

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
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
26.05.07 «Эксплуатация судового
электрооборудования и средств автоматики»

В двух частях

Часть 2

Севастополь
СевГУ
2023

УДК [621.3.01:629.5.064.5](076.5)

ББК 31.21-5*я73

ТЗЗ

Рецензент:

С.А. Конева - канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой
«Судовое электрооборудование» Морского института СевГУ

Составители: Пронина А.К., Канов Л.Н.

ТЗЗ Теория судовой электротехники: методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики». – В 2-х ч. Ч. 2 / Севастопольский государственный университет, Морской институт, кафедра «Судовое электрооборудование»; сост.: А. К. Пронина, Л. Н. Канов. – Севастополь : СевГУ, 2023. – 53 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 ОПК – 2 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.

© Пронина А.К., Канов Л.Н., сост., 2023
© ФГАОУ ВО Севастопольский
государственный университет», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения.	4
1. Лабораторная работа № 1. Круговая диаграмма неразветвленной цепи	5
2. Лабораторная работа № 2. Исследование мостовой схемы.	10
3. Лабораторная работа № 3. Исследование делителя напряжения . . .	16
4. Лабораторная работа № 4. Входные и передаточные частотные характеристики электрических цепей	21
5. Лабораторная работа № 5. Исследование симметричного четырехполюсника.	28
6. Лабораторная работа № 6. Трансформатор с ферромагнитным сердечником	33
7. Лабораторная работа № 7. Электромагнитные цепи со взаимной индукцией.	38
8. Лабораторная работа № 8. Безиндуктивные электрические фильтры	44
Библиографический список	53

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

КРУГОВАЯ ДИАГРАММА НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ

Цель работы: построение круговой диаграммы последовательной неразветвленной цепи, исследование на её основе режимов работы неразветвленной цепи с переменным резистором.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Круговая диаграмма применяется при необходимости многократно рассчитывать одну и ту же цепь переменного тока при изменении только одного её параметра. В лабораторной работе исследуется неразветвленная электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивности и переменного резистора, рис. 1.

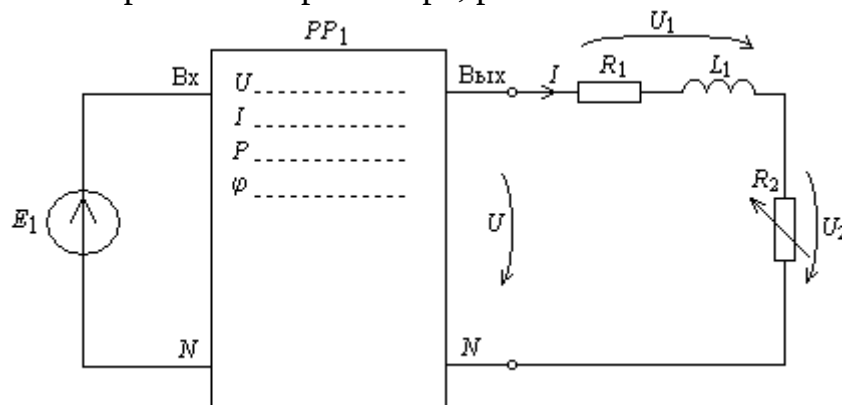


Рис. 1. Схема неразветвленной цепи для построения круговой диаграммы

Для построения круговой диаграммы предварительно в электрической цепи, рис. 1, необходимо измерить напряжение на входе U , на катушке U_1 , а также ток I и активную мощность P при нулевом значении переменного сопротивления (режим короткого замыкания).

Порядок построения круговой диаграммы, рис. 2.

1. Определяем полное сопротивление цепи (полное сопротивление катушки): $z_k = \frac{U}{I}$.

2. Определяем активное сопротивление цепи (катушки): $R_1 = \frac{P}{I^2}$.

3. Определяем индуктивное сопротивление катушки: $x_L = \sqrt{z_k^2 - R_1^2}$.

4. Находим индуктивность катушки: $L = \frac{x_L}{2\pi f}$, здесь f – частота напряжения в Герцах.

5. Находим полную мощность катушки: $s = UI$.

6. Определяем разность фаз между напряжением и током на катушке:

$$\varphi = \arccos \frac{R}{Z_k}.$$

7. Выбираем масштабы тока m_I , напряжения m_U , сопротивления m_Z , мощности m_S .

8. По вертикальной оси, рис.2, откладываем вектор входного напряжения $\mathbf{OA} = \frac{U}{m_U}$ и на нём, как на диаметре, строим полуокружности напряжений.

9. Под углом φ к вектору U проводим главную линию OD короткого замыкания. На этой линии откладываем вектор тока $I: \mathbf{OE} = \frac{I}{m_I}$. Из точки $З$ середины вектора тока восстанавливаем к нему перпендикуляр $\mathbf{ZO'}$ и из точки $\mathbf{O'}$, как из центра, описываем полуокружность токов.

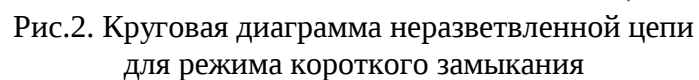
10. На главной линии короткого замыкания откладываем полную мощность $\mathbf{OЖ} = \frac{S}{m_S}$. Из точки $\mathbf{И}$ середины вектора мощности восстанавливаем перпендикуляр $\mathbf{ИO''}$ и из точки $\mathbf{O''}$, как из центра, описываем полуокружность мощностей.

11. По горизонтальной оси координат откладываем индуктивное сопротивление $x_L: \mathbf{OB} = \frac{x_L}{m_Z}$ и из точки $\mathbf{Б}$ восстанавливаем перпендикуляр – линию активных сопротивлений $\mathbf{БВ}$. Пересечение этой и главной линий образует точку $\mathbf{Г}$, причем, R_1 , вычисленное в п.2, должно совпадать с $R_1 = m_Z \cdot \mathbf{БГ}$, а активная мощность P , измеренная ваттметром, должна совпадать с $P_{1k} = m_S \cdot \mathbf{ЛЖ}$.

12. Измеряя отрезки на круговой диаграмме, можно определить значения: $U_{ак} = m_U \cdot \mathbf{ОК}$, $U_{Lк} = m_U \cdot \mathbf{КА}$, $Q_{Lк} = m_S \cdot \mathbf{ОЛ}$.

13. Опишем из точки $\mathbf{О}$ дугу в четверть окружности; она пересекает главную линию в точке $\mathbf{М}$; проекция этой точки на вертикальную ось равна $\cos \varphi$, если радиус принять за единицу.

14. Теперь, когда круговая диаграмма полностью построена, можно откладывать любые сопротивления R_2 переменного резистора по линии сопротивлений: $\mathbf{ГГ'} = \frac{R_2}{m_Z}$. Далее через точки $\mathbf{О}$ и $\mathbf{Г'}$ проводим новую главную линию 1 , по ней аналогично определяем величины: $I, U_a, U_L, s, P, Q_L, \cos \varphi$.



Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде «Электрические цепи переменного тока». В качестве источника питания используется регулируемый источник напряжения E_1 . Схема набирается из катушки Z_2 : индуктивность 80 мГн; сопротивление обмотки 40 Ом. В качестве нагрузки используются резисторы: $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 40 \text{ Ом}$; $R_4 = 80 \text{ Ом}$; $R_5 = 100 \text{ Ом}$; $R_6 = 120 \text{ Ом}$. $R_3 = 10 \text{ Ом}$. Ток, мощность, напряжение и фазовый угол измеряются цифровым универсальным измерителем PP1. Напряжение измеряется аналоговым вольтметром PV1.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Выключите напряжение источника E_1 . Соберите цепь по рис.1, переменное сопротивление пока не подсоединяйте, замените проводником (режим КЗ !). Включите напряжение питания, установите $U = 10\text{ В}$. Измерьте напряжение, ток, активную мощность цепи. Поместите данные в первую строку таблицы 1, при этом $U_2 = 0$. Далее устанавливайте вместо короткого замыкания резисторы $R_2 = 40\text{ Ом}$; $R_4 = 80\text{ Ом}$; $R_5 = 100\text{ Ом}$; $R_6 = 120\text{ Ом}$, измеряйте напряжения, ток, активную мощность цепи, данные измерений заносите в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры режимов цепи с переменным резистором

U , В	U_1 , В	U_2 , В	I , А	P , Вт
10	10	0		
10				
10				
10				
10				

2. По данным опыта 1 рассчитайте величины, необходимые для построения круговой диаграммы, результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Расчетные параметры режимов цепи с переменным резистором

z , Ом	R , Ом	x_L , Ом	L , Гн	s , ВА	$\cos \varphi$,	φ , град

3. Построить круговую диаграмму. По ней для различных значений тока I определить $R_1, R_2, z, x_L, L, \cos \varphi, \varphi, U_a, U_L, s, P, Q_L$. Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

**Параметры режимов цепи с переменным резистором,
определенные по круговой диаграмме**

R_1 , Ом	R_2 , Ом	z , Ом	x_L , Ом	L , Гн	$\cos \varphi$	φ , град	U_a , В	U_L , В	s , ВА	P , Вт	Q_L , ВАр

4. По результатам расчета с помощью круговой диаграммы построить графики $I, U_a, U_L, s, P, Q_L, \cos \varphi, \varphi$ в зависимости от сопротивления R_2 .

5. Сделайте выводы о целесообразности расчета неразветвленной цепи с помощью круговой диаграммы, сравните теоретические и

экспериментальные результаты, сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Порядок построения круговой диаграммы.
3. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
4. Схема опыта и таблицы опытных и расчетных результатов.
5. Чертеж круговой диаграммы для режима короткого замыкания и при ненулевом переменном сопротивлении.
6. Теоретические графики зависимостей параметров режима цепи от регулировочного сопротивления. На графиках должны быть отмечены опытные точки, полученные по круговой диаграмме.
7. Выводы о влиянии регулировочного резистора на режим цепи, о целесообразности расчета неразветвленной цепи с помощью круговой диаграммы, а также о соответствии опытных и расчетных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Когда целесообразно применять круговые диаграммы?
2. Какие величины нужно рассчитать, чтобы построить круговую диаграмму?
3. Какие величины можно определить по круговой диаграмме?
4. Как выбрать масштаб для построения круговой диаграммы?
5. Как по круговой диаграмме определить составляющие векторов напряжения?
6. Как по круговой диаграмме определить мощности?
7. Как по круговой диаграмме определить $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ МОСТОВОЙ СХЕМЫ

Цель работы: исследование принципа действия мостовой схемы при различных нагрузках, определение передаточных функций мостовых схем.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Схемы с двумя парами внешних зажимов называются четырехполюсниками. Различают входные и выходные зажимы, рис. 1, а.

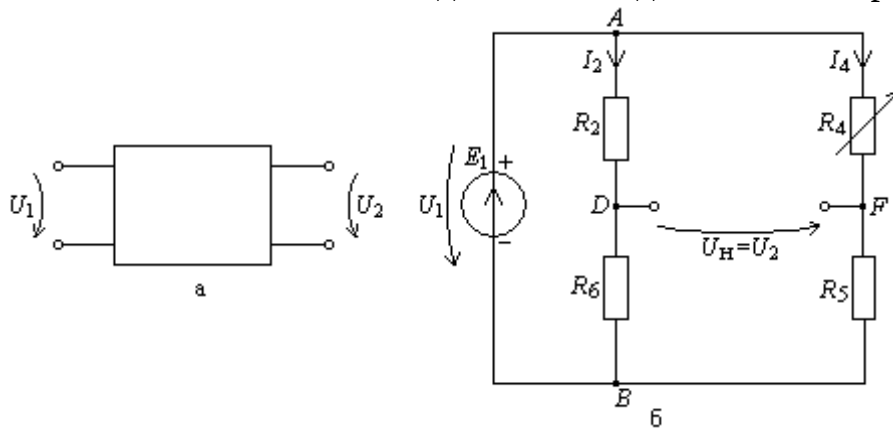


Рис. 1. Пассивный четырехполюсник:
а) обозначение; б) схема мостового четырехполюсника

Коэффициент передачи цепи по напряжению $K = \frac{U_2}{U_1}$ является важнейшей характеристикой цепи, так как дает возможность находить напряжение на выходе по известному напряжению на входе $U_2 = KU_1$. Коэффициент передачи в линейной цепи не зависит от входного напряжения и определяется только параметрами цепи и способом их соединения. Чтобы рассчитать в линейной цепи коэффициент передачи, нужно задаться произвольным входным напряжением U_1 , любым методом найти напряжение на выходе U_2 и получить $K = \frac{U_2}{U_1}$. Аналогично получают коэффициент

передачи по току $K_I = \frac{I_2}{I_1}$ или по мощности $K_P = \frac{P_2}{P_1}$.

