

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Судовое электрооборудование»

ТЕОРИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания
к лабораторным работам
для студентов специальности
26.05.06 «Эксплуатация судовых
энергетических установок»

Севастополь
СевГУ
2023

УДК [621.3.01:629.5.064.5](076.5)

ББК 31.21-5*я73

ТЗЗ

Р е ц е н з е н т:

С.А. Конева - канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой
Судового электрооборудования Морского института СевГУ

Составители: Пронина А.К., Канов Л.Н.

ТЗЗ Теория судовой электротехники : методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» / Севастопольский государственный университет, Морской институт, кафедра «Судовое электрооборудование»; сост.: А. К. Пронина, Л. Н. Канов. – Севастополь : СевГУ, 2023. – 76 с. – Текст : электронный.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в подготовке к лабораторным работам, а также для самостоятельной работы по индивидуальным графикам по дисциплине Б1.Б.18 «Теория судовой электротехники». Методические указания предназначены для отработки компетенций ПК-15, ПК-31, ПК-32 кодекса ПДНВ, раздел А – III / 6 78/95 и ФГОС ВПО.

УДК [621.3.01:629.5.064.5](076.5)

ББК 31.21-5*я73

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры СЭО, протокол № 6 от 18 января 2023 г.

В авторской редакции

Изд. № 42/2023. Объем 4,75 п.л. Усл. печ. л. 4,42. Уч.-изд. л. 4,66.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© Пронина А.К., Канов Л.Н., сост., 2023

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения.	4
1. Лабораторная работа № 1. Простые линейные электрические цепи постоянного тока	5
2. Лабораторная работа № 2. Смешанное соединение элементов в электрической цепи постоянного тока.	11
3. Лабораторная работа № 3. Электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками напряжения	17
4. Лабораторная работа № 4. Простая нелинейная цепь постоянного тока	22
5. Лабораторная работа № 5. Разветвленная нелинейная цепь постоянного тока.	27
6. Лабораторная работа № 6. Катушка индуктивности, конденсатор и резистор в режиме синусоидального тока	33
7. Лабораторная работа № 7. Электрическая цепь синусоидального тока с последовательным соединением катушки и конденсатора. Резонанс напряжений.	39
8. Лабораторная работа № 8. Электрическая цепь синусоидального тока с параллельным соединением катушки и конденсатора. Резонанс токов	46
9. Лабораторная работа № 9. Исследование режимов работы трехфазной цепи, соединенной по схеме «Звезда – звезда»	54
10. Лабораторная работа № 10. Исследование режимов работы трехфазной цепи, соединенной по схеме «Звезда – треугольник»	62
11. Лабораторная работа № 11. Катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником в режиме переменного тока	69
Библиографический список	76

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

α – 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 .

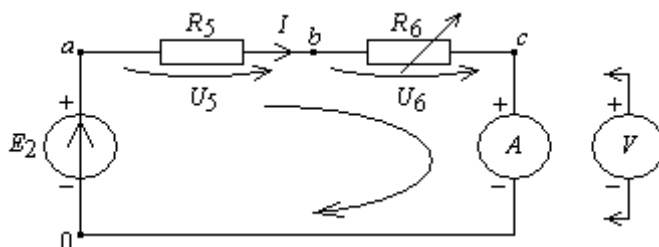


Рис. 1. Последовательная линейная электрическая цепь постоянного тока

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.

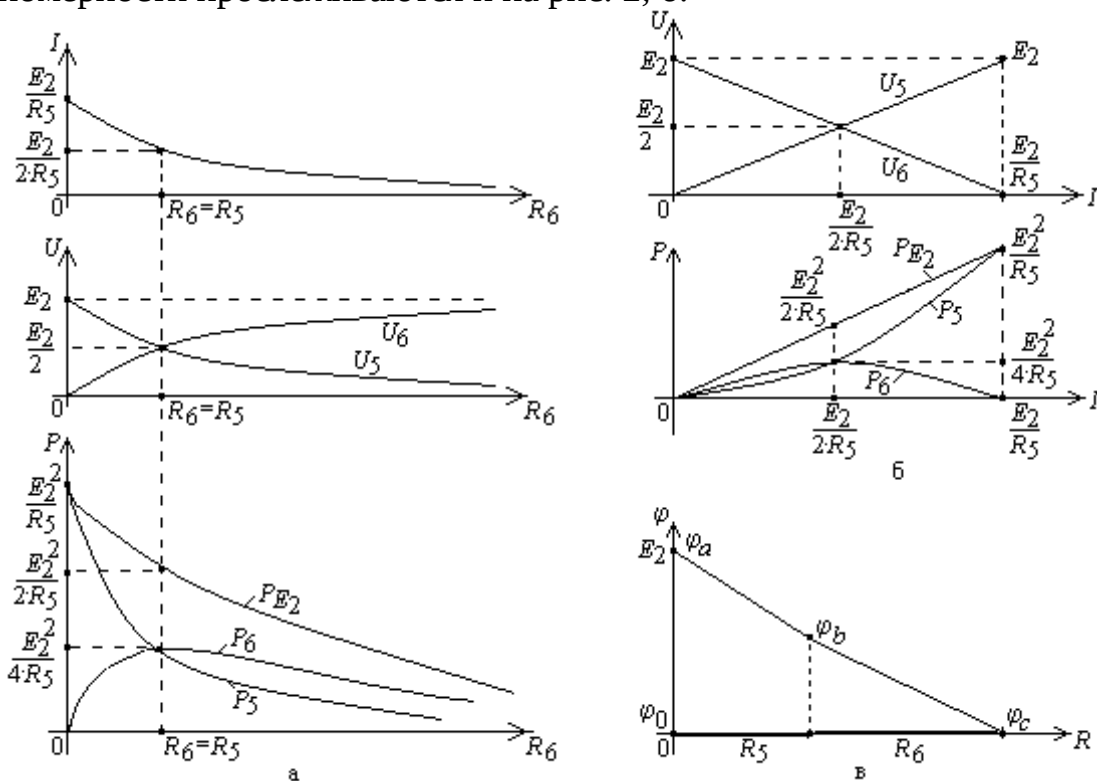


Рис. 2. Режимы работы последовательной цепи:

- 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.

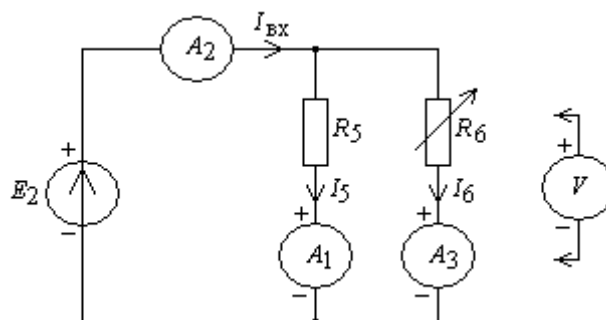


Рис.3. Параллельная линейная электрическая цепь постоянного тока

При параллельном соединении складываются проводимости резисторов, так что общая проводимость цепи относительно контактов источника ЭДС равна сумме

проводимостей $g_{вх} = g_5 + g_6$ или $\frac{1}{R_{вх}} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}$. По закону Ома токи имеют

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

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

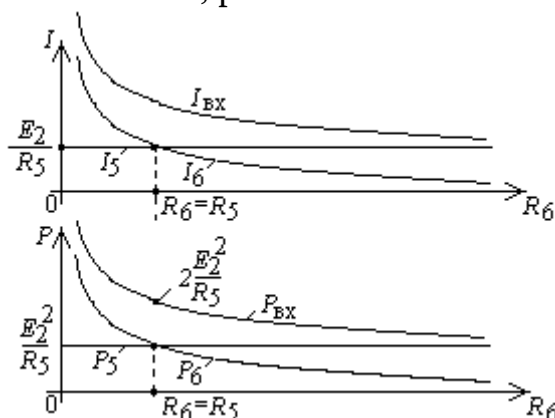


Рис. 4. Зависимости токов и мощностей от сопротивления резистора R_6 в параллельной цепи

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	$R_{вх}$, 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	$R_{вх}$, 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 изменяющ. 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 цепи.

Таблица 3

Исследование мощностей в параллельной цепи

Изменяемый резистор	Мощность источника, Вт	Мощность на резисторе R_5 , Вт	Мощность на изменяющ. 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

СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: исследование режимов работы разветвленной электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением элементов на основе законов Ома, Кирхгофа и баланса мощностей в аналитической и графической форме. Оценка влияния изменения элементов цепи на режим её работы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Разветвленная электрическая цепь постоянного тока со смешанным соединением элементов изображена на рис. 1.

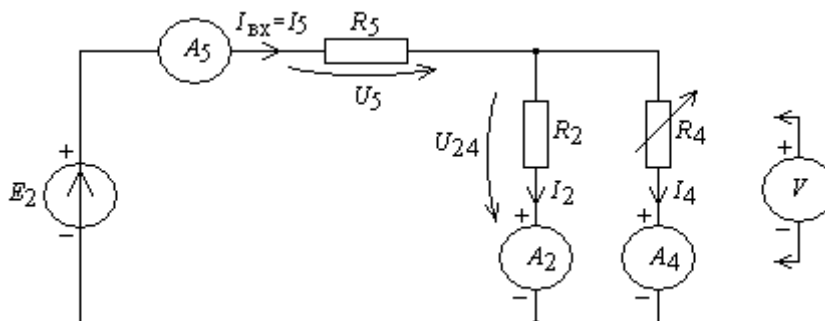


Рис. 1. Разветвленная цепь постоянного тока

Проводимости параллельно соединенных резисторов R_2 и R_4 складываются $g_{24} = g_2 + g_4$, так что $R_{24} = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}$. Сопротивления последовательно соединенных элементов складываются $R_{524} = R_{\text{вх}} = R_5 + R_{24}$. По закону Ома входной ток цепи $I_{\text{вх}} = I_5 = \frac{E_2}{R_{\text{вх}}}$. Протекая по параллельной группе резисторов R_{24} , этот ток создает на них напряжение $U_{24} = U_2 = U_4 = I_{\text{вх}} R_{24}$. Тогда по закону Ома получаем токи в параллельно соединенных резисторах:

$$I_2 = \frac{U_{24}}{R_2}; \quad I_4 = \frac{U_{24}}{R_4}.$$

По первому закону Кирхгофа входной ток $I_{\text{вх}} = I_5 = I_2 + I_4$, и напряжение на резисторе R_5 : $U_5 = I_5 R_5$. Поэтому изменение сопротивления даже одного из резисторов, например R_4 , влияет на режим работы всей цепи:

$$R_{24}(R_4) = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}; \quad R_{\text{вх}}(R_4) = R_5 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}; \quad I_5(R_4) = \frac{E_2}{R_5 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}};$$

$$U_5(R_4) = I_5(R_4); U_{24}(R_4) = R_{24}(R_4)I_5(R_4); I_2(R_4) = U_{24}(R_4)/R_2;$$

$$I_4(R_4) = U_{24}(R_4)/R_4.$$

Графики этих зависимости изображены на рис. 2, а,б.

Таким образом, в цепи выполняется первый закон Кирхгофа для узла 1: $I_5 = I_2 + I_4$ и второй закон Кирхгофа для контура: $E_2 = U_5 + U_{24}$. Кроме того, выполняется баланс мощностей: $P_E = P_5 + P_2 + P_4$ или

$$E_2 I_5 = R_5 I_5^2 + R_2 I_2^2 + R_4 I_4^2.$$

Графики мощностей изображены на рис. 2, в.

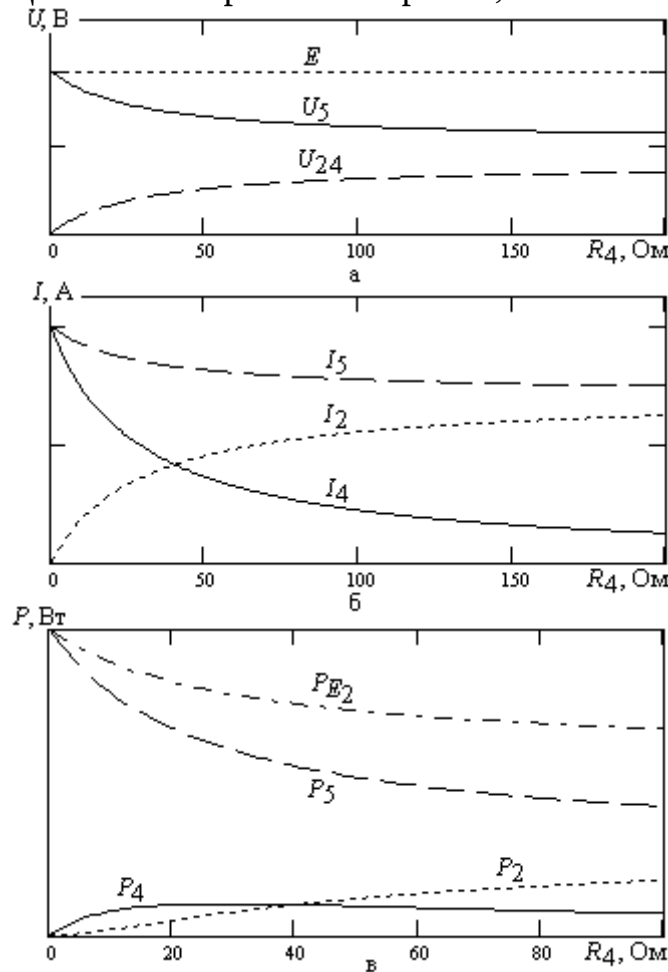


Рис.2. Зависимости параметров режима от сопротивления R_4 :

а) напряжения; б) токи; в) мощности

Определение токов в рассматриваемой цепи можно выполнить путем непосредственного решения уравнений по законам Кирхгофа

$$I_5 = I_2 + I_4; E_2 = I_5 R_5 + I_2 R_2; 0 = I_4 R_4 + I_2 R_2,$$

а также по единственному уравнению узловых потенциалов для узла 1:

$$g_{11}\varphi_1 = I_{y31} \rightarrow \varphi_1 = \frac{I_{y31}}{g_{11}} \text{ и } I_2 = \frac{\varphi_1}{R_2}, I_4 = \frac{\varphi_1}{R_4}, I_5 = \frac{\varphi_1}{R_5},$$

где $g_{11} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4}$ – собственная проводимость узла 1;

$$I_{уз1} = \frac{E_2}{R_5} - \text{узловой ток для узла 1.}$$

Анализ рассматриваемой цепи можно выполнить также и графически. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) резистора имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат $I = \frac{1}{R}U = gU$, рис.3,а. Здесь

проводимость $g = \frac{1}{R}$ играет роль углового коэффициента прямой. ВАХ идеального источника ЭДС имеет вид прямой, параллельной оси тока, рис. 3, б, так как напряжение на идеальном источнике ЭДС не зависит от тока. Зная ВАХ всех элементов, можно получить общую входную ВАХ цепи.

При последовательном соединении ток в элементах один и тот же, а напряжение равно сумме напряжений. Поэтому ВАХ последовательно соединённых резисторов складываются по линиям, параллельным оси напряжений для нескольких значений тока, рис. 3, в. При параллельном соединении элементов напряжение на элементах одно и то же, а токи складываются. Поэтому ВАХ параллельно соединённых резисторов складываются по линиям, параллельным оси токов для значений напряжения, рис. 3, г.

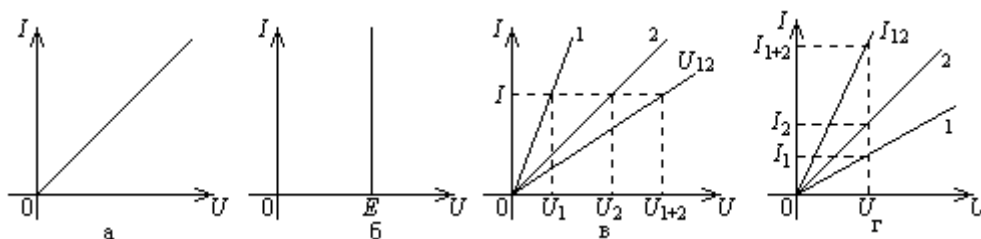


Рис. 3. Построение ВАХ последовательно и параллельно соединённых элементов

На рис. 4 показано построение ВАХ для цепи по рис. 1 и графическое определение токов и напряжений. Сложением по току получаем ВАХ параллельного соединения резисторов R_2 и R_4 . Далее, сложением по напряжению полученной ВАХ с ВАХ резистора R_5 получаем входную ВАХ цепи (ВАХ входного сопротивления цепи).

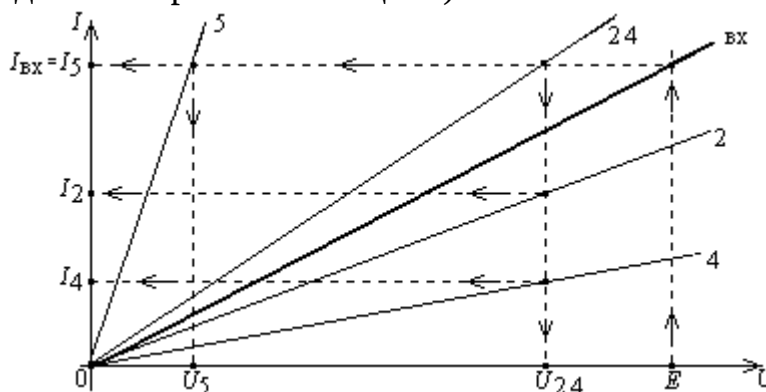


Рис. 4. Построение вольт-амперной характеристики цепи и графическое определение токов и напряжений

По полученной ВАХ цепи, используя значение ЭДС E_2 находим входной ток I_5 . На основании этого тока по ВАХ для резистора 5 находим напряжение U_5 , а для параллельно соединенных резисторов R_2 и R_4 получаем напряжение U_{24} . Зная это напряжение, по ВАХ резисторов R_2 и R_4 получаем токи I_2 и I_4 .

Графический анализ наиболее удобен для расчета нелинейных электрических цепей.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В качестве источника ЭДС E_2 используется регулируемый источник напряжения E_2 ; применяются резисторы $R_5 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 40 \text{ Ом}$; $R_4 = 80 \text{ Ом}$. Кроме них используются и другие резисторы: $R_6 = 120 \text{ Ом}$, $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$. Для измерения токов применяются цифровые амперметры $PA1$, $PA2$, $PA3$ (показания тока в Амперах). Напряжение измеряется аналоговым вольтметром с пределом измерения 15 В.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Для исследования разветвленной цепи соберите схему по рис. 1. Величину напряжения источника ЭДС E_2 установите 10 В, для этого параллельно источнику подсоедините вольтметр. Измерьте токи в цепи и напряжения на элементах, подключая к ним поочередно вольтметр. Повторите измерения, подключая к цепи вместо резистора R_4 другие: R_1 , R_3 , R_6 , $R = 0$ (чистый проводник), $R = \infty$ (разрыв, холостой ход). Данные занесите в таблицу 1. Обратите внимание, как влияет сопротивление изменяемого резистора на токи и напряжения в цепи: при уменьшении этого сопротивления ток в нем, а также входной ток и напряжение U_5 растут, ток и напряжение в резисторе R_2 уменьшаются. После окончания измерений отключите питание стенда.

