

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

С.А. Конева, А.А. Нагирняк, Г.Н. Бойченко

О Б Щ А Я **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

Методические указания
к лабораторным работам для обучающихся специальности
26.05.05 «Судовождение»
и направления подготовки
26.03.01 «Управление водным транспортом
и гидрографическое обеспечение судоходства»
всех форм обучения

Севастополь
СевГУ
2026

УДК 621.3(076.5)
ББК 31/32-5*я73
К64

Р е ц е н з е н т:

В.Е. Высоцкий – д-р техн. наук,
профессор кафедры «Судовое электрооборудование»

Конева С. А.

К64 Общая электротехника и электроника : методические указания к лабораторным работам для обучающихся специальности 26.05.05 «Судовождение» и направления подготовки 26.03.01 «Управление водным транспортом и гидрографическое обеспечение судоходства» всех форм обучения / С. А Конева, А. А Нагирняк., Г. Н. Бойченко; Севастопольский государственный университет, Морской институт. – Севастополь: СевГУ, 2026. – 44 с. – Текст : электронный.

Предназначены для обучающихся Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности **26.05.05 Судовождение** и направления **26.03.01 Управление водным транспортом и гидрографическое обеспечение судоходства** и направлено на формирование у профессиональных компетенций, обеспечивающих выпускнику осуществлять профессиональную деятельность в соответствии с ФГОС ВО с учетом требований Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (**Конвенции ПДНВ**). Выполнение лабораторных работ направлено на формирование у обучающихся следующих компетентностей в соответствии с ФГОС ВПО: специальность 26.05.05 Судовождение: **ОПК-2** – Способен проводить измерения и наблюдения, обрабатывать и представлять экспериментальные данные; **ПК-13** – Способен обеспечить эксплуатацию системы дистанционного управления двигательной установкой и системами, и службами машинного отделения.

Направление 26.03.01 Управление водным транспортом и гидрографическое обеспечение судоходства: **ПК-5** – Способность осуществлять экспертизу технической документации, надзор и контроль за состоянием и эксплуатацией транспорта и транспортного оборудования, объектов транспортно-логистической инфраструктуры, выявлять резервы, устанавливать причины недостатков в работе, принимать меры по их устранению и повышению эффективности и безопасности транспортного процесса.

УДК 621.3(076.5)
ББК 31/32-5*я73

Рассмотрено и рекомендовано на заседании кафедры «Судовое электрооборудование», заседания кафедры № 3 от 22 октября 2025 г.

© Конева С.А., Нагирняк А.А.,
Бойченко Г.Н., 2026
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения	4
Лабораторная работа № 1. Простые линейные электрические цепи постоянного тока	5
Лабораторная работа № 2. Катушка индуктивности, конденсатор и резистор в режиме синусоидального тока	12
Лабораторная работа № 3. Исследование режимов работы трехфазной цепи, соединенной по схеме «Звезда – звезда»	18
Лабораторная работа № 4. Исследование диодов	26
Лабораторная работа № 5. Исследование биполярных транзисторов	29
Лабораторная работа № 6. Исследование логических элементов	32
Лабораторная работа № 7. Автоматическое управление асинхронным электродвигателем с фазным ротором	34
Лабораторная работа № 8. Исследование параллельной работы синхронных генераторов судовой электростанции	39
Библиографический список	44

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a – поворотный множитель, град.;
 B – магнитная индукция, Тл;
 C – емкость, Ф;
 E, e – электродвижущая сила (ЭДС), В;
 E_A, E_B, E_C – трехфазная система ЭДС, В;
 φ – потенциал, В;
 F – магнитодвижущая сила, А;
 H – напряженность магнитного поля, А/м;
 g – активная проводимость, См;
 I, i – ток, А;
 J – источник тока, А;
 L – индуктивность, Гн;
 $KЗ$ – знак короткого замыкания;
 ψ – начальная фаза, град.;
 ν – частота, Гц;
 η – коэффициент полезного действия;
 P – активная мощность, Вт;
 R, r – активное сопротивление, Ом;
 R_m – магнитное сопротивление, Гн⁻¹;
 Q – реактивная мощность, ВАр;
 $\underline{S}$ – комплексная мощность, ВА;
 t – время, с;
 T – период колебания, с;
 Φ – магнитный поток, Вб;
 U, u – напряжение, В;
 U_m – магнитное напряжение, А;
 X, x – реактивное сопротивление, Ом;
 XX – знак холостого хода;
 w – число витков;
 ω – круговая частота.

Лабораторная работа № 1 ПРОСТЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: исследование режимов работы последовательной и параллельной электрической цепи постоянного тока на основе законов Ома, Кирхгофа и баланса мощностей. Оценка влияния изменения элементов цепи на режим её работы.

Теоретический раздел

Последовательная линейная электрическая цепь постоянного тока изображена на рис.1, которая состоит из источника электродвижущей силы (ЭДС) E_2 и двух резисторов R_5 и R_6 .

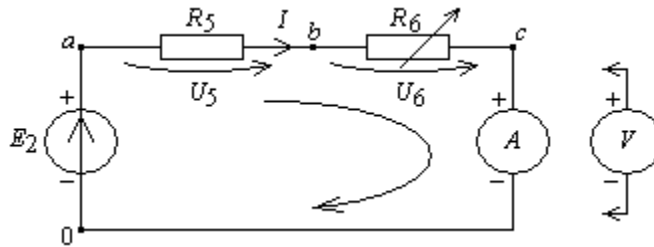


Рис. 1. Последовательная линейная электрическая цепь постоянного тока

При последовательном соединении сопротивления резисторов складываются, так что общее, входное сопротивление цепи относительно контактов источника ЭДС равно сумме сопротивлений резисторов $R_{\text{вх}} = R_5 + R_6$. По закону

Ома ток в цепи $I = \frac{E_2}{R_{\text{вх}}}$. Напряжения на резисторах по закону Ома $U_5 = IR_5$,

$U_6 = IR_6$. По второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма напряжений по контуру равна сумме ЭДС: $U_5 + U_6 = E_2$ (в нашем случае в контуре всего один источник ЭДС). Баланс мощностей заключается в равенстве суммарной мощности, потребляемой резисторами, и мощности, вырабатываемой источником ЭДС: $R_5 I^2 + R_6 I^2 = E_2 I$.

При изменении сопротивления одного из резисторов ток в цепи также изменяется, что приводит к перераспределению напряжений и мощностей на резисторах. На рис. 2, а изображены графики тока, напряжений и мощностей в зависимости от сопротивления резистора R_6 ; на рис. 2, б – графики напряжений и мощностей на элементах цепи в зависимости от тока при изменении сопротивления резистора R_6 от ∞ до нуля; на рис. 2, в – потенциальная диаграмма: график зависимости потенциалов точек контура a , b и c от сопротивлений резисторов контура.

Графики показывают, что с ростом сопротивления резистора R_6 ток цепи, мощность на источнике ЭДС, напряжение и мощность на резисторе R_5

уменьшаются, напряжение на резисторе R_6 увеличивается. Мощность на этом резисторе имеет максимум при значении $R_6 = R_5$. Эти же закономерности прослеживаются и на рис. 2,б.

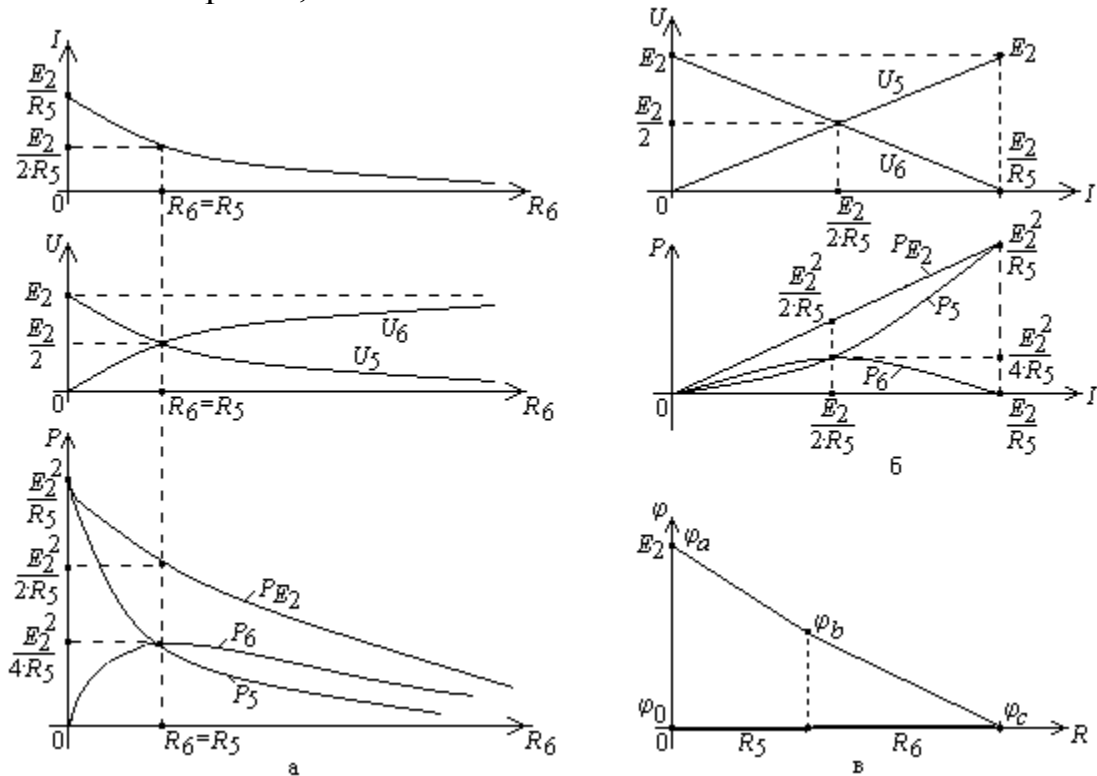


Рис. 2. Режимы работы последовательной цепи:

- а) зависимости тока, напряжений и мощностей от сопротивления резистора R_6 ;
- б) зависимости напряжений и мощностей от тока при изменении сопротивления R_6 ;
- в) потенциальная диаграмма для контура цепи

На рис. 3 изображена линейная электрическая цепь, состоящая из параллельно соединенных этих же резисторов.

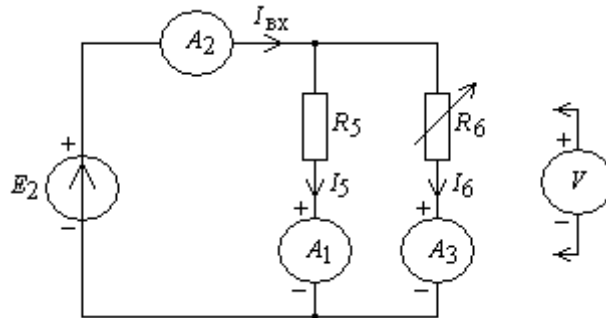


Рис. 3. Параллельная линейная электрическая цепь постоянного тока

При параллельном соединении складываются проводимости резисторов, так что общая проводимость цепи относительно контактов источника ЭДС равна сумме проводимостей $g_{\text{ex}} = g_5 + g_6$ или $\frac{1}{R_{\text{ex}}} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}$. По закону Ома то-

ки имеют вид: $I_5 = g_5 E_2 = \frac{E_2}{R_5}$; $I_6 = g_6 E_2 = \frac{E_2}{R_6}$; $I_{\text{вх}} = g_{\text{вх}} E_2 = \frac{E_2}{R_{\text{вх}}} = \frac{E_2}{\frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}}$.

Напряжения на обоих резисторах равны по величине ЭДС источника $U_5 = U_6 = E_2$. По первому закону Кирхгофа сумма токов, входящих в узел, равна сумме токов, выходящих из узла: $I_{\text{вх}} = I_5 + I_6$. Баланс мощностей заключается в равенстве суммарной мощности резисторов и мощности источника ЭДС: $R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2 = I_{\text{вх}} E_2$ или $\frac{E_2^2}{R_5} + \frac{E_2^2}{R_6} = \frac{E_2^2}{\frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}}$. При изменении сопро-

тивления одного из резисторов ток и мощность в нем и входные ток и мощность также изменяются, ток и мощность другого резистора остаются неизменными, рис. 4.