Вычислим коэффициент передачи по напряжению мостовой цепи в режиме холостого хода при разомкнутых вторичных контактах, рис. 1, б. Зададимся входным напряжением U_1 . В этом случае через резисторы R_2 и R_6 протекает ток $I_2 = \frac{U_1}{R_2 + R_6}$, а через R_4 и R_5 – ток $I_4 = \frac{U_1}{R_5 + R_4}$. Примем потенциал точки F за нулевой. Тогда при принятых условных положительных направлениях токов потенциал точки A выше потенциала

точки F на падение напряжения на резисторе R_4 , т.е. $\varphi_A = R_4 I_4 = \frac{R_4 U_1}{R_4 + R_5}$.

Так как через резистор R_2 ток течет от точки A к точке D , то потенциал точки D ниже потенциала точки A на падение напряжения на резисторе R_2 .

Поэтому

$$\varphi_D = \varphi_A - R_2 I_2 = \frac{U_1 R_4}{R_5 + R_4} - \frac{U_1 R_2}{R_2 + R_6} = U_1 \left[\frac{R_4 R_6 - R_2 R_5}{(R_5 + R_4)(R_2 + R_6)} \right].$$

Выходное напряжение

$$U_2 = \varphi_D - \varphi_F = U_1 \left[\frac{R_4 R_6 - R_2 R_5}{(R_5 + R_4)(R_2 + R_6)} \right];$$

коэффициент передачи

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_4 R_6 - R_2 R_5}{(R_5 + R_4)(R_2 + R_6)}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что коэффициент передачи зависит только от параметров цепи и не зависит от приложенного к ней напряжения.

Исследуем, как коэффициент передачи нашего четырехполюсника изменяется, если сопротивления R_2, R_5, R_6 постоянны, а сопротивление R_4 изменяется от нуля до бесконечности. При $R_4 = 0$ $K(0) = -\frac{R_2}{R_2 + R_6}$. Если в

выражение (1) подставить $R_4 = \infty$, то получаем неопределенность вида $\frac{\infty}{\infty}$.

Чтобы избавиться от неопределенности, вынесем из числителя и знаменателя множитель R_4 :

$$K = \frac{R_6 - R_2 \frac{R_5}{R_4}}{\left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right)(R_2 + R_6)}.$$

При $R_4 = \infty$ $K(\infty) = \frac{R_6}{R_2 + R_6}$. Таким образом, в цепи на рис.1,б при

изменении R_4 от 0 до ∞ коэффициент передачи K изменяется от $-\frac{R_2}{R_2 + R_6}$

до $\frac{R_6}{R_2 + R_6}$, рис.2.

Определим R_4 , при котором $K = 0$. Очевидно (1), что $K = 0$, если $R_4 R_6 - R_2 R_5 = 0$, откуда следует $R_4 = \frac{R_2 R_5}{R_6}$. При $\varphi_D = \varphi_F$ $U_2 = 0$.

Следовательно, в нашей цепи при $0 < R_4 < \frac{R_2 R_5}{R_6}$ получаем $K < 0$, т.е.

полярность выходного напряжения противоположна полярности входного. При $\frac{R_2 R_5}{R_6} < R_4 < \infty$ получаем $K > 0$, т.е. полярности входного и выходного напряжений одинаковы, а коэффициент передачи возрастает от 0 до $\frac{R_6}{R_2 + R_6}$, рис. 2.

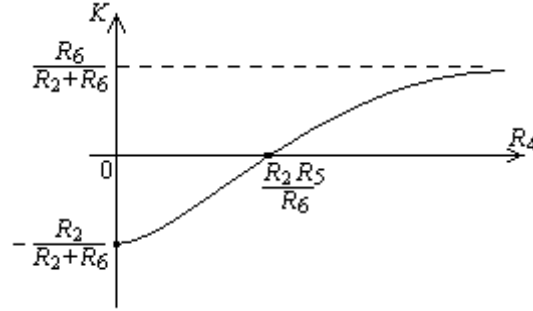


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи четырехполюсника от изменения сопротивления переменного резистора в режиме холостого хода

Оценим влияние сопротивления нагрузки $R_H = R_3$ на коэффициент передачи напряжения, рис. 3.

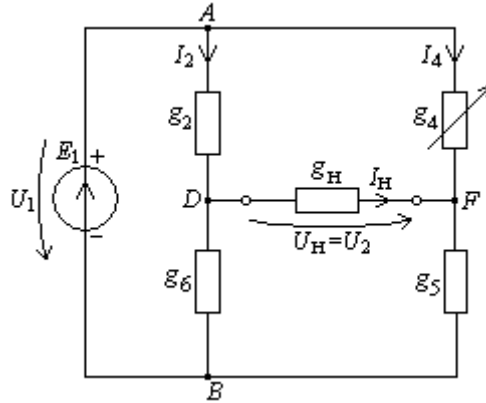


Рис. 3. Мостовой четырехполюсник под нагрузкой $R_H = R_3$

Для этого определим потенциалы точек D и F при известном потенциале точки A : $\varphi_A = U_1$. На основании метода узловых потенциалов [1] получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \varphi_D(g_2 + g_3 + g_6) - \varphi_F g_3 &= U_1 g_2; \\ -\varphi_D g_3 + \varphi_F(g_4 + g_3 + g_5) &= U_1 g_4 \end{aligned} \right\}.$$

В этих уравнениях для удобства записи резисторы характеризуются не сопротивлениями R , а проводимостями $g = \frac{1}{R}$. Решение этих уравнений дает

$$\varphi_D = \frac{\Delta_D}{\Delta}; \quad \varphi_F = \frac{\Delta_F}{\Delta},$$

где $\Delta = (g_2 + g_3 + g_6)(g_4 + g_3 + g_5) - g_3^2$;
 $\Delta_D = U_1(g_2 g_4 + g_2 g_3 + g_2 g_5 + g_3 g_4)$;

$$\Delta_F = U_1(g_2g_4 + g_4g_3 + g_4g_6 + g_3g_2).$$

Следовательно, выходное напряжение имеет вид

$$U_2 = \varphi_D - \varphi_F = U_1 \frac{g_2g_5 - g_4g_6}{(g_2 + g_6)(g_4 + g_5) + g_3(g_2 + g_5 + g_4 + g_6)}$$

и коэффициент передачи

$$K = \frac{g_2g_5 - g_4g_6}{(g_2 + g_6)(g_4 + g_5) + g_3(g_2 + g_5 + g_4 + g_6)}. \quad (2)$$

Формула (2) показывает, что сопротивление (проводимость) нагрузки g_3 присутствует только в знаменателе. Поэтому при уменьшении проводимости нагрузки до нуля (увеличения сопротивления до бесконечности) коэффициент передачи монотонно увеличивается до значения холостого хода (1); при увеличении проводимости нагрузки до бесконечности (уменьшении сопротивления до нуля) коэффициент передачи монотонно снижается до нуля, рис.4.

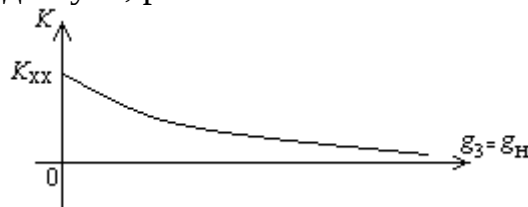


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи четырехполюсника от проводимости нагрузки при неизменной проводимости регулировочного резистора

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде «Электрические цепи постоянного тока». В качестве источника питания используется регулируемый источник напряжения E_1 . Мостовая схема набирается из резисторов: $R_2 = 40 \text{ Ом}$; $R_4 = 80 \text{ Ом}$; $R_5 = 100 \text{ Ом}$; $R_6 = 120 \text{ Ом}$. В качестве нагрузки используются резисторы: $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; Токи измеряются тремя цифровыми амперметрами $PA1 \dots PA3$. Напряжение измеряется аналоговым вольтметром $PV1$.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Выключите напряжение источника E_1 . Соберите мостовую схему без сопротивления нагрузки R_H по рис.1,б. Включите источник напряжения, установите входное напряжение 10 В. Измерьте выходное напряжение холостого хода, Данные опыта запишите в таблицу 1. Установите вместо резистора R_4 резисторы R_3 , далее R_1 , измерьте выходное напряжение, результат опыта запишите в таблицу 1. Повторите измерения при нулевом и бесконечно большом сопротивлениях, результаты опытов записывайте в таблицу 1. Выключите напряжение питания.

Таблица 1

**Зависимость коэффициента передачи от сопротивления регулировочного резистора
в режиме холостого хода**

Сопротивление переменного резистора	Выходное напряжение U_2 В		Коэффициент передачи K	
	Опыт	Теор. расчет	Опыт	Теор. расчет
R_4				
R_3				
R_1				
0				
∞				

2. Установите сопротивление переменного регулировочного резистора снова R_4 и подсоедините к выходным контактам четырехполюсника в качестве нагрузки последовательное соединение резисторов $R_1 + R_3$, измерьте выходное напряжение на нагрузке, данные опыта запишите в таблицу 2. Повторите измерения при нагрузке, состоящей из резисторов R_1 и R_3 по отдельности, а также при коротком замыкании и обрыве нагрузки. Данные опытов заносите в таблицу 2. Выключите входное напряжение.

Таблица 2

**Зависимость коэффициента передачи от сопротивления нагрузки
при неизменном сопротивлении регулировочного резистора**

Сопротивление нагрузки	Выходное напряжение U_2 В		Коэффициент передачи K	
	Опыт	Теор. расчет	Опыт	Теор. расчет
$R_1 + R_3$				
R_3				
R_1				
0				

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Для режима холостого хода при различных сопротивлениях регулировочного резистора рассчитайте выходное напряжение и коэффициент передачи, данные теоретического расчета запишите в таблицу 1. Постройте график зависимости коэффициента передачи от величины регулировочного сопротивления, нанесите на график опытные точки по таблице 1. Сделайте выводы о влиянии сопротивления регулировочного резистора на коэффициент передачи и о соответствии опытных и теоретических результатов.