Таблица 1

Исследование режимов разветвленной цепи постоянного тока

Изменяемый резистор	$U_5, \text{ В}$	$U_{24}, \text{ В}$	$I_5, \text{ А}$	$I_2, \text{ А}$	$I_4, \text{ А}$
R_4					
R_6					
R_3					
R_1					
0 (КЗ)					
∞ (ХХ)					

2. Для исследования ВАХ цепи установите в качестве изменяемого резистора R_4 . Плавное изменение от нуля напряжения источника измерьте напряжения и токи в цепи при трёх различных значениях входного напряжения: 4 В, 8 В и 12 В. Результаты измерений занесите в таблицу 2. Выключите напряжение питания.

Таблица 2

Исследование ВАХ разветвленной цепи постоянного тока

$E_2, \text{В}$	$U_5, \text{В}$	$U_{24}, \text{В}$	$I_5, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_4, \text{А}$
4					
8					
12					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По результатам таблицы 1 подсчитайте мощности на резисторах и их суммарную мощность, а также мощность источника ЭДС. Проверьте выполнение баланса мощностей. Подсчитайте также входное сопротивление цепи. Результаты занесите в таблицу 3. Сделайте выводы о выполнении баланса мощностей.

Таблица 3

Расчет мощностей в разветвленной цепи постоянного тока

Изменяемый резистор	$P_5, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$P_4, \text{Вт}$	$\sum P_R, \text{Вт}$	$P_{E2}, \text{Вт}$	$R_{BX}, \text{Ом}$
R_4						
R_6						
R_3						
R_1						
0 (КЗ)						
∞ (ОТ)						

2. По результатам таблиц 1 и 3 постройте графики токов, напряжений и мощностей в элементах цепи от величины сопротивления изменяемого 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 влиянии сопротивления изменяемого резистора на режим работы цепи.

3. По результатам измерений в таблице 2 постройте в одной системе координат ВАХ резисторов R_5, R_2, R_4 . Пользуясь этими ВАХ, сложением постройте входную ВАХ всей цепи $I_5(U_{BX})$ и по ней токи и напряжения на всех резисторах при входном напряжении 12 В.

На этом же чертеже постройте опытную ВАХ всей цепи $I_5(U_{BX})$ по данным таблицы 2, сравните её с теоретически построенной и сделайте вывод о соответствии опытных и теоретических результатов, а также о возможности применения законов Кирхгофа в графическом виде для анализа разветвленной цепи постоянного тока.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы опытов и таблицы опытных данных.
3. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
4. Графики токов, напряжений и мощностей на элементах цепи в зависимости от величины изменяемого сопротивления. Выводы о влиянии сопротивления на режим работы цепи и о выполнении баланса мощностей.
5. Графики ВАХ резисторов, теоретически построенную ВАХ цепи и опытную ВАХ на одном и том же чертеже.
6. Определение токов и напряжений по ВАХ на всех элементах цепи при входном напряжении 12 В.
7. Выводы о соответствии опытных и теоретических результатов и о возможности применения законов Кирхгофа в графическом виде для анализа разветвленной цепи постоянного тока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как по показаниям амперметра и вольтметра определить величину сопротивления и потребляемую мощность?
2. Нарисуйте схемы для измерения методом амперметра и вольтметра больших и малых электрических сопротивлений.
3. Как определить величину эквивалентного сопротивления для исследуемой цепи?
4. Для исследуемой цепи запишите уравнения по законам Кирхгофа.
5. Как по ВАХ определить величину сопротивления цепи?
6. Как применить законы Кирхгофа в графическом виде для разветвленной цепи постоянного тока?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: исследование режимов работы схемной модели электростанции постоянного тока с двумя генераторами и нагрузкой, соединенной с генераторами кабельными линиями. Анализ влияния сопротивления нагрузки на режимы работы генераторов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Схема замещения электростанции постоянного тока с двумя генераторами и нагрузкой изображена на рис. 1.

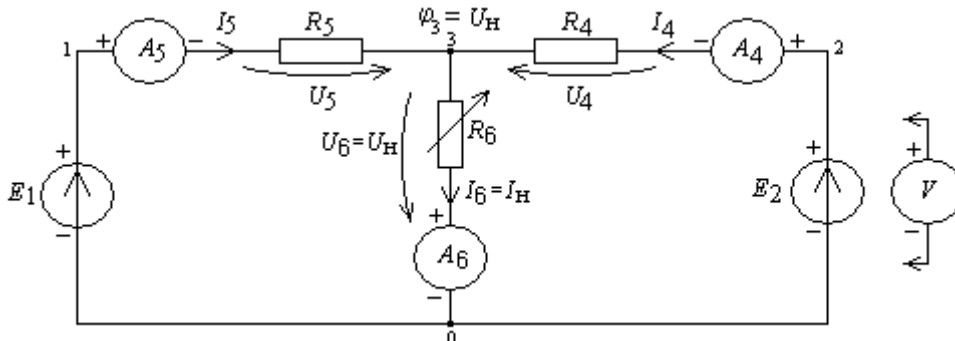


Рис. 1. Схема замещения электростанции постоянного тока

Источник ЭДС $E_1 = 15\text{ В}$ представляет первый генератор, регулируемый источник ЭДС E_2 – второй генератор. Резистор $R_6 = 120\text{ Ом}$ представляет сопротивление нагрузки электростанции. Резисторы $R_5 = 100\text{ Ом}$ и $R_4 = 80\text{ Ом}$ имитируют сопротивления кабельных линий, соединяющих нагрузку и генераторы.

Напряжение на нагрузке определяется разностью потенциалов $U_H = \varphi_3 - \varphi_0 = \varphi_3$. Потенциал узла φ_3 найдем методом узловых потенциалов

$$g_{33} \cdot \varphi_3 = I_{y3\ 3},$$

где $g_{33} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_4}$ – собственная проводимость узла 3;

$$I_{y3\ 3} = \frac{E_1}{R_5} + \frac{E_2}{R_4} \text{ – узловой ток узла 3.}$$

Отсюда получаем напряжение нагрузки $U_H = \varphi_3 = \frac{I_{y3\ 3}}{g_{33}}$. По найденному потенциалу в соответствии с законом Ома определим ток

нагрузки $I_H = I_6 = \frac{U_H}{R_6}$ и токи генераторов $I_5 = \frac{E_1 - \varphi_3}{R_5}$, $I_4 = \frac{E_2 - \varphi_3}{R_4}$, а также потери напряжения в кабелях $U_5 = I_5 R_5$, $U_4 = I_4 R_4$.

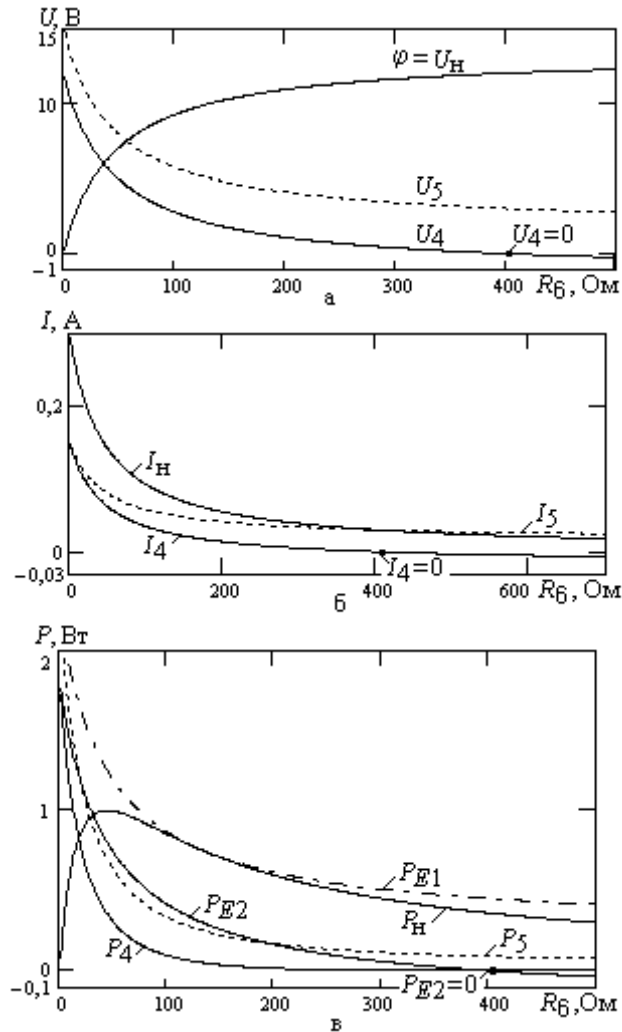


Рис. 2. Зависимость режима электростанции от сопротивления нагрузки:
а) напряжения; б) токи; в) мощности

Режим работы генераторов на электростанции зависит от сопротивления нагрузки. По мере увеличения этого сопротивления напряжение на нагрузке увеличивается и достигает максимума при обрыве сопротивления нагрузки, режим холостого хода, рис. 2, а, б. В этом случае два генератора оказываются включенными последовательно – встречно друг другу.

Ток в получившемся контуре $I_{xx} = \frac{E_1 - E_2}{R_5 + R_4}$, а напряжение холостого хода на месте оборванной нагрузки определяем по второму закону Кирхгофа для контура в левой половине схемы $E_1 = I_{xx} R_5 + U_{xx}$, отсюда

$$U_{xx} = E_1 - I_{xx} R_5 = \frac{E_1 R_4 + E_2 R_5}{R_4 + R_5}.$$

Если $E_1 > E_2$, то ток I_{xx} будет направлен в контуре по часовой стрелке и против напряжения E_2 . В этом случае генератор E_2 перестает

вырабатывать энергию, переходит в крайне нежелательный двигательный режим и потребляет энергию первого генератора, рис. 2, в. Поэтому на любой электростанции очень важно поддерживать напряжения на генераторах при параллельной работе на одинаковом уровне. Мощность на нагрузке достигает максимума при сопротивлении нагрузки $R_{6 \max} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}$.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В качестве источника ЭДС E_2 используется регулируемый источник напряжения E_2 ; Применяется источник E_1 , равный 15 В, применяются также резисторы $R_5 = 100 \text{ Ом}$, $R_6 = 120 \text{ Ом}$, $R_4 = 80 \text{ Ом}$. Кроме них используются и другие резисторы: $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 40 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$. Для измерения токов применяются цифровые амперметры $РА1$, $РА2$, $РА3$ (показания тока в Амперах). Напряжение измеряется аналоговым вольтметром с пределом измерения 15 В.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Соберите электрическую цепь с двумя источниками напряжения по рис.1. Подключив вольтметр параллельно источнику E_2 , установите на нем напряжение 12 В. Для контроля измерьте напряжение и на источнике $E_1 = 15 \text{ В}$. Измерьте напряжения и токи на резисторах R_5 , R_6 , R_4 (токи не должны превышать 0,3 А). Результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 1

Опытное исследование режимов схемной модели электростанции постоянного тока

Сопротивление нагрузки	$U_5, \text{В}$	$U_4, \text{В}$	$U_H, \text{В}$	$I_5, \text{А}$	$I_4, \text{А}$	$I_H, \text{А}$
R_6						
R_2						
R_3						
R_1						
КЗ						
ХХ						

Повторите измерения с другими сопротивлениями нагрузки вместо R_6 : $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 40 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; КЗ (нулевое сопротивление, чистый проводник); ХХ (разомкнутая нагрузка, $R = \infty$). Обратите внимание на снижение напряжения на нагрузке при уменьшении ее сопротивления и на максимальное значение тока при режиме КЗ, а также на максимальное значение напряжения на нагрузке при её разрыве. В последнем случае ток I_4

через источник E_2 изменяет направление и протекает навстречу напряжению источника E_2 , т.е. этот источник переходит в двигательный режим, перестает вырабатывать электроэнергию и начинает её потреблять.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Для всех сопротивлений нагрузки в таблице 1 рассчитайте потенциал точки 3 (т.е. напряжение нагрузки), токи в цепи I_5 , I_4 , I_H , напряжения потерь на сопротивлениях кабельной линии U_5 и U_4 . Занесите данные в таблицу 2, сравните опытные и расчетные результаты, сделайте выводы об их соответствии.

Таблица 2

Расчет режимов схемной модели электростанции постоянного тока

Сопротивление нагрузки	U_5 , В	U_4 , В	U_H , В	I_5 , А	I_4 , А	I_H , А
R_6						
R_2						
R_3						
R_1						
КЗ						
XX						

2. Постройте на одном чертеже графики напряжения на нагрузке и на сопротивлениях потерь кабельных линий в зависимости от сопротивления нагрузки. На другом чертеже – графики токов генераторов и нагрузки в зависимости также от сопротивления нагрузки. Сделайте выводы о влиянии сопротивления нагрузки на её режим работы и на величину потерь напряжения в проводах кабельной линии.

3. Рассчитайте мощности всех нагрузок, обоих генераторов и на проводах кабельных линий, результаты занесите в таблицу 3. Проверьте выполнение баланса мощностей. Сделайте выводы о выполнении баланса мощностей.

Таблица 2

Расчет мощностей электростанции постоянного тока

Сопротивление нагрузки	P_5 , Вт	P_4 , Вт	P_H , Вт	P_{E1} , Вт	P_{E2} , Вт	$P_{\Sigma R}$, Вт
R_6						
R_2						
R_3						
R_1						
КЗ						
XX						

4. Постройте на одном чертеже графики мощности нагрузки, генераторов и потерь мощностей в кабельных линиях в зависимости от сопротивления нагрузки. Сделайте выводы о влиянии этого сопротивления на режим потребления и генерирования мощности в электростанции.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы опытов и таблицы опытных данных.
3. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
4. Графики токов, напряжений и мощностей на элементах цепи в зависимости от величины изменяемого сопротивления нагрузки. Выводы о влиянии этого сопротивления на режим работы цепи и о выполнении баланса мощностей.
5. Выводы о соответствии опытных и теоретических результатов и о возможности применения метода узловых потенциалов для анализа разветвленной цепи постоянного тока с двумя источниками напряжения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие методы анализа цепей постоянного тока могут быть использованы для рассматриваемой цепи, кроме метода узловых потенциалов?
2. Сколько уравнений по законам Кирхгофа нужно было бы записать для анализа рассматриваемой цепи? Запишите эти уравнения.
3. В каких случаях наиболее рационально применять именно метод узловых потенциалов? Какое главное достоинство этого метода?
4. Как в исследуемой цепи по результатам метода узловых потенциалов определять токи цепи?
5. Что такое внешняя характеристика источника напряжения, каким уравнением она может быть представлена?
6. Как объяснить снижение напряжения на нагрузке при уменьшении её сопротивления?
7. Почему при увеличении сопротивления нагрузки один из генераторов переходит в двигательный режим? В чем состоит неприемлемость этого режима?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ПРОСТАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное получение вольтамперных характеристик (ВАХ) линейных и нелинейных элементов, графический анализ режима простых нелинейных цепей постоянного тока.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Нелинейным называется элемент, параметры которого зависят от режима его работы. ВАХ нелинейного элемента проходит через начало координат и имеет вид, отличный от прямой линии. Для примера на рис. 1, а изображена ВАХ лампы накаливания. В отличие от линейных элементов нелинейные не имеют постоянного, определенного сопротивления. Сопротивление нелинейного элемента зависит от тока и напряжения на этом элементе.

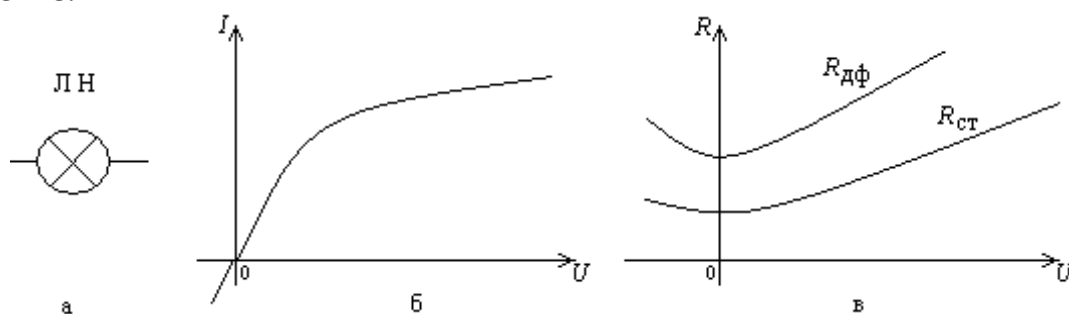


Рис. 1. Лампа накаливания а); вольт-амперная характеристика б) и ее статическое и дифференциальное сопротивления в)

Различают два вида сопротивлений для нелинейных элементов: статическое и дифференциальное. Статическое сопротивление $R_{СТ}$ определяется в заданной точке ВАХ делением напряжения на ток: $R_{СТ} = \frac{U}{I}$. Дифференциальное сопротивление $R_{ДФ}$ определяется делением разности напряжений между двумя соседними, близко расположенными точками ВАХ на разность токов между этими точками: $R_{ДФ} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2}$. Эти сопротивления не равны между собой и зависят от тока и напряжения нелинейного элемента. На рис. 1, б показаны графики статического и дифференциального сопротивления лампы накаливания, рис. 1, а, в зависимости от напряжения.

Анализ нелинейной цепи выполняется обычно графически по ВАХ: при последовательном соединении элементов их ВАХ складываются по напряжению, а при параллельном – по току. Это дает возможность графически анализировать режим работы этих элементов.