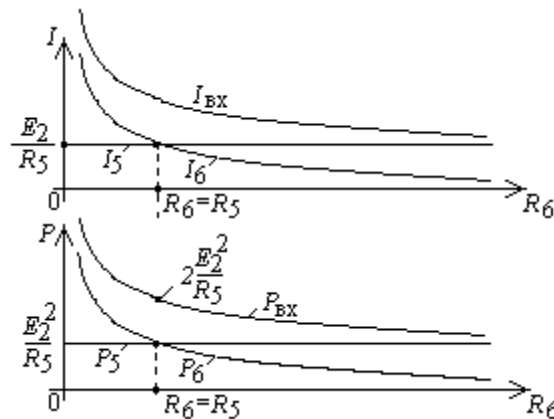


Рис. 4. Зависимости токов и мощностей от сопротивления резистора R_6 в параллельной цепи

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В качестве источника ЭДС E_2 используется регулируемый источник напряжения E_2 ; применяются резисторы $R_5 = 100 \text{ Ом}$, $R_6 = 120 \text{ Ом}$. Кроме них используются и другие резисторы: $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 40 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $R_4 = 80 \text{ Ом}$. Для измерения тока применяется цифровой амперметр $PA1$ (показания тока в Амперах). Напряжение измеряется аналоговым вольтметром с пределом измерения 15 В.

Программа экспериментов

1. Для исследования последовательной цепи соберите схему по рис. 1. Установите величину источника ЭДС равную 10 В. Для измерения этого напряжения параллельно источнику подсоедините вольтметр. Измерьте ток и напряжения на резисторах, поочередно подключая параллельно к ним вольтметр. Результаты измерений занесите в табл. 1. Повторите измерения, подсоединяя поочередно вместо резистора R_6 другие резисторы: R_4 , R_2 , R_3 , R_1 , а также $R=0$ (чистый проводник, короткое замыкание). Данные заносите в табл.1. Обратите внимание на рост тока при уменьшении величины подключаемого сопротивления, на снижение напряжения на уменьшаемом сопротивлении и на рост напряжения на неизменном сопротивлении R_5 . После окончания измерений выключите напряжение питания.

Таблица 1

Исследование последовательной цепи

Изменяемый резистор	Ток, А	U_{R5} , В	Напряжение на изменяемом резисторе, В	Расчетные величины	
				Сопротивления резисторов, Ом	$R_{\text{вх}}$, Ом
R_6					
R_4					
R_2					
R_3					
R_1					
0					

2. Для исследования параллельной цепи соберите схему по рис.3. Установите величину источника ЭДС равную 10 В. Измерьте входной ток и токи в резисторах. Результаты занесите в табл. 2. Повторите измерения, подключая, как и в п.1 вместо резистора R_6 , другие резисторы: R_2 и R_4 . Сопротивления R_1 , R_3 и $R=0$ здесь подсоединять не надо из-за недопустимо большого тока. Данные занесите в таблицу 2. Обратите внимание на то, что при уменьшении сопротивления изменяющегося резистора ток в нем и входной ток растут, ток в резисторе R_5 остается неизменным. После окончания измерений отключите напряжения питания.

Таблица 2

Исследование параллельной цепи

Изменяемый резистор	Ток I_5 , А	Входной Ток, А	Ток в изменяемом резисторе, А	Расчетные величины	
				Сопротивления резисторов, Ом	$R_{\text{вх}}$, Ом

Обработка результатов

1. По данным таблицы 1 рассчитайте величины сопротивлений всех резисторов, применяемых в опыте, и входное сопротивление, занесите в табл.1, сравните полученные результаты с данными стенда. Проверьте выполнение второго закона Кирхгофа для контура цепи. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов и о выполнении второго закона Кирхгофа.

2. Рассчитайте мощности на резисторах и на источнике ЭДС, результаты занесите в таблицу 3. Проверьте выполнение баланса мощностей во всех опытах.

Таблица 3

Исследование мощностей в последовательной цепи

Изменяемый резистор	Мощность источника, Вт	Мощность на резисторе R_5 , Вт	Мощность на изменяющемся резисторе, Вт	Суммарная мощность на резисторах, Вт
R_6				
R_4				
R_2				
R_3				
R_1				
0				

3. Постройте графики зависимостей тока, напряжений на резисторе R_5 и на изменяющемся резисторе в зависимости от сопротивления этого резистора. На другом чертеже постройте графики мощностей на источнике E_2 , на резисторе R_5 и на изменяющемся резисторе в зависимости от сопротивления этого резистора. Постройте графики зависимостей напряжений и мощностей на элементах цепи в зависимости от тока в цепи. Отдельно постройте на одном чертеже потенциальные диаграммы для всех случаев изменения резистора. Рекомендуемые масштабы: $m_U = 2 \text{ В/см}$; $m_I = 0,01 \text{ А/см}$; $m_P = 0,1 \text{ Вт/см}$; $m_R = 10 \text{ Ом/см}$.

Сделайте выводы о выполнении баланса мощностей во всех опытах и о зависимости режима цепи от величины изменяемого резистора.

4. По данным таблицы 2 рассчитайте величины сопротивлений всех резисторов, применяемых в опыте, и входное сопротивление, занесите в таблицу 2. Сравните результаты с данными стенда. Проверьте выполнение первого закона Кирхгофа для верхнего узла цепи. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов и выполнении первого закона Кирхгофа для всех опытов.

5. Рассчитайте мощности на резисторах и мощность источника E_2 , результаты занесите в таблицу 4. Проверьте баланс мощностей для всех случаев изменения резистора.

6. В прежних масштабах постройте графики зависимостей токов в резисторе R_5 , в изменяющемся резисторе и входного тока в зависимости от величины сопротивления изменяющегося резистора. На другом чертеже постройте графики мощностей на источнике E_2 , на резисторе R_5 и на изменяющемся резисторе в зависимости от величины этого резистора.

Сделайте выводы о выполнении баланса мощностей в параллельной цепи и о влиянии регулировки величины изменяемого резистора на режим работы.

Таблица 4

Исследование мощностей в параллельной цепи

Изменяемый резистор	Мощность источника, Вт	Мощность на резисторе R_5 , Вт	Мощность на изменяющемся резисторе, Вт	Суммарная мощность на резисторах, Вт
R_6				
R_4				
R_2				

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схемы опытов и таблицы полученных опытных данных.
3. Основные расчетные формулы, Результаты расчетов и таблицы с расчетными результатами.
4. Графики зависимостей параметров режимов цепей при регулировании величины сопротивления изменяемого резистора.
5. Выводы по каждому опыту о влиянии величины сопротивления изменяемого резистора на режимы работы в последовательной и параллельной цепи, а также о соответствии опытных и расчетных результатов.

Контрольные вопросы

1. Что такое «линейный элемент» в электрической цепи?
2. Приведите примеры линейных элементов электрических цепей.
3. В каких единицах измеряются сила тока, напряжение, мощность и сопротивление?
4. Как по показаниям амперметра и вольтметра определить величину сопротивления в цепи постоянного тока и его мощность?
5. Нарисуйте схемы для измерения методом амперметра и вольтметра больших и малых электрических сопротивлений.

6. Как определить величину эквивалентного сопротивления при последовательном соединении резисторов?
7. Как определить величину эквивалентного сопротивления при параллельном соединении резисторов?
8. Для исследуемых цепей запишите уравнения по законам Кирхгофа.
9. В чем заключается баланс мощностей в цепи постоянного тока?

Лабораторная работа № 2

КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ, КОНДЕНСАТОР И РЕЗИСТОР В РЕЖИМЕ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное определение параметров схем замещения резистора, катушки индуктивности и конденсатора в режиме синусоидального тока, получение их вольтамперных характеристик на различных частотах.

Теоретический раздел

Катушка индуктивности в режиме синусоидального тока может быть представлена последовательной схемой замещения, рис. 1, а. Резистор в этой схеме имеет смысл сопротивления обмотки катушки $r_{обм}$. Параметры этой схемы находятся по результатам измерения напряжения U , тока I и активной мощности P : сопротивление обмотки $r_{обм} = \frac{P}{I^2}$; полное сопротивление $z = \frac{U}{I}$;

реактивное сопротивление $x = \sqrt{z^2 - r_{обм}^2}$; индуктивность $L = \frac{x}{\omega}$, где

$\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ – круговая частота; разность фаз между входным напряжением и током $\varphi = \arctg \frac{x}{r_{обм}}$; качество катушки оценивается добротностью $Q = \frac{x}{r_{обм}}$.

Реактивное и полное сопротивления, угол разности фаз и добротность катушки зависят от частоты. На рис. 1, б изображен треугольник сопротивлений катушки.

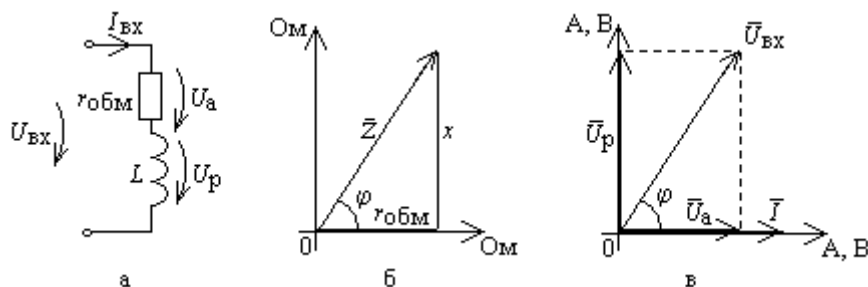


Рис. 1. Катушка индуктивности в режиме синусоидального тока:
а) последовательная схема замещения; б) треугольник сопротивлений;
в) совмещенная векторная диаграмма напряжений и тока

Вектор входного напряжения представляется суммой двух составляющих: активное напряжение $U_a = r_{обм} I$, возникающее на сопротивлении обмотки и совпадающее с током по фазе, и реактивное напряжение $U_p = x I$, возникающее на индуктивности и опережающее ток на 90° . Векторная диаграмма последовательной схемы изображена на рис. 1, в.

Конденсатор в режиме синусоидального тока представляется параллельной схемой, рис. 2, а. Резистор в этой схеме имеет смысл сопротивления утечки изоляции r_{ym} между обкладками конденсатора. Параметры этой схемы также

находятся по результатам измерения напряжения U , тока I и активной мощности P : проводимость утечки $g_{ym} = \frac{1}{r_{ym}} = \frac{P}{U^2}$; полная проводимость $y = \frac{I}{U}$; реактивная проводимость $b = \sqrt{y^2 - g_{ym}^2}$; емкость $C = \frac{b}{\omega}$; разность фаз между входными напряжением и током $\varphi = \arctg \frac{b}{g_{ym}}$; качество конденсатора оценивается добротностью $Q = \frac{b}{g_{ym}}$.

Реактивная и полная проводимости конденсатора, угол разности фаз и добротность также зависят от частоты. На рис. 2, б изображен треугольник проводимостей конденсатора.

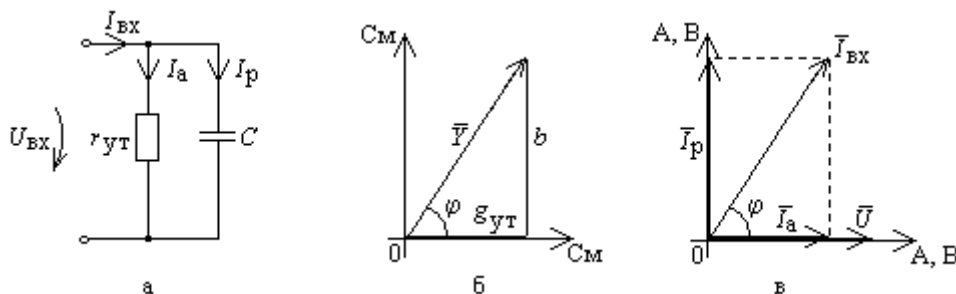


Рис. 2. Конденсатор в режиме синусоидального тока:
а) параллельная схема замещения; б) треугольник проводимостей;
в) совмещенная векторная диаграмма токов и напряжения

Вектор входного тока конденсатора представляется суммой двух составляющих: активный ток $I_a = g_{ym}U$, возникающий в сопротивлении утечки и совпадающий с входным напряжением по фазе, и реактивный ток $I_p = bU$, возникающий в емкости и опережающий напряжение на 90° . Векторная диаграмма параллельной схемы изображена на рис. 2, в.

Резистор в режиме синусоидального тока промышленной частоты не имеет схемы замещения; напряжение и ток в нем совпадают по фазе. Сопротивление резистора является активным и определяется по выражениям $r = \frac{U}{I}$ или $r = \frac{P}{I^2}$.

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В качестве источника напряжения используется регулируемый источник E_1 . Для анализа выбирается катушка индуктивности Z_2 с индуктивностью 80 мГн, конденсатор C_3 с емкостью 10 мкФ и резистор R_4 с сопротивлением 120 Ом. Для измерения тока применяются цифровой амперметр PA1; для измерения

мощностей, частоты и угла разности фаз между напряжением и током используется цифровой универсальный измеритель мощности *PP1*.

Программа эксперимента

1. Соберите схему по рис.3. Ручку регулятора напряжения установите в крайнее левое положение, ручку регулировки частоты – на 50 Гц. Включите источник и, плавно увеличивая его напряжение от нуля через 2 В до 10 В получите вольтамперную характеристику резистора R_4 на частоте 50 Гц. Результаты занесите в таблицу 1. Повторите измерения при частоте 150 Гц. Обратите внимание на то, что ВАХ резистора практически не зависит от частоты. Выключите напряжение питания стенда.