2. При неизменной величине регулировочного резистора R_4 рассчитайте выходное сопротивление и коэффициент передачи, данные теоретического расчета запишите в таблицу 2. Постройте график зависимости коэффициента передачи от величины сопротивления нагрузки, нанесите на график опытные точки из таблицы 2. Сделайте выводы о влиянии сопротивления нагрузки на коэффициент передачи и о соответствии опытных и теоретических результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
3. Схемы опытов и таблицы опытных и расчетных результатов.
4. Теоретические графики зависимостей коэффициента передачи напряжения от регулировочного сопротивления и от сопротивления нагрузочного резистора. На графиках должны быть отмечены опытные точки.
5. Выводы о влиянии сопротивления нагрузки и регулировочного резистора на выходное напряжение и коэффициент передачи, а также о соответствии опытных и расчетных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение и принцип действия мостовой схемы.
2. Выведите формулу коэффициента передачи четырехполюсника под нагрузкой.
3. Как будет изменяться график коэффициента передачи в схеме четырехполюсника под нагрузкой при изменении величины регулировочного сопротивления?
4. Как будет действовать четырехполюсник, если поменять местами включение нагрузки и входного напряжения питания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: экспериментальное исследование резистивного делителя напряжения в режиме постоянного тока; анализ влияния сопротивления нагрузки на характеристики делителя.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Делитель напряжения (потенциометр) предназначен для плавного изменения напряжения от нуля до напряжения питания. Он представляет собой реостат, включенный по схеме на рис.1. На вход подается постоянное напряжение питания U_1 . Аналоговый вольтметр $PV1$ измеряет напряжение на выходе делителя, цифровые амперметры $PA1 - PA3$ измеряют токи в цепи.

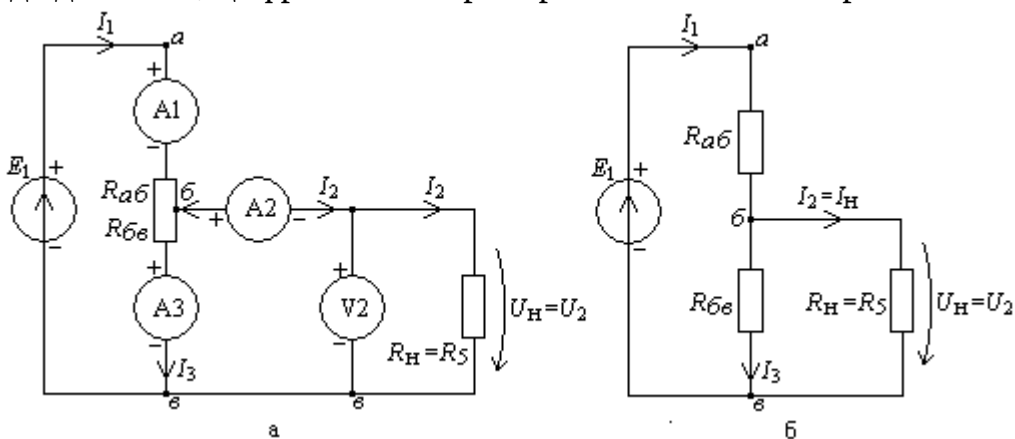


Рис. 1. Делитель напряжения:
а) принципиальная схема; б) схема замещения

Так как вольтметр имеет очень большое сопротивление, то в схеме без нагрузки ток I_2 практически равен нулю, тогда $I_1 = I_3 = \frac{U}{R_0}$, где R_0 – сопротивление делителя. Падение напряжения на участке бв пропорционально сопротивлению $R_{бв}$: $U_2 = U_{бв} = I_3 R_{бв}$.

Чем ниже находится движок, тем меньше напряжение U_2 . Если же движок перевести в точку а, то $U_2 = U_1$, а если в точку в, то $U_2 = 0$. Таким образом, получается линейная зависимость $U_2 = f(R_{бв})$, т.е. зависимость выходного напряжения от перемещения движка $U_2 = f(x)$, рис. 2, а, линия 1.

Если к делителю подключить нагрузку R_H и менять положение движка, то окажется, что зависимость $U_2 = f(x)$ становится нелинейной, рис. 2, а, линия 2. Это объясняется тем, что при изменении расстояния x изменяется не только сопротивление $R_{бв}$, но и ток в неразветвленной части цепи

$$I_1 = \frac{U}{R_{a6} + \frac{R_{66} R_H}{R_{66} + R_H}}.$$

Чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше кривизна характеристики.

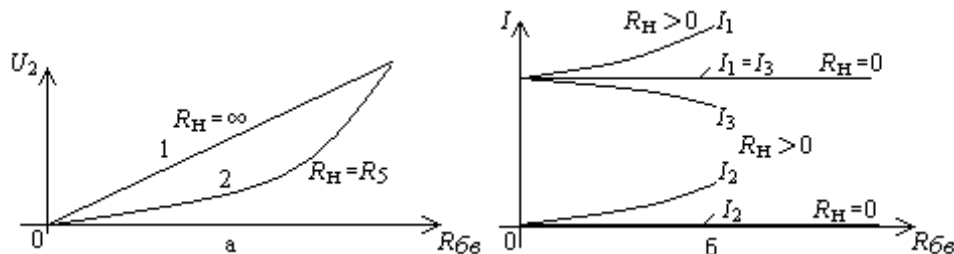


Рис.2. Напряжение и токи делителя: зависимость выходного напряжения а) и токов б) от сопротивлений делителя и нагрузки

Пусть теперь изменяется сопротивление нагрузки R_H , а движок находится в среднем положении. С уменьшением R_H увеличивается ток I_2 , а напряжение U_2 уменьшается, рис. 3, линия 1. Чем больше сопротивление делителя, тем круче падает характеристика, прямая 2. График $U_2 = f(I_2)$ называется внешней характеристикой.

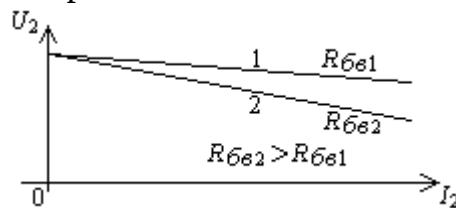


Рис. 3. Внешняя характеристика делителя напряжения

Более предпочтительной для практики является характеристика 1, так как напряжение на нагрузке при её увеличении мало изменяется. Но при малом R_0 по делителю протекает очень большой ток, что вызывает его повышенный нагрев, лишнюю трату энергии. Поэтому применение резистивного делителя напряжения ограничено. Его используют в слаботочных, маломощных цепях, где сопротивление нагрузки достаточно велико. Тогда и сопротивление делителя может быть не очень малым.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде «Электрические цепи постоянного тока». В качестве источника питания используется регулируемый источник напряжения E_1 . Делитель набирается из резисторов: $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 40 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $R_4 = 80 \text{ Ом}$. В качестве нагрузки используются резисторы: $R_5 = 100 \text{ Ом}$; $R_6 = 120 \text{ Ом}$. Токи измеряются тремя цифровыми амперметрами $PA1 \dots PA3$. Напряжение измеряется аналоговым вольтметром $PV1$.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Выключите напряжение источника E_1 . Соберите схему делителя напряжения без сопротивления нагрузки R_H по рис.1.

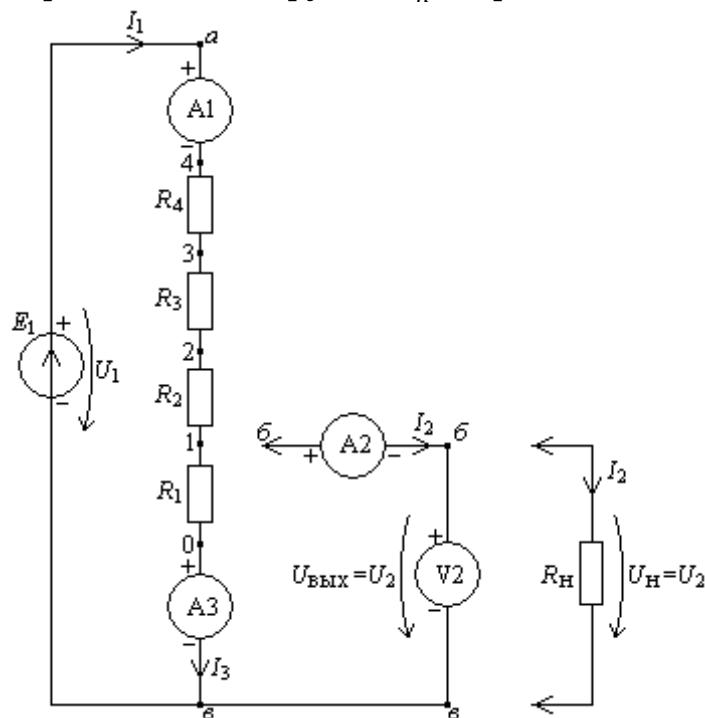


Рис. 4. Схема для исследования делителя напряжения

Левый контакт амперметра $PA2$ подсоедините к точке 0. Сопротивление нагрузки R_H пока не подсоединяйте. Включите источник напряжения E_1 , установите напряжение 10 В и в ходе работы поддерживайте его на этом уровне. Убедитесь, что выходное напряжение $U_{вых}$ и ток I_2 нулевые. Переключите левый контакт амперметра A_2 в точку 1. Запишите показания приборов в левую половину таблицы 1. Далее переставьте контакт амперметра в точку 2, повторите измерения, и так далее по точкам 3 и a (последняя точка a). Выключите источник E_1 . Обратите внимание на то, что напряжение на выходе растет, а токи делителя I_1 , I_3 не изменяются.

Таблица 1

Резистивный делитель напряжения в режиме холостого хода и под нагрузкой

R_H , Ом	XX, $R_H \rightarrow \infty$				$R_H = R_5 = 100$ Ом			
$R_{бв}$, Ом	U_2 , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	U_2 , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А
0								
$R_1 = 5$								
$R_1 + R_2 = 45$								
$R_1 + R_2 + R_3 = 55$								
$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 135$								

2. Подсоедините сопротивление нагрузки R_5 к точкам б и в, рис.4; левый контакт амперметра А2 верните в точку 0. Включите источник $E_1 = 10$ В. Повторите измерения напряжения и токов по всем точкам от 0 до а. Показания приборов запишите в правую половину таблицы 1. Обратите внимание на появление тока I_2 в нагрузке и на снижение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ по сравнению с предыдущим режимом ХХ. Выключите источник E_1 .

3. Получите внешнюю характеристику делителя под нагрузкой. Для этого установите левый подвижный контакт амперметра А2 в точку 3. Подсоедините сопротивление нагрузки $R_H = R_6$ к точкам б и в. Результаты измерения выходного напряжения и токов занесите в таблицу 2. Повторите измерения при $R_H = R_5$, при параллельном соединении резисторов $R_5 \parallel R_6$, при последовательном соединении резисторов $R_5 + R_6$. Данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Внешняя характеристика делителя под нагрузкой

R_H	$U_2, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$
$R_H = R_5$				
$R_H = R_6$				
$R_H = R_5 \parallel R_6$				
$R_H = R_5 + R_6$				

Повторите все измерения при положении подвижного контакта амперметра в точке 2. Данные занесите в таблицу 3, аналогичную таблице 2. Вы заметите, что при уменьшении сопротивления делителя $R_{\text{бв}}$ выходное напряжение уменьшается.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Выведите формулы для выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и токов $I_1 \dots I_3$ делителя напряжения в режиме холостого хода и под нагрузкой. На одном чертеже постройте теоретические графики зависимостей выходного напряжения от сопротивления $R_{\text{бв}}$ для режима ХХ и под нагрузкой $R_H = R_5$. На другом чертеже постройте графики токов $I_1 \dots I_3$ от сопротивления $R_{\text{бв}}$ для режима ХХ и под нагрузкой $R_H = R_5$. Нанесите на эти графики опытные точки. Сделайте выводы о влиянии величины сопротивления $R_{\text{бв}}$ на выходное напряжение и токи делителя.

