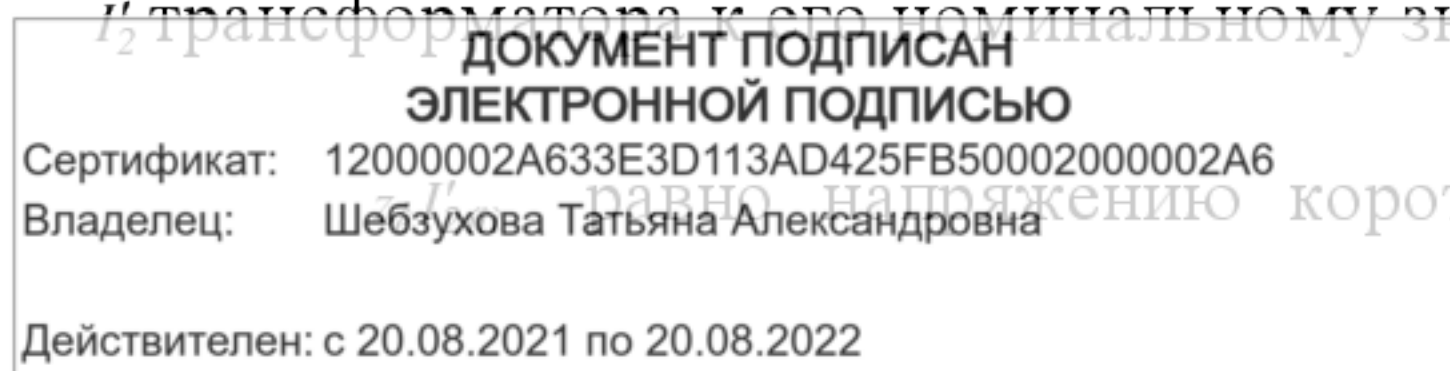
Трансформаторы, которые считаем загруженными, изображены простейшей схемой замещения в виде сопротивления $\dot{z}_e = R_e + jx_e$ короткого замыкания Из схемы (рис.5.1,в) следует:

- падение напряжения $\Delta U_{тр}$ для всех трансформаторов одинаковое;
- для каждого трансформатора напряжение $\Delta U_{тр}$ вычисляется по формуле

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

где β – коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению тока

I'_2 трансформатора к его номинальному значению $I'_{2н}$;



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 $\Delta U_{тп}$ 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 $U \approx E$;

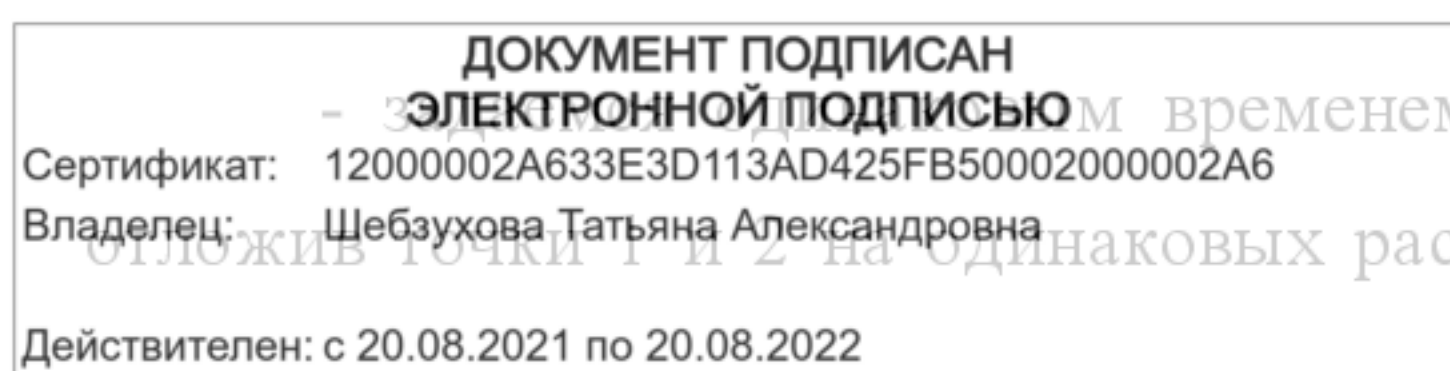
- мгновенное значение э.д.с. e , индуцируемой переменным магнитным потоком Φ и поток связаны зависимостью

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

- 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 $\Phi(t)$:



– ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ временем по осям t для графиков $i(t)$ и $\Phi(t)$, отложив точки 1 и 2 на одинаковых расстояниях от относительно точек $O_{i(t)}$ и

$\theta_{\Phi(t)}$ 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 $\Phi(t)$.

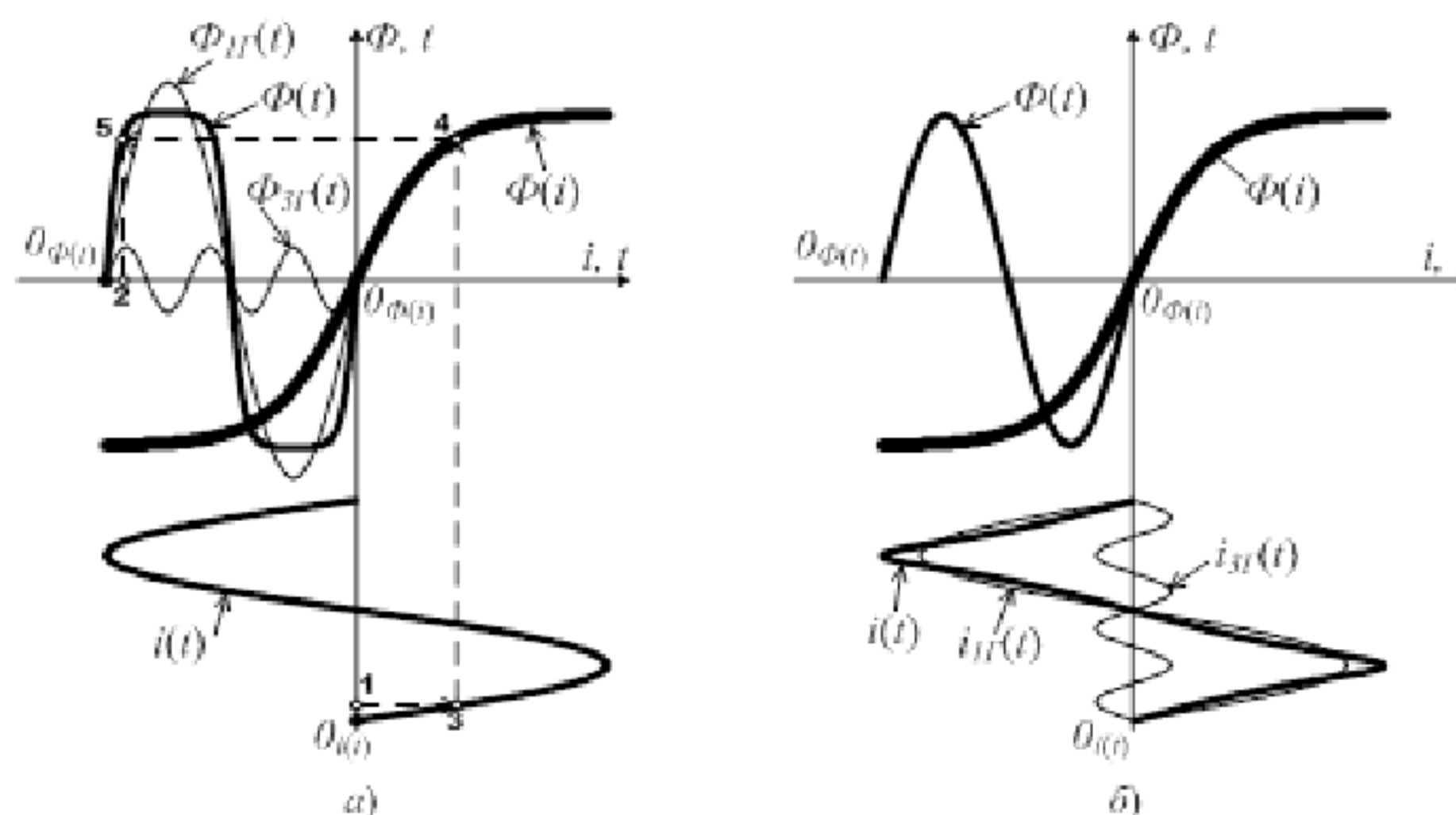


Рисунок 5.2- Графики сигналов магнитного потока $\Phi(t)$ и порождающего его тока $i(t)$ при синусоидальном токе (а) и магнитном потоке (б)

По построениям получен несинусоидальный график $\Phi(t)$. В соответствии с (6.3) индукционная э.д.с. $e(t)$ будет несинусоидальная и, следовательно, будет несинусоидальным напряжение $u(t)$ 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 синусоидальная и, следовательно, будет синусоидальным напряжение $u(t)$ на обмотке трансформатора. Используя кривую намагничивания магнитопровода трансформатора, строим график изменения во времени тока $i(t)$ в обмотке трансформатора.

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 ток $\Phi(t)$. Этим током 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 $i_{1Г}(t)$ и $i_{3Г}(t)$. Сумма первых гармоник $i_{1Г}(t)$, сдвинутых относительно друг друга на 120° электрических градусов, будет равна нулю. Третьи гармоники $i_{3Г}(t)$ 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.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

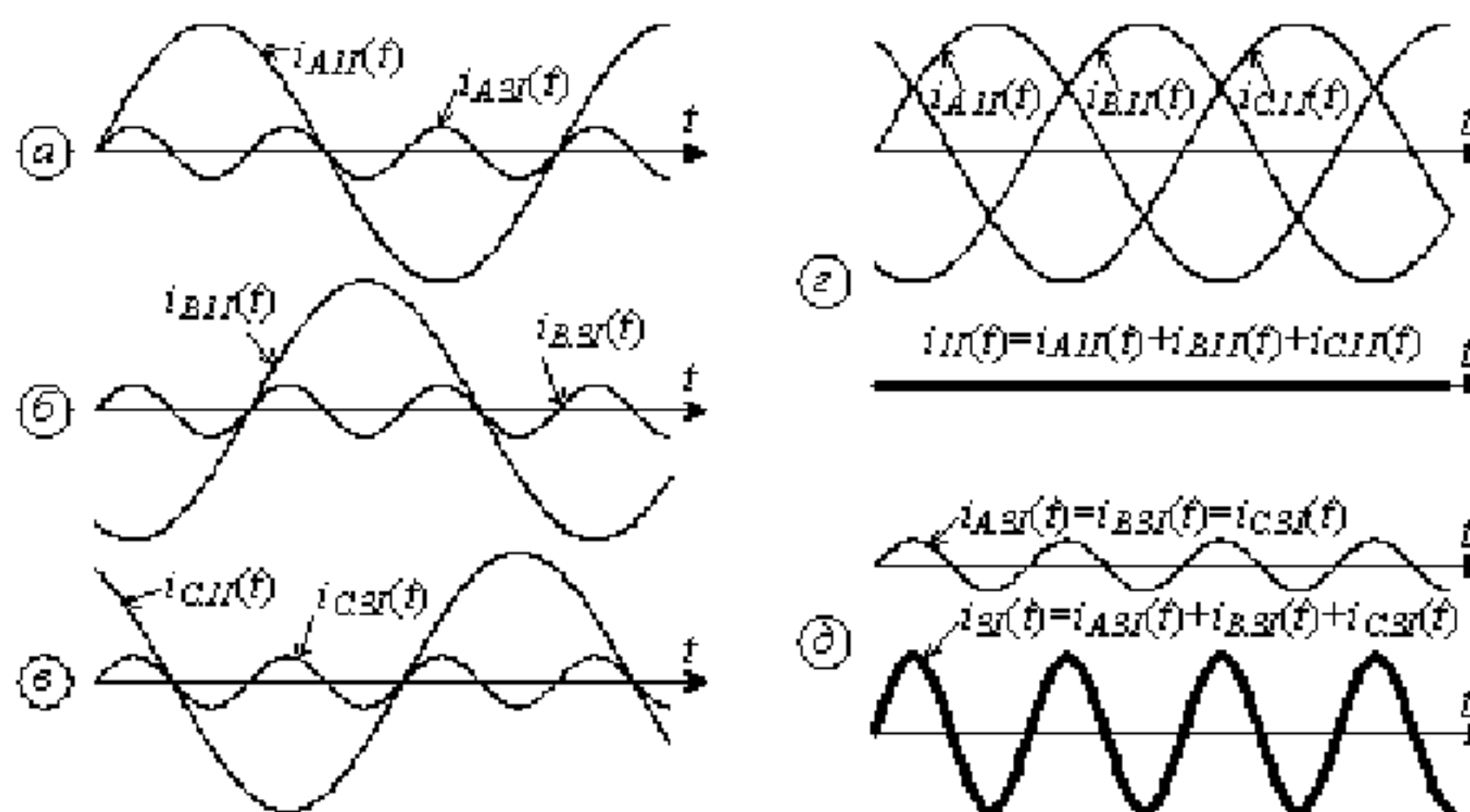


Рисунок 5.3- Гармонически составляющие токов фазы А(а), фазы В(б), фазы С(в) и суммы первых (г) и третьих (д) гармонических составляющих

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

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		$\sim 400 \text{ В} / 16 \text{ А}$
A2	Трёхфазная		$3 \times 80 \text{ В} \cdot \text{А}; 230 \text{ В} / 242, 235,$
A3	Блок измерительных трансформаторов тока и	01.1	3 трансформатора напряжения $600 \text{ В} / 3 \text{ В}; 3$
A4	Коннектор	30	8 аналог. диф. входов; 2 аналог, выходов; 8 цифр,
A5	Персональный компьютер	50	ВМ совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, кла-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. Трехфазная 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

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

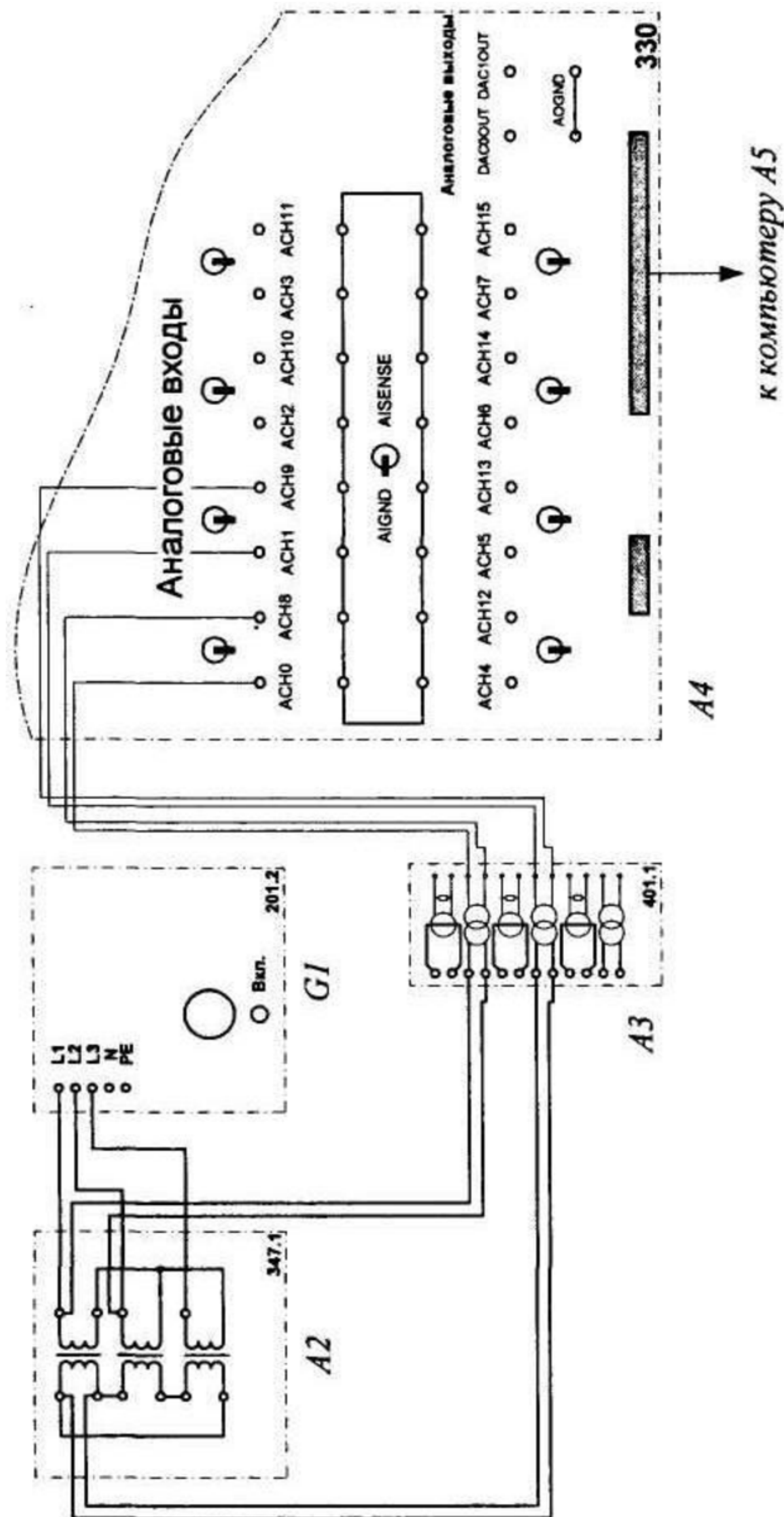


Рисунок 5.4- Схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте,

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- Соедините гнезда защитного зазем