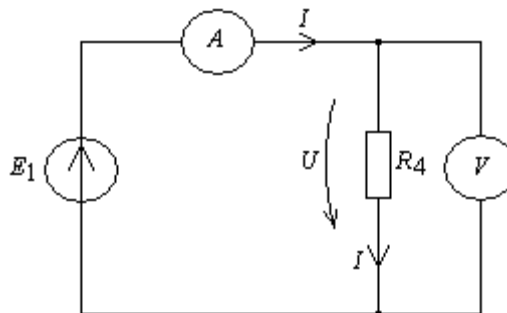


Рис. 3. Определение сопротивления резистора в режиме синусоидального тока

Таблица 1

Вольтамперные характеристики резистора

U , В	0	2	4	6	8	10
I , мА. Частота 50 Гц						
I , мА. Частота 150 Гц						

2. Для анализа конденсатора соберите схему по рис. 4. Ручку регулятора напряжения установите в крайнее левое положение, ручку регулировки частоты – на 50 Гц. Включите источник и, плавно увеличивая его напряжение от нуля через 2 В до 10 В, получите вольтамперную характеристику конденсатора C_3 на частоте 50 Гц. Результаты измерения тока и активной мощности занесите в таблицу 2. Повторите измерения при частоте 150 Гц. Обратите внимание на то, что ВАХ конденсатора смещается в сторону больших токов при увеличении частоты. Выключите напряжение питания стенда.

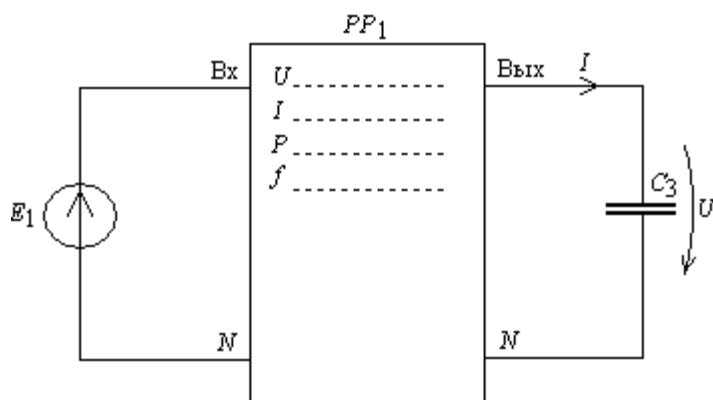


Рис. 4. Определение параметров конденсатора в режиме синусоидального тока

Таблица 2

Вольтамперные характеристики конденсатора

U , В	0	2	4	6	8	10
I , мА. Частота 50 Гц	0					
P , Вт Частота 50 Гц	0					
I , мА. Частота 150 Гц	0					
P , Вт Частота 150 Гц	0					

3. Для анализа катушки индуктивности соберите схему по рис. 5, т.е. в схеме по рис.4 вместо конденсатора подсоедините катушку Z_2 . Ручку регулятора напряжения установите в крайнее левое положение, ручку регулировки частоты – на 50 Гц. Включите источник и, плавно увеличивая его напряжение от нуля через 2 В до 10 В, получите вольтамперную характеристику катушки Z_2 на частоте 50 Гц. Результаты измерения тока и активной мощности занесите в таблицу 3. Повторите измерения при частоте 150 Гц. Обратите внимание на то, что ВАХ катушки смещается в сторону меньших токов при увеличении частоты. Выключите напряжение питания стенда.

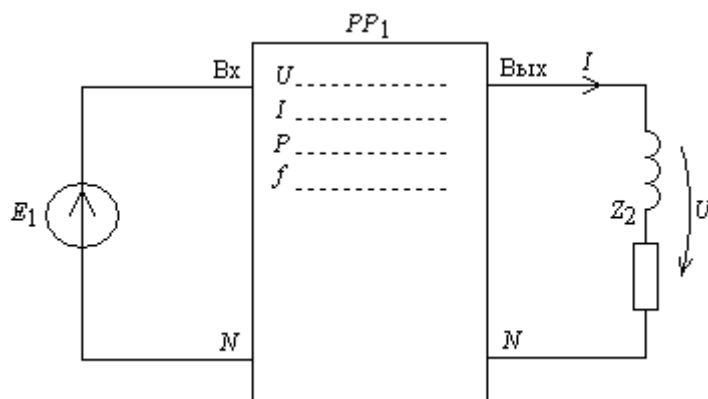


Рис. 5. Определение параметров катушки индуктивности в режиме синусоидального тока

Таблица 3

Вольтамперные характеристики катушки

U , В	0	2	4	6	8	10
I , мА. Частота 50 Гц	0					
P , Вт Частота 50 Гц	0					
I , мА. Частота 150 Гц	0					
P , Вт Частота 150 Гц	0					

Обработка результатов

1. На одном чертеже постройте вольтамперные характеристики резистора для двух частот, на другом чертеже – аналогично для конденсатора и на третьем – для катушки. Оцените степень линейности элементов. Сделайте выводы о причинах зависимости характеристик от частоты.

2. При напряжении 10 В для частот 50 Гц и 150 Гц рассчитайте активное сопротивление резистора; полное, активное и реактивное сопротивления катушки, её индуктивность; полную, активную и реактивную проводимости конденсатора, его емкость, а также угол разности фаз между напряжением и током. Результаты занесите в таблицу 4. Обратите внимание на сравнительно малую активную проводимость конденсатора, зачастую ею можно пренебречь: $g \approx 0$, $y \approx b$, $\varphi \approx -90^\circ$. Сделайте выводы о соответствии опытных результатов и номинальных значений элементов.

Таблица 4

Параметры катушки, конденсатора и резистора в цепи синусоидального тока

	f , Гц	Z , Ом	r , Ом	x , Ом	L , Гн	y , См	g , См	b , См	C , Ф	φ , Гр
R_4	50			-----	-----			-----	-----	
	150			-----	-----			-----	-----	
Z_2	50					-----	-----	-----	-----	
	150					-----	-----	-----	-----	
C_3	50	-----	-----	-----	-----					
	150	-----	-----	-----	-----					

3. По результатам расчетов в таблице 4 для всех трех элементов постройте векторные диаграммы токов и напряжений, а также треугольники сопротивлений и проводимостей. Рекомендуемые масштабы: $m_U = 2$ В/см, $m_i = 10$ мА/см, $m_R = 50$ Ом/см, $m_Y = 10^{-2}$ См/см.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схемы опытов и таблицы опытных данных.
3. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
4. Графики вольтамперных характеристик элементов цепи. Выводы о влиянии частоты входного напряжения на режим работы цепи.
5. Векторные диаграммы и треугольники сопротивлений и проводимостей для всех трех элементов.
5. Выводы о соответствии опытных и теоретических результатов.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение полному, активному, реактивному сопротивлениям. Какая между ними зависимость?
2. Дайте определение полной, активной, реактивной проводимостям. Какая между ними зависимость?
3. Объясните физический смысл параметров схем замещения катушки и конденсатора.
4. Объясните построение треугольников сопротивлений и проводимостей катушки и конденсатора и их векторных диаграмм.
5. В чем состоит отличие реальных катушки и конденсатора от идеальных?
6. Как соотносятся по фазе напряжение и ток в катушке? В конденсаторе? В резисторе?
7. Как по данным опыта для резистора оценить точность измерения его напряжения, тока и мощности?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА – ЗВЕЗДА»

Цель работы: экспериментальное исследование симметричных, несимметричных и аварийных режимов трехфазной цепи, соединенной по схеме «Звезда – звезда»; оценка влияния нейтрального провода на работу цепи.

Теоретический раздел

Трехфазная цепь, соединенная по схеме «звезда – звезда», состоит из трех источников ЭДС E_A, E_B, E_C и нагрузки r_a, r_b, r_c , соединенных тремя линейными проводами a, b, c и нейтральным (нулевым) проводом (рис. 1, а). В линейных проводах протекают линейные токи I_A, I_B, I_C , которые в рассматриваемой цепи совпадают с фазными токами нагрузки I_a, I_b, I_c . Далее не будем учитывать сопротивления проводов и нейтрального провода, а сопротивления нагрузки будем полагать чисто резистивными.

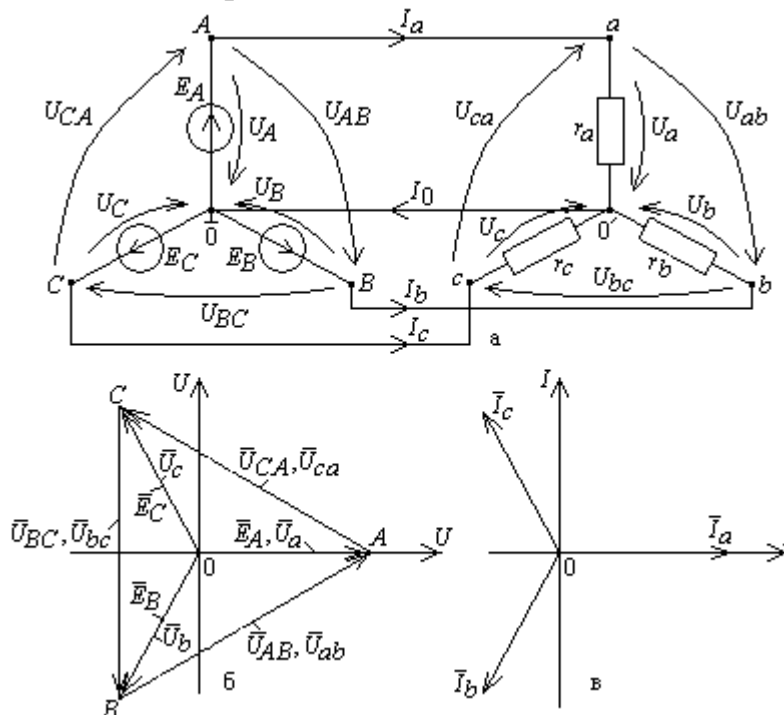


Рис. 1. Трехфазная цепь, соединенная по схеме «звезда – звезда» а) с нейтральным проводом и ее векторные диаграммы напряжений б) и токов в) в симметричном режиме

Все три ЭДС равны между собой по величине $E_A = E_B = E_C = E$, их векторы смещены на 120° друг по отношению к другу и образуют симметричный трехфазный источник напряжения, рис. 1, б. Между точками A и 0 возникает фазное напряжение источника $U_A = E_A$; между точками B и 0 – фазное напряжение $U_B = E_B$; между C и 0 – фазное напряжение $U_C = E_C$. Между точками A и B возникает линейное напряжение $U_{AB} = E_A - E_B$; между точками B и C

– линейное напряжение $U_{BC} = E_B - E_C$; между точками C и A – линейное напряжение $U_{CA} = E_C - E_A$, рис.1, б. Все фазные напряжения источника равны между собой по величине; все линейные напряжения источника также равны между собой по величине и превосходят фазные в $\sqrt{3}$.

Нагрузка, соединенная в звезду, состоит из трех сопротивлений r_a, r_b, r_c , одинаковых при симметричной нагрузке $r_a = r_b = r_c = r$. На каждом сопротивлении возникает фазное напряжение нагрузки: $U_a = r_a I_a$; $U_b = r_b I_b$; $U_c = r_c I_c$; между выводами фаз a, b нагрузки существует линейное напряжение $U_{ab} = U_a - U_b$; между выводами b, c – линейное напряжение $U_{bc} = U_b - U_c$; между выводами c, a – линейное напряжение $U_{ca} = U_c - U_a$.

Если не учитывать сопротивления проводов, то линейные напряжения источника и нагрузки всегда равны между собой: $U_{AB} = U_{ab}$; $U_{BC} = U_{bc}$; $U_{CA} = U_{ca}$, и образуют на векторной диаграмме правильный треугольник. При симметричной нагрузке все фазные напряжения равны между собой по величине, все линейные напряжения также равны между собой и превышают фазные в $\sqrt{3}$; также равны между собой фазные напряжения источника и нагрузки: $U_A = U_a$; $U_B = U_b$; $U_C = U_c$. Потенциал нейтральной точки симметричной нагрузки всегда равен нулю.

При симметричной нагрузке режим работы цепи не зависит от наличия нейтрального провода; векторы токов образуют правильную трехлучевую звезду (рис. 1, в) и определяются по закону Ома

$$I_a = \frac{U_a}{r_a}; I_b = \frac{U_b}{r_b}; I_c = \frac{U_c}{r_c}. \quad (1)$$

При наличии нейтрального провода ток в нем равен нулю.