2. Выведите формулы для выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ в зависимости от тока нагрузки I_2 (при изменении сопротивления нагрузки). Постройте теоретические графики выходного напряжения от тока нагрузки для двух

значений $R_{\text{бв}}$ (точка 3 и точка 2). Сделайте выводы о влиянии сопротивлений нагрузки R_n и делителя $R_{\text{бв}}$ на вид внешней характеристики делителя.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
3. Схемы опытов и таблицы опытных и расчетных результатов.
4. Теоретические графики зависимостей выходного напряжения и токов от сопротивления делителя и графики внешней характеристики при различных сопротивлениях делителя. На графиках должны быть отмечены опытные точки.
5. Выводы о влиянии сопротивления нагрузки и сопротивления делителя на регулировочную и внешнюю характеристики, а также о соответствии опытных и расчетных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение и принцип действия делителя напряжения.
2. Выведите формулу эквивалентного сопротивления цепи делителя включенной нагрузке.
3. Какая часть делителя ($R_{a\text{б}}$ или $R_{\text{бв}}$) больше нагревается при включенной нагрузке?
4. Как будет действовать схема делителя, если поменять местами включение нагрузки и входного напряжения питания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ВХОДНЫЕ И ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Цель работы: экспериментальное исследование входных и передаточных частотных характеристик разветвленных и неразветвленных электрических цепей с одним реактивным элементом; определение диапазона частот, в котором входное сопротивление имеет преимущественно активный или реактивный характер.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Рассмотрим электрическую цепь, работающую на синусоидальном напряжении и имеющую пару интересующих нас двух входных контактов. Цепь характеризуется комплексным входным сопротивлением $Z_{вх} = \frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{I}_{вх}} = z_{вх} e^{j\varphi_{вх}}$. Модуль $z_{вх}$ и аргумент $\varphi_{вх}$ изменяются при изменении частоты. Зависимость модуля комплексного входного сопротивления от частоты называется входной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) $z_{вх} = z_{вх}(\omega)$. Входной фазочастотной характеристикой (ФЧХ) называется зависимость аргумента комплексного входного сопротивления от частоты $\varphi_{вх} = \varphi_{вх}(\omega)$.

При анализе сравнительно простых электрических цепей комплексное входное сопротивление записывается непосредственно по виду схемы цепи. В общем случае нужно задаться входным напряжением $\dot{U}_{вх}$, рассчитать входной ток $\dot{I}_{вх}$ и получить $Z_{вх} = \frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{I}_{вх}}$.

Алгебраическая форма комплексного входного сопротивления имеет вид $Z_{вх} = R_{вх} + jX_{вх}$, где $R_{вх}$ и $X_{вх}$ – активная и реактивная составляющие входного сопротивления. Частота ω_{zp} , при которой $X_{вх}$ равно по абсолютной величине $R_{вх}$ называется граничной.

В схеме на рис.1,а $Z_{вх} = R - j \frac{1}{\omega C}$, отсюда получим условие для граничной частоты $R = \frac{1}{\omega_{zp} C}$ и $\omega_{zp} = \frac{1}{RC}$. Тогда

$$Z_{вх} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}} \cdot e^{-j \cdot \arctg \frac{1}{R\omega C}} = R \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{zp}}{\omega}\right)^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{\omega_{zp}}{\omega}},$$

следовательно АЧХ имеет вид $R\sqrt{1+\left(\frac{\omega_{zp}}{\omega}\right)^2}$, а ФЧХ находится как $\arctg \frac{\omega_{zp}}{\omega}$. Графики АЧХ и ФЧХ показаны на рис.1,б.

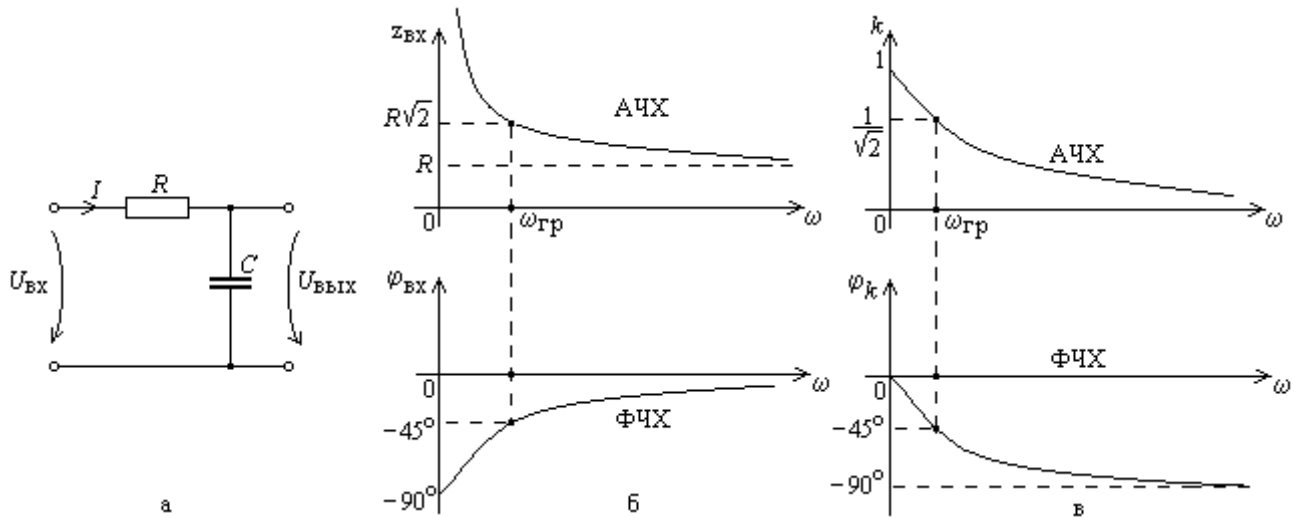


Рис.1. Входные и передаточные характеристики RC -цепи

Комплексная передаточная функция по напряжению для рассматриваемой цепи дается выражением $K_u(j\omega) = \frac{U_{BYIX}}{U_{BX}} = k_u(\omega)e^{j\psi_k(\omega)}$, рис.1,а. Здесь $k_u(\omega)$ – передаточная амплитудно-частотная характеристика; $\psi_k(\omega)$ – передаточная фазочастотная характеристика. В цепи на рис. 1, а комплексная передаточная функция по напряжению имеет вид

$$K = \frac{Z_c}{R + Z_c} = \frac{-j\frac{1}{\omega C}}{R - j\frac{1}{\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega}{\omega_{zp}}\right)}.$$

Отсюда получаем $k_u(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_{zp}}\right)^2}}$; $\psi_k(\omega) = -\arctg\left(\frac{\omega}{\omega_{zp}}\right)$, рис.1, в.

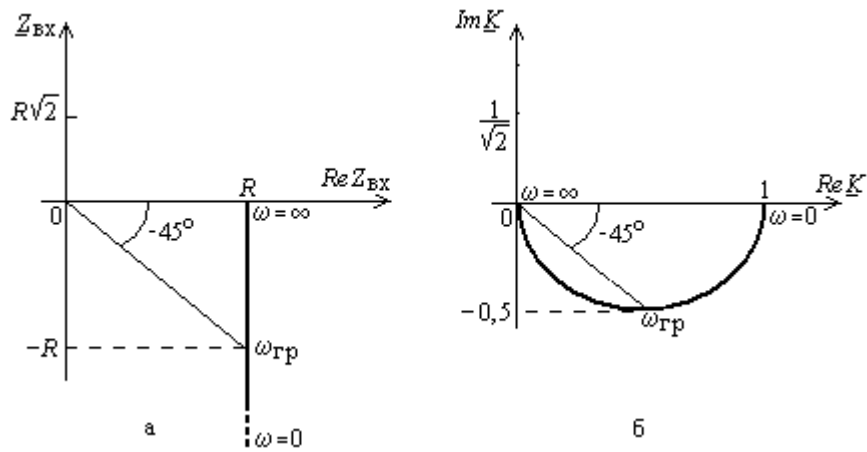


Рис. 2. Годографы входной а) и передаточной характеристики б)

Часто входные и передаточные характеристики строят в виде кривых на комплексной плоскости (годограф). На рис. 2 показаны годографы входной и передаточной характеристик для цепи, изображенной на рис. 1, а.

На вид входных и передаточных характеристик оказывает влияние сопротивление нагрузки R_H , подключаемое к выходным контактам, рис. 3.

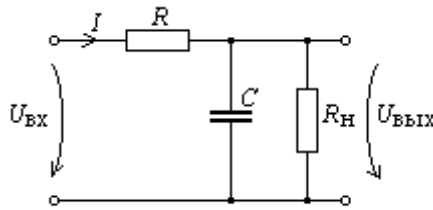


Рис. 3. Электрическая цепь с нагрузочным резистором

Входное сопротивление цепи теперь имеет вид

$$Z_{\text{вх}} = R + \frac{-j \frac{R_H}{\omega C}}{R_H - j \frac{1}{\omega C}} = R + \frac{-j R_H}{R_H \omega C - j} = \frac{R_H \omega R C + j(R + R_H)}{R_H \omega C - j},$$

$$\text{отсюда } Z_{\text{вх}}(\omega) = \sqrt{\frac{(R R_H C)^2 + \left(\frac{R + R_H}{\omega}\right)^2}{(R_H C)^2 + \left(\frac{1}{\omega}\right)^2}}; \quad \varphi_{\text{вх}}(\omega) = -\arctg \frac{\frac{R_H^2 C}{\omega}}{R R_H^2 C^2 + \frac{R + R_H}{\omega^2}}.$$

Графики АЧХ и ФЧХ входного сопротивления показаны на рис.4,а. Из рисунка видно, что ФЧХ имеет минимум при частоте ω_1 , который возникает

при условии $\frac{d\varphi_{\text{вх}}(\omega)}{d\omega} = 0$. Подсчитывая производную, получаем

$\omega_1 = \frac{1}{R_H C} \sqrt{1 + \frac{R_H}{R}}$. Минимальное значение ФЧХ при ω_1 составляет

$|\varphi_{\text{вх}}(\omega_1)| = \arctg \frac{R_H}{2\sqrt{R(R+R_H)}}$. Из последней формулы легко получить, например: при $R_H = R \rightarrow \varphi_{\text{вх}}(\omega_1) = 19^{\circ}20'$; при $R_H = 2R \rightarrow \varphi_{\text{вх}}(\omega_1) = 30^{\circ}$ и т.д.

Определим передаточные характеристики рассматриваемой цепи.

Обозначим $Z_2 = \frac{\frac{R_H}{j\omega C}}{R_H + \frac{1}{j\omega C}}$, тогда $\underline{K}(\omega) = \frac{Z_2}{R + Z_2} = \frac{R_H}{R + R_H + j\omega R R_H C}$.

Выделяя модуль и аргумент, получаем передаточные АЧХ и ФЧХ:

$$|\underline{K}(\omega)| = \frac{R_H}{\sqrt{(R + R_H)^2 + (\omega R R_H C)^2}}; \quad \varphi_K(\omega) = -\arctg \frac{\omega R R_H C}{R + R_H}.$$

Графики этих характеристик показаны на рис. 4, б.