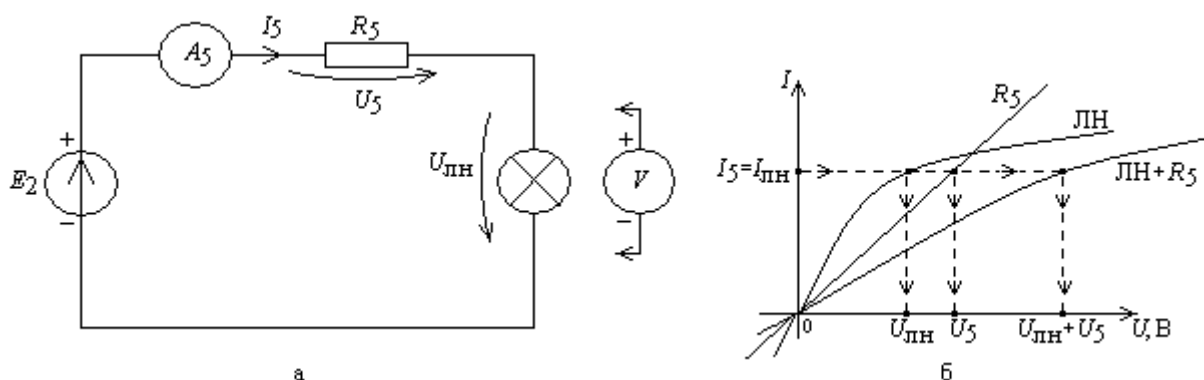


Рис. 2. Последовательная нелинейная цепь а) и построение её вольт-амперной характеристики б)

На рис. 2, а показана простая последовательная цепь с линейным резистором $R_5 = 100 \text{ Ом}$ и лампа накаливания с ВАХ, показанной на рис. 1, а. На рис. 2, б показаны ВАХ этих элементов и их общая ВАХ. По величине входного напряжения E_2 получен ток цепи и напряжение на линейном элементе U_5 и на лампе накаливания $U_{ЛН}$.

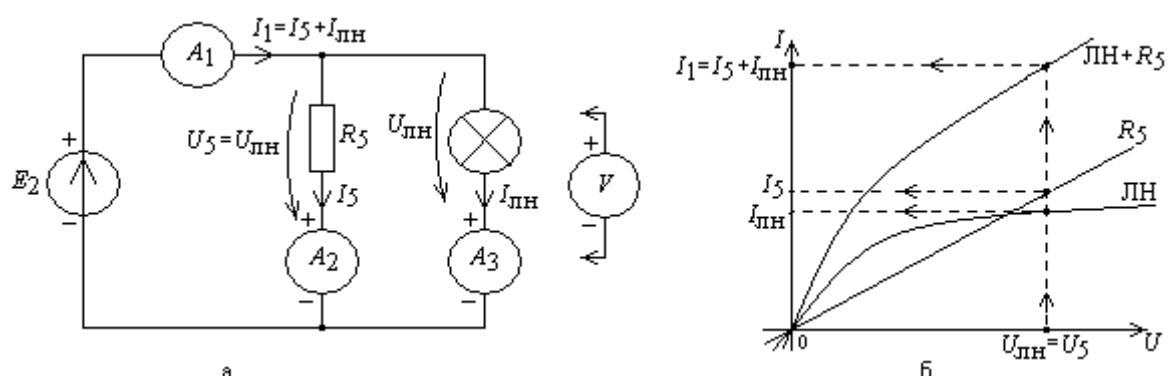


Рис. 3. Параллельная нелинейная цепь а) и построение её вольт-амперной характеристики б)

На рис. 3, а показана простая параллельная цепь из этих же элементов; на рис. 3, б – ВАХ этих элементов и всей цепи. По входному напряжению получаем входной ток цепи и токи на элементах: I_5 и $I_{ЛН}$.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В качестве источника напряжения используется регулируемый источник E_2 ; применяются также резистор $R_5 = 100 \text{ Ом}$ и лампа накаливания $HL1$. Для измерения тока применяются цифровые амперметры $РА1$, $РА2$, $РА3$ (показания тока в Амперах); для измерения напряжения применяется аналоговый вольтметр с пределом измерения 15 В.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Соберите цепь по рис. 2, а и получите ВАХ лампы накаливания, резистора R_5 и всей цепи. Для этого установите ручку источника регулятора напряжения в крайнее левое положение. Включите источник и, плавно увеличивая напряжение, измеряйте напряжения на резисторе U_5 и на лампе $U_{ЛН}$, устанавливая ток от нуля через 10 мА до величины 100 мА. Результаты занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания стенда.

Таблица 1

Вольт-амперные характеристики нелинейной последовательной цепи

$I, \text{мА}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$E_2, \text{В}$	0										
$U_5, \text{В}$	0										
$U_{ЛН}, \text{В}$	0										

2. Соберите параллельную цепь по рис.3,а. Аналогично получите ВАХ резистора, лампы и всей цепи. Результаты занесите в таблицу 2. Выключите напряжение питания.

Таблица 2

Вольт-амперные характеристики нелинейной параллельной цепи

$I, \text{мА}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$E_2, \text{В}$	0										
$I_5, \text{В}$	0										
$I_{ЛН}, \text{В}$	0										

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Запишите уравнения второго закона Кирхгофа для последовательной цепи, рис. 1, а. В одной координатной системе постройте графики ВАХ исследуемых элементов и их последовательного соединения.

Используя экспериментальные ВАХ резистора и лампы, на этом же чертеже получите теоретическую ВАХ всей цепи, сравните её с экспериментальной. Рекомендуемые масштабы: $m_U = 1 \text{ В/см}$, $m_I = 10 \text{ мА/см}$.

2. По теоретической ВАХ при входном напряжении 10 В определите входной ток, а также напряжения на исследуемых элементах. Сравните с данными по опытным графикам ВАХ. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

3. Запишите уравнения первого закона Кирхгофа для параллельной цепи, рис.3,а. В одной координатной системе постройте графики ВАХ исследуемых элементов и их параллельного соединения.

Используя экспериментальные ВАХ резистора и лампы, на этом же чертеже получите теоретическую ВАХ всей цепи, сравните её с экспериментальной. Рекомендуемые масштабы: $m_U = 1 \text{ В/см}$, $m_I = 20 \text{ мА/см}$.

По теоретической ВАХ при входном токе 45 мА определите входное напряжение, а также токи на исследуемых элементах. Сравните с данными по опытному графику ВАХ. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

4. По ВАХ лампы накаливания рассчитайте значения статического и дифференциального сопротивлений, занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Статическое и дифференциальное сопротивления лампы накаливания

$I_{лн}, \text{мА}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{лн}, \text{В}$	0										
$R_{ст}, \text{Ом}$											
$R_{диф}, \text{Ом}$											

На одном чертеже постройте графики этих сопротивлений в зависимости от напряжения. Рекомендуемые масштабы: $m_U = 1 \text{ В/см}$, $m_R = 10 \text{ В/см}$. Сделайте выводы о влиянии напряжения и тока на величины статического и дифференциального сопротивлений.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы опытов и таблицы опытных данных.
3. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
4. Графики токов и напряжений на элементах цепей в зависимости от величины изменяемого тока. Выводы о влиянии входного напряжения и тока на режим работы цепей и о выполнении законов Кирхгофа.
5. Выводы о соответствии опытных и теоретических результатов и о возможности применения графического метода для анализа простых цепей постоянного тока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение нелинейному элементу.
2. Приведите примеры известных Вам нелинейных элементов и их характеристик.
3. Почему для нелинейных элементов удобен графический метод анализа?
4. Справедливы ли для линейных цепей законы Кирхгофа?
5. Как построить вольт-амперную характеристику последовательного соединения нелинейных элементов?

6. Как построить вольт-амперную характеристику параллельного соединения нелинейных элементов?

7. Как определяется статическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для различных точек вольт-амперной характеристики?

8. Как определяется дифференциальное сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для различных точек вольт-амперной характеристики?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

РАЗВЕТВЛЕННАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное получение вольт-амперных характеристик (ВАХ) линейных и нелинейных элементов, графический анализ режима разветвленной нелинейной цепи постоянного тока.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Нелинейным называется элемент, параметры которого зависят от режима его работы. ВАХ нелинейного элемента проходит через начало координат и имеет вид, отличный от прямой линии. Для примера на рис. 1 изображена лампа накаливания, её ВАХ и статическое и дифференциальное сопротивления. На рис. 2 показана ВАХ полупроводникового нелинейного элемента. В отличие от линейных элементов, нелинейные не имеют постоянного, определенного сопротивления. Сопротивление нелинейного элемента зависит от тока и напряжения на этом элементе.

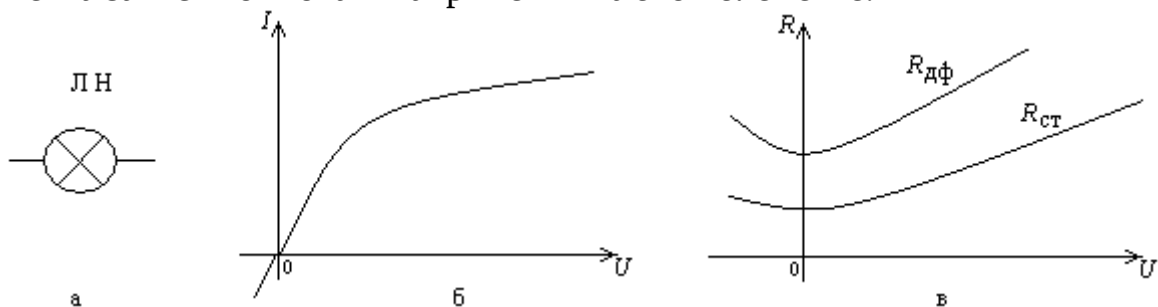


Рис.1. Лампа накаливания а); вольт-амперная характеристика лампы накаливания б) и ее статическое и дифференциальное сопротивления в)

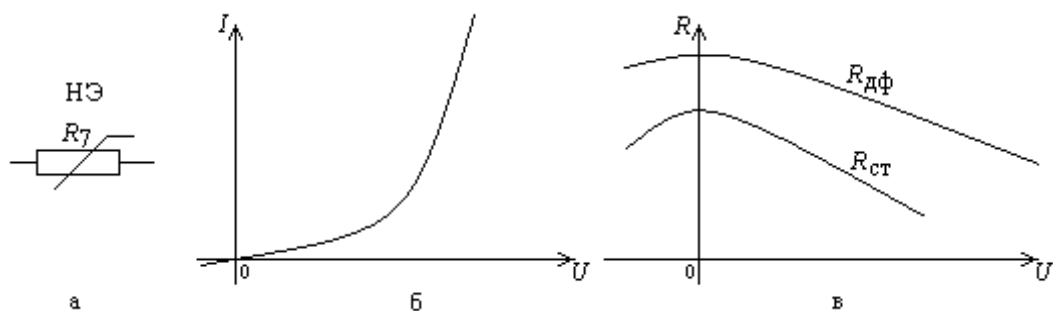


Рис.2. Нелинейный полупроводниковый элемент а); вольтамперная характеристика б); статическое и дифференциальное сопротивления в)

Различают два вида сопротивлений для нелинейных элементов: статическое и дифференциальное. Статическое сопротивление $R_{СТ}$ определяется в заданной точке ВАХ делением напряжения на ток: $R_{СТ} = \frac{U}{I}$. Дифференциальное сопротивление $R_{дф}$ определяется делением разности напряжений между двумя соседними, близко расположенными точками ВАХ

на разность токов между этими точками: $R_{ДФ} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2}$. Эти

сопротивления не равны между собой и зависят от тока и напряжения нелинейного элемента. На рис. 1, в показаны графики статического и дифференциального сопротивления лампы накаливания в зависимости от напряжения; а на рис. 2, в – графики статического и дифференциального сопротивления полупроводникового нелинейного элемента.

Анализ нелинейной цепи выполняется обычно графически по ВАХ: при последовательном соединении элементов их ВАХ складываются по напряжению, а при параллельном – по току. Это дает возможность графически анализировать режим работы этих элементов.

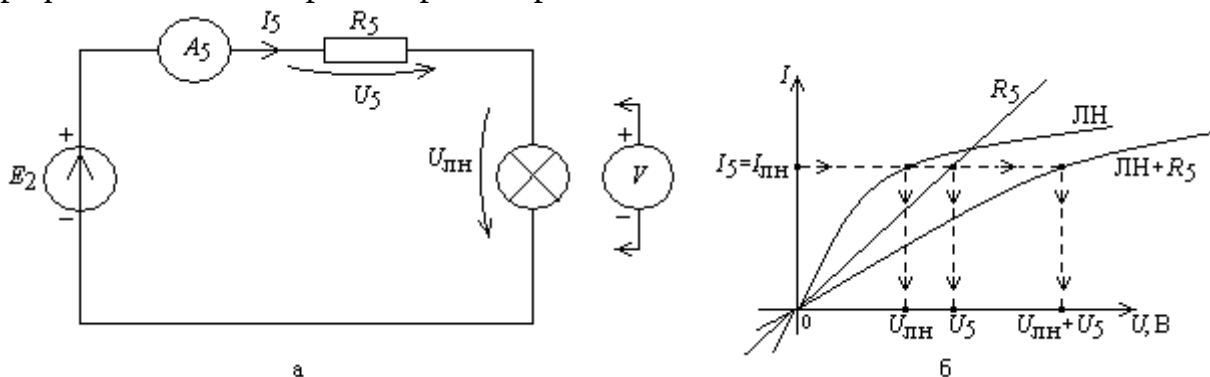


Рис. 3. Последовательная нелинейная цепь а) и построение её вольтамперной характеристики б)

На рис. 3, а показана простая последовательная цепь с линейным резистором $R_5 = 100 \text{ Ом}$ и лампа накаливания с ВАХ, показанной на рис. 1, а. На рис. 3, б показаны ВАХ этих элементов и их общая ВАХ. По величине входного напряжения E_2 получен ток цепи и напряжение на линейном элементе U_5 и на лампе накаливания $U_{ЛН}$.

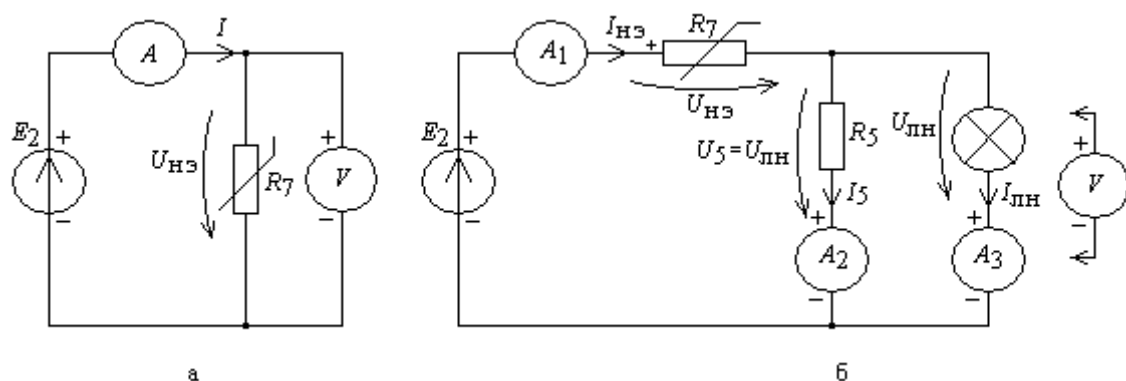


Рис.4. Нелинейные электрические цепи:
а) схема получения ВАХ нелинейного элемента;
б) нелинейная цепь со смешанным соединением элементов

На рис. 4, а показана схема цепи для получения ВАХ полупроводникового нелинейного элемента, а на рис. 4, б – электрическая цепь со смешанным соединением линейных и нелинейных элементов. На

рис. 5 представлено построение ВАХ такой цепи с параллельным соединением лампы накаливания и резистора R_5 и последовательно включенного к ним полупроводникового нелинейного элемента.

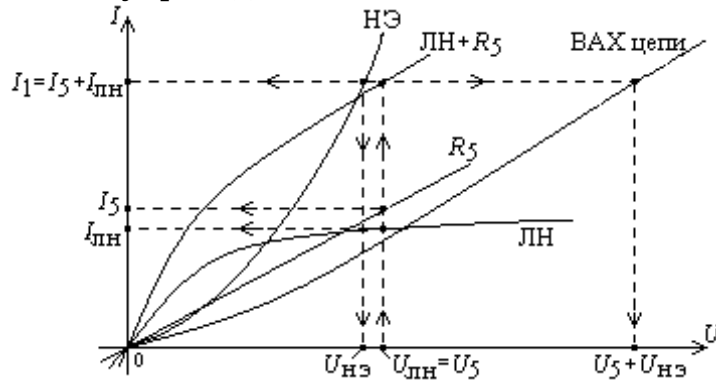


Рис. 5. Построение ВАХ нелинейной цепи со смешанным соединением элементов

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В качестве источника напряжения используется регулируемый источник E_2 ; применяются также резистор $R_5 = 100 \text{ Ом}$, лампа накаливания $HL1$ и полупроводниковый нелинейный элемент R_7 . Для измерения тока применяются цифровые амперметры $PA1$, $PA2$, $PA3$ (показания тока в Амперах); для измерения напряжения применяется аналоговый вольтметр с пределом измерения 15 В .

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Соберите цепь по рис. 3, а и получите ВАХ лампы накаливания и резистора R_5 . Для этого установите ручку источника регулятора напряжения в крайнее левое положение. Включите источник и, плавно увеличивая его напряжение, измеряйте напряжения на резисторе U_5 и на лампе $U_{ЛН}$, устанавливая ток от нуля через 10 мА до величины 100 мА . Результаты занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания стенда.

Таблица 1

Вольтамперные характеристики лампы накаливания и резистора R_5

$I, \text{мА}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_5, \text{В}$	0										
$U_{ЛН}, \text{В}$	0										

2. Соберите цепь по рис. 4, а для получения ВАХ нелинейного полупроводникового элемента. Ручку регулятора напряжения E_2 установите в крайнее левое положение. Обратите внимание на то, что для штатной работы нелинейного элемента его левый контакт должен подходить к

плюсовому контакту источника E_2 . Включите источник и, плавно увеличивая его напряжение, измеряйте напряжение на нелинейном полупроводниковом элементе R_7 , устанавливая ток от нуля через 10 мА до величины 100 мА. Результаты занесите в таблицу 2. Выключите напряжение питания.

Таблица 2

Вольт-амперная характеристика нелинейного полупроводникового элемента

$I, \text{мА}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{R7}, \text{В}$	0										
$R_{cm}, \text{Ом}$											
$R_{\partial\phi}, \text{Ом}$											

3. Соберите цепь по рис. 4, б для анализа разветвленной нелинейной цепи со смешанным соединением линейных и нелинейных элементов. По-прежнему проследите за правильным соединением левого контакта нелинейного элемента с плюсовым выводом источника. Установите ручку регулятора напряжения E_2 в крайнее левое положение, включите напряжение питания. Плавно увеличивая входное напряжение, измеряйте токи в лампе и резисторе R_5 , а также напряжения на этих элементах и на полупроводниковом элементе, устанавливая входной ток от нуля через 20 мА до величины 200 мА. Результаты занесите в таблицу 3. Выключите напряжение питания.

Таблица 3

Вольт-амперные характеристики разветвленной нелинейной цепи

$I_{\text{вх}}, \text{мА}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$E_2, \text{В}$	0										
$U_{R7}, \text{В}$	0										
$U_{R5}, \text{В}$	0										
$I_{\text{лн}}, \text{мА}$	0										
$I_{R5}, \text{мА}$	0										

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. В одной координатной системе крупно постройте графики ВАХ линейного резистора R_5 и лампы накаливания по данным таблицы 1. Рекомендуемые масштабы: $m_u = 1 \text{ В/см}$, $m_i = 10 \text{ мА/см}$. На этом же чертеже постройте ВАХ полупроводникового нелинейного элемента по данным таблицы 2.