Если нагрузка несимметричная, то режим работы зависит от присутствия нейтрального провода. При его наличии потенциал нейтральной точки $\varphi_{0'} = 0$; фазные напряжения нагрузки равны соответствующим фазным напряжениям источника, токи определяются по закону Ома (1). Вследствие несимметрии нагрузки эти токи уже не образуют правильной звезды, и согласно первому закону Кирхгофа возникает уравнительный ток нейтрального провода $I_0 = I_a + I_b + I_c$. При отсутствии нейтрального провода потенциал нейтральной точки не равен нулю, возникает напряжение смещения нейтрали $U_{0'0} = \varphi_{0'} - \varphi_0 = \varphi_{0'}$, которое определяется в соответствии с уравнением узловых потенциалов

$$\left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c} \right) \varphi_{0'} = \frac{E_A}{r_a} + \frac{E_B}{r_b} + \frac{E_C}{r_c}. \quad (2)$$

Для построения вектора потенциала нейтральной точки следует сложить три вектора: $\varphi_0' = \frac{E_A}{r_a \cdot Y_{abc}} + \frac{E_B}{r_b \cdot Y_{abc}} + \frac{E_C}{r_c \cdot Y_{abc}}$, где $Y_{abc} = \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c}$. Фазные напряжения нагрузки определяются разностями векторов

$$U_a = E_A - \varphi_0'; U_b = E_B - \varphi_0'; U_c = E_C - \varphi_0'.$$

Нормальный режим работы трехфазной цепи существует при симметричной нагрузке. В реальных условиях могут возникать несимметричные и аварийные режимы. Обычным несимметричным режимом является изменение сопротивления нагрузки одной из фаз. Например, в условиях отсутствия нейтрального провода при увеличении сопротивления фазы C вдвое $r_c = 2r$; $r_b = r_a = r$ потенциал нейтральной точки нагрузки в соответствии с (2) принимает значение $\varphi_0' = -0,2E_C$; фазное напряжение U_c увеличивается $U_c = 1,2E_C$, а фазные напряжения здоровых фаз уменьшаются до величины $0,2\sqrt{21} \cdot E$, рис. 2, а. Фазный ток I_c уменьшается до значения $0,6 \frac{E}{r}$, токи в здоровых фазах – до значения $0,2\sqrt{21} \frac{E}{r}$.

При аварийном обрыве нагрузки фазы C $r_c \rightarrow \infty$; потенциал нейтральной точки в соответствии с (1) принимает значение $\varphi_0' = -0,5E_C$, рис. 2, б. Напряжения на здоровых фазах сокращаются до значений $\frac{\sqrt{3}}{2}E$; токи – до значений $\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{E}{r}$; напряжение на обрыве фазы c увеличивается в полтора раза $U_c = 1,5E_C$ по сравнению с симметричным режимом.

Еще одним распространенным аварийным режимом в условиях симметрии нагрузки является нарушение симметрии источника питания, связанное с потерей напряжения фазной ЭДС (выпадение фазы), например, $E_C = 0$, что приводит к снижению линейных напряжений U_{BC}, U_{CA} в $\sqrt{3}$ раз до величины E . При симметричной нагрузке в соответствии с (2) потенциал нейтральной точки $\varphi_0' = -\frac{1}{3}E_C$, рис. 2, в; напряжение и ток фазы C уменьшаются втрое по сравнению с симметричным режимом: $U_c = \frac{1}{3}E_C$; $I_c = \frac{1}{3} \frac{E_C}{r}$. Напряжения на здоровых фазах сокращаются до значений $\frac{\sqrt{7}}{3}E$; а токи – до значений $\frac{\sqrt{7}}{3} \frac{E}{r}$.

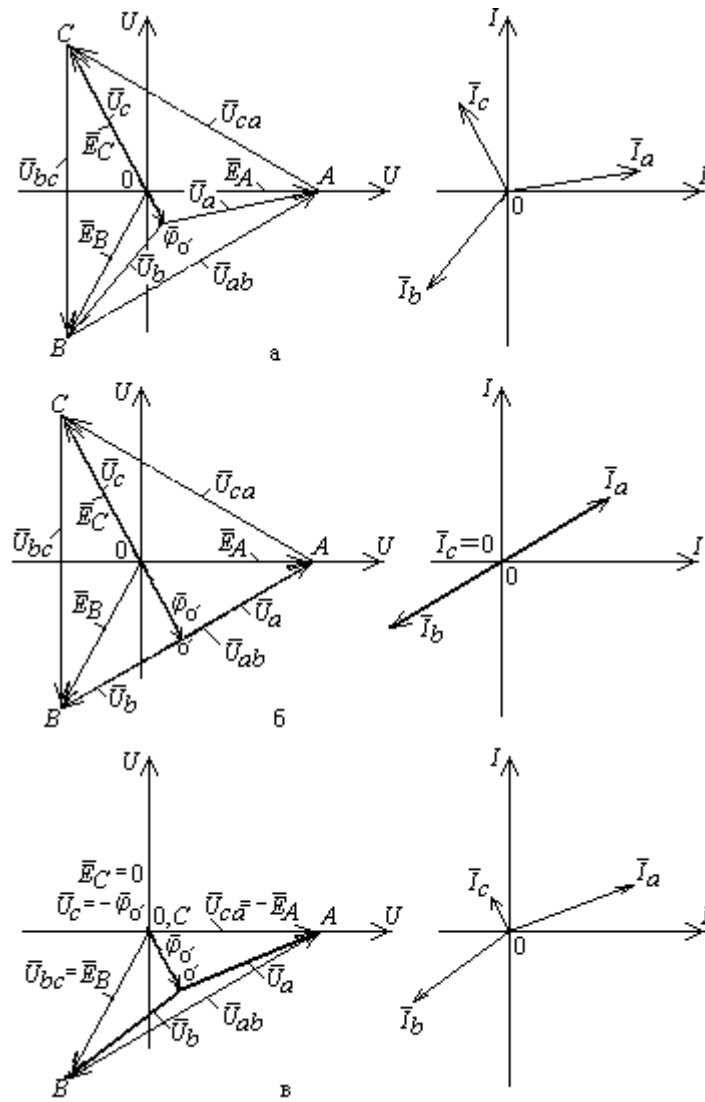


Рис. 2. Векторные диаграммы несимметричных режимов трехфазной цепи:

- а) удвоение сопротивления в фазе C ; б) обрыв нагрузки в фазе C ;
в) выпадение фазы C источника

Если в цепи присутствует нейтральный провод, то несимметрия нагрузки (обрыв или изменение сопротивления фаз) не изменяет фазных напряжений нагрузки и не нарушает их симметрии, изменяются лишь соответствующие фазные токи, и возникает ток нейтрального провода. Так, при увеличении вдвое сопротивления в фазе C $I_C = \frac{E_C}{2r}$; токи в здоровых фазах не изменяются по сравнению с симметричным режимом, ток в нейтральном проводе $I_0 = -\frac{E_C}{2r}$ компенсирует убывание тока в фазе A , рис. 3, а.

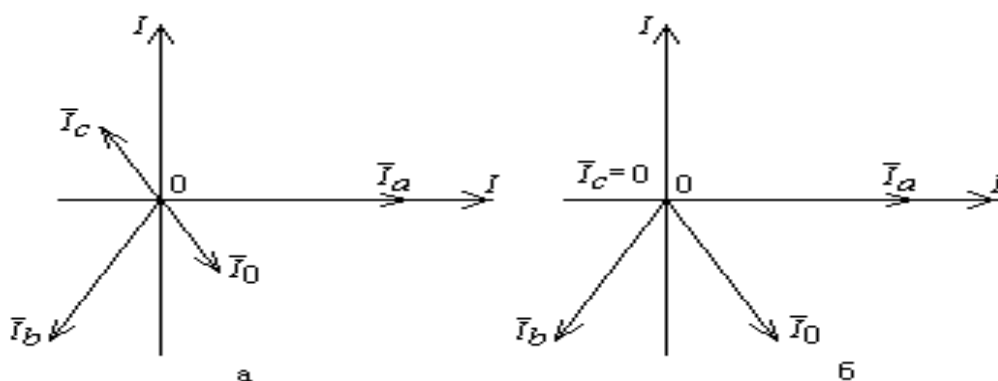


Рис. 3. Векторные диаграммы токов несимметричных режимов трехфазной цепи с нейтральным проводом

При обрыве нагрузки фазы C или при выпадении этой фазы ток нейтрального провода принимает значение $I_0 = -\frac{\bar{E}_C}{r}$ и компенсирует исчезновение тока $I_C = 0$, рис. 3, б. Таким образом, нейтральный провод обеспечивает независимость работы фаз при изменении сопротивлений нагрузки, что положительно сказывается на работе нагрузок, присоединенных к отдельным фазам.

Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В качестве источника напряжения используется нерегулируемый источник E_1 , который вырабатывает трехфазное переменное напряжение 9 В с частотой 50 Гц, предельный ток 0,3 А. Для анализа выбирается трехфазная активная линейная нагрузка, соединенная по схеме «звезда» с нейтралью и состоящая из двух регулируемых сопротивлений: $R_C = 50, 200, 100 \text{ Ом}$; $R_B = 50, 300, 150 \text{ Ом}$ и нерегулируемого сопротивления $R_A = 50 \text{ Ом}$.

Для измерения тока применяются цифровые амперметры $PA1 - PA4$ (показания тока в Амперах); для измерения напряжения используется аналоговый вольтметр с пределом 15 В.

Программа эксперимента

1. Для исследования симметричного режима трехфазной цепи без нейтрального провода соберите схему по рис. 4, а, нейтральный провод не устанавливайте. Переменные резисторы в фазах B и C установите в позицию «1», что соответствует сопротивлениям 50 Ом. Включите питание стенда. Измерьте фазные напряжения источника $U_A = E_A$; $U_B = E_B$; $U_C = E_C$, убедитесь, что они близки к 9 В. Внесите их значения в таблицу 1 в теоретическую строку симметричного режима. Это значение E будет теоретической базой для дальнейшего анализа. Измерьте линейные напряжения источника U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ; убедитесь, что они также одинаковы, больше фазных в $\sqrt{3}$ и близки к 15,6 В. Впишите их значения также в теоретическую строку симметричного режима таблицы 1.

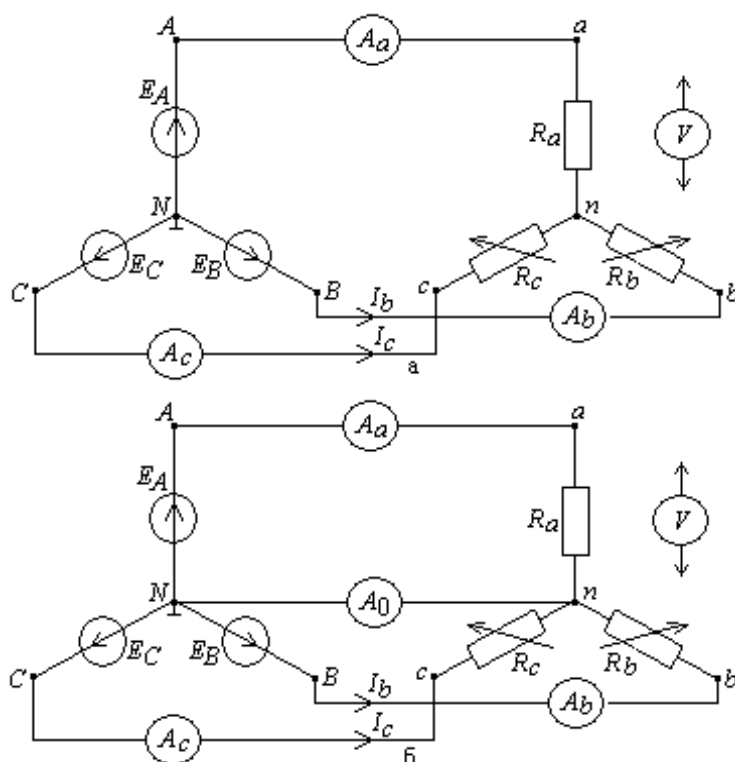


Рис. 4. Схемы эксперимента: а) трехфазная цепь без нейтрального провода; б) трехфазная цепь с нейтральным проводом

Измерьте фазные напряжения нагрузки U_a, U_b, U_c , убедитесь, что они совпадают с фазными напряжениями источника и близки к 9 В. Измерьте линейные напряжения нагрузки U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} , убедитесь, что они совпадают с линейными напряжениями источника. Измерьте напряжение смещения нейтрали U_0 между точками 0 и 0', убедитесь, что оно близко к нулю. Измерьте фазные (они же линейные) токи, убедитесь, что они одинаковы. Все результаты занесите в опытную строку симметричного режима таблицы 1. Выключите напряжение питания.

2. Для исследования несимметричного режима без нейтрального провода переключите резистор в фазе C в положение «3», что соответствует 100 Ом. Включите питание стенда, повторите измерения фазных и линейных токов и напряжений нагрузки, убедитесь, что симметрия напряжений и токов нарушена, напряжение на фазе C увеличилось, а напряжение смещения нейтрали отлочно от нуля. Результаты опыта занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания.