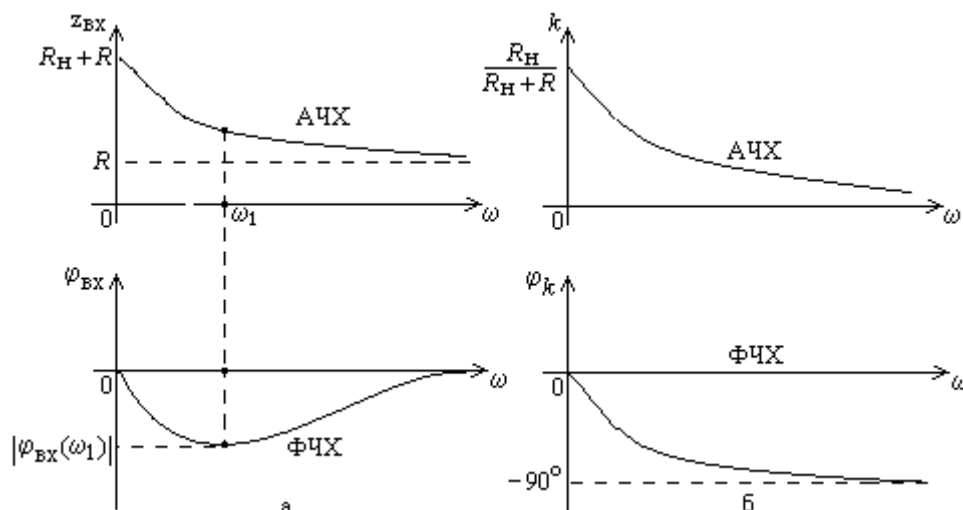


Рис. 4. Частотные характеристики цепи с нагрузочным резистором

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде «Однофазные цепи переменного тока». В качестве источника напряжения используется регулируемый источник E_1 . Для измерения напряжения используется аналоговый вольтметр $PV1$. Входной ток и угол разности фаз между входом и выходом измеряется универсальным измерителем $PP1$. В работе используется емкость $C_2 = 6,7 \text{ мкФ}$ и сопротивления $R_2 = 47 \text{ Ом}$; $R_4 = 120 \text{ Ом}$.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Выключите напряжение источника E_1 . Соберите схему по рис.5 для получения входной и передаточной характеристик; емкость $C_2 = 6,7 \text{ мкФ}$, сопротивление $R_2 = 47 \text{ Ом}$.

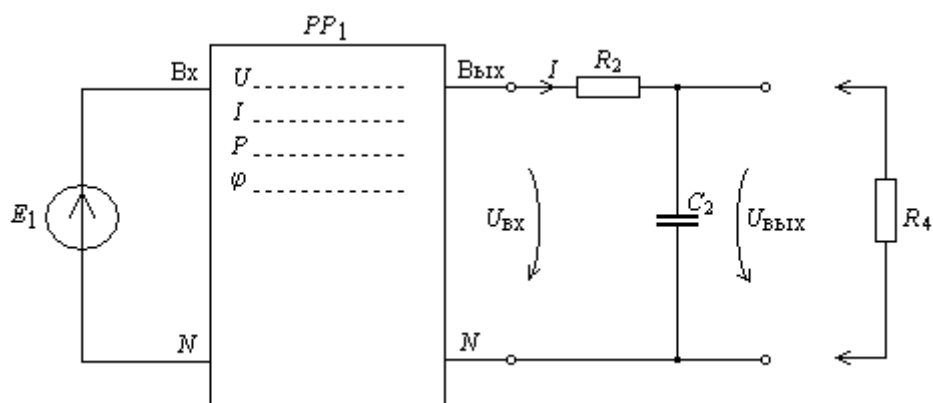


Рис. 5. Схема исследования входной и передаточной характеристики

2. Включите напряжение источника, установите величину напряжения 5 В и далее поддерживайте его на этом уровне. Устанавливая частоту от 40 Гц до 360 Гц через 80 Гц, измеряйте входной ток I , напряжение U_2 и угол $\varphi_{вх}$ разности фаз между напряжением и током. Результаты занесите в первые три столбца таблицы 1. Выключите напряжение источника. Обратите внимание на увеличение тока и уменьшение угла $\varphi_{вх}$ с ростом частоты.

Таблица 1

Входная и передаточная характеристики электрической цепи без нагрузки

f , Гц	U_2 , В	I , А	$\varphi_{вх}$, град	$z_{вх}$, Ом		$\varphi_{вх}$ Теор.	$\text{Re } Z_{вх}$, Ом		$\text{Im } Z_{вх}$ Ом	
				Опыт	Теор.		Опыт	Теор.	Опыт	Теор.
40										
120										
200										
280										
360										
400										

Продолжение таблицы 1

Входная и передаточная характеристики электрической цепи без нагрузки

f , Гц	$\frac{f}{f_{ср}}$	k		φ_k , град		$\text{Re } K$		$\text{Im } K$	
		Опыт	Теор.	Опыт	Теор.	Опыт	Теор.	Опыт	Теор.
40									
120									
200									
280									
360									
400									

3. Для исследования влияния нагрузки на частотные передаточные характеристики подсоедините параллельно конденсатору C_2 еще резистор $R_n = R_4 = 120 \text{ Ом}$. Включите источник напряжения.

4. Установите входное напряжение 5 В и повторите анализ режима при изменении частоты в принятом диапазоне. Измеряйте, как и ранее, входной ток I , угол разности фаз между входным напряжением и током $\varphi_{\text{вх}}$. Результаты занесите в таблицу 2. Выключите напряжение питания.

Таблица 2

Входная и передаточная характеристики электрической цепи с нагрузкой

f , Гц	U_2 , В	I , А	$\varphi_{\text{вх}}$, град	$z_{\text{вх}}$, Ом		$\varphi_{\text{вх}}$	$\text{Re } Z_{\text{вх}}$, Ом		$\text{Im } Z_{\text{вх}}$ Ом	
				Опыт	Теор.	Теор.	Опыт	Теор.	Опыт	Теор.
40										
120										
200										
280										
360										
400										

Продолжение таблицы 2

Входная и передаточная характеристики электрической цепи с нагрузкой

f , Гц	$\frac{f}{f_{\text{гр}}}$	k		φ_k , град		$\text{Re } K$		$\text{Im } K$	
		Опыт	Теор.	Опыт	Теор.	Опыт	Теор.	Опыт	Теор.
40									
120									
200									
280									
360									
400									

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Подсчитайте по формулам из теоретического раздела значения входной и передаточной характеристик с нагрузкой и без неё: $z_{\text{вх}}(\omega)$, $\varphi_{\text{вх}}(\omega)$, $\text{Re } Z_{\text{вх}}(\omega)$, $\text{Im } Z_{\text{вх}}(\omega)$, $k(\omega)$, $\varphi_k(\omega)$, $\text{Re } K(\omega)$, $\text{Im } K(\omega)$ для принятого ряда частот, а также для частот $\omega = 0$ и $\omega = \infty$. Данные внесите в левые половинки столбцов таблиц 1 и 2. Постройте теоретические графики этих характеристик, а также годографы $Z_{\text{вх}}(\omega)$ и $K(\omega)$ на комплексной плоскости.

2. По опытным данным U_2 , I , $\varphi_{\text{вх}}$ таблицы 1 рассчитайте для принятого ряда частот модуль входного сопротивления $z_{\text{вх}}(\omega)$, вещественные и мнимые характеристики этого сопротивления. Рассчитайте АЧХ и ФЧХ передаточные характеристики, а также их вещественные и мнимые части. Данные занесите в правые столбцы таблицы 1 и нанесите точками на соответствующие теоретические графики и на годографы. Сделайте выводы о влиянии частоты на параметры частотных характеристик, а также о соответствии опытных и теоретических результатов.

3. По опытным данным U_2 , I , $\varphi_{\text{вх}}$ таблицы 2 рассчитайте для ряда частот модуль входного сопротивления $z_{\text{вх}}(\omega)$, вещественные и мнимые характеристики этого сопротивления. Рассчитайте АЧХ и ФЧХ передаточных характеристик, а также их вещественные и мнимые части. Данные занесите в правые столбцы таблицы 2 и нанесите точками на соответствующие теоретические графики и на годографы. Сделайте выводы о влиянии сопротивления нагрузки на параметры частотных характеристик, а также о соответствии опытных и теоретических результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы опытов и таблицы опытных и данных.
3. Основные расчетные формулы и результаты теоретических расчетов в таблицах.
4. Теоретические графики частотных характеристик с нанесенными на них опытными точками. Выводы о влиянии сопротивления нагрузки на свойства частотных характеристик.
5. Векторные диаграммы токов и напряжений для граничной частоты $\omega_{\text{гр}}$ в цепи с нагрузкой и без неё.
6. Выводы о соответствии опытных и теоретических результатов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Цель работы: экспериментальное определение параметров и характерных режимов симметричных проходных четырехполюсников.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

В работе исследуется симметричный четырехполюсник, состоящий из двух продольных резисторов R и поперечной емкости C , рис.1. Существуют несколько систем уравнений, связывающих напряжения и токи на выводах четырехполюсника: уравнения в Z – параметрах и далее в Y , H , G , A , B – параметрах. Это так называемые первичные параметры, все они имеют определенный физический смысл и связаны между собой.

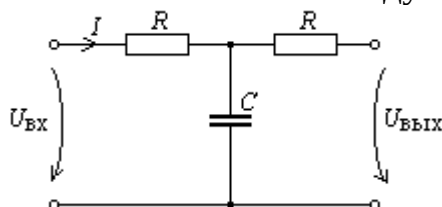


Рис. 1. Симметричный проходной четырехполюсник

В работе ограничимся рассмотрением уравнений четырехполюсника в A – параметрах

$$\dot{U}_1 = A_{11}\dot{U}_2 + A_{12}\dot{I}_2 \quad \dot{I}_1 = A_{21}\dot{U}_2 + A_{22}\dot{I}_2. \quad (1)$$

Эти параметры подчиняются следующему соотношению

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1. \quad (2)$$

Кроме первичных параметров часто применяются входные сопротивления четырехполюсника в режиме холостого хода и короткого замыкания:

$$\underline{Z}_x = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \text{ при } \dot{I}_2 = 0; \quad \underline{Z}_k = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \text{ при } \dot{U}_2 = 0.$$

A – параметры легко выражаются через эти сопротивления:

$$A_{11} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_x}{\underline{Z}_x - \underline{Z}_k}}; \quad A_{12} = A_{11}\underline{Z}_k; \quad A_{21} = \frac{A_{11}}{\underline{Z}_x}; \quad A_{22} = A_{11}.$$

Кроме первичных у четырехполюсников есть еще вторичные параметры: характеристическое сопротивление $\underline{Z}_c$ и коэффициент передачи γ . Характеристическим сопротивлением называется такое сопротивление, при подключении которого к выходным контактам входное сопротивление четырехполюсника оказывается равным подключаемому сопротивлению. Характеристическое сопротивление определяется экспериментально из

опытов холостого хода и короткого замыкания: $\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_x \underline{Z}_k} = \sqrt{\frac{A_{12}}{A_{21}}}.$

Коэффициентом передачи называется натуральный логарифм отношения комплексных действующих значений напряжений (или токов) на входе и выходе четырехполюсника, нагруженного сопротивлением, равным характеристическому: $\underline{\gamma} = \ln\left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}\right) = \ln\left(\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2}\right) = \alpha + j\beta$.

Вещественная часть коэффициента передачи (коэффициент затухания) α характеризует уменьшение действующего напряжения (или тока) при передаче энергии от источника к нагрузке через четырехполюсник при работе его на согласованную нагрузку: $\alpha = \ln\left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}\right) = \ln\left(\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2}\right)$, откуда

$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 e^{-\alpha}$. Мнимая часть коэффициента передачи (коэффициент фазы) β равен разности начальных фаз этих напряжений (токов) $\beta = \psi_{U_1} - \psi_{U_2} = \psi_{I_1} - \psi_{I_2}$ или $\psi_2 = \psi_1 + \beta$.

При расчетах коэффициент затухания выражают в Неперах (Нп), а коэффициент фазы – в радианах (рад). Измерительная аппаратура градуируется в децибелах и градусах: 1 Нп = 8,68 дБ; 1 дБ = 0,115 Нп; 1 рад = 57,3 град; 1 град = 0,017452 рад.