2. Запишите уравнения первого закона Кирхгофа для параллельного соединения линейного резистора R_5 и лампы по рис. 4, б. В той же

координатной системе по п.1 постройте график ВАХ параллельного соединения этих элементов. На этом же чертеже постройте сложением теоретический график параллельного соединения R_5 и лампы, сопоставьте с опытным, сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

3. Запишите уравнения второго закона Кирхгофа для последовательного соединения нелинейного элемента и параллельной группы линейного резистора R_5 и лампы по рис. 4, б. В координатной системе п.1 и 2 по данным таблицы 3 постройте ВАХ всей разветвленной цепи. На этом же чертеже сложением постройте теоретический график входной ВАХ цепи, сопоставьте с опытным, сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

4. По теоретическим ВАХ цепи при входном напряжении 10 В определите входной ток, а также токи и напряжения на всех элементах цепи. Сравните с данными по опытным графикам ВАХ. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

5. По ВАХ нелинейного полупроводникового элемента R_7 по данным таблицы 2 рассчитайте статическое и дифференциальное сопротивления, занесите их в таблицу 2. На одном чертеже постройте графики этих сопротивлений в зависимости от напряжения, рекомендуемые масштабы: $m_U = 1$ В/см, $m_R = 10$ В/см. Сделайте выводы о влиянии напряжения и тока на величины статического и дифференциального сопротивлений.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы опытов и таблицы опытных данных.
3. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
4. Графики вольт-амперных характеристик элементов цепи, опытных и теоретических ВАХ их соединений и всей цепи. Выводы о влиянии входного напряжения и тока на режим работы цепи и о выполнении законов Кирхгофа.
5. Выводы о соответствии опытных и теоретических результатов и о возможности применения графического метода для анализа разветвленных нелинейных цепей постоянного тока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение нелинейному элементу.
2. Приведите примеры известных Вам нелинейных элементов и их характеристик.
3. Почему для нелинейных элементов удобен графический метод анализа?
4. Справедливы ли для линейных цепей законы Кирхгофа?

5. Как построить вольт-амперную характеристику последовательного соединения нелинейных элементов?

6. Как построить вольт-амперную характеристику параллельного соединения нелинейных элементов?

7. Как определяется статическое сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для различных точек вольтамперной характеристики?

8. Как определяется дифференциальное сопротивление нелинейного элемента? Будет ли оно одинаковое для различных точек вольт-амперной характеристики?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

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

входными 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.

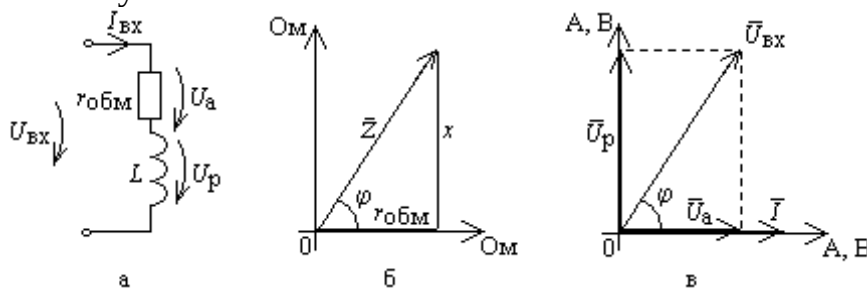


Рис. 1. Катушка индуктивности в режиме синусоидального тока:
а) последовательная схема замещения; б) треугольник сопротивлений;
в) совмещенная векторная диаграмма напряжений и тока

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 $U_p = \chi I$, 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_{yt} между обкладками конденсатора.

Параметры этой схемы также находятся по результатам измерения напряжения U , тока I и активной мощности P : проводимость утечки $g_{yt} = \frac{1}{r_{yt}} = \frac{P}{U^2}$; полная проводимость $y = \frac{I}{U}$; реактивная проводимость

$b = \sqrt{y^2 - g_{yt}^2}$; емкость $C = \frac{b}{\omega}$; разность фаз между входным напряжением

и током $\varphi = \arctg \frac{b}{g_{yt}}$; качество конденсатора оценивается добротностью

$$Q = \frac{b}{g_{yt}}.$$

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

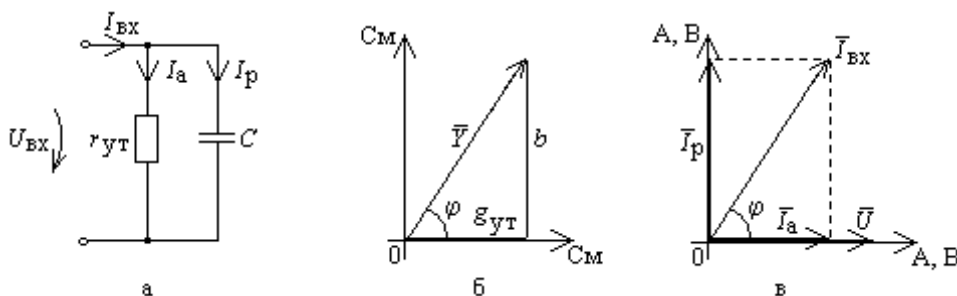


Рис. 2. Конденсатор в режиме синусоидального тока:
а) параллельная схема замещения; б) треугольник проводимостей;
в) совмещенная векторная диаграмма токов и напряжения

Вектор входного тока конденсатора представляется суммой двух составляющих: активный ток $I_a = g_{yt}U$, 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

$$r = \frac{U}{I} \text{ или } r = \frac{P}{I^2}.$$

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 вольт-амперную 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.

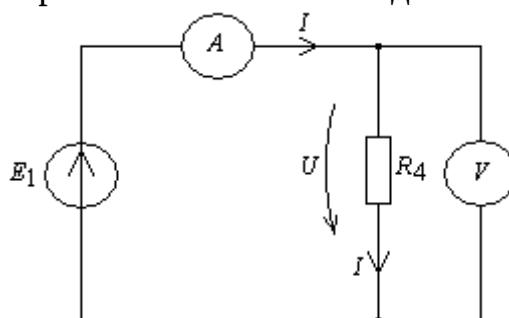


Рис. 3. Определение сопротивления резистора в режиме синусоидального тока

Таблица 1

Вольт-амперные 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 вольт-амперную 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.

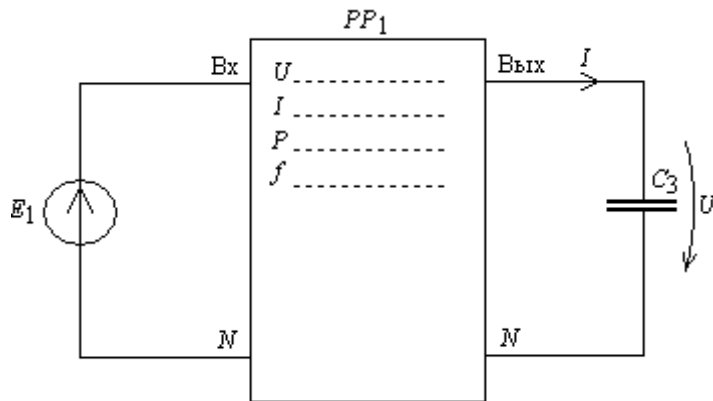


Рис. 4. Определение параметров конденсатора в режиме синусоидального тока

Таблица 2

Вольт-амперные 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.

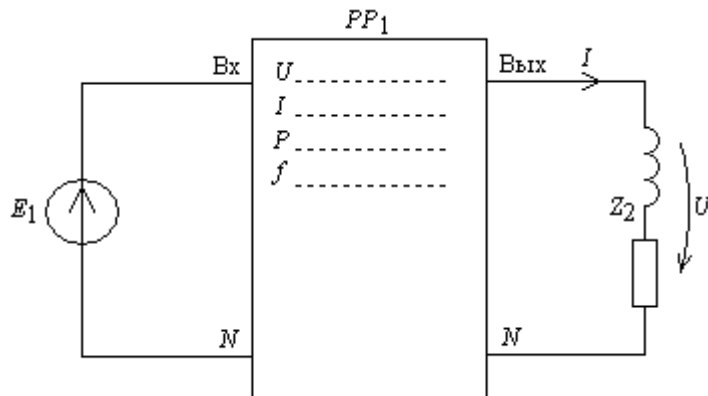


Рис. 5. Определение параметров катушки индуктивности в режиме синусоидального тока

Таблица 3

Вольт-амперные 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 вольт-амперные 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 вольт-амперных 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 № 7

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШКИ И КОНДЕНСАТОРА. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: исследование режима синусоидального тока в последовательной цепи, состоящей из катушки индуктивности и конденсатора; анализ резонанса напряжений.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

При последовательном соединении элементов их сопротивления складываются. Отдельно складываются активные (резистивные) сопротивления; отдельно – реактивные (емкостные и индуктивные). Емкостные сопротивления при сложении учитываются с отрицательным знаком, т.е. фактически отнимаются от индуктивных: $x = x_L - x_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$.

Общее, полное сопротивление последовательной цепи определяется, как гипотенуза прямоугольного треугольника, горизонтальным катетом которого является суммарное активное сопротивление, а вертикальным катетом – суммарное реактивное сопротивление $z = \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}$. Расположение треугольника сопротивлений на плоскости зависит от знака общего реактивного сопротивления, рис. 1. Действующее значение тока в последовательной цепи, а также напряжения на отдельных элементах определяются по закону Ома:

$$I = \frac{U_{вх}}{z}; \quad U_r = r \cdot I; \quad U_L = x_L \cdot I; \quad U_C = x_C \cdot I.$$

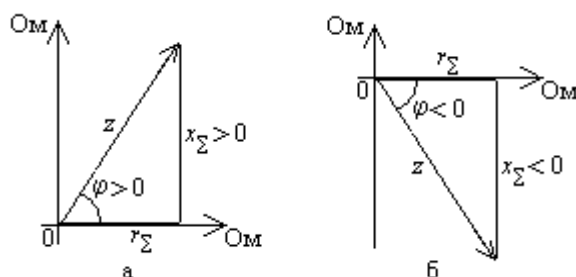


Рис. 1. Векторы сопротивлений последовательно соединенных элементов:
а) индуктивное сопротивление преобладает; б) емкостное сопротивление преобладает

Резонанс напряжений – это явление полной взаимной компенсации реактивных емкостных и индуктивных сопротивлений в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки индуктивности и конденсатора. Эквивалентное входное сопротивление цепи имеет при резонансе чисто резистивный характер.

В цепи, состоящей из последовательно соединенных конденсатора и катушки индуктивности, рис. 2, а, полное входное сопротивление имеет вид: $z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$, где r – сопротивление обмотки катушки, $x_L = \omega L$ – реактивное сопротивление катушки; $x_C = \frac{1}{\omega C}$ – реактивное сопротивление конденсатора. Условие резонанса заключается в равенстве общего реактивного сопротивления нулю: $x = x_L - x_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$.

При неизменных частоте напряжения и параметрах катушки режима резонанса можно достичь подбором емкости $C_p = \frac{1}{\omega^2 L}$, а при неизменных параметрах конденсатора и катушки резонанса добиваемся подбором частоты $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

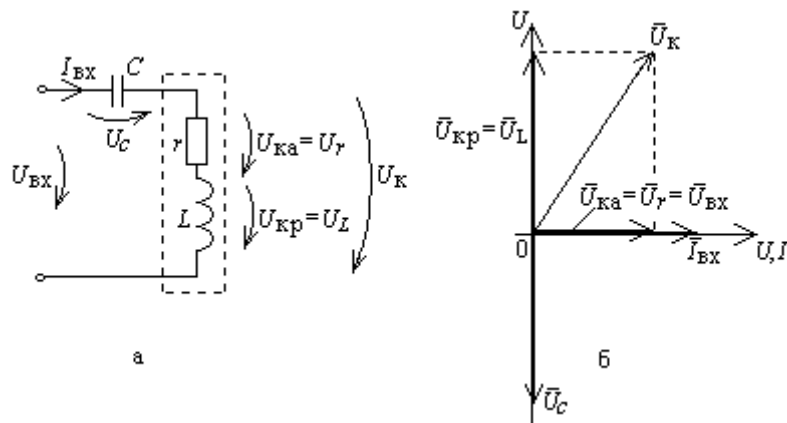


Рис. 2. Последовательная RLC-цепь и ее векторная диаграмма

В режиме резонанса полное сопротивление цепи определяется только активным сопротивлением обмотки катушки $z = r$ и минимально; а ток принимает максимальное значение $I = \frac{U}{z} = \frac{U}{r}$. Напряжение на конденсаторе

$U_C = \frac{1}{\omega C} I$ и реактивное напряжение на катушке $U_{KP} = U_L = \omega L \cdot I$ равны по величине, противофазны (рис. 2, б) и компенсируют друг друга: $\vec{U}_C + \vec{U}_{KP} = 0$. Резонанс в такой цепи называется резонансом напряжений.

Входное напряжение совпадает с активной составляющей напряжения на катушке, т.е. с напряжением на активном сопротивлении обмотки $U_{BX} = U_{KA} = U_r = rI$. Добротность цепи также совпадает с добротностью катушки $Q = \frac{x_L}{r} = \frac{x_C}{r}$. Добротность показывает, во сколько раз напряжение на конденсаторе и реактивное напряжение катушки превышают входное напряжение $Q = \frac{U_C}{U} = \frac{U_{KP}}{U}$.

Графики параметров режима цепи при изменении емкости C от 0 до ∞ показаны на рис. 3, а: индуктивное (реактивное) сопротивление катушки $x_L = x_K = \omega L$; емкостное сопротивление конденсатора $x_C = \frac{1}{\omega C}$; реактивное сопротивление цепи $x = x_L - x_C$; полное сопротивление цепи $z = \sqrt{r^2 + x^2}$; угол разности фаз между входными напряжением и током $\varphi = \arctg \frac{x}{r}$; ток цепи $I = \frac{U}{z}$; напряжение на конденсаторе $U_C = x_C I$; активное напряжение катушки $U_{KA} = U_r = rI$; реактивное напряжение катушки $U_{KP} = U_L = x_L I$;

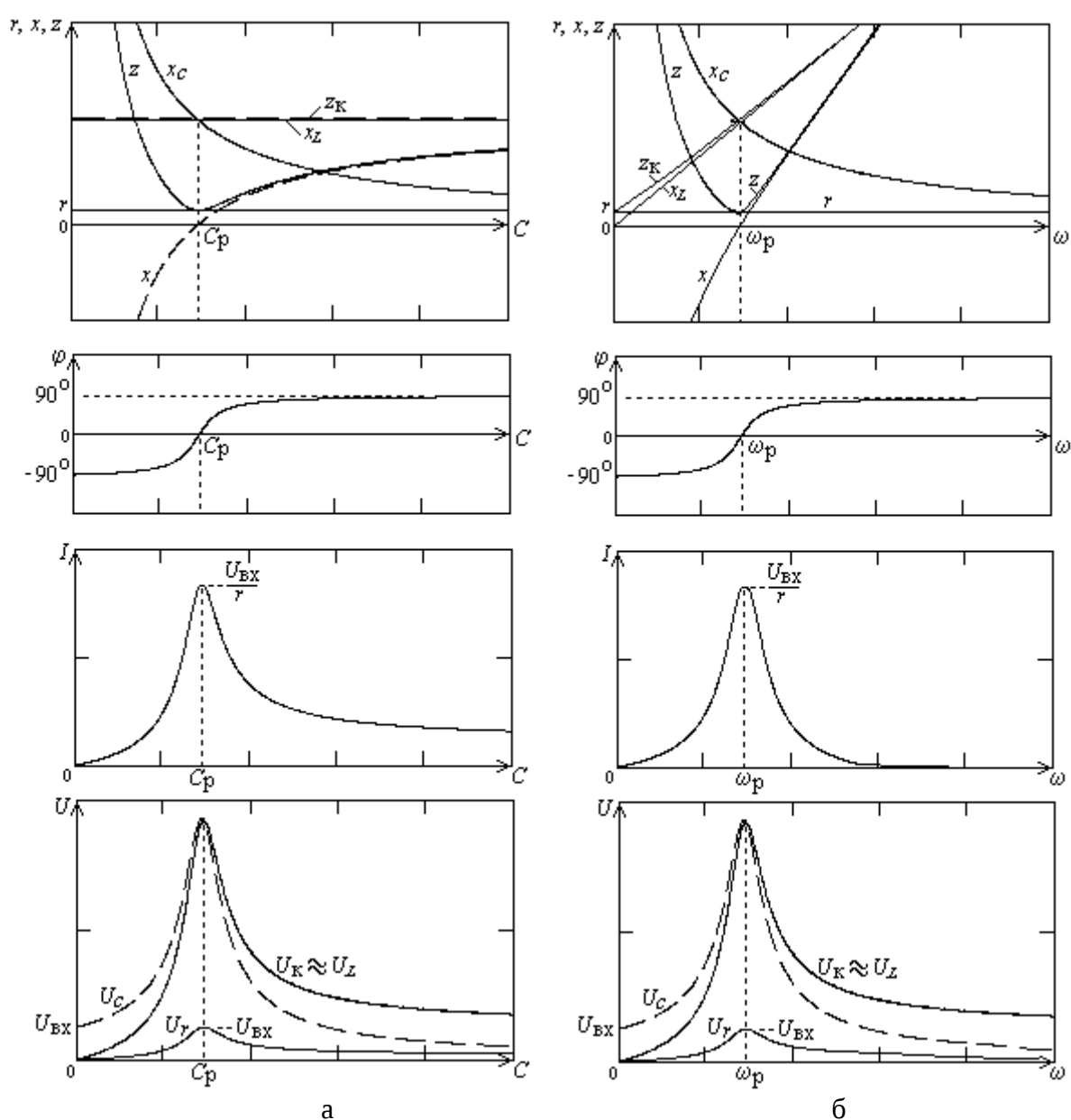


Рис. 3. Зависимости параметров режима последовательной RLC-цепи от емкости а) и от частоты б)

общее напряжение на катушке $U_K = z_K I$, где $z_K = \sqrt{r^2 + x_L^2}$ – полное сопротивление катушки. При нулевой емкости $I = 0$; $U_K = 0$; $U_C = U_{BX}$; при очень большой емкости $I = \frac{U}{z_K}$; $U_C = 0$; $U_K = U_{BX}$.