3. Для имитации аварийного режима обрыва фазы C нагрузки без нейтрального провода освободите от питающего провода левый контакт резистора в фазе C . Включите питание стенда и повторите измерения напряжений и токов, в том числе и напряжения на оборванной фазе. Убедитесь, что это напряжение возросло, а ток в ней стал равным нулю. Данные занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания.

4. Для имитации аварийного режима выпадения фазы C источника без нейтрального провода при симметричной нагрузке восстановите симметрию нагрузки, освободите линейный провод c из клеммы питания C и подсоедини-

те его к нейтральной точке питания 0. Повторите измерения, убедитесь в снижении напряжений и токов нагрузки, особенно заметном в фазе C . Данные занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания.

Таблица 1

Исследование трехфазной цепи «звезда–звезда» без нейтрального провода

Режим		U_a , В	U_b , В	U_c , В	U_{ab} , В	U_{bc} , В	U_{ca} , В	U_0 , В	I_a , А	I_b , А	I_c , А
Симм.	Опыт										
	Теор.										
Несим. $r_c = 2r$	Опыт										
	Теор.										
Обрыв: $r_c \rightarrow \infty$	Опыт										
	Теор.										
Выпаден. фазы C : $E_C = 0$	Опыт										
	Теор.										

5. Для исследования режима цепи с нейтральным проводом установите в схему последний оставшийся амперметр между нейтральными точками источника напряжения и нагрузки, рис. 4, a . Повторите измерения симметричного и несимметричного режимов, режимов обрыва нагрузки и выпадения фазы A . Данные занесите в таблицу 2. Обратите внимание на симметрирующее действие нейтрального провода.

Обработка результатов

Для симметричного режима рассчитайте теоретические значения фазных токов $I_a = I_b = I_c = \frac{E}{r}$. Рассчитайте фазные и линейные напряжения и токи, а также напряжение смещения нейтрали для остальных исследованных несимметричных и аварийных режимов. В качестве величины E принимайте значение фазных напряжений из теоретической строки симметричного режима. Теоретические результаты внесите в таблицы 1 и 2.

На одном чертеже в масштабе 2 В/см постройте векторные диаграммы напряжений всех исследованных режимов (разными цветами); на другом чертеже в масштабе 0,05 А/см постройте векторные диаграммы токов всех режимов по расчетным данным. По каждому пункту экспериментов сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов, а также о влиянии несимметрии нагрузки и источника питания на режим работы цепи; выводы о последствиях аварий и о влиянии нейтрального провода.

Исследование трехфазной цепи «звезда–звезда» с нейтральным проводом

Режим		U_a , В	U_b , В	U_c , В	U_{ab} , В	U_{bc} , В	U_{ca} , В	I_0 , А	I_a , А	I_b , А	I_c , А
Симм.	Опыт										
	Теор.										
Несим. $r_c = 2r$	Опыт										
	Теор.										
Обрыв: $r_c \rightarrow \infty$	Опыт										
	Теор.										
Выпаден. фазы C: $E_C = 0$	Опыт										
	Теор.										

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема трехфазной цепи, соединенной в звезду, и основные расчетные формулы для определения фазных напряжений и токов.
3. Схемы всех экспериментов с указанием типов приборов.
4. Таблицы опытных и расчетных результатов.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов.
6. Выводы по каждому опыту о влиянии несимметрии нагрузки и источника питания на режим цепи; выводы о последствиях аварий, о влиянии нейтрального провода и о соответствии опытных и расчетных результатов.

Контрольные вопросы

1. Какое соединение называется звездой?
2. Какие соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами в трехфазном источнике напряжения?
3. Каковы характерные признаки симметричного режима?
4. Как определить вектор напряжения смещения нейтрали?
5. Какова роль нейтрального провода и как определить ток в нейтральном проводе?
6. Каковы последствия увеличения сопротивления фазы нагрузки?
7. Каковы последствия обрыва фазы нагрузки?
8. Каковы последствия нарушения симметрии источника питания при выпадении фазы?
9. Почему в цепи с нейтральным проводом в режиме обрыва нагрузки и выпадения фазы ток нейтрального провода одинаков?
10. Почему при несимметричной нагрузке обрыв нейтрального провода является аварийным режимом?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель работы: Изучение характеристик и параметров диодов – выпрямительного, Шоттки, стабилитрона и светодиода.

Задание и методические указания

а) изучить темы курса «р-п переход», «Диоды» и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве, начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе.

Экспериментальное исследование выпрямительного диода

а) собрать схему для исследования выпрямительного диода на постоянном токе в соответствии с принципиальной схемой рис. 1. Для измерения анодного тока включить миллиамперметр постоянного тока с пределом 100 мА. Для измерения анодного напряжения использовать мультиметр. Последовательно с диодом включить токоограничивающий резистор R_H .

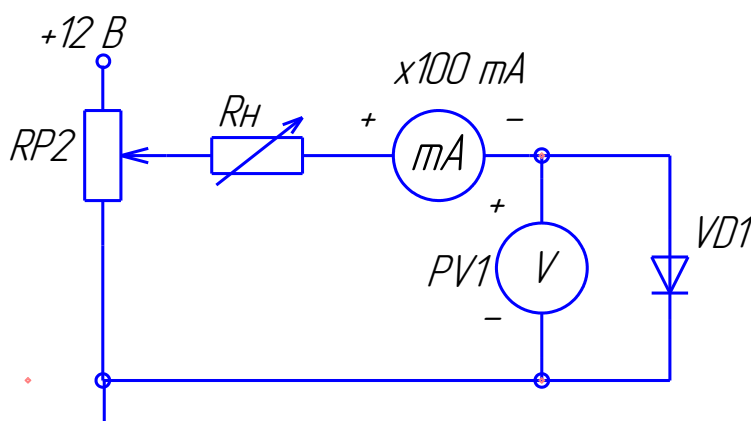


Рис. 1. Схема исследования выпрямительного диода на постоянном токе (прямая ветвь ВАХ)

Снять вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе для прямой ветви (рис. 1); для снятия характеристик регулировать напряжение на выходе потенциометра; результаты измерений занести в таблицу, по которой построить прямую ветвь ВАХ;

б) собрать схему для снятия обратной ветви ВАХ $VD1$, подключив к $RP2$ источник -12 В и заменив миллиамперметр, поменяв также его полярность подключения (рис. 2); снять обратную ветвь ВАХ диода;

в) определить параметры диода: максимальное напряжение между анодом и катодом в открытом состоянии U_{am} при максимальном анодном токе I_{amax} , пороговое напряжение U_0 и дифференциальное сопротивление r_d ;

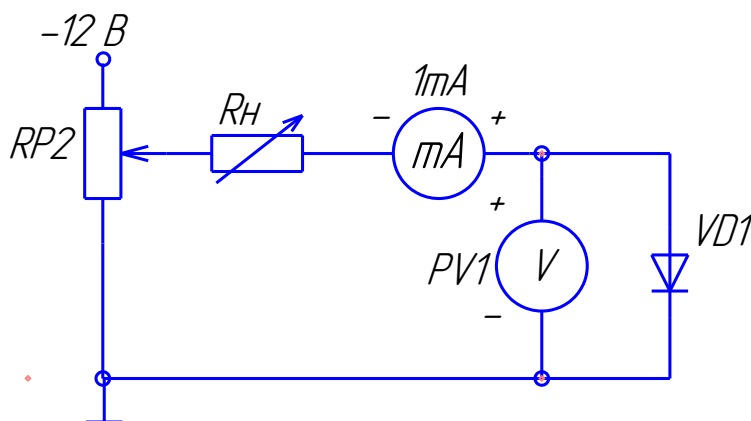


Рис. 2. Схема исследования выпрямительного диода на постоянном токе (обратная ветвь ВАХ)

г) собрать схему для получения ВАХ диода на экране осциллографа. Исследование выпрямительного диода выполняется на переменном токе в соответствии с принципиальной схемой рис. 3. Вход **Y** (CH2) осциллографа подключить к шунту RS2, а корпус осциллографа () соединить с общим проводом ($\perp$). Вход **X** (CH1) осциллографа подключить к аноду диода. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение **X/Y**. Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Подать питание. Зарисовать ВАХ диода, определить масштабы по току и напряжению;

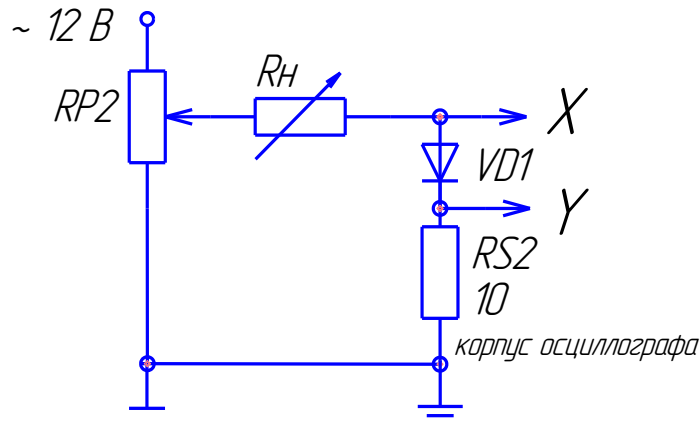


Рис. 3. Схема исследования осциллограмм ВАХ выпрямительного диода

д) определить по осциллограмме параметры диода: максимальное напряжение между анодом и катодом в открытом состоянии U_{am} при максимальном анодном токе $I_{a\max}$, пороговое напряжение U_0 и дифференциальное сопротивление r_d , сравнить с результатами, полученными на постоянном токе.

Экспериментальное исследование диода Шоттки

Выполнить пункты 2а, в для диода Шоттки, используя схему рис. 1. ВАХ построить на том же рисунке, что и в п.3. Сравнить ВАХ и параметры диода Шоттки с параметрами и ВАХ обычного выпрямительного диода.

Экспериментальное исследование стабилитрона

Выполнить пункты 2а, б, г для стабилитрона, включив в схему резистор R_6 . ВАХ построить на том же рисунке, что и в п.3. Сравнить ВАХ стабилитрона и ВАХ обычного выпрямительного диода. По ВАХ, снятым на постоянном и переменном токе, определить напряжение стабилизации $U_{ст}$ и дифференциальное сопротивление $r_{дст}$ (на участке стабилизации), сравнить результаты.

Экспериментальное исследование светодиода

Собрать схему для исследования прямой ветви ВАХ светодиода на постоянном токе подобно рис. 1, заменив VD1 на VD3, и подключив в качестве токоограничивающего резистора $R_6 = 1\text{кОм}$; снять ВАХ и построить ее на том же рисунке, что и в п.3. Определить ток, при котором становится заметным свечение.

Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе; в выводах обязательно ответить на контрольные вопросы 11 – 13.

Контрольные вопросы

1. Каковы свойства p - n перехода? Объясните вид ВАХ p - n перехода?
2. Как влияет температура на различные участки ВАХ диода?
3. Как снять по точкам ВАХ диода?
4. Почему на схемах рис. 1 и 2 по-разному включены измерительные приборы?
5. Как снять ВАХ диода с помощью осциллографа?
6. Поясните вид ВАХ стабилитрона. Где рабочий участок на ВАХ стабилитрона?
7. Как зависит напряжение стабилизации от температуры?
8. От чего зависит яркость свечения светодиода?
9. Каким образом на экране осциллографа получается изображение периодической функции времени?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: Изучение характеристик и параметров биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

Задание и методические указания

1. Предварительное домашнее задание:

а) изучить тему курса “Транзисторы” и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе.