Коэффициент передачи определяется экспериментально из опытов холостого хода и короткого замыкания или рассчитывается по известным значениям первичных параметров четырехполюсника: $th \underline{\gamma} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_k}{\underline{Z}_x}}$;

$e^{\underline{\gamma}} = (\underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{12} \underline{A}_{21}})$, откуда

$$\underline{\gamma} = \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\underline{Z}_k}{\underline{Z}_x}} = \ln(\underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{12} \underline{A}_{21}}) = 2,3 \cdot \lg(\underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{12} \underline{A}_{21}}).$$

Для симметричных четырехполюсников справедливы также такие соотношения: $\underline{A}_{11} = ch \underline{\gamma}$; $\underline{A}_{12} = \underline{Z}_c sh \underline{\gamma}$; $\underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_c} sh \underline{\gamma}$; $\underline{A}_{22} = \underline{A}_{11}$. Основные уравнения (1) четырехполюсника в A – форме через коэффициенты затухания и фазы имеют вид

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 ch \underline{\gamma} + \underline{I}_2 \underline{Z}_c sh \underline{\gamma}; \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2 ch \underline{\gamma} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} sh \underline{\gamma}.$$

Зная сопротивления холостого хода и короткого замыкания, уравнения четырехполюсника можно записать во всех формах $\underline{A}, \underline{Y}, \underline{Z}, \underline{H}$, так как первичные параметры связаны между собой формулами перехода.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В качестве источника напряжения используется регулируемый источник E_1 . Продольные резисторы набираем последовательным

соединением сопротивлений: с левой стороны $R = R_2 + R_3 = 47 + 82 = 129 \text{ Ом}$; с правой стороны $R = R_4 = 120 \text{ Ом}$ (несимметрия в пределах погрешности измерений). Поперечный конденсатор $C_1 = 4,7 \text{ мкФ}$. Для измерения тока применяется цифровой амперметр $PA1$, напряжение измеряется аналоговым вольтметром $PV1$, а фазовые углы измеряются универсальным электронным измерителем $PP1$.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Выключите напряжение источника. Соберите схему по рис. 2.

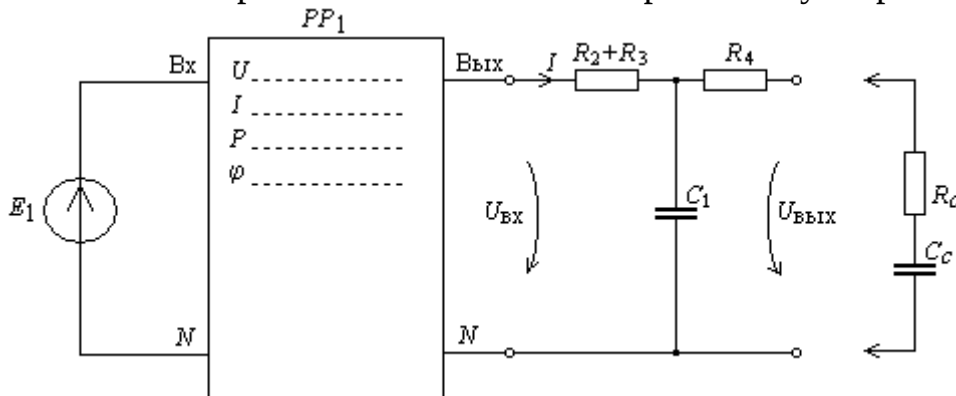


Рис. 2. Анализ режима четырехполюсника
в режимах холостого хода и короткого замыкания
и с возможностью подключения согласованной нагрузки

Включите напряжение питания, установите напряжение источника 5 В, частоту 400 Гц. Измерьте входной ток и угол разности фаз между входным напряжением и током четырехполюсника для его режима холостого хода и короткого замыкания. Рассчитайте входные сопротивления для этих режимов и определите характеристическое сопротивление четырехполюсника. Результаты занесите в таблицу 1. Выключите напряжение источника.

Таблица 1

Характерные режимы четырехполюсника

$U_{вх}, \text{В}$	$f_{вх}, \text{Гц}$	Режим ХХ		Режим КЗ		Характеристическое сопротивление Z_c		
		$I_{вх}, \text{А}$	$\varphi_{вх}, \text{гр.}$	$I_{вх}, \text{А}$	$\varphi_{вх}, \text{гр.}$	$Re Z_c, \text{Ом}$	$Im Z_c, \text{Ом}$	$C_c, \text{мкФ}$

2. На выход четырехполюсника включите согласованную нагрузку: последовательное соединение резистора с сопротивлением $R = R_c$ и конденсатора с емкостью $C = C_c$ (рис. 2). Включите напряжение питания 5 В с частотой 400 Гц. Измерьте входной ток $I_{вх}$ четырехполюсника и угол $\varphi_{вх}$ разности фаз между входным напряжением и током при нагрузочном

согласованном режиме, а также выходное напряжение на нагрузке U_2 . Выключите напряжение питания. Данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Согласованный режим четырехполюсника

$U_{вх}, В$	$f_{вх}, Гц$	$I_{вх}, А$	$\varphi_{вх}, гр$	$U_{вых}, В$

3. Для сравнения удалите из нагрузки один из элементов, например, резистор (замените его проводником!), теперь четырехполюсник в несогласованном режиме. Измерьте в этом режиме входной ток $I_{вх}$, угол $\varphi_{вх}$ разности фаз и выходное напряжение U_2 . Данные занесите в таблицу 3. Сравните параметры этих двух режимов.

Таблица 3

Несогласованный режим четырехполюсника

$U_{вх}, В$	$f_{вх}, Гц$	$I_{вх}, А$	$\varphi_{вх}, гр$	$U_{вых}, В$

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По схеме четырехполюсника на рис.1 рассчитайте входные сопротивления четырехполюсника в режиме холостого хода и короткого замыкания, а также коэффициент распространения γ . Результаты сравните с опытными данными. Постройте векторные диаграммы токов и напряжений для этих режимов.

2. По схеме четырехполюсника под согласованной нагрузкой (рис. 2) рассчитайте его согласованный режим, определите входной ток, угол разности фаз, напряжение и ток нагрузки. Сравните с опытными данными таблиц 2 и 3. Постройте векторную диаграмму напряжений и токов согласованного режима. В чем особенности и интерес согласованного режима?

3. По данным таблицы 1 рассчитайте А-параметры четырехполюсника. Проверьте выполнение соотношения (2).

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
3. Схемы опытов и таблицы опытных и расчетных результатов.
4. Векторные диаграммы режимов холостого хода и короткого замыкания, согласованного и несогласованного режимов.
5. Сравнительный анализ согласованного и несогласованного режима, выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите системы параметров четырехполюсников.
2. Каков физический смысл A -параметров?
3. Как рассчитываются параметры четырехполюсника по данным опытов холостого хода и короткого замыкания?
4. В чем практическая ценность коэффициента распространения?
5. В чем состоит интерес согласованного режима четырехполюсника?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ТРАНСФОРМАТОР С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Цель работы: изучение режима работы понижающего трансформатора под резистивной нагрузкой; определение параметров схемы замещения трансформатора по данным опыта холостого хода и короткого замыкания.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Трансформатор – это электромагнитный статический преобразователь энергии переменного тока, состоящий из ферромагнитного сердечника и нанесенных на него обмоток w_1 , w_2 . В работе исследуется двухобмоточный понижающий трансформатор, коэффициент трансформации которого

$n = \frac{w_1}{w_2} > 1$. Переменное напряжение U_1 , подключенное к первичной обмотке

трансформатора, вызывает переменный магнитный поток в сердечнике, который, в свою очередь, наводит ЭДС взаимной индукции во вторичной обмотке. Если к этой обмотке подсоединить нагрузку, то в ней возникает ток I_2 . В трансформаторе выполняется приближенное соотношение:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx n.$$

Для анализа потерь энергии в трансформаторе и построения его схемы замещения применяется операция приведения вторичной обмотки к первичной. Все параметры приведенного трансформатора отмечаются штрихом и связаны с параметрами исходного реального трансформатора соотношениями:

$n' = 1$; $w'_2 = w_1$; $I'_2 = \frac{I_2}{n}$; $U'_2 = U_2 n$; $r'_2 = r_2 n^2$; $L'_{s2} = L_{s2} n^2$;

$r'_H = r_H n^2$; $L'_H = L_H n^2$; $F'_2 = F_2$; $s'_2 = s_2$; $P'_2 = P_2$, здесь r_2 , L_{s2} – сопротивление и индуктивность рассеяния вторичной обмотки; F_2 – намагничивающая сила вторичной обмотки; s_2 , P_2 – полная и активная мощности вторичной обмотки.

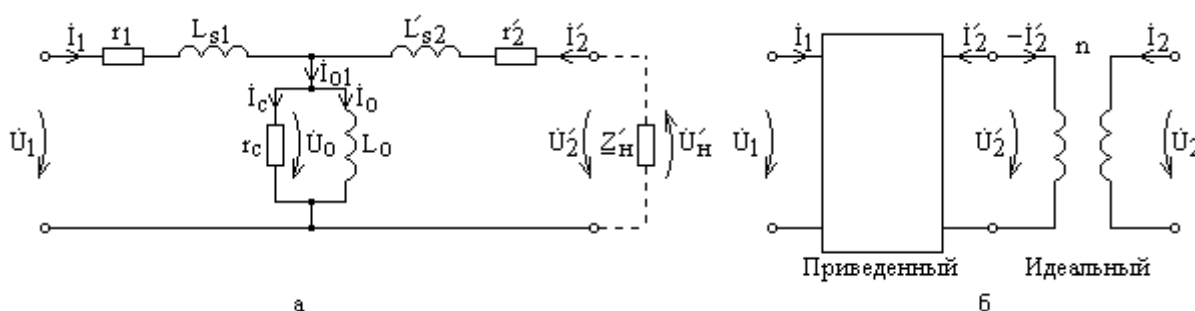


Рис. 1. Трансформатор с ферромагнитным сердечником:
а) схема замещения приведенного трансформатора;
б) схема замещения реального трансформатора

сопротивлениями r_C и L_0 , так как их влияние будет мало. Таким образом, получаем $P_{1K3} = I_1^2 \cdot (r_1 + r_2')$, откуда определяем

$$r_1 + r_2' = \frac{P_{1K3}}{I_1^2}; \quad z_{1K3} = \frac{U_{1K3}}{I_1} = \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_{S1} + x_{S2}')^2};$$

$$x_{S1} + x_{S2}' = \sqrt{z_{1K3}^2 - (r_1 + r_2')^2}.$$

Теперь нетрудно найти $r_1, r_2', x_{S1}, x_{S2}'$, так как в трансформаторе обычно $r_1 \approx r_2', x_{S2} \approx x_{S2}'$. Индуктивности рассеяния определяются по найденным значениям сопротивлений: $L_{S1} = \frac{x_{S1}}{\omega}; L_{S2}' = \frac{x_{S2}'}{\omega}$. Эффективность работы трансформатора оценивается коэффициентом полезного действия η и

коэффициентом активной мощности $\cos \varphi_1$: $\eta = \frac{P_H}{P_{BX}} = \frac{r_H I_2^2}{P_{BX}}; \cos \varphi_1 = \frac{P_{BX}}{U_1 I_1}$.

Чем ближе эти коэффициенты к единице, тем более эффективно работает трансформатор. Степень загруженности трансформатора обычно оценивается коэффициентом загрузки $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ ном}}}$.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде «Однофазные цепи переменного тока». Трансформатор выполнен в виде двухобмоточной катушки со стальным выдвижным сердечником. В работе используются цифровые амперметры PA_1 и PA_2 с пределом 0,3 А. Выходной вольтметр $PV1$ используется аналоговый с пределом 15 В типа Ц42300. В качестве переменной части резистивной нагрузки используются резисторы: $R_1 = 22 \text{ Ом}; R_2 = 47 \text{ Ом}; R_3 = 82 \text{ Ом}$. Мощность измеряется универсальным электронным измерителем $PP1$.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Для исследования понижающего трансформатора под резистивной нагрузкой соберите схему по рис. 3; резистор r_4 – номинальное сопротивление нагрузки, запишите его величину; запишите числа витков обмоток трансформатора, подсчитайте коэффициент трансформации.