Аналогичные графики параметров режима цепи при изменении частоты ω от 0 до ∞ показаны на рис. 3, б.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Входное напряжение подается с регулятора переменного напряжения и частоты E_1 . Катушка индуктивности обозначена Z_2 , ее индуктивность $L_2 = 80$ мГн; емкости: $C_1 = 4,7$ мкФ; $C_2 = 6,7$ мкФ; $C_3 = 10$ мкФ; $C_4 = 22$ мкФ. Для измерения тока, напряжения, мощности, частоты и угла разности фаз между напряжением и током используется цифровой универсальный измеритель $PP1$. Для измерения напряжения применяется аналоговый вольтметр.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Для исследования последовательной цепи соберите схему по рис. 4.

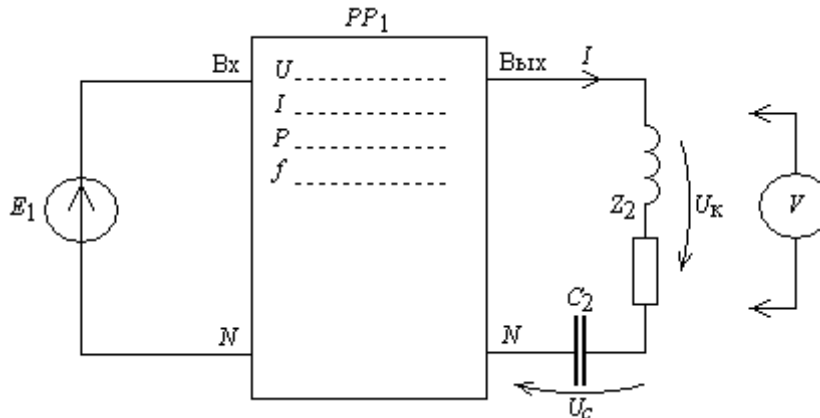


Рис.. 4. Схема эксперимента

Подсчитайте резонансную частоту ω_p для обеспечения в цепи резонансного режима, переведите её в Герцы. Включите питание стенда, установите на выходе источника питания напряжение 7 В и рассчитанную резонансную частоту. Убедитесь, что угол разности фаз равен нулю, т.е. режим резонанса достигнут. В таблицу 1 запишите ток, мощность и напряжения на катушке и конденсаторе. Обратите внимание на то, что эти напряжения гораздо больше входного. Выключите напряжение питания.

2. Установите вместо резонансной C_2 другую емкость, например, C_1 , включите напряжение и при той же частоте повторите измерения, данные занесите в таблицу 1. Аналогично, устанавливая емкости C_3 , C_4 , $C = 0$

(разомкните один из контактов емкости) и $C = \infty$ (вместо емкости поставьте чистый проводник (почему?!)), выполните измерения параметров режима, данные заносите в таблицу 1. Убедитесь, что при уходе от резонанса в обе стороны ток и напряжения в цепи уменьшаются. Выключите напряжение стенда.

3. Установите снова исходную резонансную емкость C_2 , включите питание стенда. Отстраиваясь от резонансной частоты, повторите измерения параметров режима при нескольких частотах, меньших и больших ω_p , например. 150 Гц; 100 Гц; 250 Гц; 300 Гц; 400 Гц. Во время опыта не забывайте поддерживать входное напряжение на заданном неизменном уровне. Данные занесите в таблицу 2. Убедитесь, что при отстройке от резонансной частоты ток и напряжения в цепи уменьшаются. Выключите напряжение стенда.

Таблица 1

Экспериментальное исследование последовательной цепи при изменении емкости

C , мкФ	0	$C_1 < C_p$	C_p	$C_3 > C_p$	$C_4 > C_3$	$C \rightarrow \infty$
I , А						
U_C , В						
U_K , В						
P , Вт						

Таблица 2

Экспериментальное исследование последовательной цепи при изменении частоты

f_p , Гц	100	150	f_p	250	300	400
I , А						
U_C , В						
U_K , В						

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным опыта 1 для всех емкостей подсчитайте емкостное сопротивление конденсатора x_C ; активное r , индуктивное x_L и полное z_K сопротивления катушки; реактивное $x = x_L - x_C$ и полное z сопротивления цепи; угол разности фаз между напряжением и током φ ; ток I ; напряжение на конденсаторе U_C ; активное U_{KA} , реактивное U_{KP} и общее U_K напряжения на катушке. Результаты занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Расчетные параметры режима последовательной цепи при различных емкостях

C , мкФ	0	$C_1 < C_p$	C_p	$C_3 > C_p$	$C_4 > C_3$	$C \rightarrow \infty$
x_C , Ом						
x , Ом						
z , Ом						
φ , град						
I , А						
U_C , В						
U_{KA} , В						
U_{KP} , В						
U_K , В						

По таблице 3 постройте теоретические графики зависимостей всех этих параметров от емкости; рекомендуемые масштабы: по сопротивлению 10 Ом/см; по напряжению 2 В/см; по току 0,02 А/см; по углу 30 град/см; по емкости 2 мкФ/см. Нанесите на графики опытные точки тока и напряжений по таблице 1. Постройте векторные диаграммы тока и напряжений для всех режимов. Для резонансного режима постройте треугольник сопротивлений. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

2. По данным опыта 2 для всех частот подсчитайте емкостное сопротивление конденсатора x_C ; индуктивное x_L и полное z_K сопротивления катушки; реактивное $x = x_L - x_C$ и полное z сопротивления цепи; угол разности фаз между напряжением и током φ ; ток I ; напряжение на конденсаторе U_C ; активное U_{KA} , реактивное U_{KP} и общее U_K напряжения на катушке. Результаты занесите в таблицу 4.

Таблица 4

Расчетные параметры режима последовательной цепи при различных частотах

f_p , Гц	100	150	f_p	250	300	400
x_C , Ом						
x_L , Ом						
x , Ом						
z_K , Ом						
z , Ом						
φ , град						
I , А						
U_C , В						
U_{KA} , В						
U_{KP} , В						
U_K , В						

По данным таблицы 4 постройте теоретические графики зависимостей всех этих параметров от частоты; рекомендуемые масштабы: по сопротивлению 10 Ом/см; по напряжению 2 В/см; по току 0,02 А/см; по углу 30 град/см; по частоте 40 Гц/см. Нанесите на графики опытные точки тока и напряжений по таблице 3. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема последовательной цепи, расчетные формулы.
3. Схема опыта с указанием типов приборов, таблицы 1 и 2 с опытными данными, сопротивление обмотки катушки и ее индуктивность.
4. Таблицы 3 и 4 с расчетными данными, расчетные графики с нанесенными на них опытными точками, треугольник сопротивлений, векторные диаграммы тока и напряжений.
5. Выводы о соответствии опытных и расчетных результатов, а также о влиянии емкости и частоты на характер и величину входного сопротивления и на режим работы последовательной цепи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяются сопротивления в последовательной цепи?
1. Каково общее условие резонанса?
2. Почему в последовательной цепи ток в режиме резонанса максимален?
3. Чем определяется острота графика тока?
4. Почему в режиме резонанса напряжение на конденсаторе и катушке в последовательной цепи гораздо больше входного?
5. Каков характер эквивалентного сопротивления цепи при разных емкостях? частотах?
6. Почему графики напряжения на емкости и реактивного напряжения на катушке в последовательной цепи пересекаются при C_p ? при ω_p ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШКИ И КОНДЕНСАТОРА. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Цель работы: исследование режима синусоидального тока в параллельной цепи, состоящей из катушки индуктивности и конденсатора; анализ резонанса токов и компенсации реактивной мощности индуктивной нагрузки.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

В параллельной цепи удобно вместо сопротивлений применять проводимости. Так, схема замещения катушки индуктивности содержит активную (резистивную) проводимость $g_k = \frac{r_{обм}}{z_k^2}$ и реактивную

(индуктивную) проводимость $b_k = \frac{\omega L}{z_k^2}$, где z_k – полное сопротивление

катушки: $z_k = \sqrt{r_{обм}^2 + (\omega L)^2}$, рис. 1.

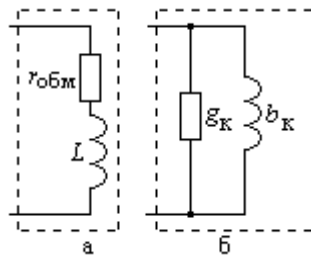


Рис. 1. Последовательная а) и параллельная б) схемы замещения катушки индуктивности

Конденсатор обычно представляется одной реактивной проводимостью $b_c = \frac{1}{x_c} = \omega C$. При параллельном соединении катушки и конденсатора общая

активная проводимость равна резистивной проводимости катушки $g = g_k$, а реактивные проводимости катушки и конденсатора складываются, причем реактивная проводимость катушки учитывается с отрицательным знаком

$b = b_c - b_k = \omega C - \frac{\omega L}{z_k^2}$. Полная проводимость параллельного соединения

$y = \sqrt{g^2 + b^2}$ определяется как гипотенуза прямоугольного треугольника, горизонтальным катетом которого является активная проводимость, а вертикальным катетом – суммарная реактивная проводимость. Расположение треугольника проводимостей на плоскости зависит от знака общей реактивной проводимости, рис. 2.

Действующее значение общего тока в параллельной цепи, а также токи на отдельных элементах определяются по закону Ома:

$$I = yU_{\text{вх}}; \quad I_{\text{к акт}} = g_{\text{к}} \cdot U_{\text{вх}}; \quad I_{\text{к реакт}} = b_{\text{к}} \cdot U_{\text{вх}}; \quad I_{\text{с}} = b_{\text{с}} \cdot U_{\text{вх}}.$$

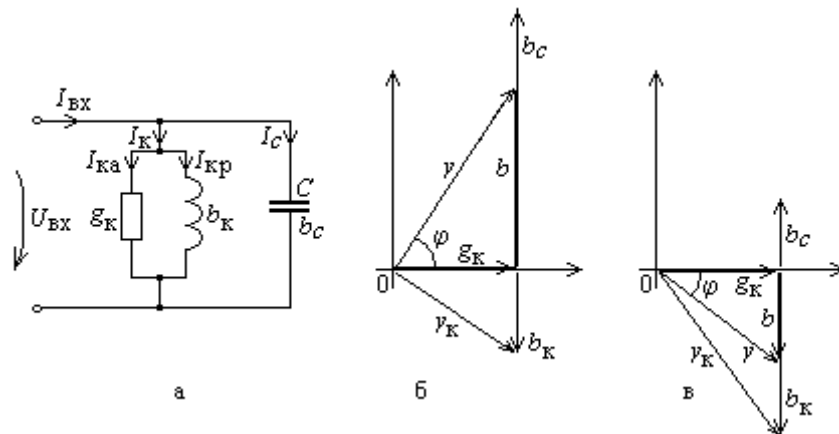


Рис. 2. Векторы проводимостей параллельно соединенных элементов:
а) схема замещения параллельной цепи; б) емкостная проводимость преобладает;
в) индуктивная проводимость преобладает

Резонанс токов – это явление полной взаимной компенсации реактивных емкостных и индуктивных проводимостей в электрической цепи, состоящей из параллельно соединенных катушки индуктивности и конденсатора. Эквивалентная входная проводимость цепи имеет при резонансе чисто резистивный характер.

В цепи, состоящей из параллельно соединенных конденсатора и катушки индуктивности, полная входная проводимость имеет вид:

$$y = \sqrt{g_{\text{к}}^2 + (b_{\text{с}} - b_{\text{л}})^2}. \quad \text{Условие резонанса заключается в равенстве общей реактивной проводимости нулю: } b = b_{\text{с}} - b_{\text{к}} = \omega C - \frac{\omega L}{Z_{\text{к}}^2} = 0 \quad \text{или} \quad \omega C = \frac{\omega L}{Z_{\text{к}}^2}.$$

рис. 3, а.

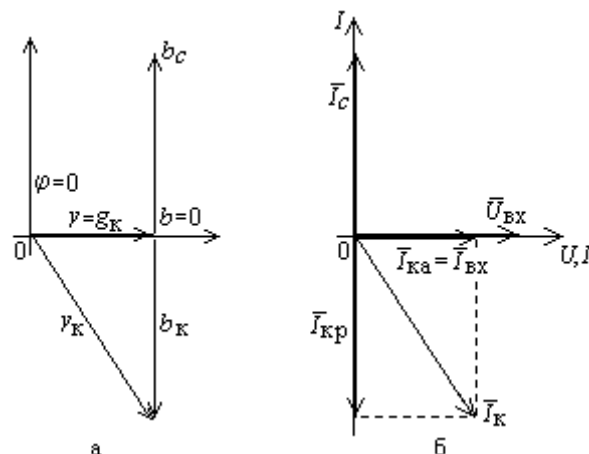


Рис.3. Резонансный режим параллельной цепи:
а) проводимости цепи; б) напряжение и токи в цепи

При неизменных частоте напряжения и параметрах катушки режима резонанса можно достичь подбором емкости $C_p = \frac{L}{z_k^2}$, а при неизменных параметрах конденсатора и катушки резонанса добиваемся подбором частоты $\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r_{обм}}{L}\right)^2}$.

В режиме резонанса полная проводимость цепи определяется только активной проводимостью обмотки катушки $y = g_k$ и минимальна; входной ток цепи также принимает минимальное значение $I = yU_{вх} = g_k U_{вх}$. Ток в конденсаторе $I_C = \omega C \cdot U_{вх}$ и реактивный ток катушки $I_{KP} = b_k \cdot U_{вх}$ равны по величине, противофазны (рис. 3, б) и компенсируют друг друга: $\bar{I}_C + \bar{I}_{KP} = 0$. Резонанс в такой цепи называется резонансом токов.

Входной ток совпадает с активной составляющей тока на катушке, т.е. с током на активной проводимости обмотки $I_{вх} = I_{KA} = g_k U_{вх}$. Добротность цепи также совпадает с добротностью катушки $Q = \frac{b_k}{g_k}$. Добротность показывает, во сколько раз ток в конденсаторе и реактивный ток катушки превышают входной ток $Q = \frac{I_C}{I_{вх}} = \frac{I_{KP}}{I_{вх}}$.

Графики параметров режима цепи при изменении емкости C показаны на рис. 4,а: индуктивная (реактивная) проводимость катушки $b_L = b_k = \frac{\omega L}{z_k^2}$; емкостная проводимость конденсатора $b_C = \omega C$; реактивная проводимость цепи $b = b_C - b_k$; полная проводимость цепи $y = \sqrt{g_k^2 + b^2}$; угол разности фаз между входными напряжением и током $\varphi = \arctg \frac{b}{g_k}$; входной ток цепи

$I_{вх} = yU_{вх}$; ток в конденсаторе $I_C = b_C U_{вх}$; активный ток катушки $I_{KA} = g_k U_{вх}$; реактивный ток катушки $I_{KP} = b_k U_{вх}$; общий ток катушки $I_K = y_K U_{вх}$, где $y_K = \sqrt{g_k^2 + b_k^2}$ – полная проводимость катушки. При нулевой емкости $I_{вх} = I_K = y_K U_{вх}$; $I_C = 0$; при очень большой емкости $I_{вх} = \sqrt{I_{KA}^2 + (I_C - I_{KP})^2}$; $I_C \rightarrow \infty$; $I_K = y_K U_{вх}$.

При резонансе токов угол разности фаз между входными напряжением и током равен нулю, поэтому коэффициент мощности $\cos \varphi$ принимает максимальное значение, равное единице. Это обстоятельство применяется для повышения эффективности работы мощных индуктивных нагрузок, когда реактивная мощность конденсатора равна и имеет противоположный знак с реактивной мощностью индуктивной нагрузки. Происходит компенсация реактивной мощности нагрузки, что существенно повышает

эффективность работы питающего источника напряжения и не нарушает штатный режим работы индуктивной нагрузки.

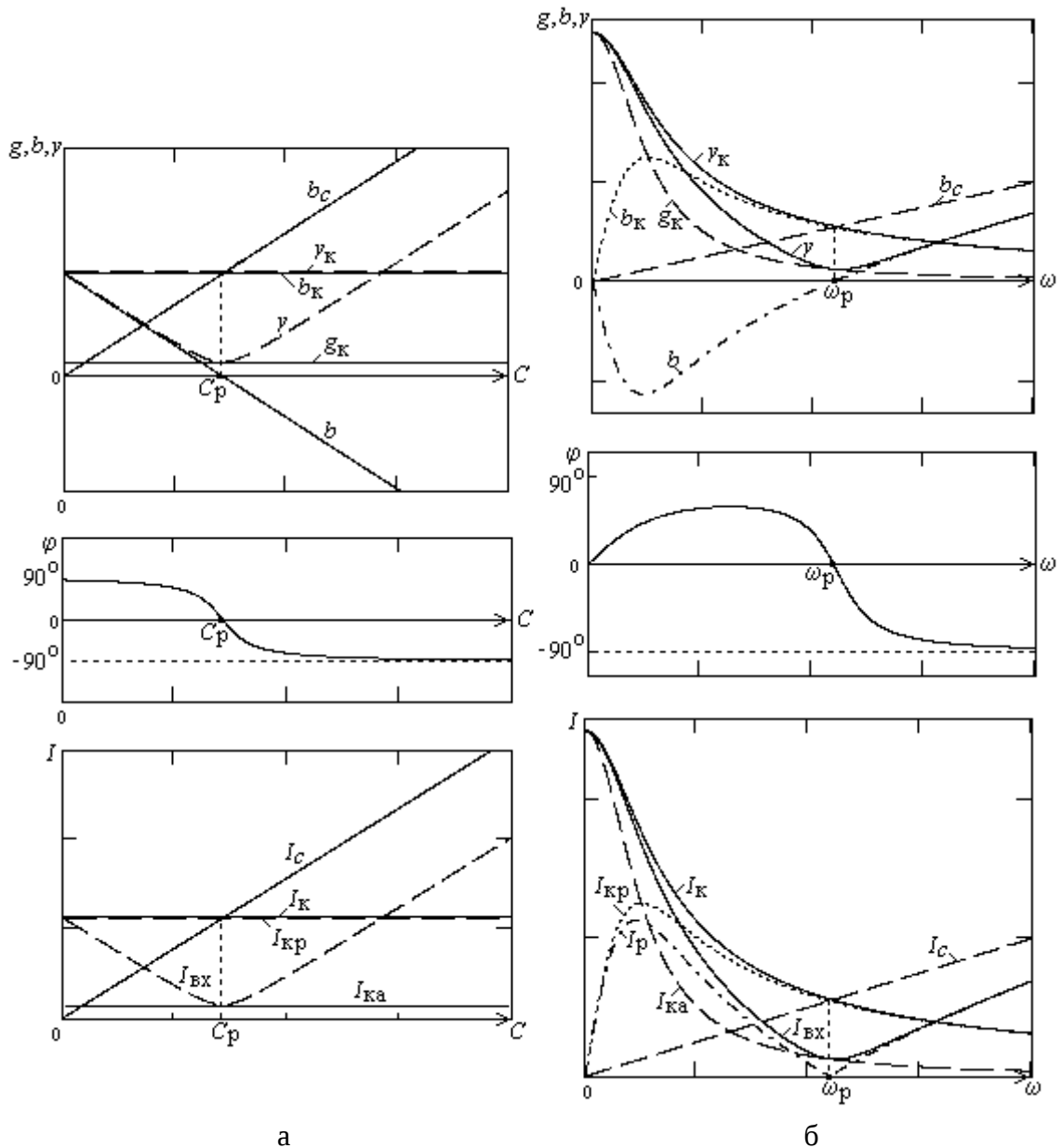


Рис. 4. Зависимости параметров режима параллельной RLC – цепи от емкости а) и от частоты б)

Аналогичные графики параметров режима цепи при изменении частоты ω показаны на рис. 4, б.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Входное напряжение подается с регулятора переменного напряжения и частоты E_1 . Кагушка индуктивности обозначена Z_2 , ее индуктивность $L_2 = 80$ мГн и её сопротивление обмотки 40 Ом; емкости: $C_1 = 4,7$ мкФ; $C_2 = 6,7$ мкФ; $C_3 = 10$ мкФ; $C_4 = 22$ мкФ. Для измерения тока, напряжения,

мощности, частоты и угла разности фаз между напряжением и током используется цифровой универсальный измеритель $PP1$. Для измерения напряжения применяется аналоговый вольтметр.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Для исследования параллельной цепи соберите схему по рис. 4.