Экспериментальное исследование характеристик биполярного транзистора

а) собрать схему для снятия характеристик прямой передачи по току биполярного транзистора (рис. 1). Для измерения тока базы подключить миллиамперметр РА1 (до 1 мА), а для измерения тока коллектора подключить РА2 (до 100 мА). Для измерения напряжения на коллекторе использовать вольтметр РВ1; в качестве резистора в цепи коллектора использовать резистор РР3 (по указанию преподавателя);

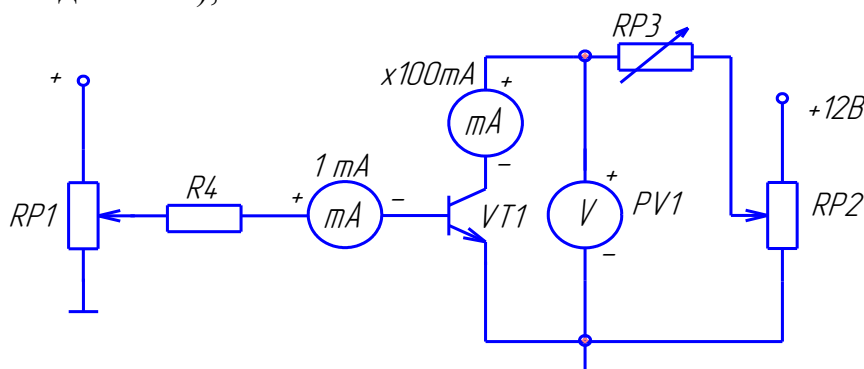


Рис. 1. Схема исследования характеристик биполярного транзистора

б) снять статическую характеристику прямой передачи по току $I_k = f(I_b)$ при U_k , равном заданному значению E_k и $R_k = 0$. Экспериментальные точки здесь и далее записывать в таблицу и наносить на график. При снятии характеристики следить за постоянством напряжения U_k по вольтметру;

в) снять характеристику прямой передачи по току при наличии заданного сопротивления нагрузки R_k (рис. 1). С помощью потенциометра РР1 установите ток базы, равный нулю, а с помощью потенциометра РР2 установите заданное значение E_k . В дальнейшем ручку регулировки РР2 не трогать. В области вблизи насыщения точки снимать чаще;

г) по построенной в п.2в характеристике определить области активного усиления, отсечки и насыщения. Определить максимальный ток $I_{б\max}$, при котором еще обеспечивается линейное усиление;

д) снять выходные статические ВАХ с помощью осциллографа. Собрать схему в соответствии с рис. 2. Вход Y (CH2) осциллографа подключить к шунту $R_{ш}$, а корпус осциллографа () соединить с общим проводом (⊥). Вход X (CH1) осциллографа подключить к коллектору. При этом переключатель развёртки осциллографа должен быть приведен в положение X/Y. Установить потенциометр RP1 в крайнее левое положение, соответствующее минимальному сопротивлению. Включить питание. Изменять ток базы от 0 до максимума (но не более 1 мА), пронаблюдать семейство выходных характеристик; зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений тока базы: $I_{б1} = 0$; $I_{б2} = 0,5 I_{б\max}$; $I_{б3} = I_{б\max}$. Записать масштабы по напряжению и току. Выключить питание модуля.

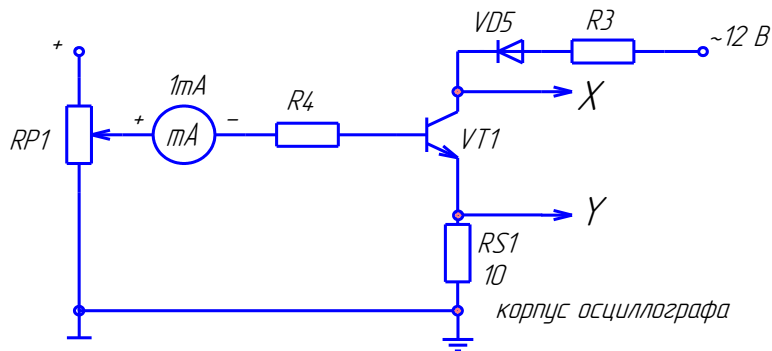


Рис. 2. Схема исследования выходные статических ВАХ с помощью осциллографа

Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы; определить по экспериментальным характеристикам прямой передачи по току статический коэффициент передачи тока β и коэффициент усиления каскада по току K_i при заданной нагрузке вблизи рабочей точки покоя для класса А:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b}, \quad K_i = \frac{\Delta I'_k}{\Delta I_b};$$

г) экспериментально снятые и построенные характеристики;

д) обработанные осциллограммы;

е) рассчитать потери в транзисторе в рабочей точке покоя в классе А ($P_{кр} = U_{кр} I_{кр}$), в режиме насыщения $P_{кн}$, отсечки $P_{ко}$ и средние потери в ключевом режиме при относительной длительности импульса 0,5 ($P_{кр.ср} = 0,5P_{кн} + 0,5P_{ко}$), воспользовавшись экспериментально снятыми выходными характеристиками. Сравнить потери в классе А и в ключевом режиме. Указать, какие потери в ключевом режиме не учтены;

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия транзистора?
2. Какие существуют схемы включения транзисторов?
3. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к транзистору типа *n-p-n* при различных схемах включения?
4. Как выглядят выходные и входные статические характеристики в схеме с общим эмиттером?
5. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как ее построить? Как она видоизменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?
6. Как определить статический коэффициент передачи транзистора по току β ?
7. Как снять статические выходные характеристики?
8. Как построить линию нагрузки?
9. Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
10. Что такое ключевой режим?
11. Каковы преимущества ключевого режима?

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: Изучение характеристик и функций простейших логических элементов.

Задание и методические указания

а) изучить тему курса “Цифровые интегральные микросхемы”, содержание данной работы и быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) построить временные диаграммы работы для логического элемента 2И-НЕ при заданной последовательности импульсов.

Экспериментальное исследование комбинационных цифровых устройств

а) составить таблицу истинности логического элемента «И-НЕ». Для этого собрать схему (рис. 1), подключив выходы гнезд «Уровень логический» к соответствующим входам логического элемента «И-НЕ». Включить тумблер «Питание». Задавая различные комбинации входных логических сигналов (X_1 , X_2) тумблерами SA1 и SA2, фиксировать по светодиоду выходной сигнал Y логического элемента. Составить таблицу истинности исследуемого элемента. Результаты занести в табл. 1. Выключить тумблер «Питание»;

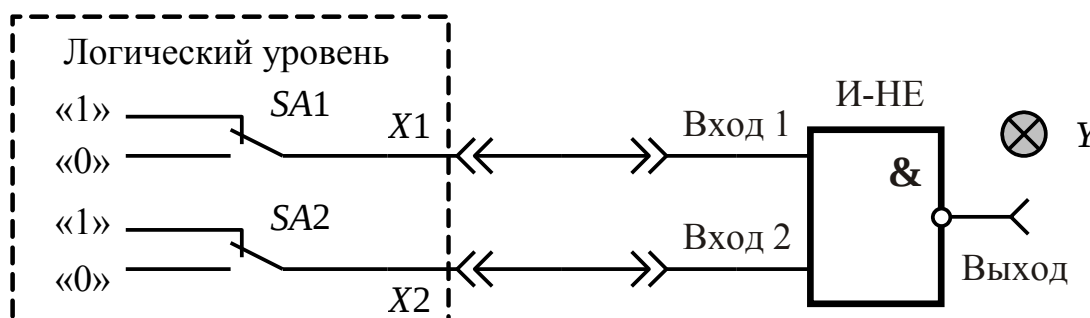


Рис. 1. Схема соединений для исследования логического элемента И-НЕ

Таблица 1

Результаты таблицы истинности исследуемого элемента

X1	X2	Y			
		И	НЕ	И-НЕ	ИЛИ-НЕ

б) проверить работу логического элемента «И-НЕ», подключив выходные гнезда «Генератора импульсов» с частотой 0,1 кГц и 0,2 кГц к «Входу 1» и «Входу 2» логического элемента соответственно (см. рис. 3). Включить тумблер «Питание». Зарисовать временные диаграммы сигналов на входах и выходе логического элемента. Для этого осциллограф перевести в режим внешней синхронизации «EXT», соединив вход осциллографа «TRIG IN» с гнездом «Генера-

тора импульсов» 0,1 кГц. Затем вход осциллографа *CH1* подключить к «Входу 1» элемента «И-НЕ», а вход осциллографа *CH2* – к «Входу 2» элемента (корпус осциллографа « $\perp$ » соединить с общей точкой модуля). Зарисовать входные сигналы друг под другом. Переключить вход осциллографа *CH2* к «Выходу» элемента «И-НЕ», и зарисовать выходной сигнал. Выключить тумблер «Питание»;

в) аналогично выполнить п. а и б для логических элементов «И», «ИЛИ-НЕ», «НЕ».

Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;
- в) таблицы состояний и временные диаграммы входных и выходных напряжений;
- г) построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие виды логики вы знаете?
2. Какие логические элементы исследуются в данной работ и к какому виду логики они относятся?
3. Перечислите основные параметры логических элементов.
4. Составьте таблицы истинности для логических элементов «И-НЕ», «И», «ИЛИ-НЕ», «ИЛИ», «НЕ», «Исключающее ИЛИ».
5. Как составить таблицу истинности логического элемента в лабораторной работе?
6. Как снять временные диаграммы входных и выходного сигналов логического элемента при помощи осциллографа в лабораторной работе?

Лабораторная работа № 7

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы

Целью работы является изучение реверсивной схемы автоматического управления пуском в функции времени асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР), наладка схемы, регулировка отдельных элементов, а также анализ возможных неисправностей и аварийных режимов работы привода.

Теоретическая часть

Вращающий момент, развиваемый асинхронным двигателем, в Нм:

$$M = C_M \Phi I_P \cos \varphi_P,$$

где C_M – постоянная, зависящая от конструкции АД; Φ – магнитный поток, пронизывающий ротор, Вб; I_P – ток фазы ротора, А; φ_P – угол сдвига фаз между ЭДС и током ротора.

Здесь магнитный поток Φ практически постоянен. При любых токах двигателя он индуцирует такую ЭДС в статоре, которая уравнивает приложенное напряжение сети за вычетом (геометрическим) небольшого падения напряжения в обмотках статора.

При пуске асинхронного двигателя с замкнутыми кольцами ток ротора I_P велик вследствие значительной ЭДС, индуцируемой в подвижном роторе, быстро вращающемся магнитным потоком статора, и малой величины активного сопротивления фаз замкнутого ротора.

Пусковой коэффициент мощности $\cos \varphi_P$ мал настолько, что даже при большом токе ротора момент M двигателя получается сравнительно небольшим. Низкий $\cos \varphi_P$ объясняется большим сдвигом фаз φ_P между ЭДС и током ротора из-за увеличенного реактивного сопротивления фаз ротора от повышенной частоты тока в роторе АД.

При пуске асинхронный двигатель с замкнутыми кольцами развивает момент $M = (0,5 \dots 1,5) M_{ном}$. При этом пусковые токи статора и ротора больше номинального в 5 - 7 раз.

Такие большие токи в статоре и роторе недопустимы по условиям превышения динамических усилий в обмотках и нагрева обмоток. Низкий пусковой момент обычно является недостаточным для ускорения привода.

Введение внешнего сопротивления R_p в цепь ротора уменьшает пусковой ток I_p и настолько увеличивает $\cos \varphi_P$, что пусковой момент M_p возрастает. Кратности момента становятся почти равными кратностям тока (при очень больших пусковых сопротивлениях ток ротора сильно падает и пусковой момент опять уменьшается).

При ускорении двигателя уменьшается ЭДС ротора, вследствие чего уменьшается ток ротора и момент АД.

Для поддержания ускорения привода уменьшают по ступеням величину пускового реостата R_p , отчего при данной ЭДС возрастает ток ротора и ускоряющий момент. Когда все сопротивление R_p закорочено, двигатель переходит на свою естественную характеристику (точка А рисунка 1б).

Схема включения пускового реостата в цепь ротора АД приведена на рис. 1, а. Пусковые механические характеристики имеют вид, показанный на рис. 1, б.

Принципиальная электрическая схема управления АДФР приведена на рис. 2.