2. Установите номинальное первичное напряжение 10 В, 50 Гц и нулевое значение переменного сопротивления нагрузки – это номинальный режим. Запишите параметры номинального режима: входные ток и мощность и выходные ток и напряжение, убедитесь, что трансформатор понижающий. Запишите параметры режима при нескольких других сопротивлениях

нагрузки: $R_1 = 22 \text{ Ом}$; $R_2 = 47 \text{ Ом}$; $R_3 = 82 \text{ Ом}$, в том числе и при $r = \infty$ (холостой ход). Во время опытов поддерживайте входное напряжение неизменным.

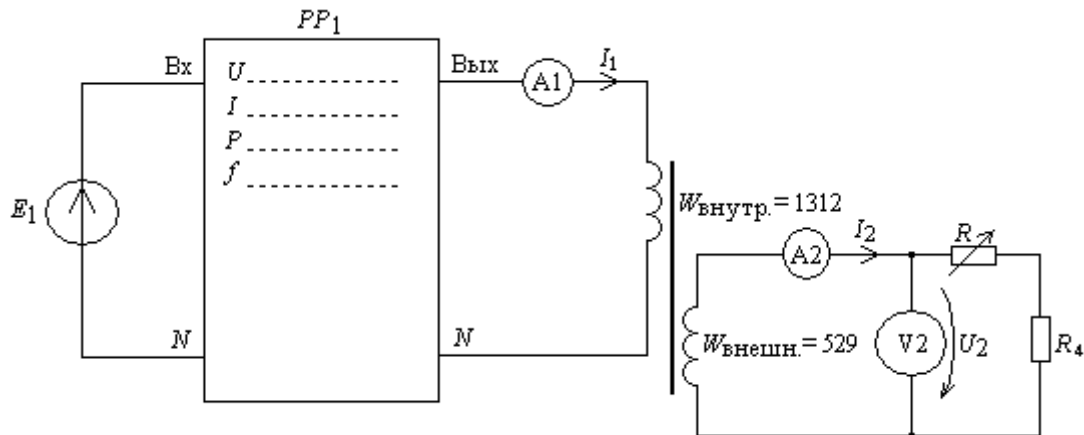


Рис. 3. Схема экспериментального исследования трансформатора

Все результаты сведите в таблицу 1. По мере увеличения сопротивления нагрузки токи и мощность падают, а выходное напряжение незначительно увеличивается. В опыте холостого хода входные ток и мощность малы.

Таблица 1

Работа трансформатора под резистивной нагрузкой

r_H перем., Ом	r_H общ., Ом	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	β	η	$\cos \varphi_1$	φ_1 , град.
0 (номин)									
r_1									
r_2									
r_3									
∞ (хх)									

3. Выполните опыт эксплуатационного короткого замыкания: сбросьте **входное напряжение на нуль**, замкните нагрузку проводником, регулятором осторожно установите такое входное напряжение, чтобы входной ток был бы равен номинальному значению из п.2. Запишите входное напряжение и мощность, выходной ток. Входное напряжение невелико, и $\frac{I_2}{I_1} \approx n$.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания рассчитайте параметры эквивалентной схемы замещения приведенного трансформатора: сопротивления первичной и вторичной обмоток,

сопротивление стали, индуктивность рассеяния и индуктивность намагничивания.

2. Задавшись напряжением $U'_2 = U_2 \cdot n$ на приведенной резистивной нагрузке в номинальном режиме по данным таблицы 1 рассчитайте номинальный режим работы приведенного трансформатора, определите входные ток и напряжение, сравните с опытными величинами, постройте векторную диаграмму; рекомендуемые масштабы: по току $m_I = 0,05$ А/см; по напряжению $m_U = 1$ В/см.

3. По данным опытов рассчитайте КПД η , коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ и коэффициент загрузки β для всех нагрузок, занесите результаты в таблицу 1. Постройте графики зависимостей КПД и $\cos \varphi_1$ от коэффициента загрузки β под резистивной нагрузкой. Постройте внешнюю нагрузочную характеристику трансформатора под резистивной нагрузкой: $U_2 = f(I_2)$. Сделайте выводы о влиянии величины и характера нагрузки на эффективность работы трансформатора.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема эксперимента с указанием типов приборов.
3. Таблица 1 с опытными и расчетными результатами по исследованию трансформатора под резистивной нагрузкой.
4. Расчетные формулы и результаты определения параметров схемы замещения приведенного трансформатора.
5. Расчетные формулы и векторная диаграмма понижающего трансформатора с резистивной нагрузкой.
6. Графики зависимостей КПД, $\cos \varphi_1$ от коэффициента загрузки β , график внешней нагрузочной характеристики.
7. Выводы о соответствии опытных и расчетных результатов и о влиянии величины и характера нагрузки на эффективность работы трансформатора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните устройство и принцип действия трансформатора.
2. Запишите уравнения для электрической и магнитной цепей трансформатора.
3. Объясните смысл совершенного, идеального и приведенного трансформатора.
4. Объясните построение векторной диаграммы приведенного трансформатора.
5. Как построить схему замещения и векторную диаграмму реального трансформатора?
6. В чем особенность опыта эксплуатационного короткого замыкания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЦЕПИ СО ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИЕЙ

Цель работы: определение параметров магнитосвязанных обмоток; анализ последовательного согласного и встречного соединения таких обмоток; исследование режима работы простейшего трансформатора.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Магнитная связь между обмотками на магнитопроводе устанавливается точками, указывающими начала обмоток, и коэффициентом взаимной индукции M – это коэффициент пропорциональности между магнитным потоком сцеплением одной обмотки и вызывающим его током другой обмотки; например, для пары обмоток: $\Psi_{21} = M_{21}i_1$ – потокосцепление во второй обмотке, вызываемое током первой обмотки; $\Psi_{12} = M_{12}i_2$ – потокосцепление в первой обмотке от тока во второй; $M_{12} = M_{21} = M$.

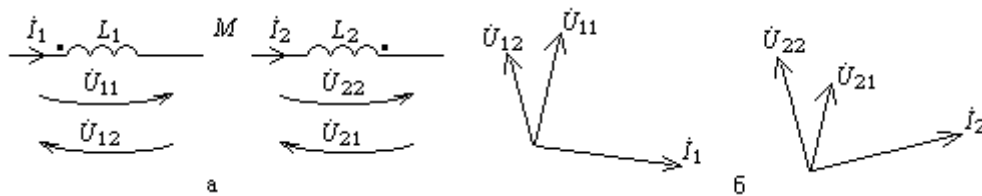


Рис. 1. Магнитная связь между обмотками

В режиме переменного тока между магнитосвязанными обмотками существует комплексное сопротивление взаимной индукции $Z_M = j\omega M$, и в этих обмотках возникают напряжения взаимной индукции: $\dot{U}_{21} = Z_M \dot{I}_1$ – напряжение, возникающее во второй обмотке от влияния тока в первой обмотке; аналогично $\dot{U}_{12} = Z_M \dot{I}_2$ – напряжение в первой обмотке от тока во второй. Напряжения взаимной индукции ориентированы относительно начал обмоток так же, как вызывающие их токи, рис. 1, а и опережают их по фазе на 90° , рис. 1, б. На рисунке обозначены напряжения самоиндукции $\dot{U}_{11} = Z_{L1} \dot{I}_1$; $\dot{U}_{22} = Z_{L2} \dot{I}_2$ и напряжения взаимной индукции $\dot{U}_{21}, \dot{U}_{12}$.

Полноту связи между обмотками показывает коэффициент магнитной связи $k_M = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$, который меньше единицы из-за рассеяния магнитного потока, которое характеризуется индуктивностями рассеяния L_{S1}, L_{S2} .

Коэффициент взаимной индукции, сопротивления и индуктивности магнитосвязанных обмоток обычно определяются экспериментально, рис.2.

В опыте прямого включения (рис. 2, а) в первой обмотке измеряется ток I_1 , напряжение U_1 и активная мощность P . Вторая обмотка находится в

режиме холостого хода, и в ней измеряется напряжение взаимной индукции $U_{21} = \omega M_{21} \cdot I_1$.

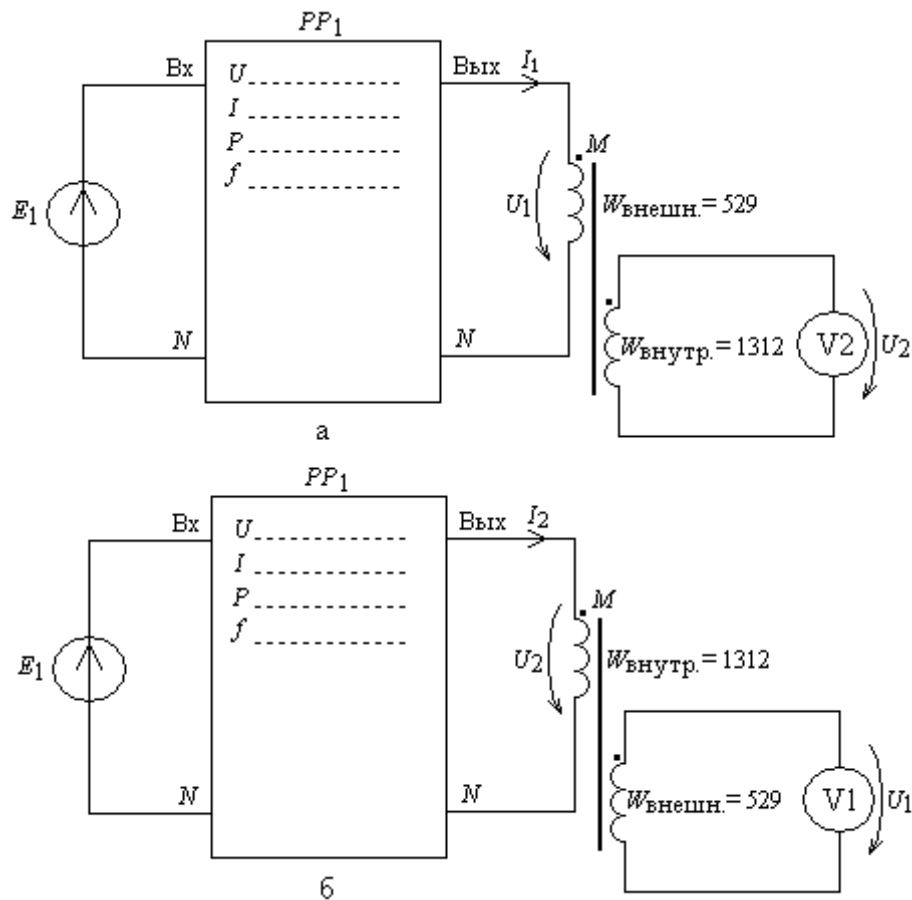


Рис. 2. Экспериментальное определение параметров магнитосвязанных катушек:
а) прямое включение; б) обратное включение

Отсюда получаем $M_{21} = \frac{U_{21}}{\omega I_1}$. Далее получаем полное сопротивление первой обмотки $z_1 = \frac{U_1}{I_1}$; активное и реактивное сопротивления этой обмотки $r_1 = \frac{P_1}{I_1^2}$; $x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}$ и ее индуктивность $L_1 = \frac{x_1}{\omega}$. Из опыта обратного включения, (рис. 2, б) определяем $M_{12} = \frac{U_{12}}{\omega I_2}$; $z_1 = \frac{U_2}{I_2}$; $r_2 = \frac{P_2}{I_2^2}$; $x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}$; $L_2 = \frac{x_2}{\omega}$. Коэффициент взаимной индукции обычно усредняется $M = \frac{M_{12} + M_{21}}{2}$. Индуктивности рассеяния находятся из выражений $L_{s1} = L_1 - \frac{w_1}{w_2} M$; $L_{s2} = L_2 - \frac{w_2}{w_1} M$.