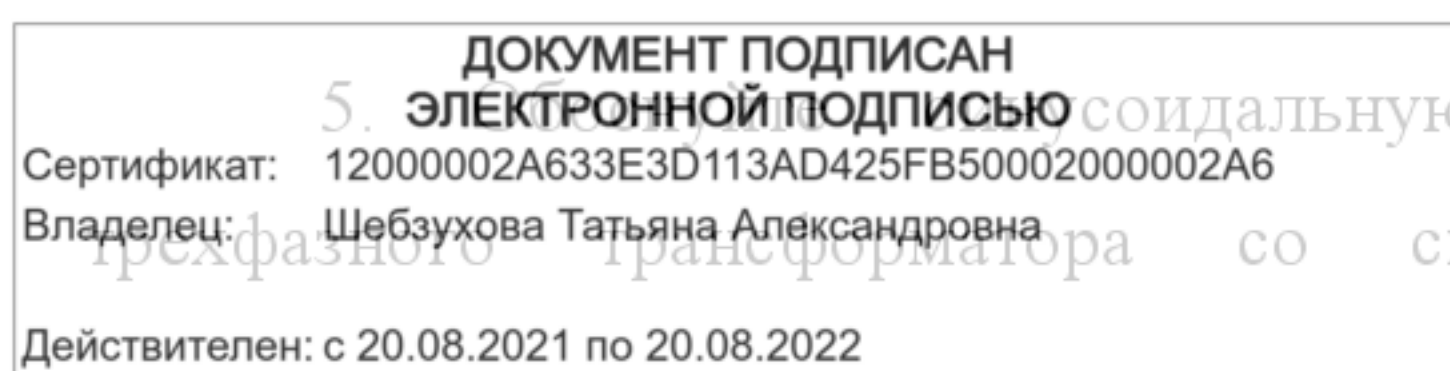
устройств,

используемых 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/Δ .



Лабораторная работа №6

Тема: _Определение уравнивающего тока, вызванного неравенством коэффициентов трансформации

Цель работы: изучить условия появления уравнивающего тока

Теоретическая часть:

- Основные теоретические сведения.

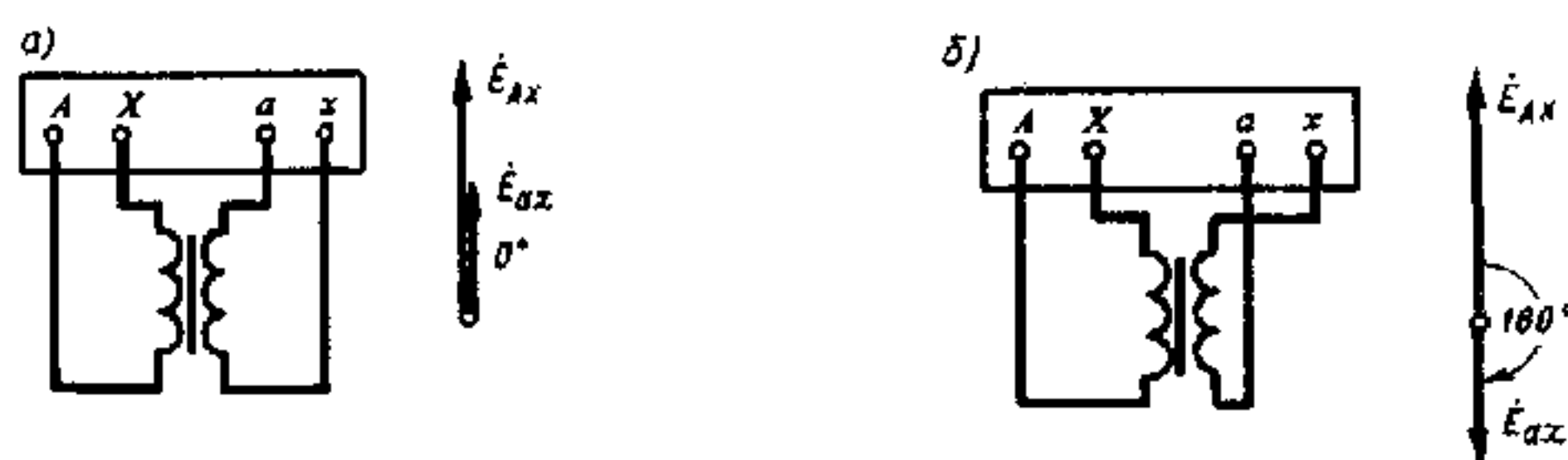


Рис. 6.1. Группы соединения обмоток однофазных трансформаторов:

а — группа I/1 — 0; б — группа I/1 — 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, а. 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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

ВН определяют умножением числа,

обозначающего 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 $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$.

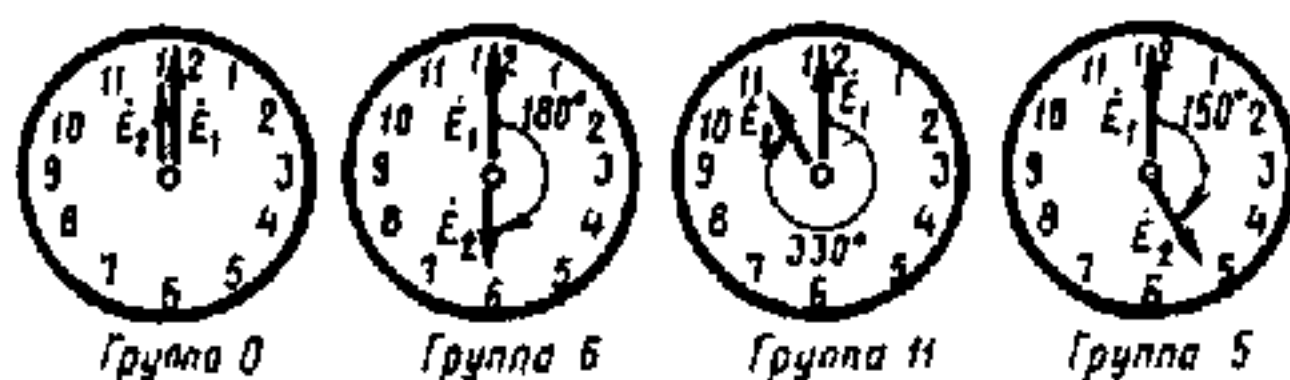


Рис. 6.2. Сравнение положения стрелок часов с обозначением групп соединения.

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 I/I—0.

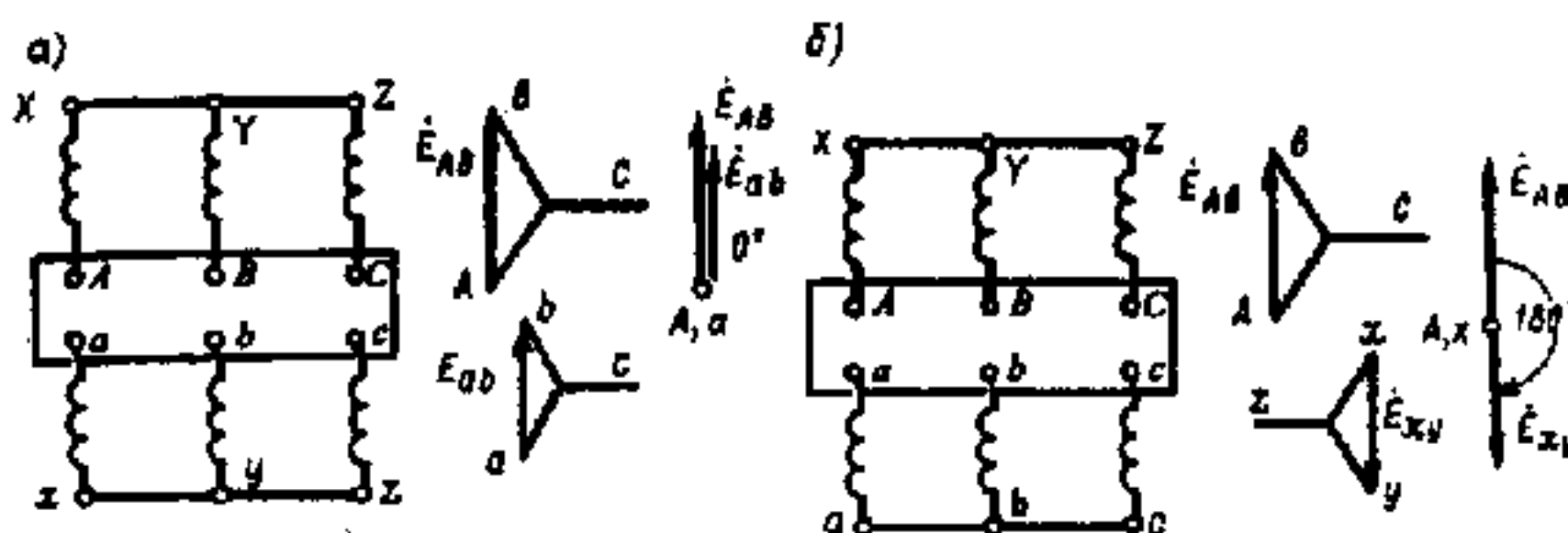


Рис. 6.3. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: а — для группы Δ/Δ —0; б — для группы Y/Y —6

Применением разных способов соединения обмоток в трехфазных

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.

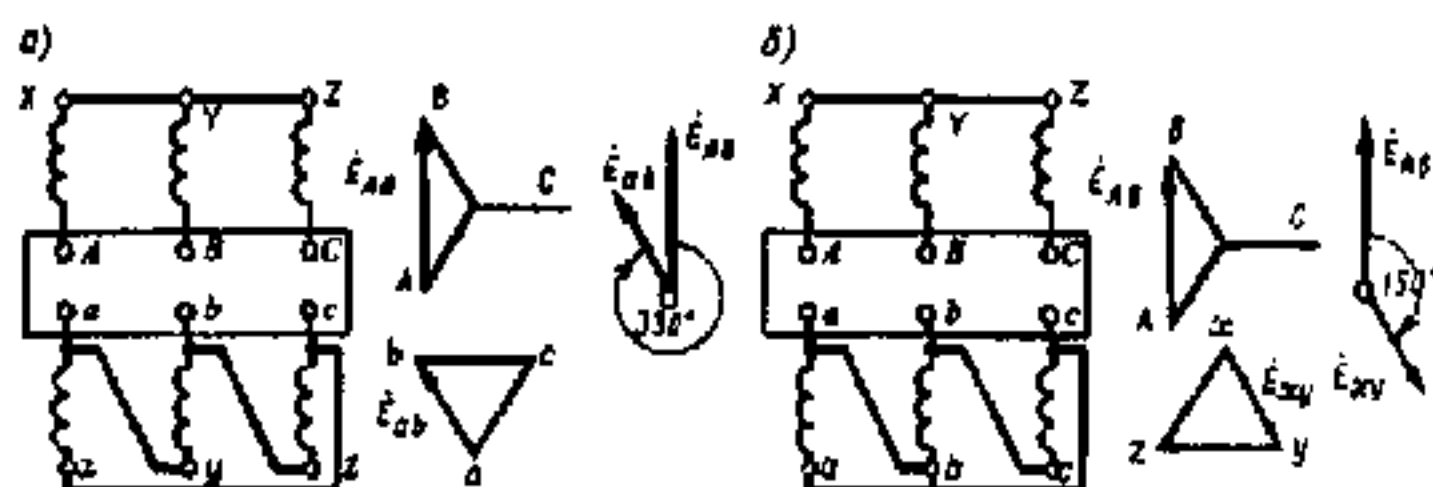


Рис. 6.4. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы: а — для группы $Y/\Delta-11$; б — для группы $Y/\Delta-5$.

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 и вместо последовательности abc принять последовательность bca , то вектор $\dot{E}_{ab}$ 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 I/I — 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	

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.

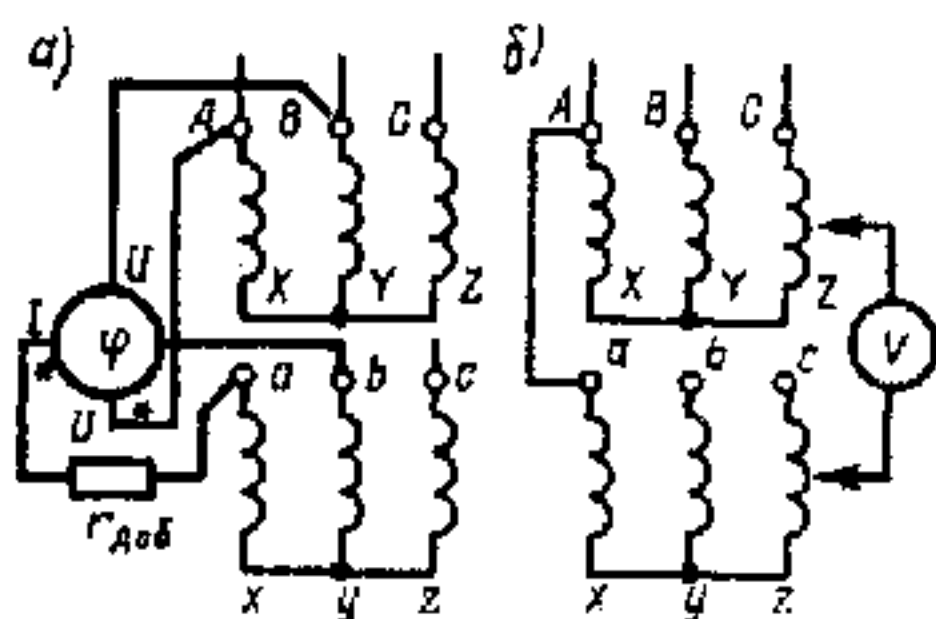


Рис. 6.6. Проверка группы соединения $Y/Y-0$ методами фазометра (а) и вольтметра (б).

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-b} (между выводами b и B) и U_{c-c} (между выводами c и C). Если

предполагаемая группа соединения $Y/Y-0$ соответствует фактической, то

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

где $k_n = U_{AB}/U_{ab}$ — 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

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

группа Y/Δ — 11

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

группа Y/Δ — 5

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

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

Обозначен	Наименование		Параметры
G1	Трехфазный источник		~ 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/

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты. По одному из однофазных трансформаторов трехфазных трансформаторных групп A2, A7 включаются на параллельную работу на активную нагрузку A10. С помощью мультиметров блока P1 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 A2 и A7 установите коэффициенты трансформации трансформаторов, например, равными соответственно 230/230В и 230/220 В.
- Установите переключателями активную нагрузку в фазах блока A10, например, равной 30 %.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите источник G1.
- С помощью амперметров P1.1 и P1.2 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,

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

Электрическая схема соединений представлена на рис. 7.1.