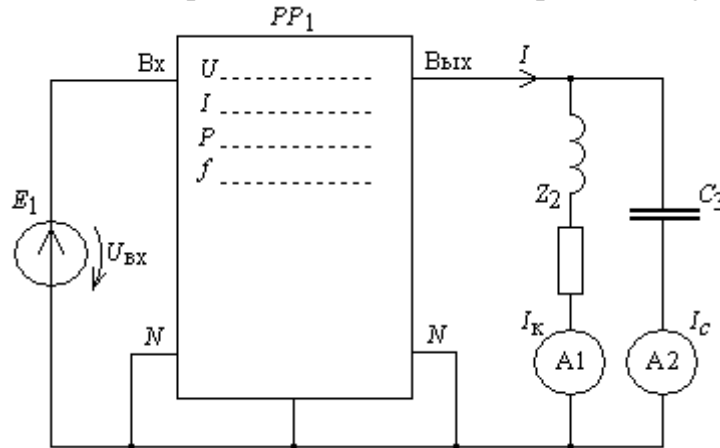


Рис. 4. Схема эксперимента

Подсчитайте резонансную частоту ω_p для обеспечения в цепи резонансного режима, переведите её в Герцы. Включите питание стенда, установите на выходе источника питания напряжение 7 В и рассчитанную резонансную частоту. Убедитесь, что угол разности фаз равен нулю, т.е. режим резонанса достигнут. В таблицу 1 запишите мощность и напряжение, входной ток и токи на катушке и конденсаторе. Обратите внимание на то, что эти токи гораздо больше входного. Выключите напряжение питания.

2. Установите вместо резонансной C_3 другую емкость, например, C_2 , включите напряжение и при той же частоте повторите измерения, данные занесите в таблицу 1. Аналогично, устанавливая емкости C_1 , C_4 , $C=0$ (разомкните один из контактов емкости) выполните измерения параметров режима, данные заносите в таблицу 1. Убедитесь, что при уходе от резонанса в обе стороны входной ток в цепи увеличивается, и ток конденсатора также растет с увеличением емкости. Ток в катушке остается неизменным. Выключите напряжение стенда.

3. Установите снова исходную резонансную емкость C_3 , включите питание стенда. Отстраиваясь от резонансной частоты, повторите измерения параметров режима при нескольких частотах, меньших и больших ω_p , например. 150 Гц; 100 Гц; 250 Гц; 300 Гц; 400 Гц. Во время опыта не забывайте поддерживать входное напряжение на заданном неизменном уровне. Данные занесите в таблицу 2. Убедитесь, что при отстройке от резонансной частоты входной ток в цепи увеличивается. С ростом частоты ток в конденсаторе растет, ток в катушке уменьшается. Выключите напряжение стенда.

Таблица 1

Экспериментальное исследование параллельной цепи при изменении емкости

C , мкФ	0	$C_1 < C_2$	$C_2 < C_p$	C_p	$C_4 > C_p$
$I_{вх}$, А					
I_C , А					
I_K , А					
P , Вт					

Таблица 2

Экспериментальное исследование параллельной цепи при изменении частоты

f_p , Гц	100	150	f_p	250	300	400
I , А						
I_C , А						
I_K , А						

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным опыта 1 для всех емкостей подсчитайте емкостную проводимость конденсатора b_C ; активную g_K , индуктивную b_K и полную y_K проводимости катушки; реактивную $b = b_C - b_K$ и полную y проводимости цепи; угол разности фаз между напряжением и током φ ; входной ток I ; ток конденсатора I_C ; активный I_{KA} , реактивный I_{KP} и общий I_K токи катушки. Результаты занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Расчетные параметры режима параллельной цепи при различных емкостях

C , мкФ	0	$C_1 < C_p$	C_p	$C_3 > C_p$	$C_4 > C_3$
b_C , См					
b , См					
y , См					
φ , град					
I , А					
I_C , А					
I_{KA} , А					
I_{KP} , А					
I_K , А					

По данным таблицы 3 постройте теоретические графики зависимостей всех этих параметров от емкости; рекомендуемые масштабы: по проводимости 0,01 См/см; по напряжению 2 В/см; по току 0,02 А/см; по углу

30 град/см; по емкости 2 мкФ/см. Нанесите на графики опытные точки тока и напряжений по таблице 1. Постройте векторные диаграммы тока и напряжений для всех режимов. Для резонансного режима постройте треугольник проводимостей. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

2. По данным опыта 2 для всех частот подсчитайте емкостную проводимость конденсатора b_C ; индуктивную b_K и полную y_K проводимости катушки; реактивную $b = b_C - b_K$ и полную y проводимости цепи; угол разности фаз между напряжением и током φ ; входной ток I ; ток конденсатора I_C ; активный I_{KA} , реактивный I_{KP} и общий I_K токи катушки. Результаты занесите в таблицу 4.

Таблица 4

Расчетные параметры режима параллельной цепи при различных частотах

f_p , Гц	100	150	f_p	250	300	400
b_C , См						
g_K , См						
b_K , См						
y_K , См						
b , См						
y , См						
φ , град						
I , А						
I_C , А						
I_{KA} , А						
I_{KP} , А						
I_K , А						

По данным таблицы 4 постройте теоретические графики зависимостей всех этих параметров от частоты; рекомендуемые масштабы: по проводимости 0,01 См/см; по напряжению 2 В/см; по току 0,02 А/см; по углу 30 град/см; по частоте 40 Гц/см. Нанесите на графики опытные точки токов по таблице 3. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема параллельной цепи, расчетные формулы.
3. Схема опыта с указанием типов приборов, таблицы 1 и 2 с опытными данными, сопротивление обмотки катушки и ее индуктивность.

4. Таблицы 3 и 4 с расчетными данными, расчетные графики с нанесенными на них опытными точками, треугольник проводимостей, векторные диаграммы токов и напряжения.

5. Выводы о соответствии опытных и расчетных результатов, а также о влиянии емкости и частоты на характер и величину входной проводимости и на режим работы параллельной цепи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяются проводимости в параллельной цепи?
1. Каково общее условие резонанса?
2. Почему в параллельной цепи входной ток в режиме резонанса минимален?
3. Чем определяется острота графика тока?
4. Почему в режиме резонанса ток конденсатора и катушки в параллельной цепи гораздо больше входного?
5. Каков характер эквивалентной проводимости цепи при разных емкостях? частотах?
6. Почему графики тока емкости и реактивного тока катушки в параллельной цепи пересекаются при C_p ? при ω_p ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

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.

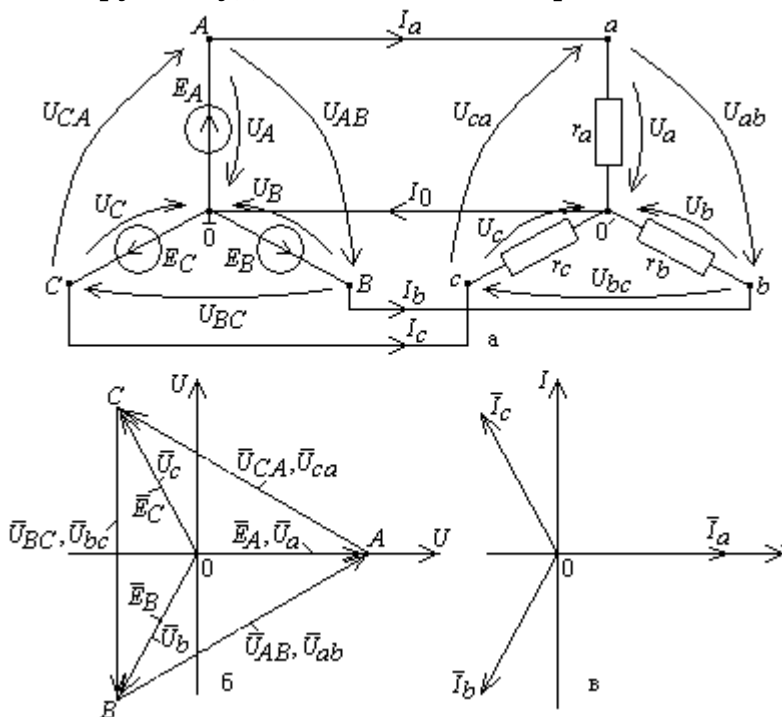


Рис. 1. Трехфазная цепь, соединенная по схеме «звезда – звезда» а) с нейтральным проводом и ее векторные диаграммы напряжений б) и токов в) в симметричном режиме

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 А и 0 возникает фазное напряжение источника $\bar{U}_A = \bar{E}_A$; между точками В

и 0 – фазное напряжение $\bar{U}_B = \bar{E}_B$; между С и 0 – фазное напряжение $\bar{U}_C = \bar{E}_C$. Между точками А и В возникает линейное напряжение $\bar{U}_{AB} = \bar{E}_A - \bar{E}_B$; между точками В и С – линейное напряжение $\bar{U}_{BC} = \bar{E}_B - \bar{E}_C$; между точками С и А – линейное напряжение $\bar{U}_{CA} = \bar{E}_C - \bar{E}_A$, 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: $\bar{U}_a = r_a \bar{I}_a$; $\bar{U}_b = r_b \bar{I}_b$; $\bar{U}_c = r_c \bar{I}_c$; между выводами фаз а, b нагрузки существует линейное напряжение $\bar{U}_{ab} = \bar{U}_a - \bar{U}_b$; между выводами b, c – линейное напряжение $\bar{U}_{bc} = \bar{U}_b - \bar{U}_c$; между выводами c, a – линейное напряжение $\bar{U}_{ca} = \bar{U}_c - \bar{U}_a$.

Если не учитывать сопротивления проводов, то линейные напряжения источника и нагрузки всегда равны между собой: $\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{ab}$; $\bar{U}_{BC} = \bar{U}_{bc}$; $\bar{U}_{CA} = \bar{U}_{ca}$, 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: $\bar{U}_A = \bar{U}_a$; $\bar{U}_B = \bar{U}_b$; $\bar{U}_C = \bar{U}_c$. 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

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{U}_a}{r_a}; \bar{I}_b = \frac{\bar{U}_b}{r_b}; \bar{I}_c = \frac{\bar{U}_c}{r_c}. \quad (1)$$

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 $\bar{I}_0 = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c$. При отсутствии нейтрального провода потенциал нейтральной точки не равен нулю, возникает напряжение смещения нейтрали $\bar{U}_{0'0} = \bar{\varphi}_{0'} - \bar{\varphi}_0 = \bar{\varphi}_{0'}$, которое определяется в соответствии с уравнением узловых потенциалов

$$\left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c} \right) \bar{\varphi}_{0'} = \frac{\bar{E}_A}{r_a} + \frac{\bar{E}_B}{r_b} + \frac{\bar{E}_C}{r_c}. \quad (2)$$

Для построения вектора потенциала нейтральной точки следует сложить три вектора: $\bar{\varphi}_{0'} = \frac{\bar{E}_A}{r_a \cdot Y_{abc}} + \frac{\bar{E}_B}{r_b \cdot Y_{abc}} + \frac{\bar{E}_C}{r_c \cdot Y_{abc}}$, где $Y_{abc} = \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c}$.

Фазные напряжения нагрузки определяются разностями векторов

$$\bar{U}_a = \bar{E}_A - \bar{\varphi}_{0'}; \bar{U}_b = \bar{E}_B - \bar{\varphi}_{0'}; \bar{U}_c = \bar{E}_C - \bar{\varphi}_{0'}.$$

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 $\bar{\varphi}_{0'} = -0,2\bar{E}_C$; фазное напряжение U_c увеличивается $\bar{U}_c = 1,2\bar{E}_C$, 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 $\bar{\varphi}_{0'} = -0,5\bar{E}_C$, 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 $\bar{U}_c = 1,5\bar{E}_C$ 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, $\bar{E}_C = 0$, что приводит к снижению линейных напряжений $\bar{U}_{BC}, \bar{U}_{CA}$ в $\sqrt{3}$ раз до величины E . При симметричной нагрузке в соответствии с (2) потенциал нейтральной точки $\bar{\varphi}_{0'} = -\frac{1}{3}\bar{E}_C$, рис. 2, в; напряжение и ток фазы

C уменьшаются втрое по сравнению с симметричным режимом: $\bar{U}_c = \frac{1}{3}\bar{E}_C$;

$\bar{I}_c = \frac{1}{3}\frac{\bar{E}_C}{r}$. Напряжения на здоровых фазах сокращаются до значений $\frac{\sqrt{7}}{3}E$; а

токи – до значений $\frac{\sqrt{7}}{3}\frac{E}{r}$.

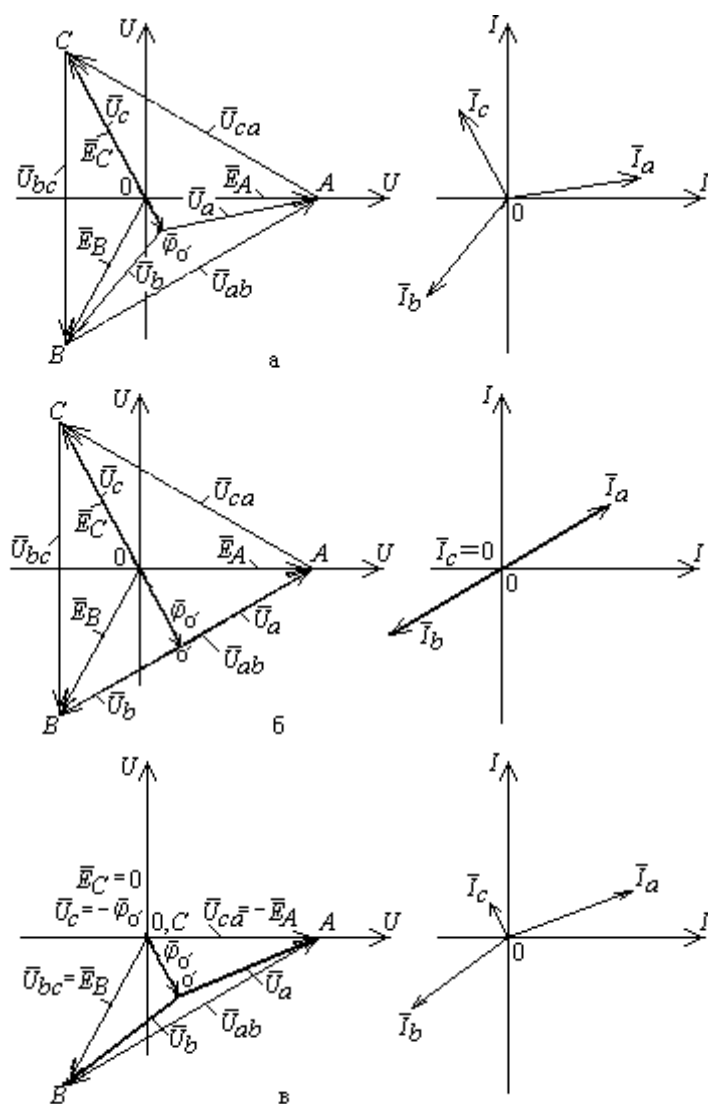


Рис. 2. Векторные диаграммы несимметричных режимов трехфазной цепи:
а) удвоение сопротивления в фазе C ; б) обрыв нагрузки в фазе C ;
в) выпадение фазы C источника

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 $\bar{I}_C = \frac{\bar{E}_C}{2r}$; токи в здоровых фазах не изменяются по сравнению с симметричным режимом, ток в нейтральном проводе $\bar{I}_0 = -\frac{\bar{E}_C}{2r}$ компенсирует убывание тока в фазе A , рис. 3, а.

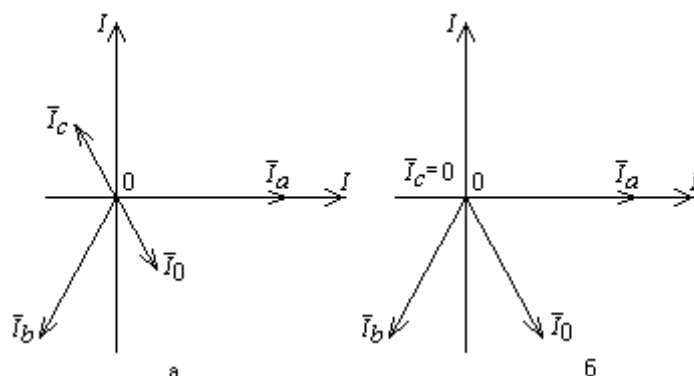


Рис. 3. Векторные диаграммы токов несимметричных режимов трехфазной цепи с нейтральным проводом

При обрыве нагрузки фазы C или при выпадении этой фазы ток нейтрального провода принимает значение $\bar{I}_0 = -\frac{\bar{E}_C}{r}$ и компенсирует исчезновение тока $\bar{I}_C = 0$, 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.