Элементы схемы управления

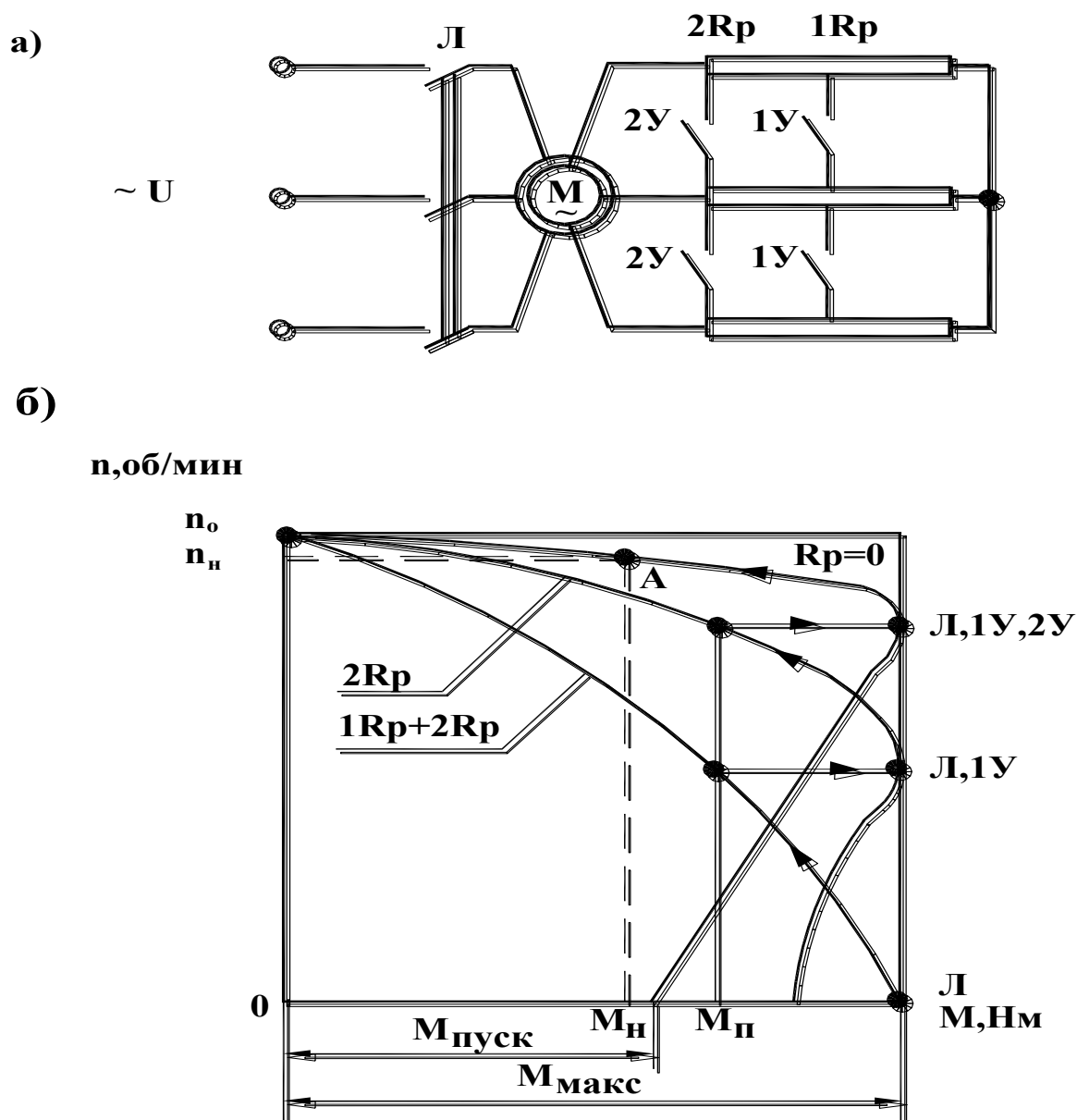


Рис. 1. Схема включения АДФР и его механические характеристики:
а – схема включения двух секций пускового реостата R_p в цепь ротора АД;
б – пусковые механические характеристики двигателя

1А – установочный автомат;
1Л, 2Л – линейные контакторы реверса;
М – асинхронный двигатель с фазным ротором (АДФР);
Пр1...Пр4 – предохранители в цепях управления;
КнС, КнВ, КнН – кнопки управления;
ЛВ, ЛН, ЛЗ – сигнальные лампы;
1У, 2У – контакторы ускорения;
UD – выпрямитель;
1РУ, 2РУ – реле ускорения с выдержкой времени;
1Rp, 2Rp – ступени пускового реостата.

Работа схемы

Исходное состояние. При включении установочного автомата срабатывают реле ускорения 1РУ, 2РУ, разрывая цепи питания контакторов ускорения 1У, 2У (контакторы 1РУ1 и 2РУ1 размыкаются).

Ступени пускового реостата 1Rp, 2Rp полностью введены в цепь ротора АД. Схема готова к пуску.

Пуск «Вперед». Для пуска АД «Вперед» нажимается двойная кнопка КнВ. Катушка линейного контактора 1Л получит питание по цепи: фаза С, 1А, Пр1, КнС, нижний контакт КнВ, КнН, 1Л, 2Л4, Пр2, 1А, фаза В. Одновременно загорается лампа ЛВ. Срабатывая, контактор 1Л силовыми контактами 1Л1...1Л3 подает питание на статор АД. Ротор АД набирает обороты при полностью введенном пусковом реостате Rp (нижняя характеристика рис. 1, б). Одновременно, контактор 1Л, своими блокконтактами производит переключение в схеме управления: НО контакты 1Л5 блокируют кнопку КнВ, НЗ контакты 1Л4 разрывают цепь питания катушки 2Л, осуществляя электрическую блокировку, НЗ контакты 1Л6 разрывают цепь питания реле ускорения 1РУ. Реле ускорения 1РУ, потеряв питание, с выдержкой времени отпускает, замыкая свой контакт 1РУ1. Контактор ускорения первой ступени 1У, получая питание, срабатывает, шунтируя своими контактами 1У1, 1У2 первую ступень пускового реостата 1Rp, производя ускорение АД (см. рис. 1, б) – промежуточная характеристика АД).

Блокконтакт контактора 1У3 разрывает цепь питания реле ускорения 2РУ. Реле 2РУ отключается и с выдержкой времени замыкает своим контактом 2РУ1 цепь питания контактора ускорения 2У.

Контактор 2У срабатывая, шунтирует своими контактами последнюю ступень реостата 2Rp, производя ускорение АД и вывод его на естественную характеристику (рис. 1, б, верхняя характеристика). Одновременно блокконтакт 2У3 замыкает цепь питания лампы ЛЗ («Пуск завершен»). Разгон двигателя по естественной характеристике будет происходить до тех пор, пока момент, развиваемый АД, не уравновесит момент сопротивления нагрузки (точка А, рис. 1, б).

Остановка электродвигателя. Для остановки АД нажимается КнС «Стоп». Контактами кнопки КнС разрывается цепь питания катушек контакто-

ров 1Л и 2Л, сигнальных ламп ЛВ и ЛН. Контактор 1Л отпускает, отключая своими силовыми контактами статор АД от сети.

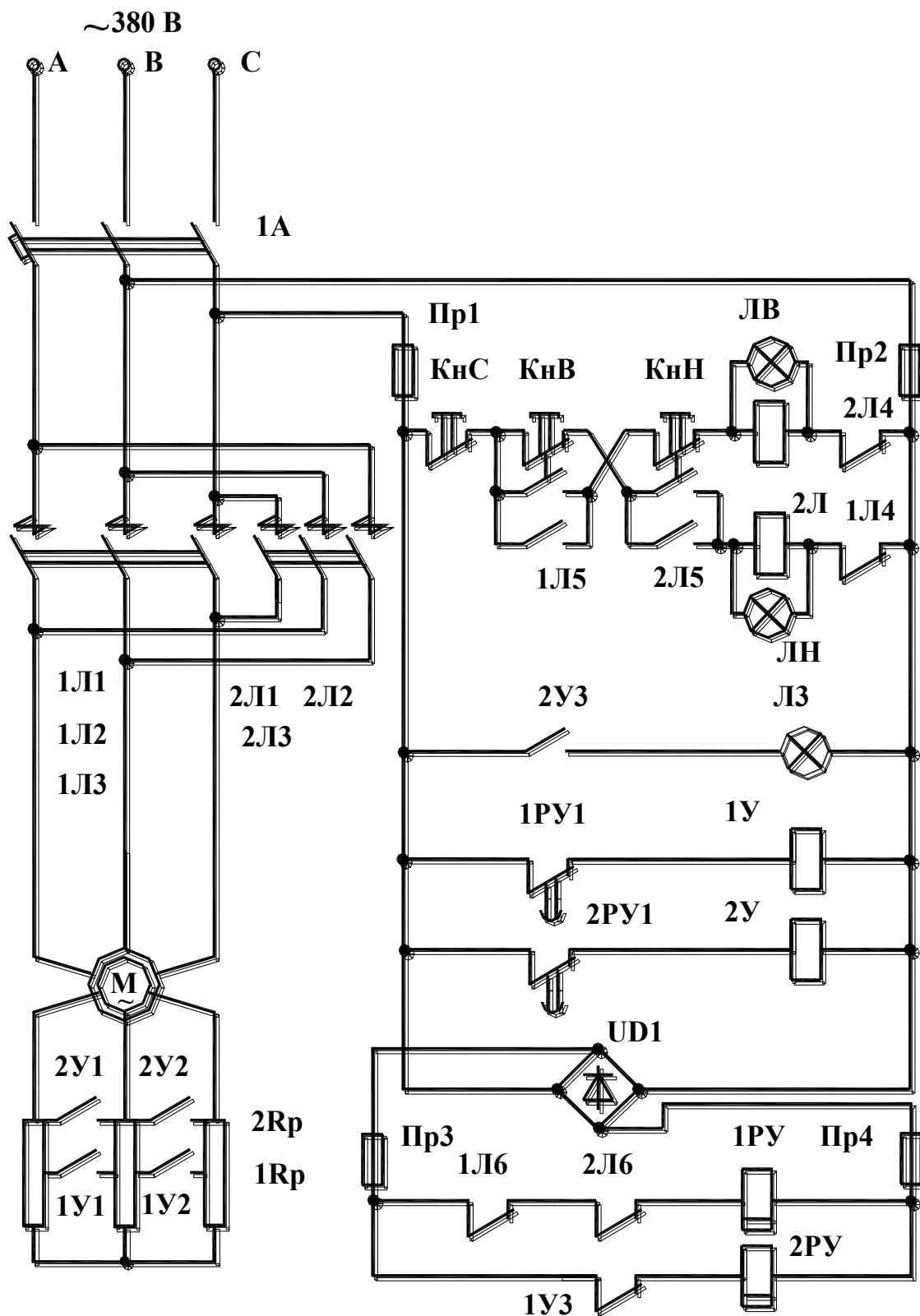


Рис. 2. Схема управления АДФР

Одновременно блокконтакты контактора 1Л производят следующие переключения в цепях управления: блокконтакт 1Л4, замыкаясь, подготавливает цепь включения катушки 2Л, блокконтакт 1Л5 снимает блокировку с кнопки КнВ. Блокконтакт 1Л6 замыкает цепь питания реле ускорения 1РУ. Реле ускорения, срабатывая, размыкает свой контакт 1РУ1 в цепи питания катушки 1У. Контактор 1У отпускает, размыкая свои силовые контакты 1У1 и 1У2 в цепях пускового реостата Рр. Блокконтакт 1У3, замыкаясь, подает питание на катушку 2РУ. Реле ускорения 2РУ, срабатывая, размыкает контакт 2РУ1. Контактор 2У теряет питание, размыкает свои силовые контакты 2У1, 2У2 в цепях пускового реостата Рр. Блокконтакт 2У3 снимает питание с лампы ЛЗ, лампа гаснет. Схема готова к следующему пуску. Двигатель останавливается в режиме «Свободного выбега».

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципом автоматического управления пуском в функции времени и реверсом асинхронного электродвигателя с фазным ротором.
 2. Ознакомиться с принципиальной электрической схемой привода.
 3. После допуска преподавателем производится пуск «Вперед», остановка, пуск «Назад», наблюдается последовательность работы электроаппаратов схемы управления приводом.
 4. Изучаются возможные неисправности в схеме и способы их устранения.
 5. Самостоятельно рассмотреть работу схемы при нажатии кнопки КнН (пуск «Назад»).
- Произвести анализ аварийных режимов работы привода.

Оформление отчета

Отчет должен содержать:

- а) схему автоматического управления АДФР;
- б) перечень элементов схемы с техническими данными;
- в) описание работы схемы в режиме пуск «Назад»;
- г) перечень аварийных режимов работы электропривода с указанием аппаратуры защиты.
- д) краткие выводы по проделанной работе.

Выполнение лабораторной работы и оформление отчета рассчитано на 4 часа.

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Цель работы

Целью лабораторной работы является ознакомление с физической моделью электроэнергетической системы, изучение ее элементов и экспериментальное исследование параллельной работы синхронных генераторов при различных системах возбуждения и регулирования.

Теоретическая часть

Судовая электростанция переменного тока, как правило, состоит из нескольких синхронных генераторов. Схема же судовой электростанции предусматривает как автономную, так и параллельную работу СГ. В результате повышается надежность и живучесть, как системы генерирования электроэнергии, так и системы электропитания потребителей. Включение на параллельную работу синхронных генераторов может быть осуществлено при проведении соответствующей синхронизации системы.

При точной синхронизации генераторов необходимо выполнить следующие условия:

- а) сборные шины судовой электростанции и шины подключаемого генератора должны иметь одинаковый порядок чередования фаз $A_1-B_1-C_1$ и $A_2-B_2-C_2$;
- б) равенство напряжений на сборных шинах и подключаемом синхронном генераторе;
- в) равенство частот напряжений на сборных шинах и подключаемом синхронном генераторе;
- г) угол между одноименными фазами по возможности должен быть равен нулю.

По различным причинам условия точной синхронизации не всегда удается выполнить. Поэтому синхронизация происходит при некотором отклонении от идеальных условий. При этом, в каждом отдельном случае, исходя из конкретных условий, учитывается то, чтобы в элементах системы не возникли недопустимые уравнительные токи, а также не появились значительные затруднения при вхождении в синхронизм генератора.

Важным требованием, предъявляемым к генераторным агрегатам судовой электростанции, является и требование пропорционального распределения с заданной точностью активных и реактивных нагрузок между параллельно работающими синхронными генераторами. Выполнение этого требования обеспечивает равномерную загрузку синхронных генераторов, исключает уравнительный ток между генераторами и повышает устойчивость параллельной работы агрегатов.

По правилам Регистра неравномерность распределения нагрузок между синхронными генераторами не должна превышать от +2% до +10% номинальной мощности наименьшего генератора при изменении режима работы от холостого хода до номинального.