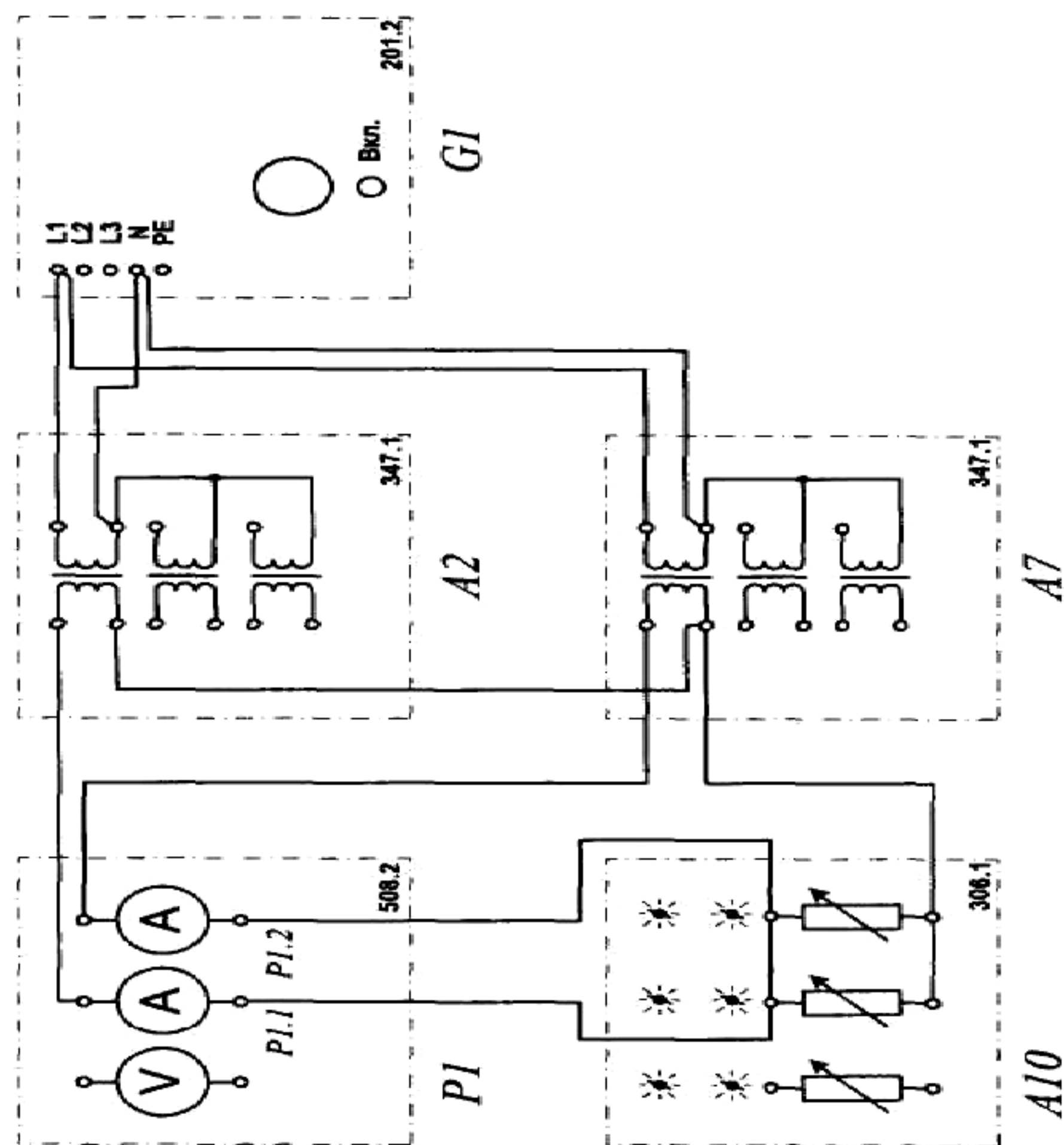


Рисунок 6.6- Схема соединения

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	47.1	3x80В·А;230В/242,235,230, 226,
P1	Блок мультиметров	08.2	3 мультиметра ~0...1000В/ ~ 0...10А /

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Описание электрической схемы соединений

Источник G1 – источник синусоидального напряжения промышленной части. Обмотки трехфазных трансформаторных групп A2 и A7 (трёхфазных 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 "PE"  фазного источника питания G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- В трехфазных трансформаторных группах A2 и A7 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 уравнительного тока I_y (по отношению к номинальному току трансформаторов I_N) при включении на

параллельно включаемых трехфазных трансформаторов с данными группами соединения обмоток по формуле

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

где U_K - напряжение короткого замыкания трансформаторов, %.

- По ожидаемой величине кратности уравнительного тока сделайте вывод о недопустимости параллельной работы трансформаторов с

различными
группами
соединения
обмоток.

Опыт
выполняется по
схеме рис. 6.7.

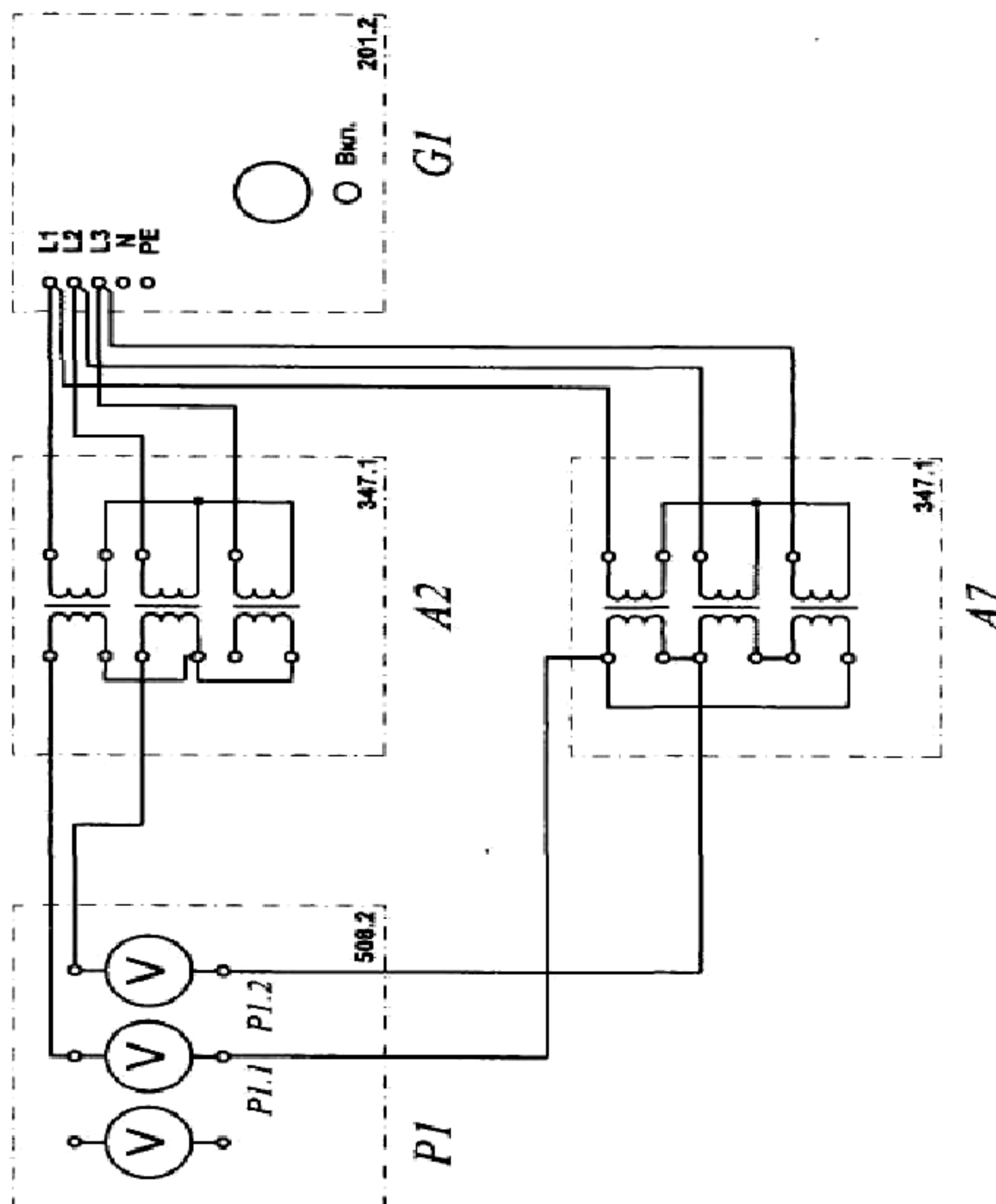


Рис. 6.7. Электрическая схема соединений

Контрольные вопросы

- С какой целью применяют параллельную работу трансформаторов?
- Каковы условия включения трансформаторов на

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.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 .

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_A , которым будет создано на сопротивлении нагрузки R_H напряжение U_A . Направление тока I_A совпадает с направлением э.д.с. E .

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

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

Уравнения ГПТ и ДПТ одинаковые по структуре и отличаются только знаком тока I_A .

Помимо основного эффекта – получения э.д.с. E , в ГПТ существует **побочный эффект** – возникновение тормозящего момента M_T . направлено навстречу моменту $M_{диз}$ дизеля. Тормозящий момент M_T возникает за счет

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

взаимодействия проводников обмотки якоря, обтекаемых током I_A магнитного поля обмотки возбуждения $\Phi_{ОВ}$. Направление момента M_T определенное по правилу левой руки, будет

противоположным направлению момента $M_{диз}$, и если $M_{диз}$ 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_A :

$$M_T = c_\Phi I_A$$

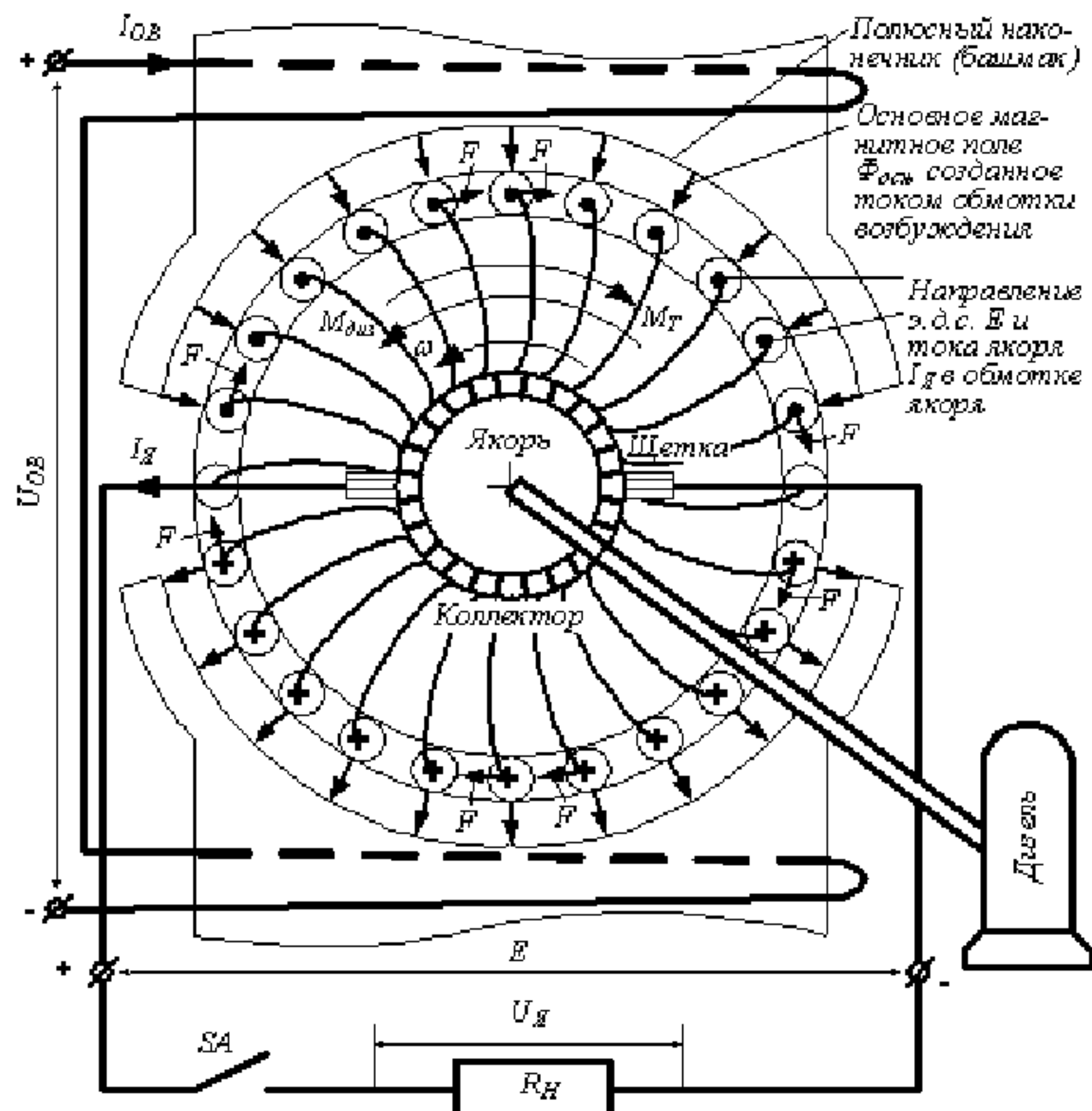


Рисунок 7.1- Устройство и принцип действия генератора постоянного тока

Дизель развивает момент $M_{диз}$ 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: $M_{диз} = M_T$. Возникновение момента M_T связано с током I_A . Этим током в сопротивлении R_H выделяется электрическая энергия $W_{\dot{y}} = R_H I_A^2 t$. Энергия $W_{\dot{y}}$ 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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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
ГЛ	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

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

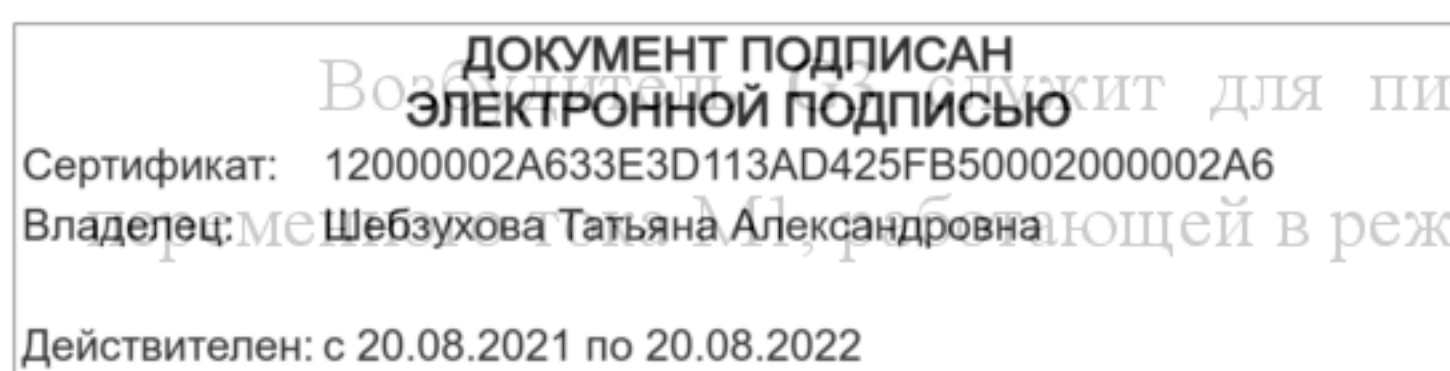
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

A5	Персональный компьютер	50	IBM совместимый, Windows 9*, Монитор,мышь, клавиатура,плата сбора информации PCI-6023E,(PCI-6024E)
A6, A8	Трехполосный выключатель	01.1	~ 400 В / 10 А
A9	Реостат для цепи ротора машины переменного тока	07.1	$3 \times 0 \dots 40 \text{ Ом} / 1 \text{ А}$
A11	Реостат возбуждения машины постоянного тока	08.1	$0 \dots 2000 \text{ Ом}$ $0,1 \dots 0,5 \text{ А}$
A12	Блок датчиков тока и напряжения	02.3	3 датчика напряжения $\pm 100; 1000 \text{ В} / \pm 5 \text{ В};$ 3 датчика тока $\pm 1; 5 \text{ А} / \pm 5 \text{ В}$
P3	Указатель частоты вращения	06.2	- $2000 \dots 0 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$

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)



Возбуждение машины для питания обмотки возбуждения машины
работает в режиме генератора с независимым возбуждением 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 ACH0-ACH8 и ACH1-ACH9 коннектора A4 напряжения, пропорциональные току возбуждения и э.д.с. испытуемого генератора G4 вводятся в компьютер A5.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