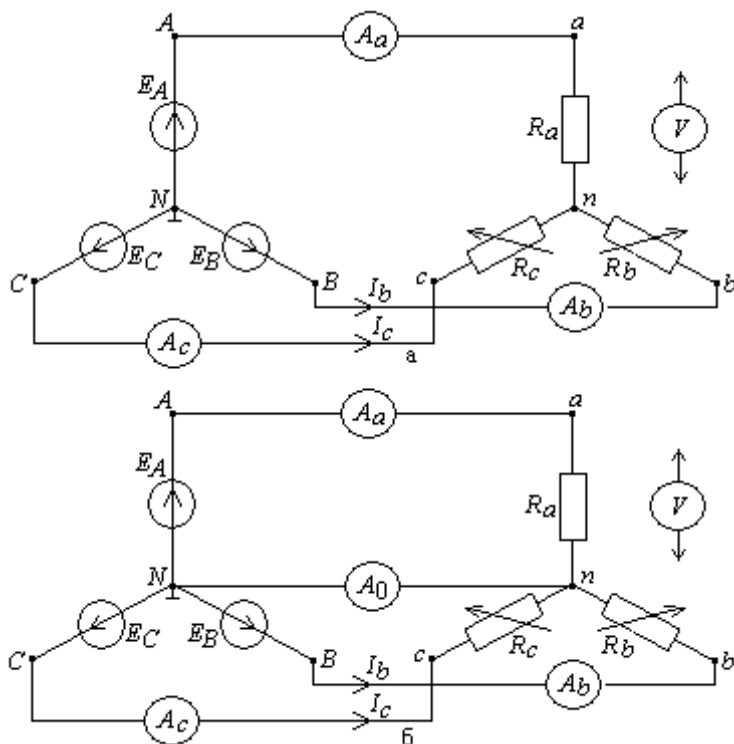


Рис. 4. Схемы эксперимента: а) трехфазная цепь без нейтрального провода; б) трехфазная цепь с нейтральным проводом

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 С 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 С увеличилось, а напряжение смещения нейтрали отлично от нуля. Результаты опыта занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания.

3. Для имитации аварийного режима обрыва фазы С нагрузки без нейтрального провода освободите от питающего провода левый контакт резистора в фазе С. 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 подсоедините 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, а. 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 № 10

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

Цель работы: экспериментальное исследование симметричных, несимметричных и аварийных режимов трехфазной цепи, соединенной по схеме «Звезда – треугольник».

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Трехфазная цепь, соединенная по схеме «звезда – треугольник», состоит из трех источников ЭДС E_A, E_B, E_C и нагрузки r_{ab}, r_{bc}, r_{ca} , соединенных тремя линейными проводами a, b, c (рис. 1, а). В линейных проводах протекают линейные токи I_a, I_b, I_c . Далее не будем учитывать сопротивления проводов, а сопротивление нагрузки будем полагать чисто резистивным.

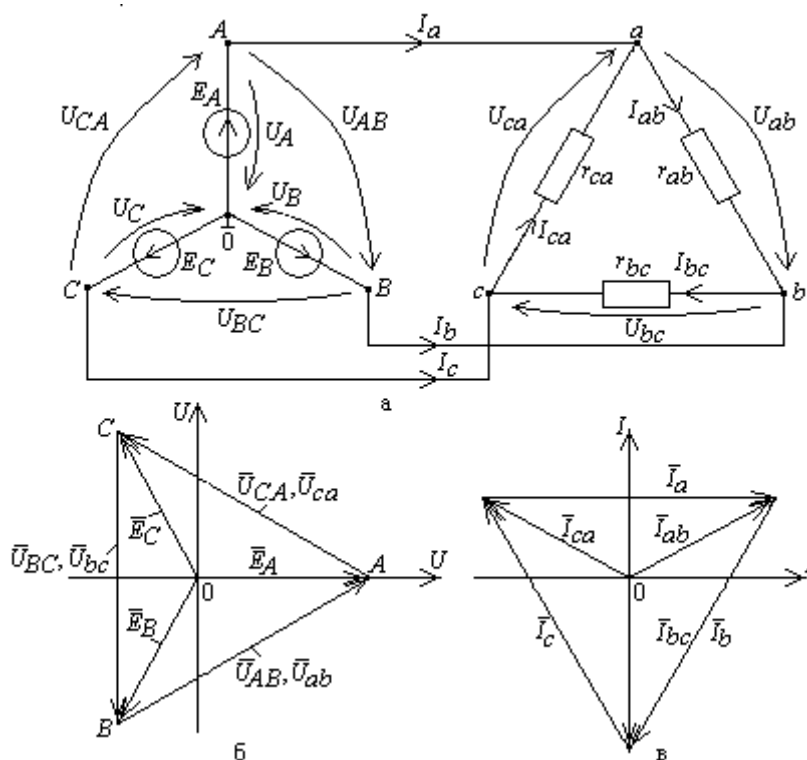


Рис. 1. Трехфазная цепь, соединенная по схеме «звезда – треугольник» и ее векторные диаграммы напряжений и токов в симметричном режиме

Все три ЭДС равны между собой по величине $E_A = E_B = E_C = E$, смещены на 120° друг по отношению к другу и образуют симметричный трехфазный источник напряжения. Векторы ЭДС показаны на рис. 1, б. Между точками A и 0 возникает фазное напряжение источника $\vec{U}_A = \vec{E}_A$; между точками B и 0 – фазное напряжение $\vec{U}_B = \vec{E}_B$; между C и 0 – фазное напряжение $\vec{U}_C = \vec{E}_C$. Между точками A и B возникает линейное

напряжение источника $\bar{U}_{AB} = \bar{E}_A - \bar{E}_B$; между точками B и C – линейное напряжение $\bar{U}_{BC} = \bar{E}_B - \bar{E}_C$; между точками C и A – линейное напряжение $\bar{U}_{CA} = \bar{E}_C - \bar{E}_A$, 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 треугольник, состоит из трех сопротивлений r_{ab}, r_{bc}, r_{ca} , одинаковых при симметричной нагрузке $r_{ab} = r_{bc} = r_{ca} = r$. В каждом сопротивлении нагрузки протекают фазные токи $\bar{I}_{ab}, \bar{I}_{bc}, \bar{I}_{ca}$ и возникает фазное напряжение нагрузки: $\bar{U}_{ab} = r_{ab} \bar{I}_{ab}$; $\bar{U}_{bc} = r_{bc} \bar{I}_{bc}$; $\bar{U}_{ca} = r_{ca} \bar{I}_{ca}$. Если не учитывать сопротивления линейных проводов, то эти напряжения всегда совпадают с линейными напряжениями источника $\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{ab}$; $\bar{U}_{BC} = \bar{U}_{bc}$; $\bar{U}_{CA} = \bar{U}_{ca}$. При симметричной нагрузке все фазные (они же линейные) напряжения равны между собой по величине.

Фазные токи нагрузки определяются по закону Ома

$$\bar{I}_{ab} = \frac{\bar{U}_{ab}}{r_{ab}}; \bar{I}_{bc} = \frac{\bar{U}_{bc}}{r_{bc}}; \bar{I}_{ca} = \frac{\bar{U}_{ca}}{r_{ca}}, \quad (1)$$

и в условиях симметричной нагрузки образуют правильную трехлучевую звезду (рис. 1, в). Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа в узлах треугольника нагрузки

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca}; \bar{I}_b = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab}; \bar{I}_c = \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{bc} \quad (2)$$

и в симметричной цепи образуют правильный треугольник токов, рис. 1, в. Все линейные токи равны между собой по величине и превосходят фазные токи в $\sqrt{3}$.

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, при увеличении сопротивления фазы ab $r_{ab} = 1,4 \cdot r$; $r_{bc} = r_{ca} = r$ напряжения и токи здоровых фаз bc и ca сохраняются неизменными, а величина тока $\bar{I}_{ab}$ уменьшается по сравнению с симметричным режимом. Это приводит и к уменьшению линейных токов $\bar{I}_a, \bar{I}_b$, тогда как линейный ток $\bar{I}_c$ остается неизменным (рис. 2, а). Векторная диаграмма напряжений нагрузки не зависит от сопротивления фаз и остается такой, как в симметричном режиме, рис. 1, б.

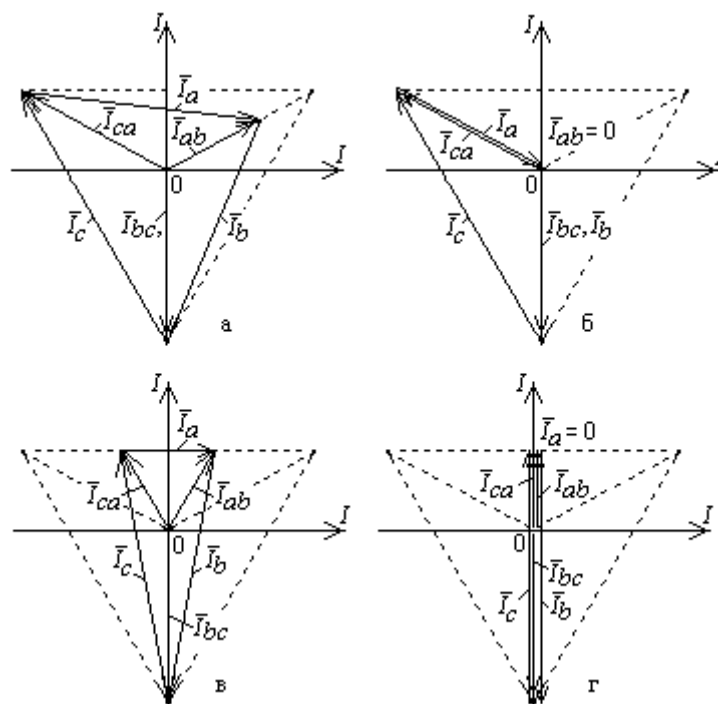


Рис. 2. Векторные диаграммы несимметричных режимов трехфазной цепи:
а) удвоение сопротивления в фазе ab ; б) обрыв нагрузки в фазе ab ;
в) выпадение фазы А источника; г) обрыв линейного провода a

При аварийном обрыве нагрузки фазы ab $r_{ab} \rightarrow \infty$, и ток $\bar{I}_{ab}$ исчезает. Фазные напряжения и токи здоровых фаз bc и ca сохраняются неизменными, как и при симметричном режиме. Линейные токи $\bar{I}_a, \bar{I}_b$ уменьшаются до значений фазных токов здоровых фаз $\bar{I}_a = -\bar{I}_{ca}$; $\bar{I}_b = \bar{I}_{bc}$; линейный ток $\bar{I}_c$ остается неизменным, как и в симметричном режиме (рис. 2, б).

Распространенным аварийным режимом в условиях симметрии нагрузки является нарушение симметрии источника питания, связанное с потерей напряжения фазной ЭДС (выпадение фазы), например, $\bar{E}_A = 0$, что приводит к снижению линейных напряжений источника $\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{CA}$ и фазных напряжений нагрузки $\bar{U}_{ab}, \bar{U}_{ca}$ в $\sqrt{3}$ раз до величины E : $\bar{U}_{AB} = \bar{U}_{ab} = -\bar{E}_B$; $\bar{U}_{CA} = \bar{U}_{ca} = \bar{E}_C$. Напряжение и ток фазы bc остаются прежними, как в симметричном режиме. Фазные токи $\bar{I}_{ab}$ и $\bar{I}_{bc}$ сокращаются в $\sqrt{3}$ по сравнению с симметричным режимом; линейные токи $\bar{I}_b$ и $\bar{I}_c$ сокращаются до значений $\frac{1}{3}\sqrt{7} \cdot I_{\text{лин симм}}$, а линейный ток $\bar{I}_a$ сокращается втрое по сравнению с симметричным режимом, рис. 2, в.

Еще одним распространенным аварийным режимом в условиях симметрии нагрузки является обрыв линейного провода. Например, при обрыве линейного провода a нагрузка получает питание только по двум оставшимся линейным проводам: $\bar{U}_{BC} = \bar{U}_{bc}$. В этом случае фазные напряжение и ток bc остаются прежними, как в симметричном режиме, а

напряжения ab и ca уменьшаются вдвое по сравнению с симметричным режимом: $\bar{U}_{ab} = \bar{U}_{ca} = -\frac{\bar{U}_{BC}}{2}$. Фазные токи $\bar{I}_{ab}, \bar{I}_{ca}$ также сокращаются вдвое по сравнению с симметричным режимом. Линейные токи $\bar{I}_b$ и $\bar{I}_c$ сокращаются до значений $\frac{1}{2}\sqrt{3} \cdot I_{\text{лин симм}}$, а ток $\bar{I}_a$ исчезает, рис. 2, г.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде (А301). 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 «треугольник» и состоящая из двух регулируемых сопротивлений: $R_{ab} = 100, 280, 140 \text{ Ом}$; $R_{ca} = 100, 220, 180 \text{ Ом}$ и нерегулируемого сопротивления $R_{bc} = 100 \text{ Ом}$.

Для измерения тока применяются цифровые амперметры РА1 – РА4 (показания тока в Амперах); для измерения напряжения используется аналоговый вольтметр с пределом 15 В.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Для исследования симметричного режима трехфазной цепи соберите схему по рис. 3. Переменные резисторы в фазах АВ и СА установите в позицию «1», что соответствует сопротивлениям 100 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.

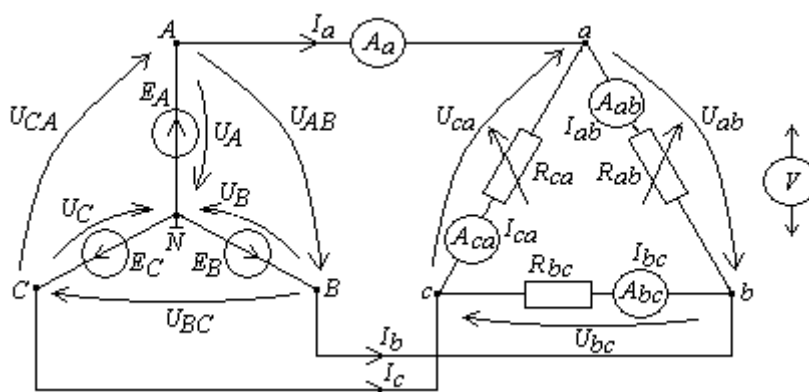


Рис. 3. Схема эксперимента по исследованию трехфазной цепи «звезда – треугольник»

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

значения линейных напряжений в теоретическую строку симметричного режима таблицы 1. Эти значения будут теоретической базой для дальнейшего анализа. Измерьте линейные напряжения нагрузки U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} , убедитесь, что они совпадают с линейными напряжениями источника; впишите их значения в опытную строку симметричного режима таблицы 1.

Таблица 1

Исследование трехфазной цепи «звезда–треугольник»

Режим		$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А	$I_a,$ А	$I_b,$ А	$I_c,$ А
Симм.	Опыт								х	х
	Теор.									
Несим. $r_{ab} = 1,4r$	Опыт								х	х
	Теор.									
Обрыв: $r_{ab} \rightarrow \infty$	Опыт								х	х
	Теор.									
Выпаден. фазы А: $E_A = 0$	Опыт								х	х
	Теор.									
Обрыв провода a	Опыт								х	х
	Теор.									

Измерьте токи в фазах нагрузки I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} и линейный ток I_a убедитесь, что фазные токи одинаковы по величине, а линейный ток превосходит их по величине в $\sqrt{3}$; результаты занесите в опытную строку симметричного режима таблицы 1. Выключите напряжение питания стенда.

2. Для исследования несимметричного режима в фазе ab переключите резистор R_{AB} в этой фазе в положение «3», что соответствует 140 Ом. Включите напряжение питания. Повторите измерения фазных напряжений нагрузки U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} и фазных токов I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} , а также линейного тока I_a , убедитесь, что симметрия токов нарушена: токи I_{ab} и I_a уменьшились, фазные напряжения не изменились. Опытные данные занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания.

3. Для имитации аварийного режима обрыва фазы ab нагрузки удалите соединительный проводник в нижней части резистора R_{AB} . Включите питание стенда. Повторите измерения напряжений и токов, в том числе и напряжения на оборванной фазе. Убедитесь, что эти напряжения не изменились по сравнению с симметричным режимом, а линейные токи уменьшились. Опытные данные занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания.

4. Для имитации аварийного режима выпадения фазы А источника при симметричной нагрузке восстановите симметрию нагрузки (подсоедините обратно резистор R_{AB} и оба переключателя в фазах ab и ca установите в

положение «1»), освободите линейный провод a из клеммы питания A и подсоедините его к нейтральной точке питания 0 . Включите напряжение стенда. Повторите измерения фазных и линейных напряжений источника и нагрузки, фазных токов нагрузки и линейного тока I_a , убедитесь в нарушении симметрии источника питания. Фазные напряжения U_{ab}, U_{ca} снизились по сравнению с симметричным режимом, сократились линейные токи I_b и I_c , а ток I_a уменьшился втрое. Опытные данные занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания.

5. Для исследования аварийного режима обрыва линейного провода при симметричной нагрузке удалите линейный провод a из точки 0 питания и оставьте его разомкнутым. Включите напряжение питания. Повторите измерения фазных напряжений и токов нагрузки, линейного тока I_a , обратите внимание на уменьшение вдвое фазных напряжений U_{ab}, U_{ca} по сравнению с симметричным режимом и на исчезновение тока I_a в оборванном проводе. Опытные данные занесите в таблицу 1. Выключите напряжение питания.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании теоретических значений фазных (линейных) напряжений U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} симметричного режима по выражениям (1) рассчитайте теоретические значения фазных напряжений и токов I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} всех исследованных режимов цепи. Теоретические данные занесите в таблицу 1, сравните с опытными значениями. По выражениям (2) подсчитайте теоретические значения линейных токов I_a, I_b, I_c для всех режимов цепи, теоретические результаты занесите в таблицу 1, сравните с опытными данными.

На одном чертеже в одном масштабе 2 В/см постройте векторные диаграммы напряжений для всех исследованных режимов (разными цветами); на другом чертеже в масштабе 0,05 А/см постройте векторные диаграммы токов всех режимов по теоретическим данным. По каждому пункту опытов 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.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема трехфазной цепи, соединенной в треугольник, 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 и о соответствии опытных и расчетных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом три однофазных потребителя соединяют в треугольник?

2. В каком соотношении находятся фазные и линейные токи в симметричной нагрузке, соединенной в треугольник?

3. Всегда ли при соединении нагрузки в треугольник справедливо соотношение $\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0$?

4. Каковы характерные признаки симметричного режима?

5. Каковы последствия увеличения сопротивления фазы нагрузки?

6. Каковы последствия обрыва фазы нагрузки?

7. Каковы последствия обрыва линейного провода?

8. Каковы последствия нарушения симметрии источника питания при выпадении фазы?

9. Почему в исследуемой цепи недопустим режим короткого замыкания фазного сопротивления нагрузки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ В РЕЖИМЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное определение параметров схемы замещения катушки индуктивности в режиме переменного тока, построение векторной диаграммы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Катушка с ферромагнитным сердечником является нелинейным элементом и имеет криволинейную вольт-амперную характеристику по действующим значениям тока и напряжения, показанную на рис. 1. Эта нелинейность объясняется магнитным насыщением материала сердечника катушки. Поэтому такая катушка не имеет определенных значений своих параметров, которые зависят от величины входного напряжения.