Неравномерность распределения как реактивных, так и активных нагрузок определяется соответственно различными внешними и механическими характеристиками генератора и первичного двигателя. Очевидно, что для пропорционального распределения нагрузок между параллельно работающими генераторами необходимо, чтобы:

а) СГ большей мощности имел характеристики с меньшим статизмом и, наоборот, СГ меньшей мощности – с большим статизмом;

б) СГ одинаковой мощности должны иметь совпадающие характеристики регулирования.

Отметим, что по обмоткам статоров синхронных генераторов при равномерной их загрузке активной и реактивной мощностью будет протекать одинаковый ток $I_1=I_2$. Если по каким либо причинам ЭДС, например первого СГ станет больше ЭДС второго СГ на величину ΔE , то в обмотках статоров будет протекать уравнивающий ток $I_{ур}$ который будет индуктивным для первого и емкостным для второго генератора, это и определит неравномерную реактивную загрузку генераторов. Уравнивающие токи в генераторах создадут соответствующие размагничивающую и намагничивающую реакции статора, что приведет к размагничиванию первого и подмагничиванию второго генератора. В результате произойдет выравнивание токов генераторов.

Такой процесс характерен для СГ с системами возбуждения, не имеющими обратной связи по току статора. Для СГ, имеющих системы компаундирования, картина распределения реактивных нагрузок иная. Так, увеличение тока статора первого генератора вызывает увеличение тока возбуждения, а у второго генератора происходит уменьшение тока возбуждения. Поэтому системы компаундирования обуславливают неравномерное распределение реактивных нагрузок между СГ, работающими параллельно.

Для уменьшения реактивных уравнивающих токов, возникающих между СГ, снабженными системами компаундирования, при параллельной работе применяют уравнивающие связи или блоки параллельной работы.

Для систем компаундирования без коррекции напряжения обычно применяют уравнивающие связи на стороне постоянного тока. На рис. 1 представлена принципиальная схема физической модели СЭЭС. В состав системы входят два генераторных агрегата ПД-СГ, два нагрузочных агрегата АД-Г, щит управления, комплекс коммутационной, пусковой, защитной, установочной, регулирующей и измерительной аппаратуры.

Генераторные агрегаты состоят из СГ типа ЕССМ-62 $P_n=12\text{кВт}$, $U_n=230\text{В}$, $n_n=1500\text{об/мин}$, $\cos\varphi=0,8$ и приводного двигателя типа П-61М $P_n=12\text{кВт}$, $U_n=220\text{В}$, $n_n=1500\text{ об/мин}$. Связь машин жесткая. СГ имеют две системы возбуждения.

Нагрузочные агрегаты состоят из приводного асинхронного двигателя 380АО 51/4 $P_n=4,5$ кВт, $U_n=220$ В, $n_n=1440$ об/мин. и ГПТ типа П-51М $P_n=7,4$ кВт, $U_n=230$ В, $n_n=1500$ об/мин. Нагрузкой ГПТ является система резисторов.

Программа работы

1. Ознакомление с физической моделью электроэнергетической системы и изучение ее элементов.
2. Экспериментальное исследование параллельной работы синхронных генераторов при различных системах возбуждения и регулирования.
3. Обработка результатов исследования и оформление отчета.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с моделью ЭЭС и составить ее структурную схему, изучить назначение и порядок оперативных коммутаций всех элементов СЭС.
2. Проверить, чтобы все рукоятки, переключатели и автоматы находились в положении «выкл», а переключатель системы возбуждения стоял в положении «самовозбуждение».
3. Подготовить электростанцию к работе и произвести настройку ее элементов. Для чего:
 - а) автоматом АПД подать питание на приводной двигатель (ПД), нажав кнопку «пуск»;
 - б) регулятором $R_{рпд.}$, действуя на ток возбуждения ПД добиться, чтобы частота напряжения стала 50 Гц, а регулятором $R_{р.сг.}$ добиться, чтобы напряжение генератора U_g стало 230В. Данные контролировать по приборам ($U_{сг}$, f).
 - в) подать напряжение на шины с помощью генераторного автомата (ГА).
4. Снять и построить внешние характеристики каждого синхронного генератора. Для этого кнопкой «пуск» необходимо включить асинхронный двигатель (АД), а тем самым и генератор постоянного тока, находящийся на одном валу с АД. Регулятором $R_{рг}$ выставить напряжение генератора.
5. Синхронизировать генераторы и с помощью автомата АПВ включить их на параллельную работу. Нагрузить один из СГ и проверить распределение нагрузки между генераторами, снять внешние характеристики, затем произвести перевод нагрузки с одного СГ на другой.
 $U=230$ В. Далее, постепенно нагружать ГПТ, подавая нагрузку с помощью автоматов Ан. Снять значения напряжений U_g и тока нагрузки I_n .
6. Оценить режимы параллельной работы СГ при:
 - а) изменении возбуждения одного из СГ;
 - б) изменении вращающего момента одного из приводных двигателей;
 - в) выходе из строя (отключении) одного из приводных двигателей СГ (п.4 выполнять под руководством преподавателя).
- 7). Исследовать параллельную работу СГ независимого возбуждения:
 - а) снять внешние характеристики каждого генератора;

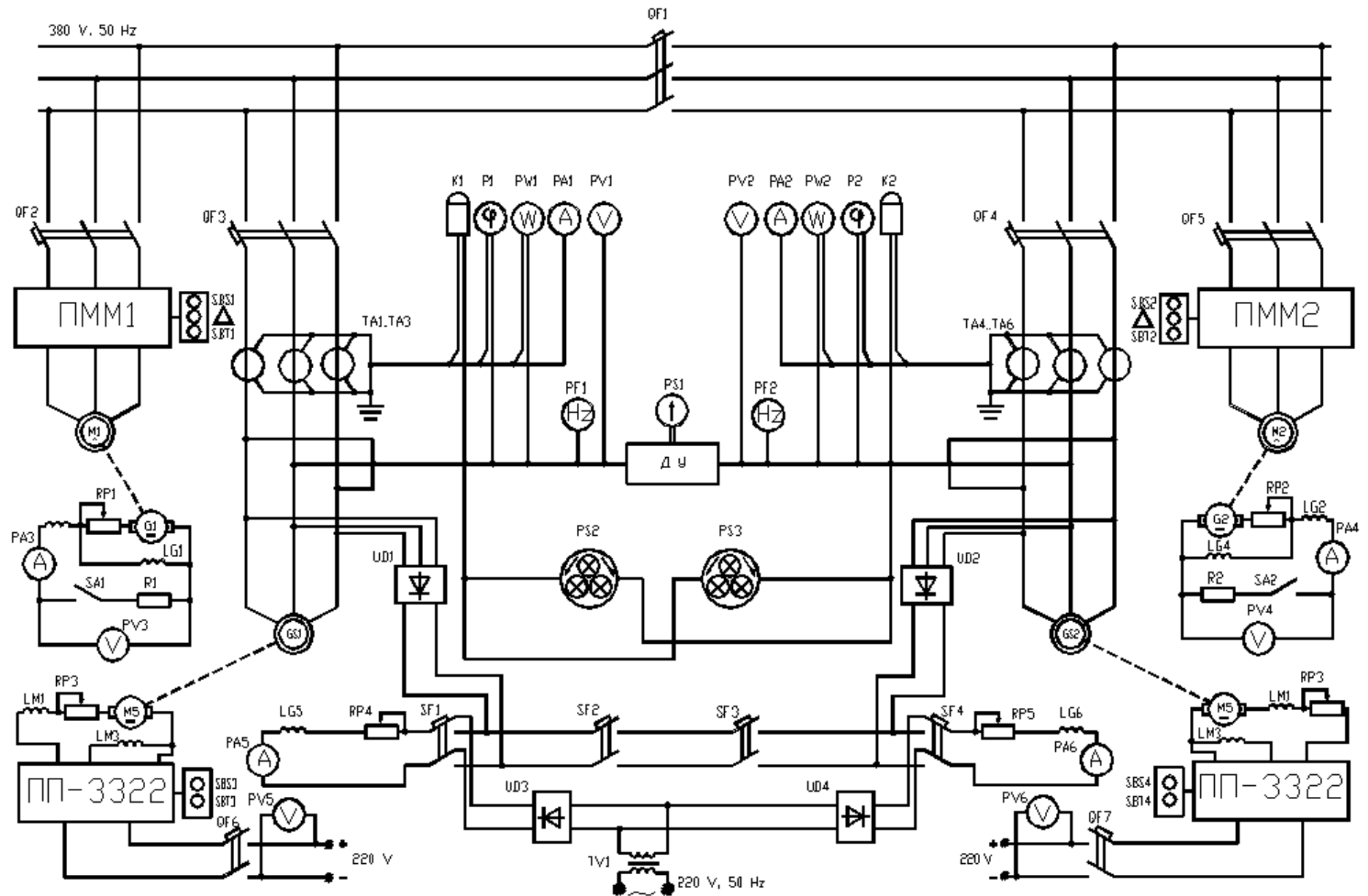


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования способов синхронизации СГ

б) включить СГ на параллельную работу, нагрузить их и проверить распределение нагрузки между СГ;

в) снять внешние характеристики и произвести перевод нагрузки с одного СГ на другой;

г) оценить режимы параллельной работы при изменении возбуждения одного из синхронных генераторов;

д) определить точность распределения реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами при наличии уравнительных связей по постоянному току.

Обработка результатов исследований

Обработка результатов исследований приводится в отчете, который должен содержать:

1. Структурную схему модели электроэнергетической системы с указанием технических данных генераторных агрегатов, коммутационной и защитной аппаратуры, электроизмерительных приборов.

2. Таблицы всех измерений и наблюдений.

3. Внешние характеристики во всех режимах работы.

4. Описание физических процессов, сопровождающих различные режимы работы СГ.

5. Анализ полученных результатов исследований с рекомендациями эффективного метода распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, а также с оценкой устойчивости их работы.

Выполнение и оформление результатов лабораторной работы рассчитано на 4 часа.

Контрольные вопросы

1. Назовите условия включения синхронных генераторов на параллельную работу.

2. Что такое внешняя характеристика СГ.

3. Поясните значение регулировочной характеристики СГ.

4. Как осуществить перевод нагрузки с одного генератора на другой параллельно работающий генератор.

5. Поясните причину глубокого провала напряжения в судовой сети при прямом пуске асинхронного двигателя мощности, соизмеримой с мощностью синхронного генератора.

6. Каким образом осуществляется регулирование частоты в данном лабораторном стенде.

7. Каким образом осуществляется регулирование напряжения генераторов в данном лабораторном стенде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для бакалавров техн. вузов по направлениям: «Электротехника», «Электротехнологии», «Электромеханика», «Электроэнергетика», «Приборостроение» / Л. А. Бессонов. - 11-е изд. - М.: Юрайт, 2012. - 317 с.
2. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники: учебное пособие/
3. И. А. Данилов, П. М. Иванов. - 6-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2005. - 752 с.
4. Жаворонков М. А. Электротехника и электроника: учебное пособие/ М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. - 4-е изд., испр. - М.: Академия, 2011. - 394 с.
5. Касаткин А. С. Электротехника: учебник/ А. С. Касаткин, М. В. Немцов. - 9-е изд., стереотип. - М.: Академия, 2005. - 539 с.
6. Петров С. И. Теоретические основы электротехники. Установившиеся и переходные процессы в линейных электрических цепях: учебное пособие/ С. И. Петров А. А. Руппель; ред. В. П. Горелов. - Омск: ОИВТ, 2009. - 137с.
7. Евдокимов Ф.Е. Общая электротехника/ Ф.Е. Евдокимов. – М.: Высш. шк., 2004. – 367 с.
8. Лунин, В. П. Электротехника и электроника в 3 т. Том 1. Электрические и магнитные цепи: учебник и практикум для академического бакалавриата / В. П. Лунин, Э. В. Кузнецов; под общей редакцией В. П. Лунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 255 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-00356-7. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/433164>.
9. Электротехника и электроника в 3 т. Том 3. Основы электроники и электрические измерения: учебник и практикум для академического бакалавриата / Э. В. Кузнецов, Е. А. Куликова, П. С. Культиасов, В. П. Лунин; под общей редакцией В. П. Лунина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 234 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-9916-8414-9. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/433379>.
10. Международная Конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года с поправками и Кодекс по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты.
11. Кодекс Торгового Мореплавания Украины.
12. Правила технической эксплуатации морских и речных судов. Электрооборудование. КНД 31.2.007.01-96.
13. Правила техники безопасности на судах морского флота. РД 31.81.10-85.— М.: В/О "Мортехинформреклама", 1985.
14. Памятка по электробезопасности для плавсостава судов морского и речного флота. - Одесса, ЮЖНИИМФ, 1996. - 90 с.

В авторской редакции