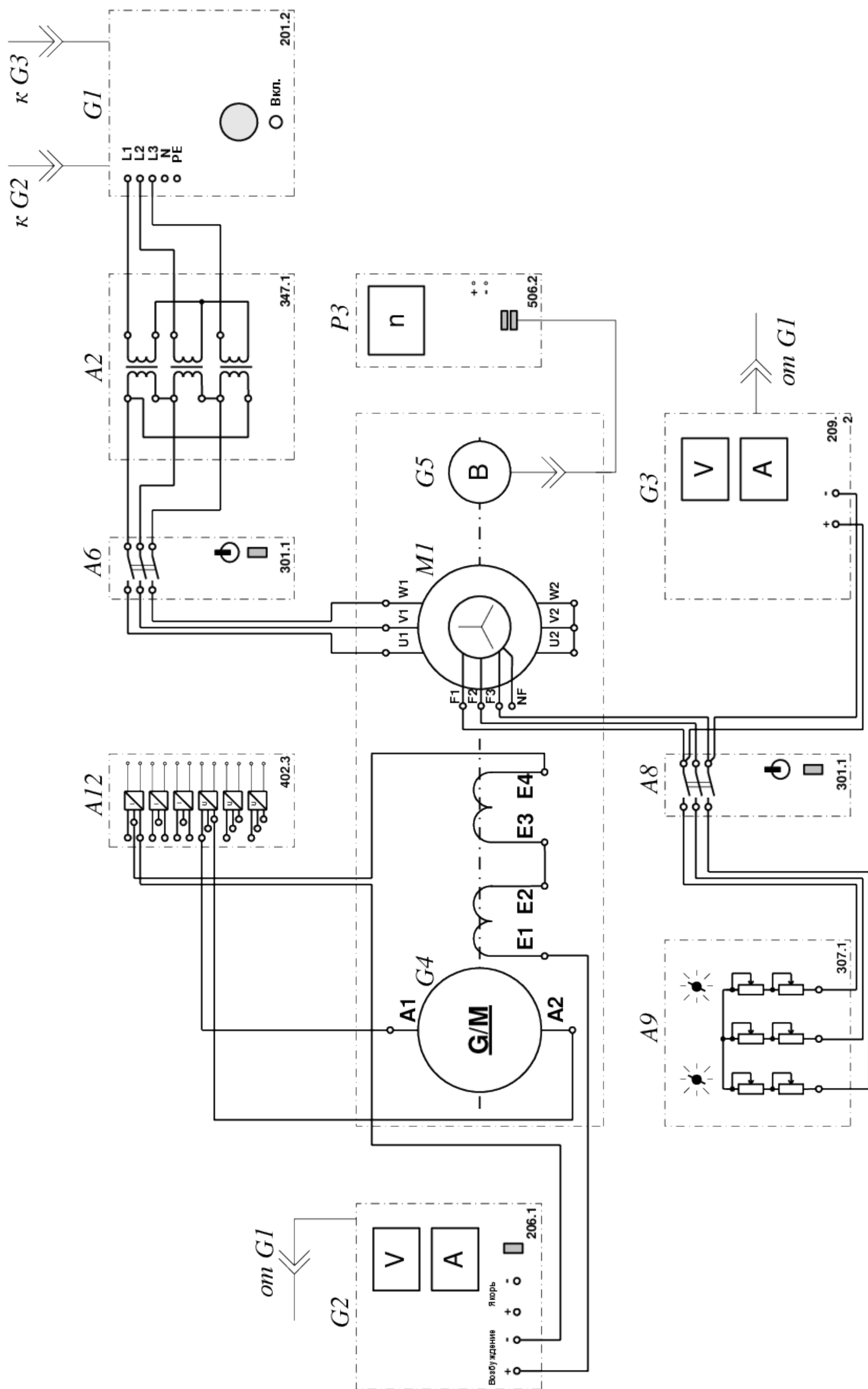


Рисунок 7.2(а) Электрическая схема соединений (вариант 1)

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

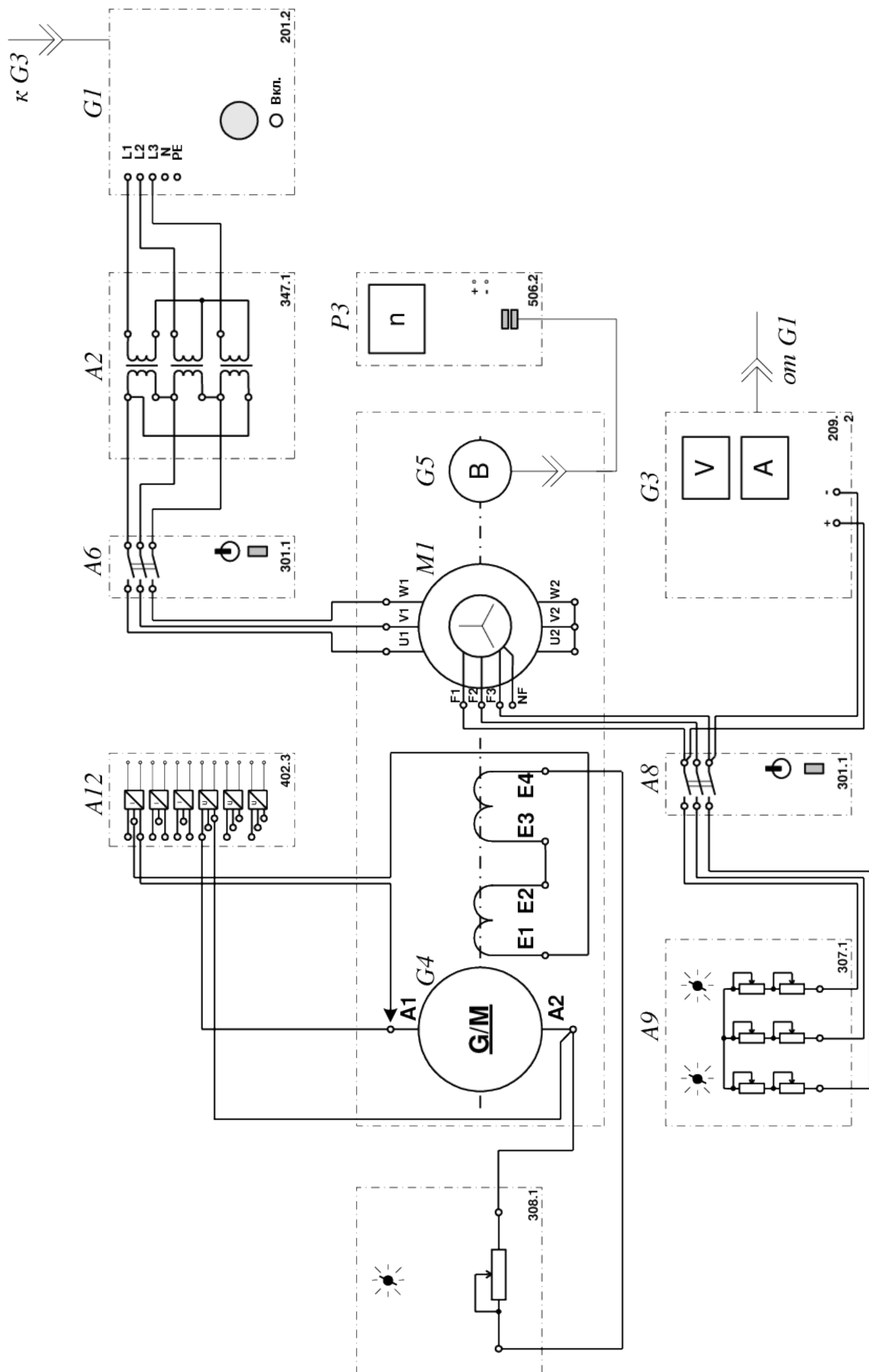


Рисунок 7.2(б)- Электрическая схема соединений (вариант 2)

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Электрическая схема соединений (продолжение)

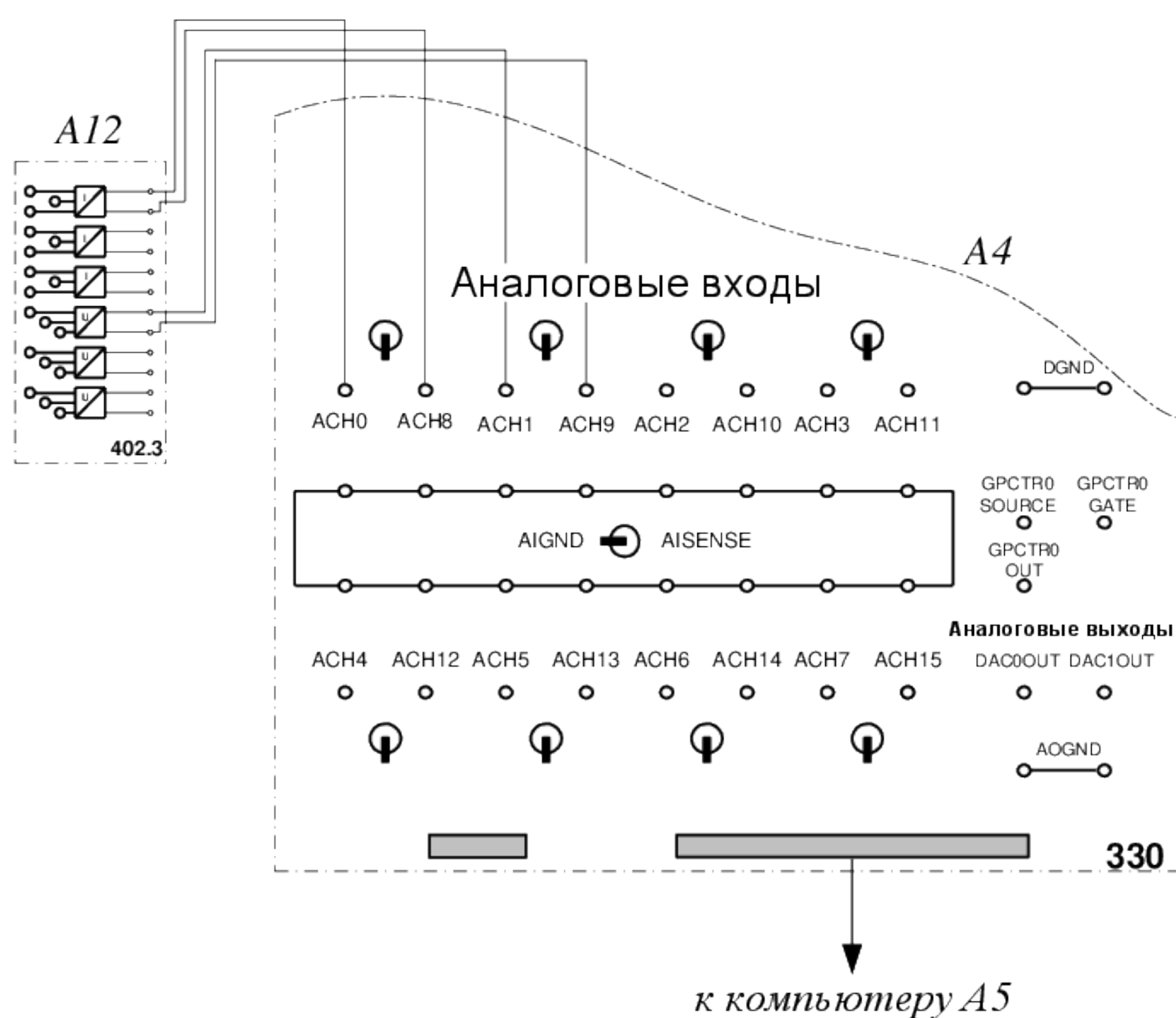


Рисунок 7.3- Электрическая схема соединений (продолжение)

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 "⏏" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" трехфазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой

соединения **ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ** возбуждения генератора G4 от независимого источника G2 / вариант 2 при самовозбуждении генератора G4).

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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»

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

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 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, указателя частоты вращения P3 и блока A12 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 / 0,25А(возбуждении)
G5	Угловых		6 вых. каналов / 2500

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	перемещений	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 совместимый, 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

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 ACH0-ACH8 коннектора A4 напряжение, пропорциональное току короткого замыкания испытуемого генератора G4 вводится в компьютер A5.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