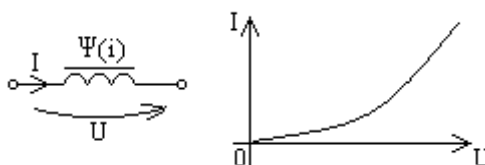


Рис. 1. Катушка с ферромагнитным сердечником
и ее вольт-амперная характеристика

Схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником показана на рис. 2, а. Параметры этой схемы имеют следующий физический смысл: r_m – сопротивление обмотки (меди) катушки, L_s – индуктивность рассеяния, r_c – сопротивление стали катушки, L_0 – полезная индуктивность намагничивания, характеризующая формирование магнитного потока. Параметры режима работы катушки по схеме замещения в эквивалентных синусоидах: I, U – входные ток и напряжение, I_c – ток стали, I_0 – ток намагничивания, U_0 – напряжение самоиндукции, $U_{обм}$ – потери напряжения на обмотке катушки. Ток стали показывает долю входного тока, идущую на нагрев сердечника катушки, а ток намагничивания – на создание магнитного потока в сердечнике. Векторная диаграмма показана на рис. 2, б.

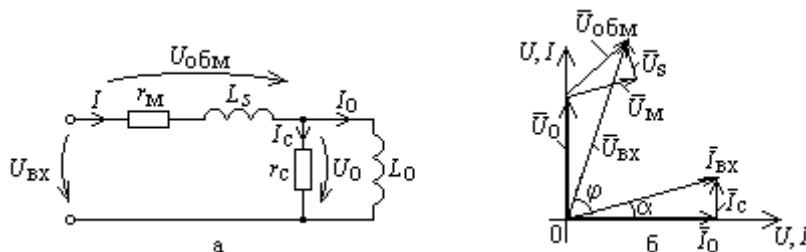


Рис. 2. Катушка с ферромагнитным сердечником:
а) схема замещения; б) векторная диаграмма

Индуктивность намагничивания существенно зависит от напряжения U_0 , а, следовательно, и от входного напряжения, причем с ростом напряжения эта индуктивность падает. Сопротивление стали и индуктивность рассеяния также зависят от напряжения, хотя и в меньшей степени. Сопротивление обмотки не зависит от напряжения. Резкое нарастание входного тока при увеличении входного напряжения объясняется именно нарастанием тока намагничивания при уменьшении индуктивности L_0 , и, следовательно, индуктивного сопротивления $x_0 = \omega L_0$.

Параметры схемы замещения катушки и параметры ее режима работы также зависят от количества витков катушки, причем обе индуктивности растут пропорционально квадрату числа витков, сопротивление r_m пропорционально числу витков катушки. Поэтому при неизменном входном напряжении с ростом числа витков ток в катушке уменьшается.

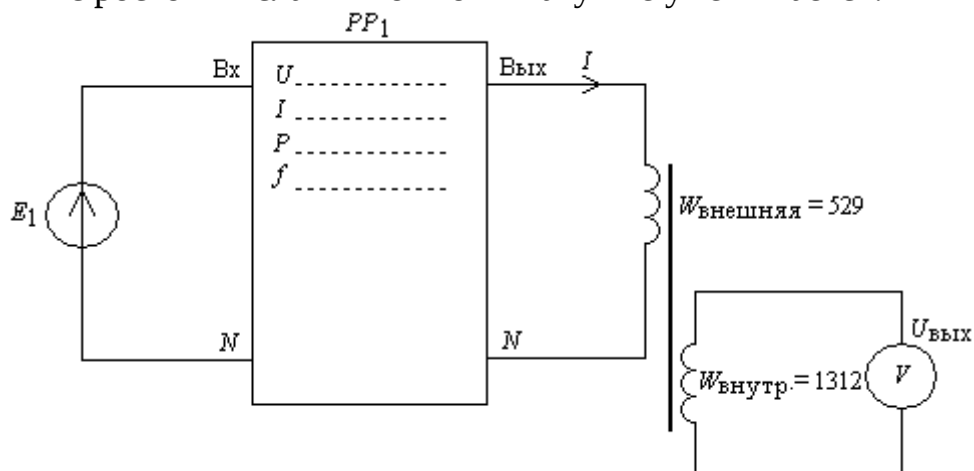


Рис. 3. Схема опыта по определению параметров катушки

Все параметры схемы замещения катушки определяются экспериментально, схема опыта показана на рис. 3. В опыте на исследуемой внешней обмотке измеряются входные напряжение U , ток I , мощность P , угол φ между напряжением и током, а также выходное напряжение на внутренней измерительной обмотке $U_{\text{вых}}$, через которое определяется напряжение самоиндукции обмотки U_0 .

Вначале исследуем катушку при отсутствии сердечника. Схема замещения катушки в этом режиме и векторная диаграмма показаны на рис. 4. В этом случае в схеме замещения отсутствует сопротивление стали r_c , и на векторной диаграмме отсутствует ток стали I_c .

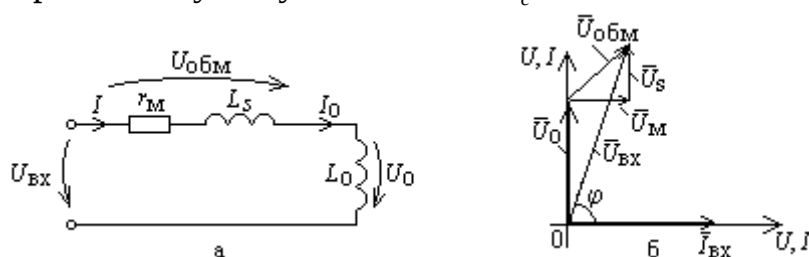


Рис. 4. Катушка без ферромагнитного сердечника:
а) схема замещения; б) векторная диаграмма

Вся мощность расходуется лишь на нагрев исследуемой внешней обмотки $P_m = r_m I^2$. Отсюда находим сопротивление и потерю напряжения на этой обмотке $r_m = \frac{P_m}{I^2}$, $U_m = r_m I$. Полное сопротивление внешней обмотки находим по закону Ома $z = \frac{U}{I}$, отсюда определяем общее реактивное сопротивление x и напряжение U_p на этом сопротивлении, а также общую индуктивность катушки: $x = \sqrt{z^2 - r_m^2}$, $U_p = r_x I$, $L = \frac{x}{\omega}$. Далее через коэффициент трансформации рассчитываем напряжение самоиндукции исследуемой внешней обмотки $U_0 = \frac{W_{внешн}}{W_{внутр}} \cdot U_{вых}$. По этим данным находим напряжение U_s на индуктивности рассеяния, её сопротивление x_s и саму эту индуктивность L_s : $U_s = U_p - E_0$, $x_s = \frac{U_s}{I}$, $L_s = \frac{x_s}{\omega}$. Окончательно определяем полезную индуктивность намагничивания $L_0 = L - L_s$.

Построение векторной диаграммы катушки (рис.4) основано на втором законе Кирхгофа $\bar{U} = \bar{U}_m + \bar{U}_s + \bar{U}_0$. Вектор входного тока $\bar{I}$ располагаем по горизонтальной оси. Вектор напряжения самоиндукции $\bar{U}_0$ опережает ток на 90° , поэтому он направлен по вертикальной оси. От конца этого вектора откладываем параллельно току вектор напряжения $\bar{U}_m$. От конца этого вектора вертикально вверх откладываем вектор напряжения рассеяния $\bar{U}_s$. Начало координат соединим с концом вектора $\bar{U}_s$ и получим вектор входного напряжения $\bar{U}$.

Рассмотренной катушке без ферромагнитного сердечника присущ такой недостаток, как малая полезная индуктивность намагничивания. Поэтому далее рассмотрим катушку с ферромагнитным сердечником, рис. 2. Анализ выполним снова по схеме на рис. 3.

Очевидно, что сопротивление r_m меди обмотки не зависит от наличия сердечника. Определяем поэтому мощность P_m нагрева обмотки и потерю активного напряжения на этой обмотке: $P_m = r_m I^2$, $U_m = r_m I$. Далее находим мощность нагрева сердечника $P_c = P - P_m$. Используя коэффициент трансформации, определяем напряжение самоиндукции U_0 исследуемой внешней обмотки $U_0 = \frac{W_{внешн}}{W_{внутр}} \cdot U_{вых}$. Затем рассчитываем ток стали $I_c = \frac{P_c}{U_0}$, сопротивление стали $r_c = \frac{U_0}{I_c}$, ток намагничивания $I_0 = \sqrt{I^2 - I_c^2}$, реактивное

сопротивление намагничивания $x_0 = \frac{U_0}{I_0}$, полезную индуктивность намагничивания $L_0 = \frac{x_0}{\omega}$.

Чтобы найти параметры рассеяния L_s и U_s построим векторную диаграмму катушки с сердечником, рис.2. Вектор тока намагничивания $\bar{I}_0$ располагаем по горизонтальной оси. Вектор напряжения самоиндукции $\bar{U}_0$ опережает ток на 90° , поэтому он направлен по вертикальной оси. Вектор тока потерь в стали $\bar{I}_s$ совпадает по направлению с напряжением $\bar{U}_0$, поэтому его направляем вертикально вверх от конца вектора тока $\bar{I}_0$. Соединив конец вектора тока $\bar{I}_s$ с началом координат, получаем вектор входного тока $\bar{I}$. Теперь вектор напряжения $\bar{U}_m$ на сопротивлении обмотки следует провести от конца вектора $\bar{U}_0$ параллельно вектору входного тока $\bar{I}$. Угловой коэффициент наклона вектора $\bar{U}_m$ равен $k = \frac{I_s}{I_0}$.

Координаты конца вектора $\bar{U}_m$ подсчитываем по формулам

$$x_1 = U_m \cdot \frac{I_0}{I}; \quad y_1 = U_0 + U_m \cdot \frac{I_s}{I}. \quad (1)$$

Из конца вектора $\bar{U}_m$ (точка с координатами x_1, y_1) проводим линию, перпендикулярную вектору $\bar{U}_m$. Уравнение этой линии следует из условия перпендикулярности прямых, пересекающихся в точке (x_1, y_1) :

$$y - y_1 = -\frac{1}{k}(x - x_1). \quad (2)$$

Эта линия определяет направление вектора $\bar{U}_s$, который и начинается в точке (x_1, y_1) . Совместным решением уравнения (2) и уравнения окружности

$$x^2 + y^2 = U_{\text{ex}}^2 \quad (3)$$

находим координаты точки (x, y) конца вектора $\bar{U}_s$. Для этого из уравнения (2) выражаем y и подставляем в уравнение (3), получаем квадратное уравнение для координаты x

$$\left(1 + \frac{1}{k^2}\right) \cdot x^2 - \frac{2}{k} \left(y_1 + \frac{x_1}{k}\right) \cdot x + \left(y_1 + \frac{x_1}{k}\right)^2 - U_{\text{ex}}^2 = 0. \quad (4)$$

Далее из уравнения (3) определяем величину y :

$$y = \sqrt{U_{\text{ex}}^2 - x^2}. \quad (5)$$

Точка с полученными координатами (x, y) на проведенном ранее перпендикуляре к вектору $\vec{U}_m$ и определяет конец вектора $\vec{U}_s$. Соединив начало координат с точкой (x, y) , получаем вектор входного напряжения $U_{вх}$. Длину вектора $\vec{U}_s$ определим по формуле

$$U_s = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}. \quad (6)$$

Окончательно, находим реактивное сопротивление рассеяния $x_s = \frac{U_s}{I}$ и индуктивность рассеяния $L_s = \frac{x_s}{\omega}$. Поскольку напряжение самоиндукции

$$U_0 = \omega W_{внеш} \Phi_0, \text{ то полезный магнитный поток } \Phi_0 = \frac{U_0}{\omega W_{внеш}}.$$

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Входное напряжение подается с регулятора переменного напряжения и частоты E_1 . Обозначения выводов обмоток катушки и числа их витков приведены непосредственно на катушке. Для измерения тока, напряжения, мощности, частоты и угла разности фаз между напряжением и током используется цифровой универсальный измеритель $PP1$. Для измерения напряжения применяется аналоговый вольтметр.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Соберите схему по рис. 3. Для исследования катушки без ферромагнитного сердечника выведите сердечник в крайнее верхнее положение. Включите напряжение питания, установите регулятором величину напряжения 3 В и частоту 100 Гц. Измерьте входные ток I , мощность P , выходное напряжение $U_{вых}$ и угол разности фаз φ между напряжением и током. Данные занесите в таблицу 1. Выключите напряжение стенда.

Таблица 1

**Экспериментальное исследование катушки индуктивности
без ферромагнитного сердечника**

$U_{вх}$, В	I , А	P , Вт	$U_{вых}$, В	r_m , Ом	U_m , В	U_0 , В	U_s , В	L_s , Гн	L_0 , Гн	φ , Град

2. Для исследования катушки с ферромагнитным сердечником введите сердечник полностью в катушку в крайнее нижнее положение. Включите

напряжение питания, установите регулятором снова величину напряжения 3 В и частоту 100 Гц. Измерьте входные ток I , мощность P , выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ и угол разности фаз φ между напряжением и током. Данные занесите в таблицу 2. Выключите напряжение стенда.

Таблица 2

**Экспериментальное исследование катушки индуктивности
с ферромагнитным сердечником**

$U_{\text{вх}},$ В	$I,$ А	$P,$ Вт	$U_{\text{вых}},$ В	$U_{\text{м}},$ В	$U_0,$ В	$I_{\text{с}},$ А	$r_{\text{с}},$ Ом	$I_0,$ А	$L_0,$ Гн	$L_{\text{с}},$ Гн	$\varphi,$ Град

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным опыта 1 и таблицы 1 подсчитайте параметры режима и схемы замещения катушки без ферромагнитного сердечника: сопротивление внешней обмотки исследуемой катушки $r_{\text{м}}$ и напряжение на этом сопротивлении $U_{\text{м}}$, напряжение самоиндукции U_0 и напряжение на индуктивности рассеяния $U_{\text{с}}$, полезную индуктивность L_0 (обратите внимание, ω здесь равна 628 !), индуктивность рассеяния $L_{\text{с}}$ и угол разности фаз между входными напряжением и током φ . Результаты занесите в таблицу 1. Обратите внимание на малую величину индуктивности L_0 , сопоставимую с величиной индуктивности рассеяния $U_{\text{с}}$.

2. По результатам расчетов постройте векторную диаграмму катушки без сердечника, рекомендуемые масштабы: $m_U = 0,2 \text{ В/см}$, $m_I = 0,05 \text{ А/см}$. Обратите внимание на преобладающий характер напряжения на сопротивлении обмотки $U_{\text{м}}$. Определите по диаграмме угол φ разности фаз между входными током и напряжением, сравните его с измеренным значением в ходе опыта п.1.

3. По данным опыта 2 подсчитайте параметры режима и схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником: напряжение на сопротивлении обмотки $U_{\text{м}}$ (сопротивление внешней обмотки исследуемой катушки $r_{\text{м}}$ уже определено в п.1), напряжение самоиндукции U_0 , ток стали $I_{\text{с}}$ и сопротивление стали $r_{\text{с}}$, ток и индуктивность намагничивания I_0 , L_0 ($\omega = 628!$). По выражениям (1) определите координаты конца вектора $U_{\text{м}}$ (x_1, y_1). По уравнению (4) подсчитайте величину x , как минимальную из корней (4), и по выражению (5) подсчитайте величину y , как положительное значение квадратного корня. Наконец, по выражению (6) вычислите длину вектора напряжения на индуктивности рассеяния $U_{\text{с}}$ и саму эту индуктивность $L_{\text{с}}$. Обратите внимание на существенное увеличение

индуктивности намагничивания и на уменьшение индуктивности рассеяния. Подсчитайте полезный магнитный поток Φ_0 в сердечнике катушки.

4. По результатам расчетов постройте векторную диаграмму катушки с сердечником в прежних масштабах. Соедините конец вектора U_s с началом координат, убедитесь, что полученный отрезок представляет вектор входного напряжения. Определите по диаграмме угол φ разности фаз между входным током и напряжением, сравните его с измеренным значением в ходе опыта п.2.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы замещения катушки без сердечника и с сердечником, расчетные формулы для определения параметров схем замещения.
3. Схема опыта с указанием типов приборов, таблицы 1 и 2 с опытными данными и расчетными результатами.
4. Векторные диаграммы токов и напряжений для случаев катушки без и при наличии сердечника.
5. Выводы о соответствии опытных и расчетных результатов, а также о влиянии ферромагнитного сердечника на параметры схемы замещения и режим работы катушки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как измеряется активное сопротивление катушки?
2. Как измеряется полное сопротивление катушки?
3. Для чего в этой работе необходимо знать частоту входного напряжения?
4. Почему при введении ферромагнитного сердечника полезная индуктивность катушки увеличивается, а индуктивность рассеяния уменьшается?
5. Как изменятся потери мощности в катушке при включении ей на постоянное напряжение?
6. Какой физический смысл элементов схемы замещения катушки? Почему отличаются схемы замещения для катушки с сердечником и без?
6. Как определяются параметры схемы замещения катушки с сердечником?
7. Каков порядок построения векторной диаграммы катушки с сердечником?
8. Выведите формулу уравнения (4), выражения (6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теоретические основы электротехники / П. А. Ионкин [и др.] – М.: Высшая школа, 1976. – 514 с.
2. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 752 с.
3. Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин [и др.] – СПб.: Изд-во «Питер», 2009. – 463 с.
4. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 2010. – 592 с.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Изд-во «Юрайт», 2012. – 701 с.
6. Улахович Д. А. Основы теории линейных электрических цепей / Д. А. Улахович. – СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург», 2009. – 816 с.
7. Фриск В. В. Основы теории цепей / В. В. Фриск. – М.: Изд-во «Солон-Пресс», 2009. – 160 с.
8. Гаврилов Л. П. Расчет и моделирование линейных электрических цепей с применением ПК / Л. П. Гаврилов, Д. А. Соснин. – М.: Изд-во «Солон-Пресс», 2009. – 448 с.
9. Лоторейчук Е. А. Теоретические основы электротехники / Е. А. Лоторейчук. – М.: Изд-во «ИД ФОРУМ. ИНФРА», 2009. – 320 с.
10. Прянишников В. А. Теоретические основы электротехники / В. А. Прянишников. – СПб.: Изд-во «Корона принт», 2010. – 368 с.
11. Прянишников В. А. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах / В. А. Прянишников, Е. А. Петров, Ю. М. Осипов. – СПб.: Изд-во «Корона – Век», 2008. – 336 с.
12. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – М.: Высшая школа, 1990. – 544 с.
13. Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники: сборник задач / Н. В. Коровкин, Е. Е. Селина [и др.]. – СПб.: Изд-во «Питер», 2004. – 512 с.
14. Бычков Ю. А. Сборник задач и практикум по основам теории электрических цепей / Ю. А. Бычков, М. В. Золотницкий, Э. П. Чернышов. – СПб.: Изд-во «Питер», 2007. – 300 с.