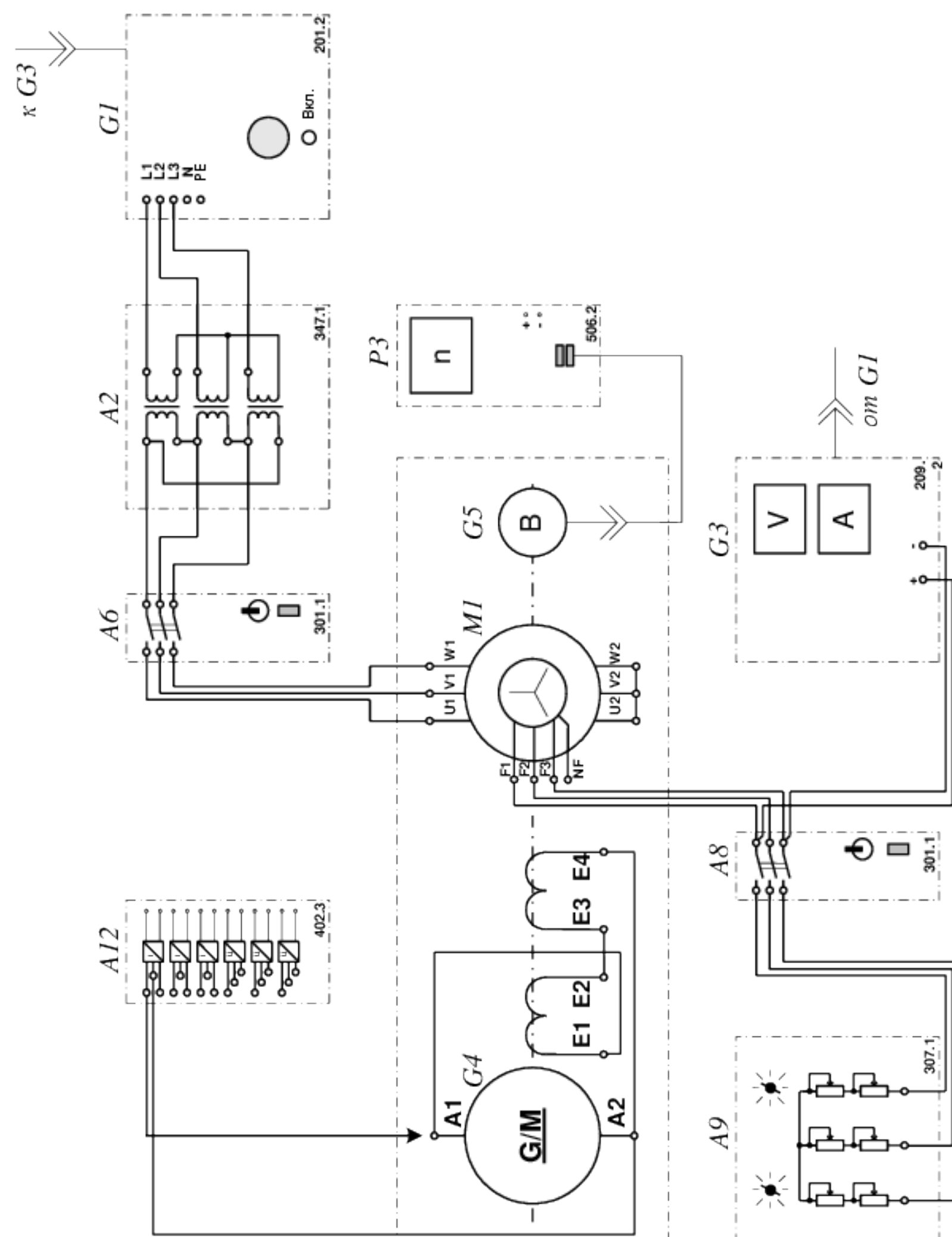


Рисунок 7.4 Электрическая схема соединений

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

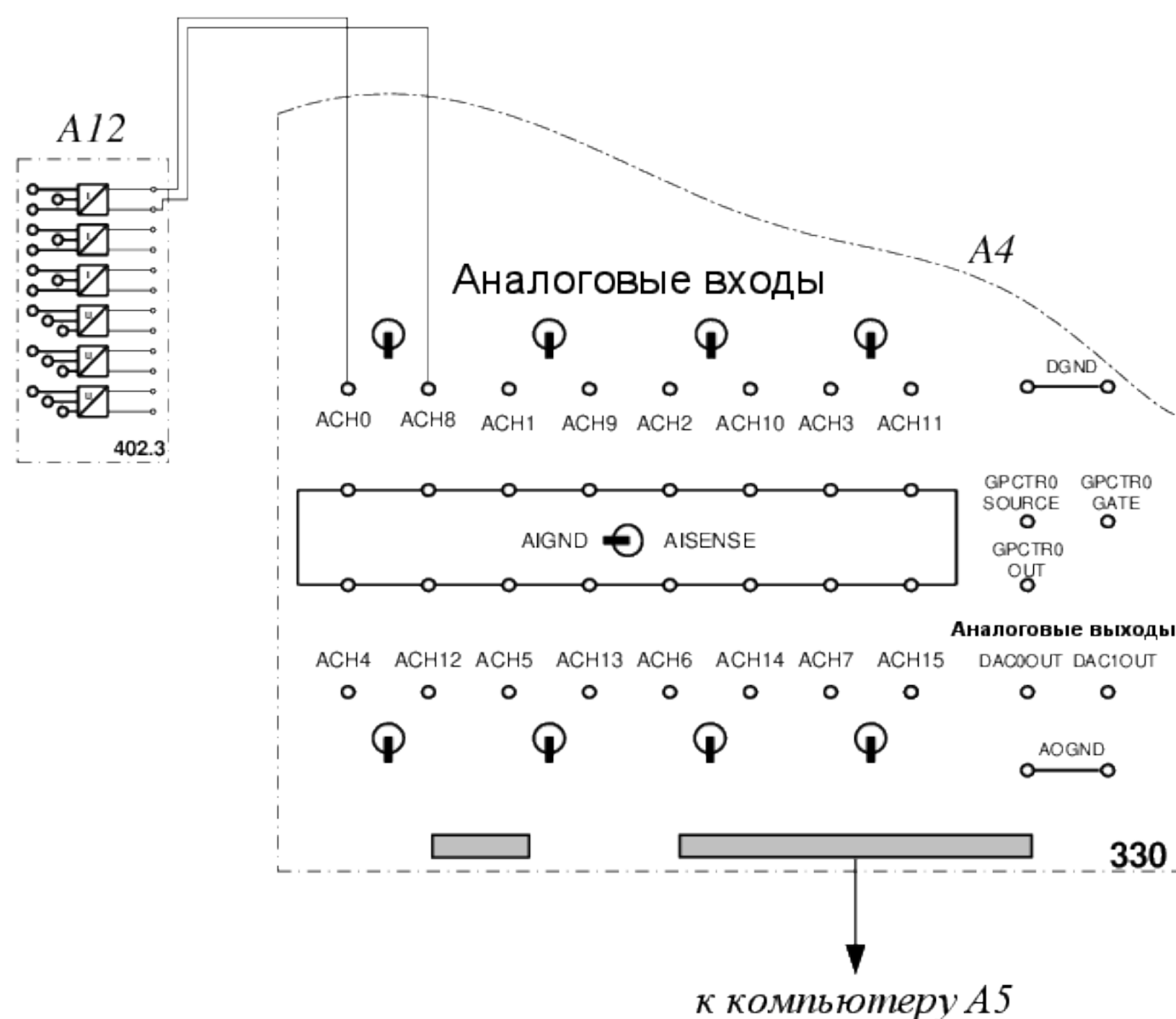


Рисунок 7.5 Электрическая схема соединений (продолжение)

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 "⏏" 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

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» возбудителя 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.

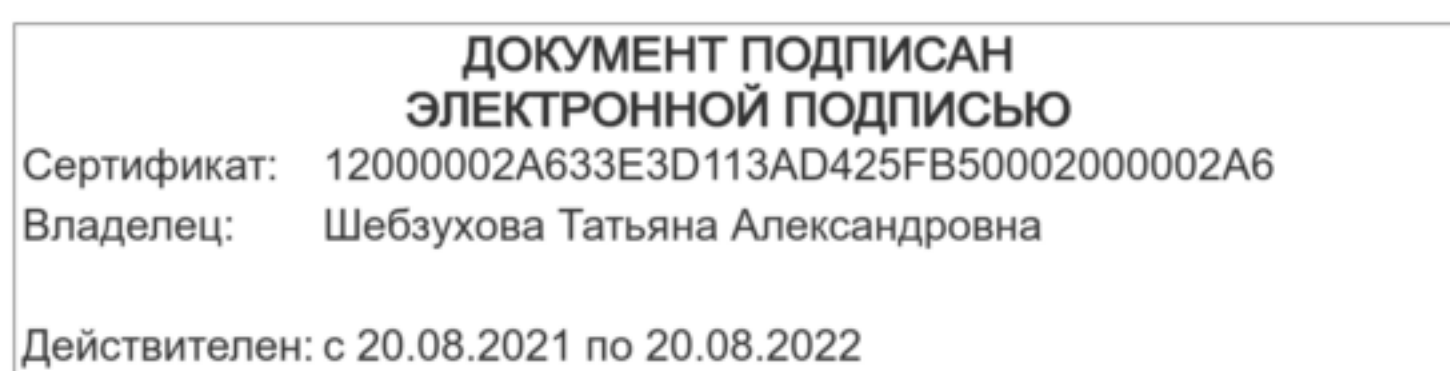
Нажмите кнопку «ВКЛ.» возбудителя G3. Двигатель М1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью.

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» возбудителя 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.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

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

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.

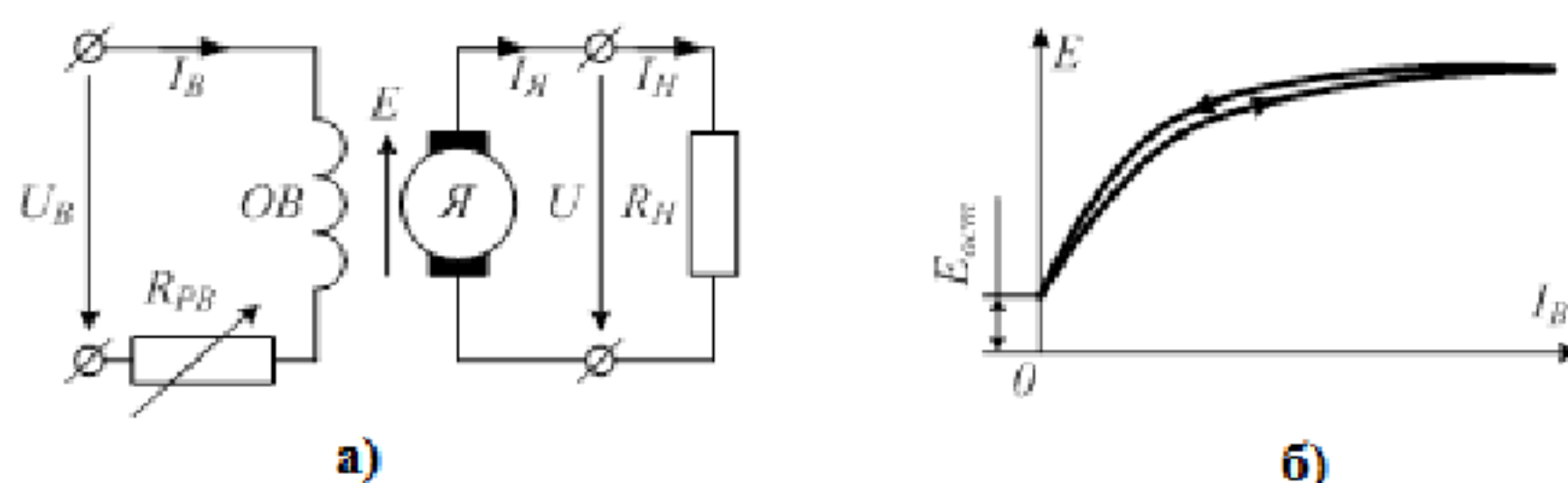


Рисунок 8.1 – Схема ГИТ с независимым возбуждением (а) и характеристика холостого хода генератора

Характеристикой холостого хода (рис.8.1(б)) называют зависимость э.д.с. E от тока возбуждения I_B для ненагруженного ГИТ ($I_A=0$) 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

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 $\Delta U_1 = R_A I_A$ на сопротивлении R_A обмотки якоря;
- 2) из-за уменьшения ЭДС E в результате размагничивающего действия реакции якоря, что показано как понижение напряжения U на ΔU_2 .

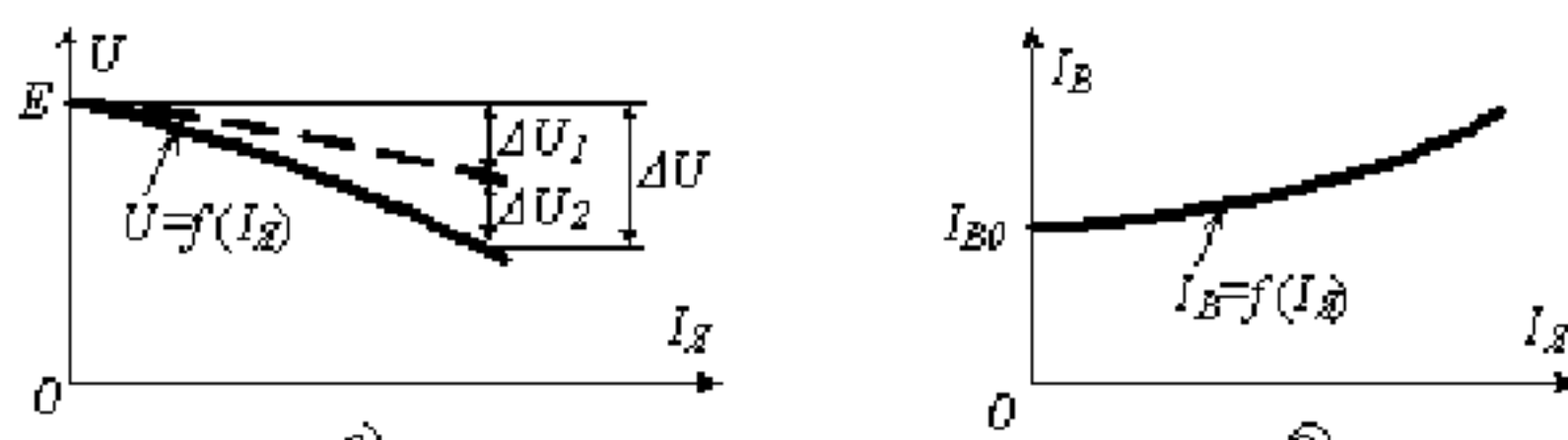


Рисунок 8.2- Внешняя (а) и регулировочная (б) характеристика ГПТ

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

каким образом следует регулировать постоянным напряжение U генератора

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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.

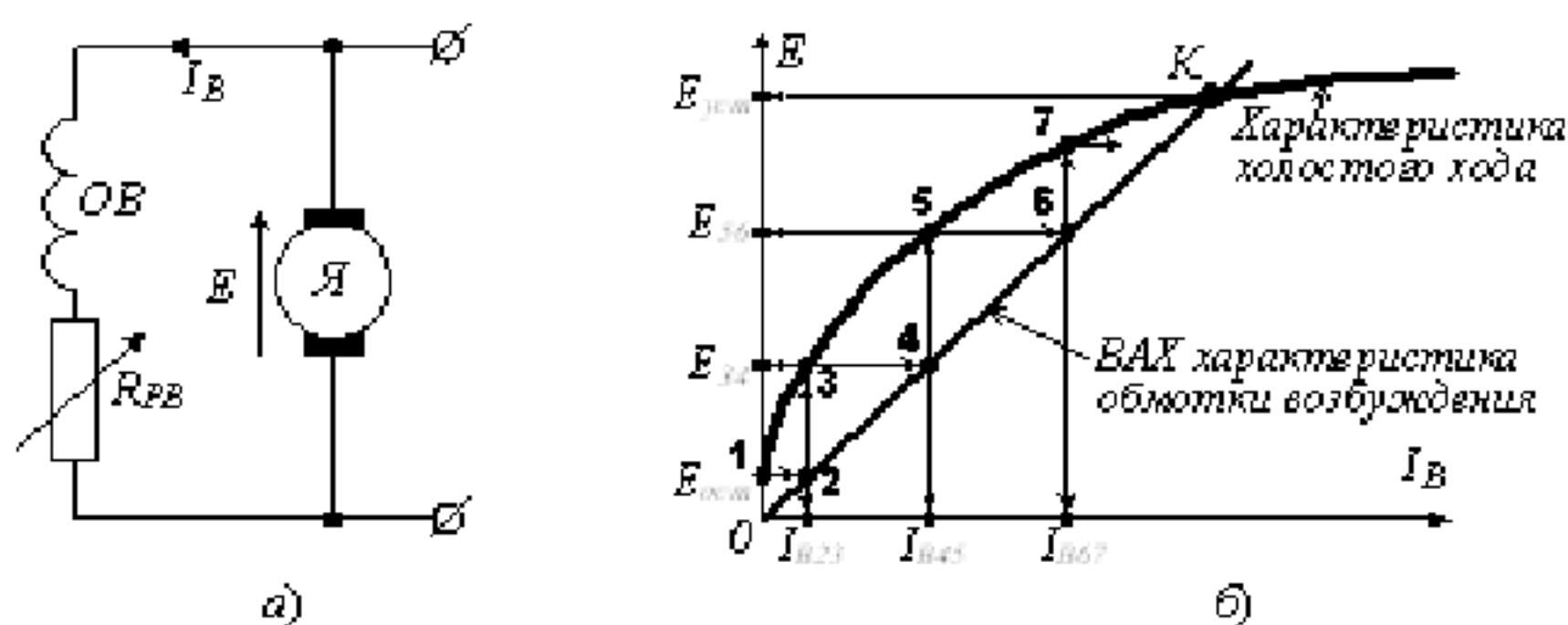


Рисунок 8.3- Схема ГПТ с параллельным возбуждением (а) и процесс самовозбуждения

1). Точка I – 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

$$I_{B23} = \frac{E_{ост}}{R_{ОВ} + R_{РВ}}.$$

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}

$$I_{B45} = \frac{E_{34}}{R_{ОВ} + R_{РВ}}$$

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.

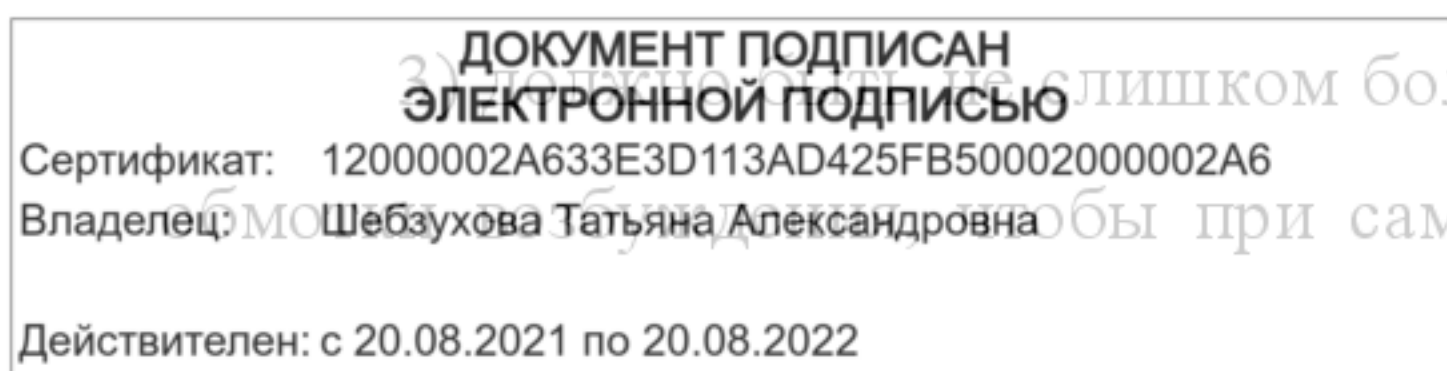
Описанные процессы будут повторяться до тех пор, пока будет достигнута точка K пересечения графиков холостого хода ГПТ и вольтамперной характеристики ОВ (3.35). На клеммах ГПТ установится э.д.с. $E_{уст}$ (далее – просто E).

Очевидно, что положение точки K зависит от наклона характеристик графика цепи ОВ. Чем больше сопротивление регулировочного реостата возбуждения $R_{РВ}$, 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 собственное сопротивление $R_{ОВ}$ обмотки возбуждения, чтобы при самовозбуждении без сопротивления $R_{РВ}$

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

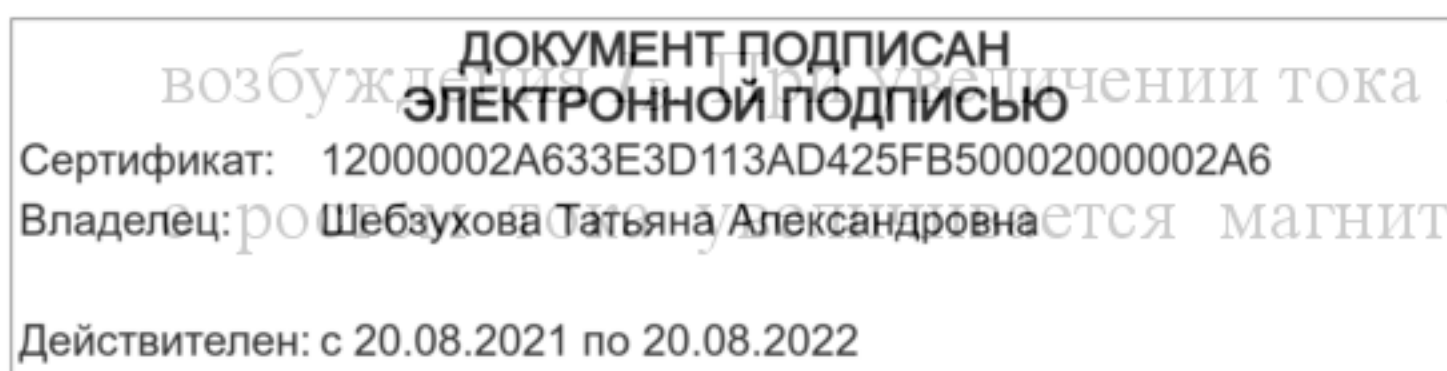
В генераторе со смешанным (*компаундным*) возбуждением поток создается двумя обмотками – шунтовой (ОВШ) и сериесной (ОВС) (рис.8.5,а). Применяется только параллельно-последовательное возбуждение с $\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} \pm \Phi_{С}$ с преобладанием магнитного потока $\Phi_{Ш}$ шунтовой ОВ над магнитным потоком $\Phi_{С}$ сериесной 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 сериесной 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. При увеличении тока якоря I_A увеличивается э.д.с. E , так как увеличивается магнитный поток ОВС, но и одновременно



растет падение напряжения ΔU на сопротивлении провода ОВС. На участке изменения тока якоря $I_{\text{я}}$ от нулевого значения до некоторого граничного значения $I_{\text{ГР}}$, рост э.д.с. E превышает рост падения напряжения ΔU и, поэтому, график 4 возрастающий. После тока $I_{\text{ГР}}$ 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 $I_{\text{ГР}}$ имеется ниспадающий участок.

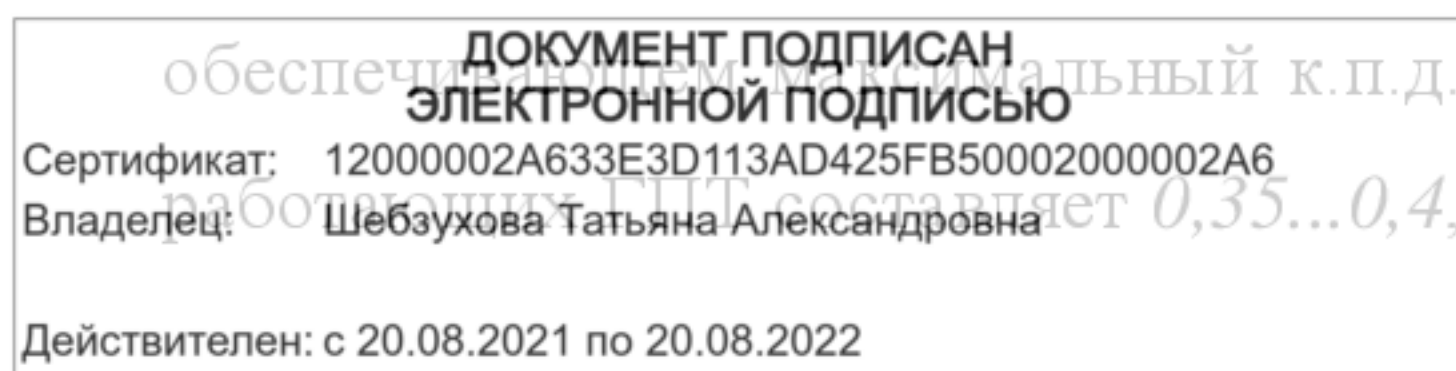
При согласном включении ОВШ и ОВС их магнитные потоки складываются ($\Phi_{\text{ОВ}} = \Phi_{\text{Ш}} + \Phi_{\text{С}}$) и, соответственно, внешние характеристики 2 и 4 складываются, образуя характеристику 1. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что выходное напряжение U практически неизменно 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 ($\Phi_{\text{ОВ}} = \Phi_{\text{Ш}} - \Phi_{\text{С}}$) и, соответственно, также вычитаются внешние характеристики 2 и 4, образуя характеристику 3. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что при коротком замыканий ГПТ ($U=0$) ток ограничен некоторым допустимым значением $I_{\text{КЗ}}$. Такие ГПТ применяются в качестве сварочных, 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,

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_A ГПТ в момент включения нулевой. Внешняя характеристика 3 подключенного ГПТ совпадает при токе $I_A=0$ 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_A ГПТ не должен превышать максимально допустимого.
2. Нагрузочный ток $I_{АН}$ 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 $I_{АН}$ ГПТ.

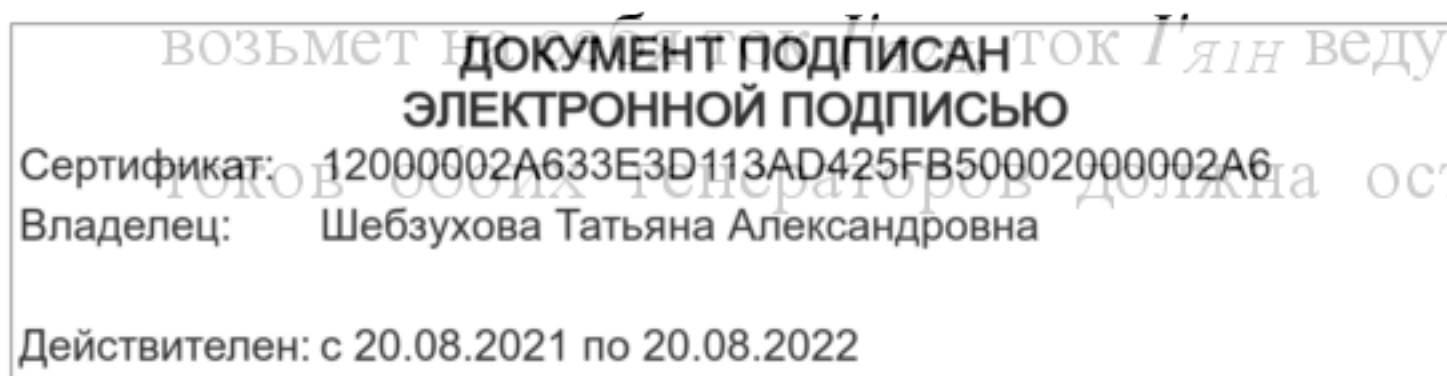
Параллельная работа ГПТ соизмеримой мощности.

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_{A1H} (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_{A2H} ведомого генератора будет нулевым.

Для нагружения ГПТ2 нужно увеличить его ток возбуждения. Внешняя характеристика сместится параллельно в положение 2'. ГПТ2

ток I'_{A1H} ведущего ГПТ2 уменьшится, так как сумма токов обоих генераторов должна остаться постоянной и равной току I_H .



потребляемому нагрузкой:

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

До нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 имело вид

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

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

После нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 примет вид

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

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 $U_{за\delta}$ до $U'_{за\delta}$.

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 $U_{за\delta}$:

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

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

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

Обоз	Наименование	ип	Параметры
начение	ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ		
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6	ОЧНИК	питания	~ 400 В / 16 А
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна			
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022			

		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 (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 переменного 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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Одобрение электронной 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.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

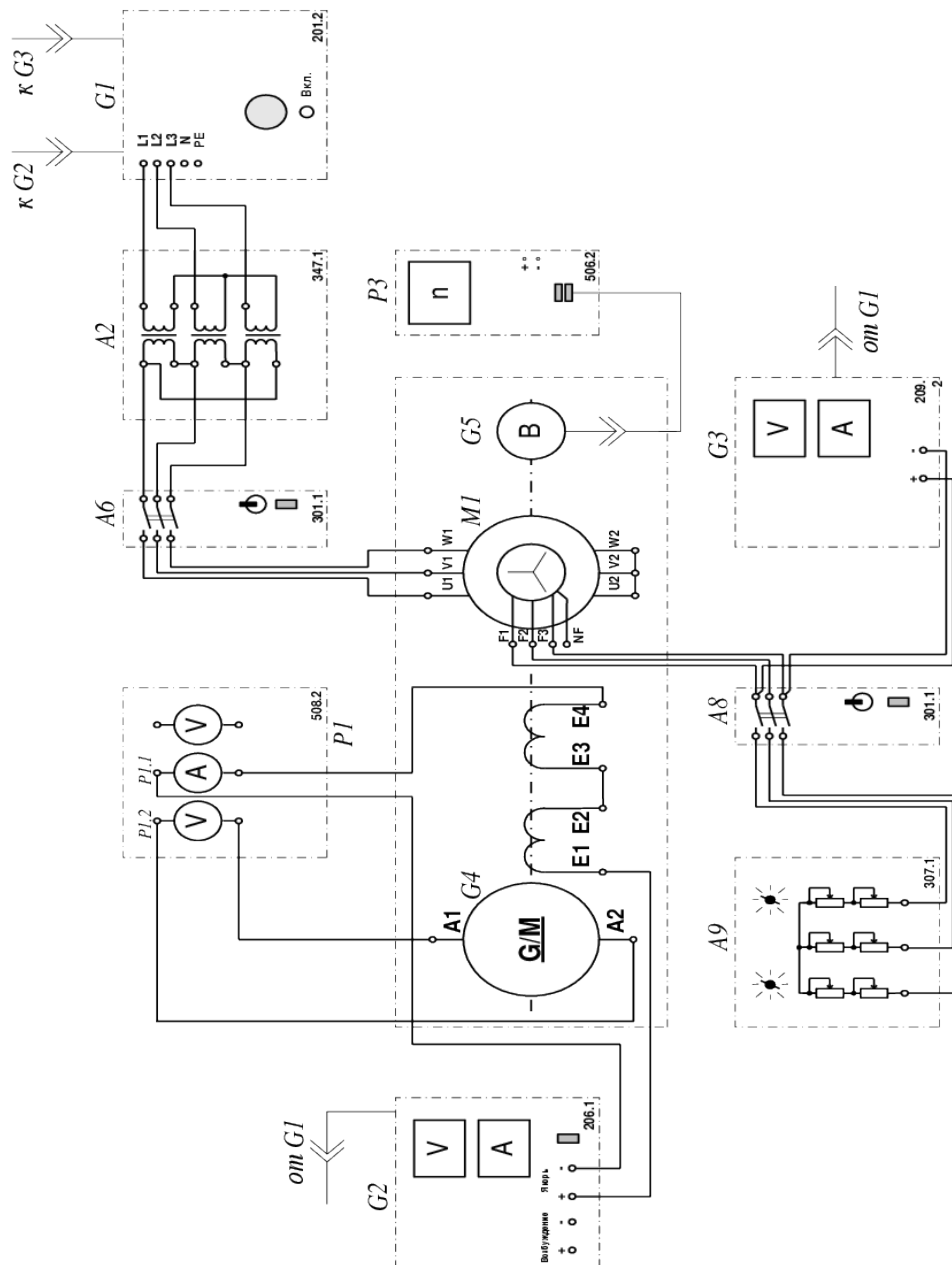


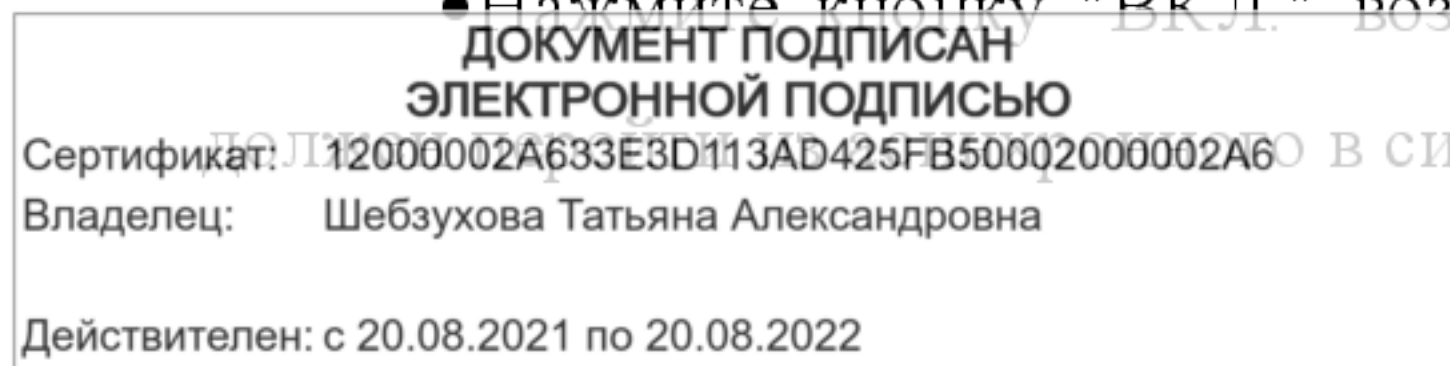
Рисунок 8.7 Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте,

- 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 А6 и А8 установите в положение "РУЧН".
- Регулировочные рукоятки источника G2 и 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 сопротивление 8 Ом.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей А6 и А8, блока мультиметров Р1, указателя частоты вращения Р3.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель А8 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 А6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 должен начать вращаться.

- Нажмите кнопку "ВКЛ" возбудителя G3. Двигатель М1 при этом



В синхронный режим работы с сетью.

- Отключите выключатель А8 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, А										
E_0, В										

- 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 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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

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
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 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	Трёхполосный выключатель	01.1	~ 400 В / 10 А
A9	Реостат для цепи ротора машины переменного 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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
 ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Оформление 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.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- 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 А6 и А8 установите в положение "РУЧН".
- Регулировочные рукоятки источника G2 и 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 сопротивление 8 Ом.
- Включите выключатель «СЕТЬ» выключателей А6 и А8, блока мультиметров Р1, указателя частоты вращения Р3.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель А8 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 А6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 должен начать вращаться и стрелка указателя частоты должна

ОТКЛОНИТЬСЯ ВЛЕВО

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- 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

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
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 переменного тока	07.1	3 × 0...40 Ом / 1 А
A10	Активная нагрузка	06.1	220 В / 3×0...50 Вт;
A11	Реостат возбуждения машины постоянного 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
			-2000...0...2000

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

		06.2	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.

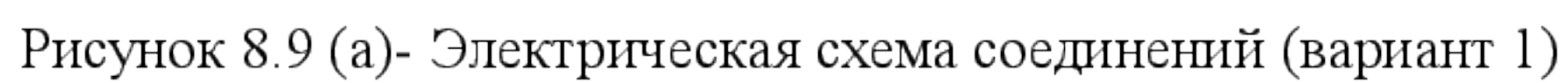
Реостат A11 ограничивает ток в цепи возбуждения генератора постоянного тока G4.

Реостат A13 повышает дискретность изменения тока возбуждения генератора G4.

С помощью мультиметров блока P1 контролируются ток возбуждения I_f ,

ток I и напряжение на обмотке испытуемого генератора G4.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	



Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

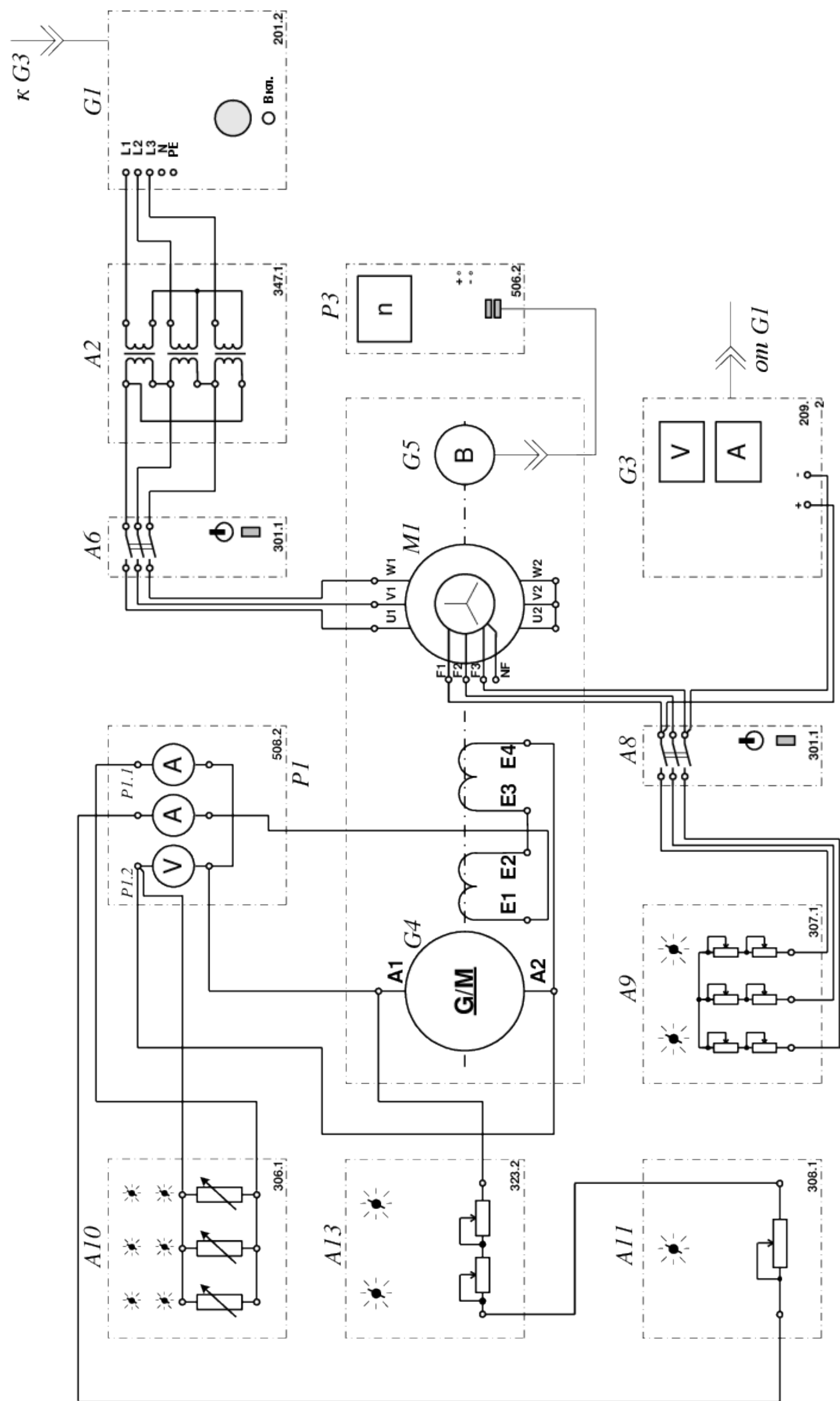


Рисунок 8.10- Электрическая схема соединений

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

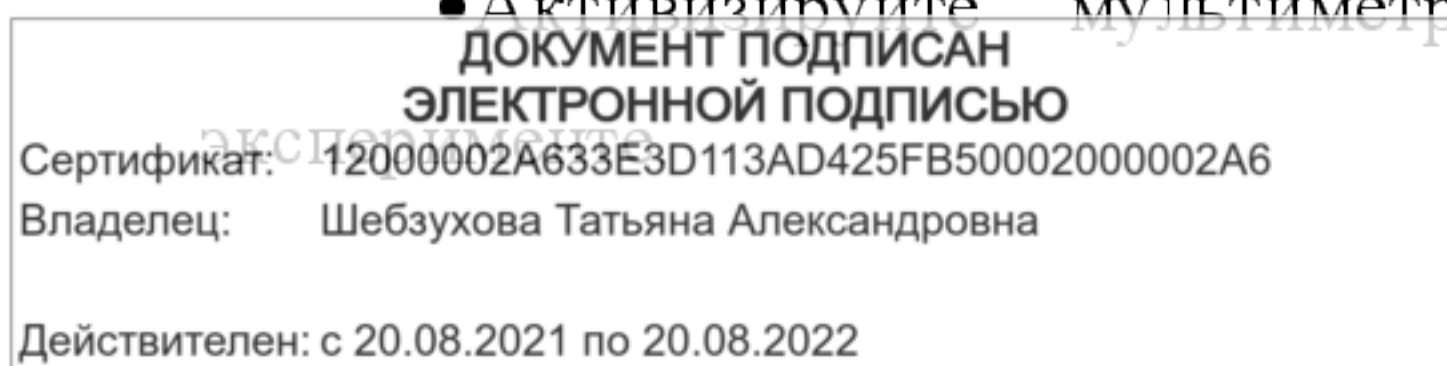
Указания по проведению эксперимента

- 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

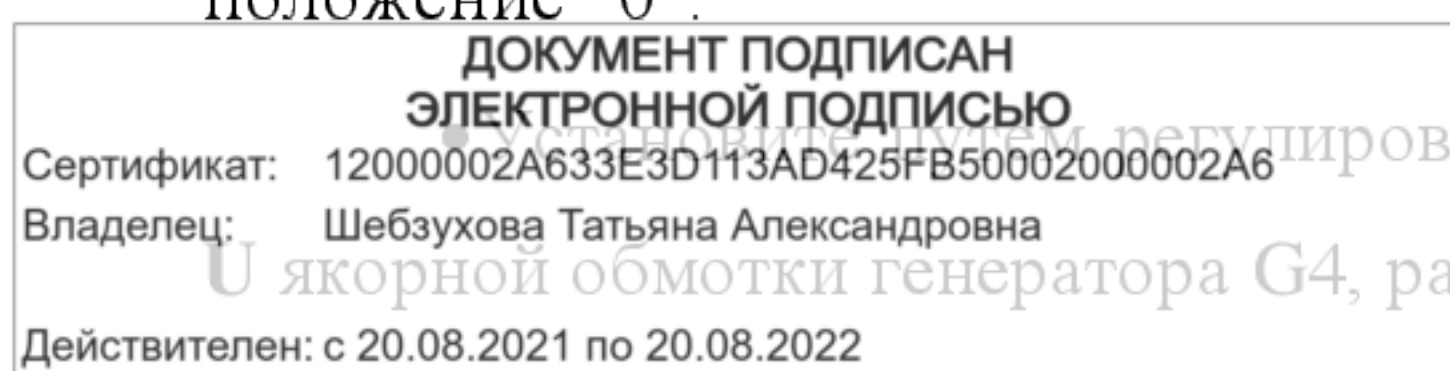


- Включите выключатель А8 кнопкой «ВКЛ».
- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель «СЕТЬ» возбuditеля G3 и, вращая его регулировочную рукоятку, установите на его выходе напряжение равным 20 В.
- Включите выключатель А6 кнопкой «ВКЛ». При этом двигатель М1 должен начать вращаться.
- Нажмите кнопку "ВКЛ." возбuditеля G3. Двигатель М1 при этом должен перейти из асинхронного в синхронный режим работы с сетью. Частота его вращения n должна достичь 1500 мин^{-1} .
- Отключите выключатель А8 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 А10, изменяйте ток I якорной обмотки генератора G4 и заносите показания амперметра Р1.1 (ток I) и вольтметра Р1.2 (напряжение U якорной обмотки генератора G4) в таблицу 1.3.1

Таблица 1.3.1

I, А										
U, В										

- Верните регулировочные рукоятки активной нагрузки А10 в положение "0".



Установите ток возбуждения I_f напряжение U якорной обмотки генератора G4, равным, например, 140 В.

•Перемещая регулировочные рукоятки активной нагрузки A10 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, А										
I_f, А										

•Меняя положение регулировочных рукояток активной нагрузки A10 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, А										
U, В										

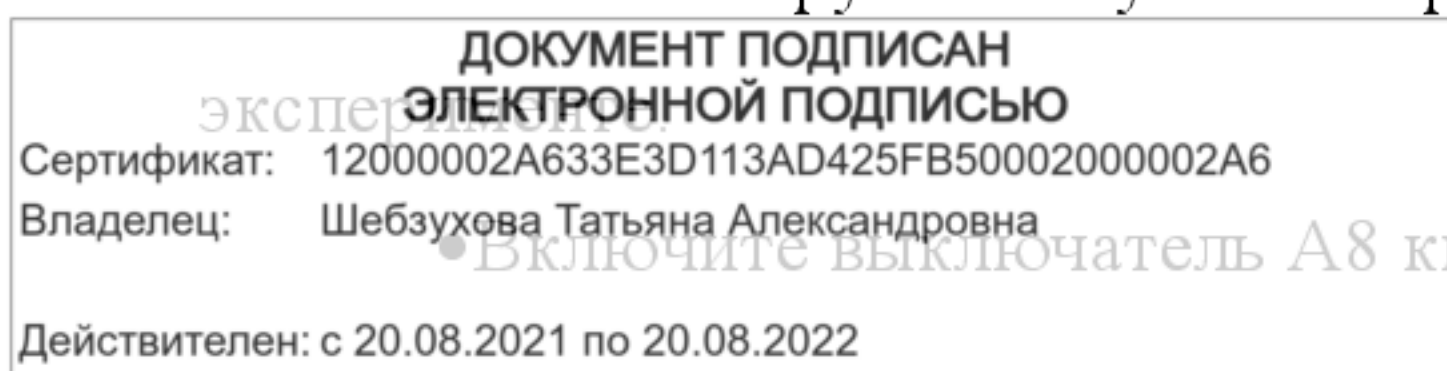
•По завершении эксперимента у источника G2 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора, нажмите кнопку "ОТКЛ." и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель A6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Отключите источник G1 нажатием на кнопку – гриб, и последующим отключением ключа – выключателя. Отключите выключатель "СЕТЬ" возбудителя G3,

и отключите выключатель блока мультиметров P1 и указателя частоты

- 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



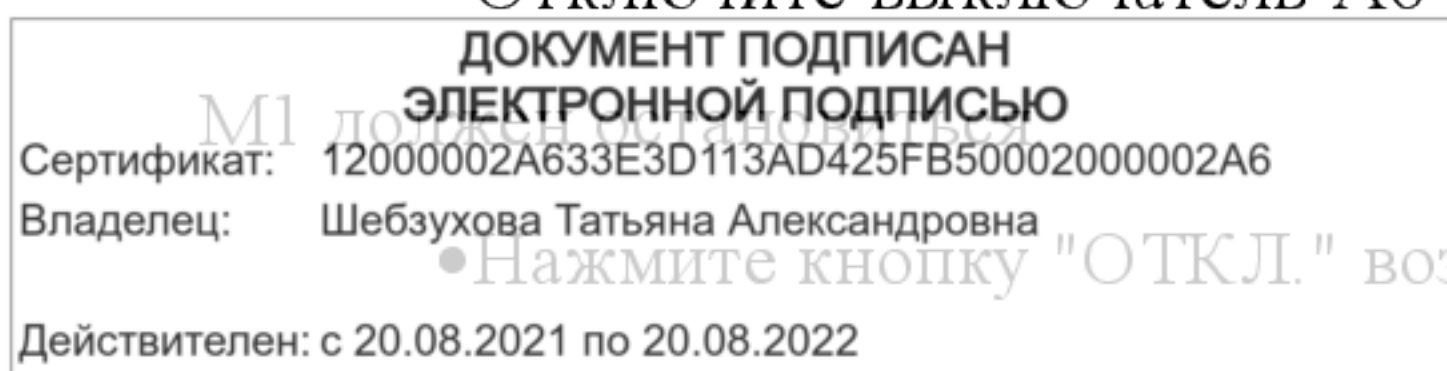
•Включите выключатель A8 кнопкой «ВКЛ».

- Включите источник G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатель «СЕТЬ» возбuditеля 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." возбuditеля 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.

I, А										
U, В										

- Отключите выключатель A6 нажатием кнопки "ОТКЛ.". Двигатель



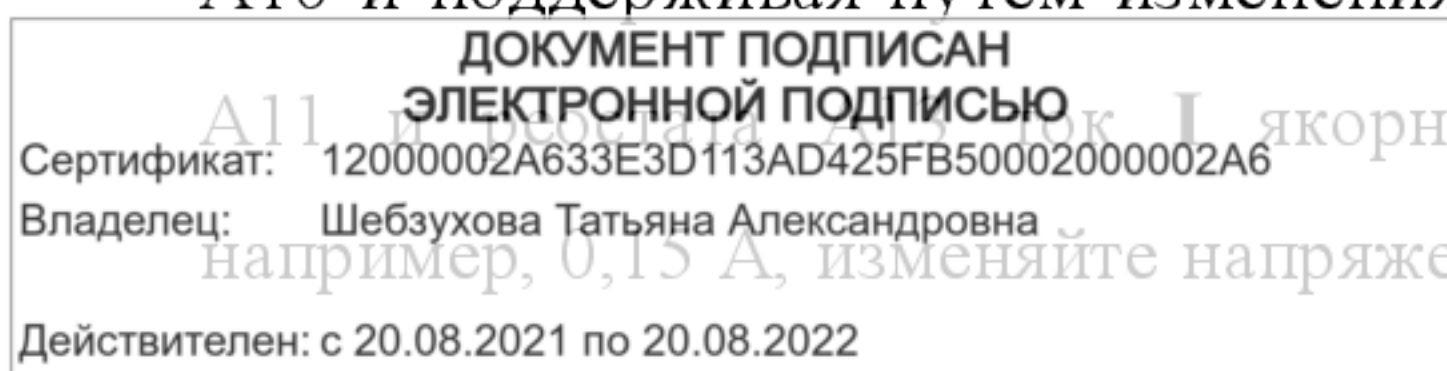
- Нажмите кнопку "ОТКЛ." возбuditеля G3.

- 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, А										
I_f, А										

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



- напряжения U якорной обмотки неизменным и равным, например, 90 В, изменяйте ток I 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 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. 1.3.2...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.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

3. Критерии возбуждения 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 сериесной 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 сериесной 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.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 $n=f(M)$ 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.

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.

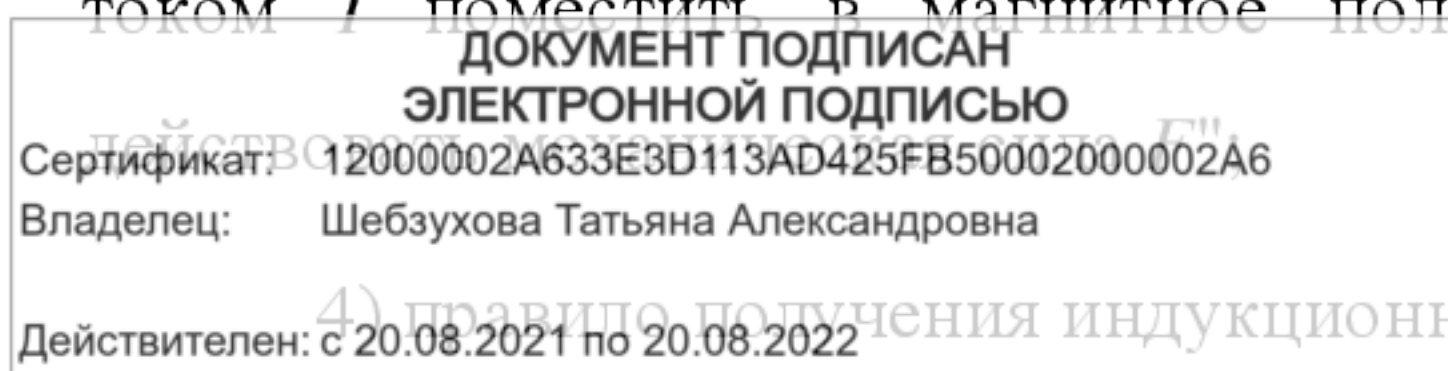
Теоритическая часть

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



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

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

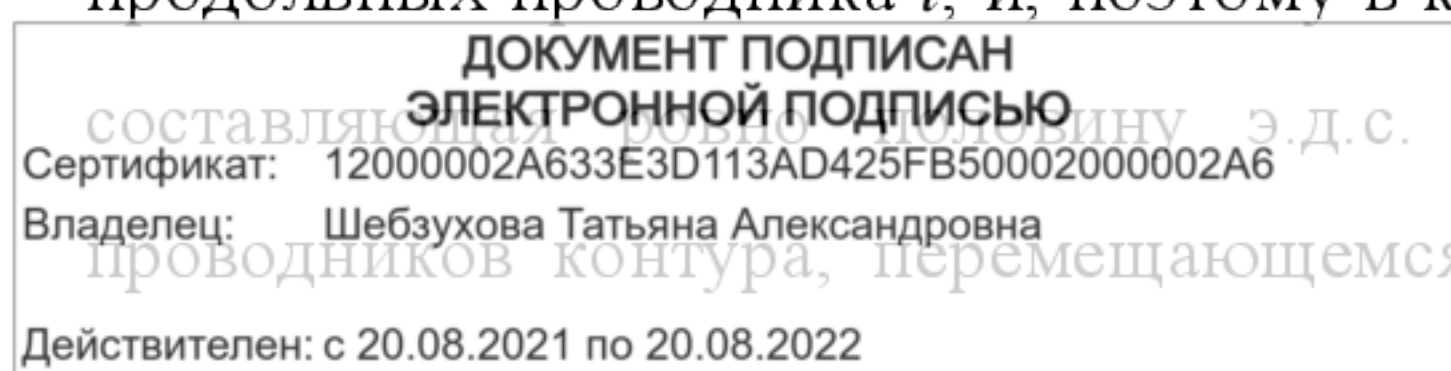
В контуре в соответствии с явлением электромагнитной индукции наведётся э.д.с. E_2 , равная

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

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 ,

составляющих равнодействующую э.д.с. E_2 . Учитывая это, в каждом из проводников контура, перемещающемся в магнитном поле, буде 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".

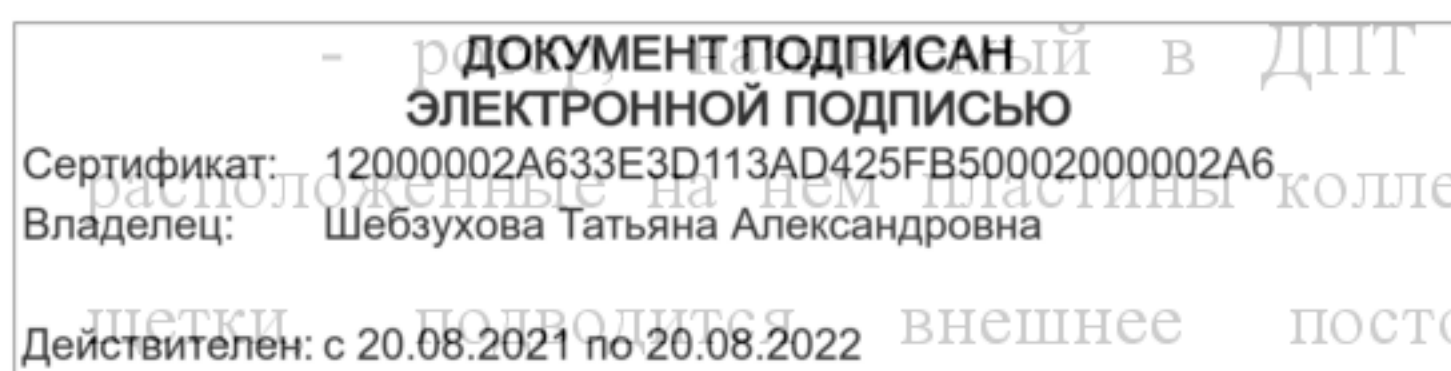
Отмечаем, что правило правой руки не является универсальным, каким является правило Ленца, применительно к базовому определению получения индукционной э.д.с., но его применение при анализе МПТ является более простым и, поэтому, предпочтительным.

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 $I_{ОВ}$, который создает постоянное магнитное поле возбуждения $\Phi_{ОВ}$; 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 $\Phi_{осн}$;

- обмотку якоря, расположенную на якоре; к обмотке якоря через коллектора и прилегающие к пластинам щетки подводится внешнее постоянное напряжение, называемое



напряжением якоря $U_{\text{я}}$; это напряжение создает в обмотке якоря постоянный ток якоря $I_{\text{я}}$.

Принцип действия ДПТ состоит в следующем: на проводники якоря, обтекаемые током $I_{\text{я}}$, помещенные в магнитное поле $\Phi_{\text{ОВ}}$ 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 $U_{\text{я}}$, то изменится направления тока $I_{\text{я}}$ 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 $\Phi_{\text{ОВ}}$. Направление э.д.с. вращения E , определенное по правилу правой руки, противоположно току $I_{\text{я}}$. Так как ток $I_{\text{я}}$ создается приложенным к якорю ДПТ напряжением $U_{\text{я}}$, то направления $I_{\text{я}}$

и $U_{\text{я}}$ совпадают. Э.д.с. вращения E направлена навстречу к $U_{\text{я}}$. Поэтому э.д.с. вращения E называют также противо-э.д.с. Установленное соотношение между E и $U_{\text{я}}$ позволяет записать следующее уравнение цепи

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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 .

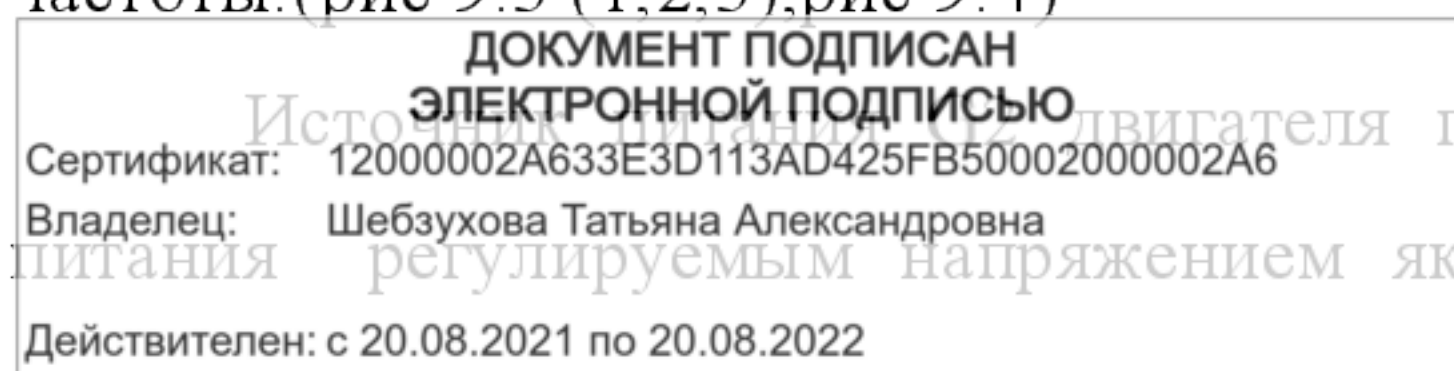
Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	ип	Параметры
G1	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	ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Машина переменного тока Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	04	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
G6			100 Вт / ~ 230 В

		02.1	/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	23.2	2×0...100 Ом / 1 А
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)



Источником питания двигателя постоянного тока используется для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и нерегулируемым

напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока М2, работающей в режиме двигателя с независимым возбуждением и для питания регулируемым напряжением якорной обмотки и обмотки возбуждения машины постоянного тока М2, 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 РЗ электромашиного агрегата.

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

Реостат А13 ограничивает пусковой ток двигателя М2.

Выключатель А6 предназначен для шунтирования реостата А13 после разгона двигателя М2.

Датчики тока и напряжения в блоке А12 обеспечивают гальваническую развязку силовой и измерительной цепей и преобразуют ток и напряжение якорной обмотки испытуемого двигателя М2 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.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

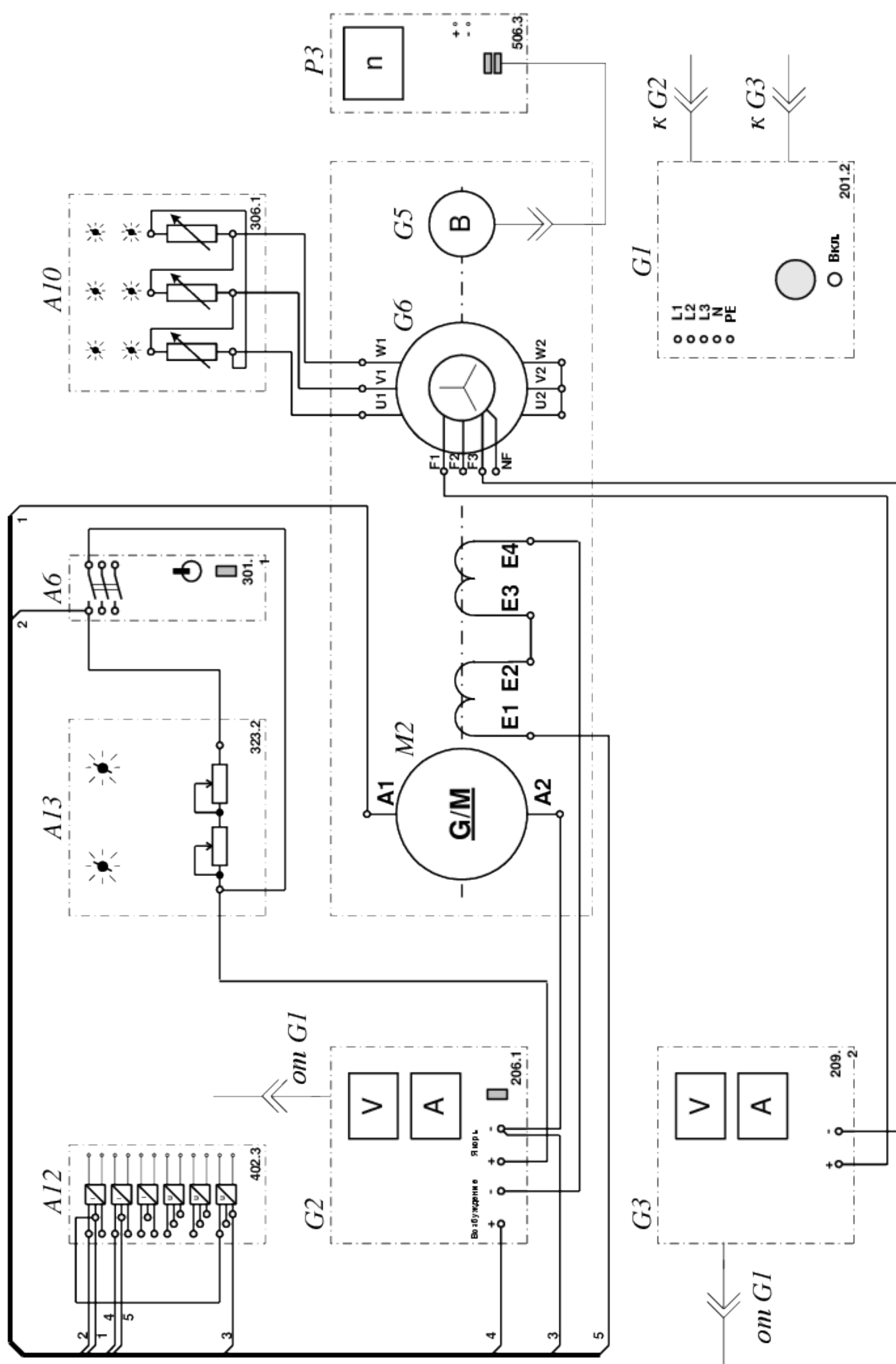


Рисунок 9.3 (1) -Электрическая схема соединений (вариант 1)

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

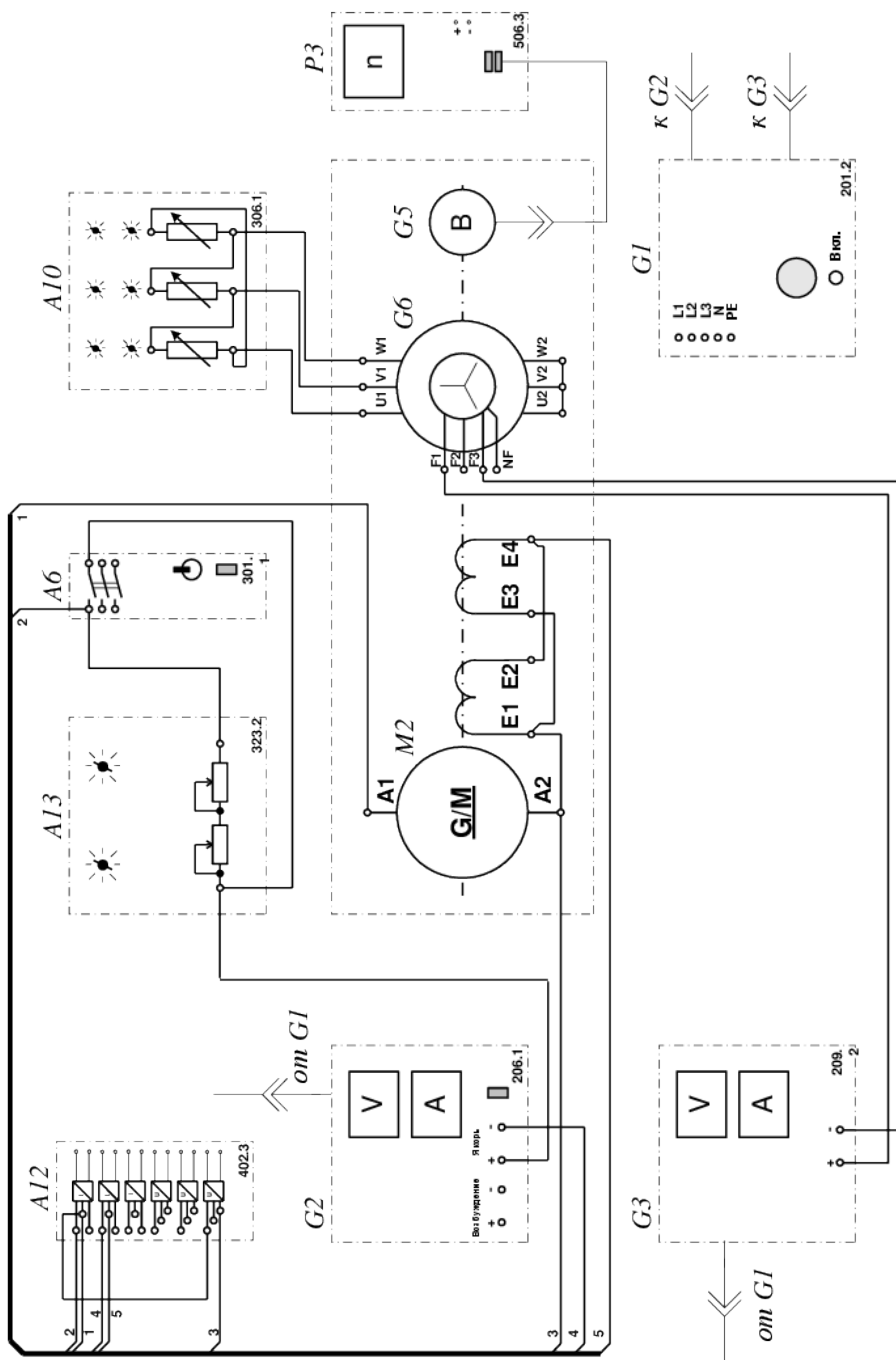


Рисунок 9.3(3)- Электрическая схема соединений (вариант 3)