Наиболее эффектно свойства магнитосвязанных обмоток проявляются при их последовательном соединении, когда они обтекаются одним и тем же

током. Последовательное согласное соединение изображено на рис. 3, а. В соответствии со вторым законом Кирхгофа получаем

$$\dot{U}_{BX} = r_1 \dot{I} + j\omega L_1 \dot{I} + j\omega M \cdot \dot{I} + r_2 \dot{I} + j\omega L_2 \dot{I} + j\omega M \cdot \dot{I}.$$

Эквивалентная индуктивность цепи $L_{\text{ЭКВС}} = L_1 + L_2 + 2M$ и эквивалентное сопротивление $Z_C = r_1 + r_2 + j\omega L_{\text{ЭКВС}}$ велики, а ток $\dot{I} = \frac{\dot{U}_{BX}}{Z_C}$ в схеме мал. Векторная диаграмма напряжений при условии, что начальная фаза тока принята нулевой, изображена на рис. 3, б.

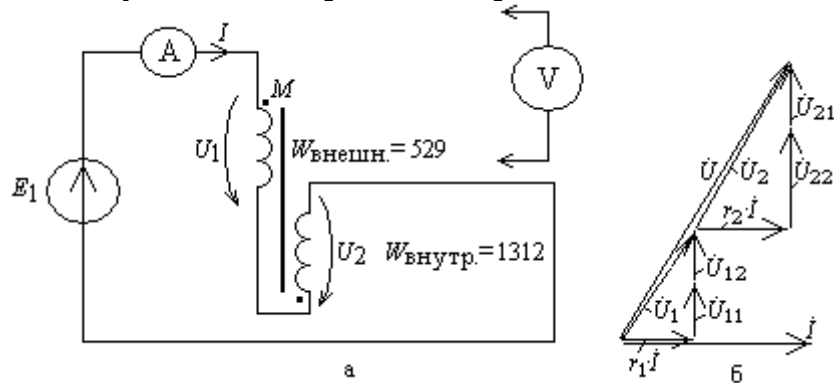


Рис. 3. Последовательное согласное соединение магнитосвязанных обмоток

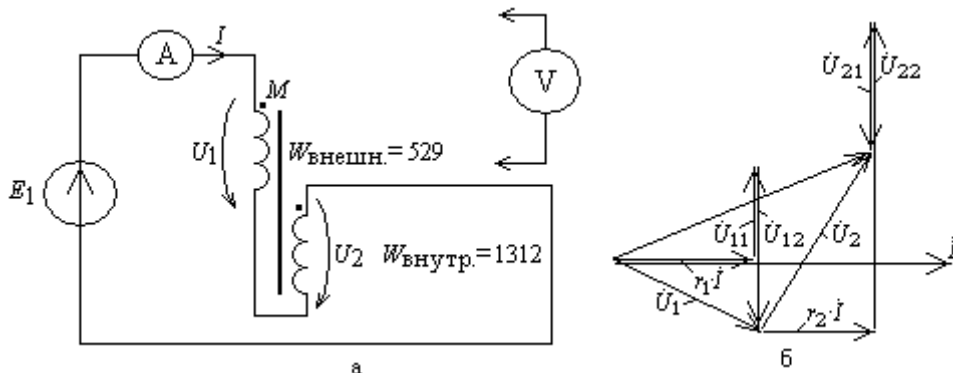


Рис. 4. Последовательное встречное соединение магнитосвязанных обмоток

Последовательное встречное соединение изображено на рис.4,а. Здесь напряжения взаимной индукции ориентированы встречно току и компенсируют напряжения самоиндукции

$$\dot{U}_{BX} = r_1 \dot{I} + j\omega L_1 \dot{I} - j\omega M \cdot \dot{I} + r_2 \dot{I} + j\omega L_2 \dot{I} - j\omega M \cdot \dot{I}.$$

Эквивалентная индуктивность цепи $L_{\text{ЭКВВ}} = L_1 + L_2 - 2M$ и эквивалентное сопротивление $Z_B = r_1 + r_2 + j\omega L_{\text{ЭКВВ}}$ малы, и ток $\dot{I} = \frac{\dot{U}_{BX}}{Z_B}$ в схеме велик. Векторная диаграмма напряжений при условии, что начальная фаза тока принята нулевой, изображена на рис.4,б.

На этой диаграмме хорошо заметен эффект ложной емкости, который проявляется в том, что на первой катушке напряжение отстает от тока, т.е.

первая обмотка ведет себя как емкость. Это происходит из-за полной компенсации собственного индуктивного напряжения этой обмотки напряжением взаимной индукции от второй обмотки. Эквивалентное реактивное сопротивление первой обмотки $x_{\Sigma 1} = x_1 - x_M < 0$; эквивалентная «ложная» емкость первой обмотки находится из выражения

$$x_{\Sigma 1} = \frac{1}{\omega C_{\Sigma 1}} \rightarrow C_{\Sigma 1} = \frac{1}{\omega x_{\Sigma 1}}.$$

Важнейшим устройством, основанным на явлении взаимной индукции, является трансформатор. На рис.5,а изображена схема включения простейшего трансформатора на резистивную нагрузку. Уравнения трансформатора в соответствии со вторым законом Кирхгофа имеют вид (обратите внимание на то, что $\dot{U}_H = r_H \dot{I}_2 = -\dot{U}_2$ вследствие принятых условных положительных направлений напряжений и токов)

$$\dot{U}_1 = r_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \cdot \dot{I}_2; \dot{U}_2 = j\omega M \cdot \dot{I}_1 + r_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2.$$

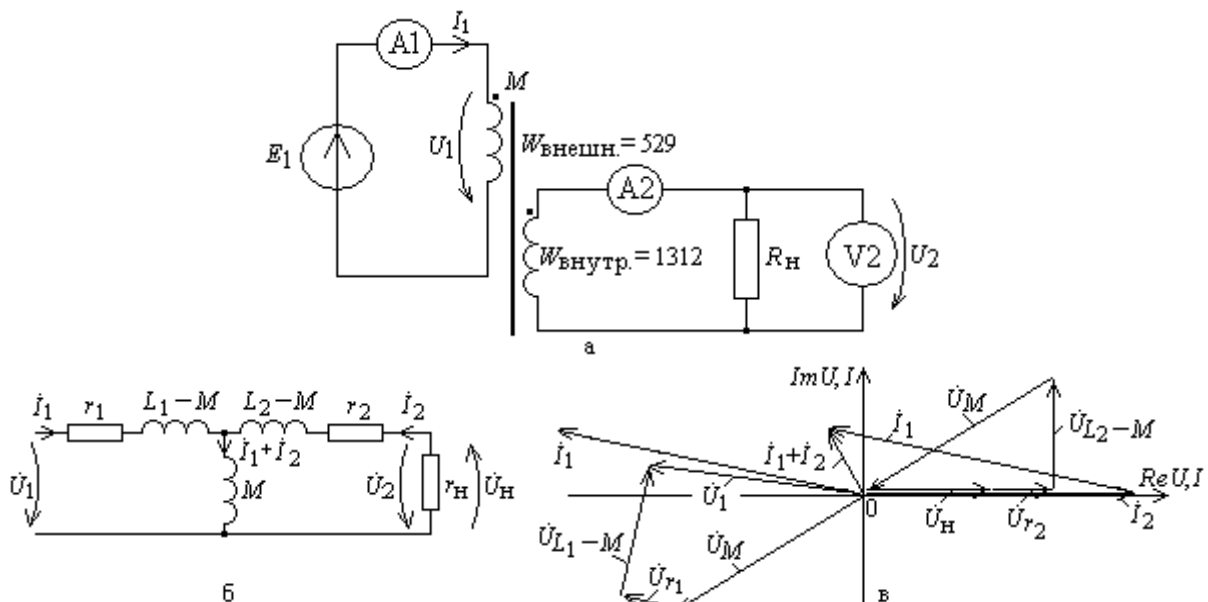


Рис. 5. Трансформатор: а) схема включения на резистивную нагрузку; б) Т-схема замещения; в) векторная диаграмма

Эти выражения представляют уравнения трансформатора как уравнения пассивного четырехполюсника для Z -параметров, в соответствии с которыми T -схема замещения трансформатора изображена на рис.5,б, а ее векторная диаграмма при условии равенства нулю начальной фазы тока $\dot{I}_2$ – на рис. 5, в. Для рассматриваемого трансформатора индуктивность $L_1 - M$ отрицательна, и вследствие эффекта ложной емкости напряжение на этой индуктивности отстает от тока $\dot{I}_1$. По T -схеме удобно анализировать различные эксплуатационные и аварийные режимы трансформатора.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде «Однофазные цепи переменного тока». Число витков первой обмотки $w_1 = 529$; второй $w_2 = 1312$. Для измерения тока применяются цифровые амперметры РА1 и РА2 с пределом 0,3 А; для измерения напряжения – аналоговый вольтметр РВ1. Мощность измеряется цифровым универсальным измерителем РР1.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Выключите напряжение питания E_1 . Для определения параметров магнитосвязанных обмоток соберите схему по рис. 2, а. Измерьте входные ток I_1 , мощность P_1 и напряжение взаимной индукции U_{21} при входном напряжении $U_1 = 5$ В промышленной частоты. Выключите напряжение питания, пересоедините катушки для обратного включения согласно рис. 2, б и измерьте ток I_2 , мощность P_2 и напряжение взаимной индукции U_{12} при напряжении $U_2 = 5$ В.

2. Для исследования последовательного соединения согласно включенных обмоток соберите схему по рис. 3, а. Измерьте входной ток и напряжения на обмотках U_1, U_2 при входном напряжении 5 В. Вы заметите, что ток в этой цепи мал. Для анализа последовательного соединения встречно включенных обмоток соберите схему по рис. 4, а, для чего при выключенном входном напряжении переключите контакты второй обмотки наоборот. Установите напряжение 5 В и измерьте ток и напряжения на обмотках; Вы заметите, что они превышают величину входного напряжения, а ток велик. Выключите напряжение питания E_1 .

3. Для анализа работы трансформатора под резистивной нагрузкой соберите схему по рис. 5, а; включите напряжение питания $E_1 = 5$ В. Измерьте входной ток I_1 и выходное напряжение, запишите сопротивление нагрузки $R_n = R_4 = 120$ Ом. Обратите внимание на то, что хотя трансформатор и повышающий ($w_1 < w_2$), напряжение на выходе меньше, чем на входе из-за большого падения напряжения на внутреннем сопротивлении трансформатора.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным опыта 1 определите коэффициент взаимной индукции M , как среднее значение при прямом и обратном включении обмоток. Определите активные сопротивления обмоток r_1, r_2 , индуктивности обмоток L_1, L_2 , индуктивности рассеяния L_{s1}, L_{s2} и коэффициент магнитной связи k_M .

2. По данным опыта 2 для схемы с последовательным согласным и встречным включением обмоток подсчитайте эквивалентные индуктивности, входные сопротивления, входной ток и напряжения на обмотках. Сравните опытные и расчетные результаты. Постройте векторные диаграммы напряжений и токов для согласного и встречного соединений обмоток (рекомендуемые масштабы: по напряжению 1 В/см; по току 0,02 А/см). Определите разность фаз между напряжением и током на обеих обмотках; подсчитайте ложную емкость первой обмотки. Сделайте выводы о влиянии способа соединения обмоток на режим их коллективной работы.

3. Подсчитайте параметры Т-схемы замещения трансформатора. Выполните расчет режима трансформатора при входном напряжении 5 В под нагрузкой R_4 (наиболее удобно здесь применение метода пропорционального пересчета с предварительным заданием тока $I_2 = 0,1$ А). Сравните опытные и расчетные результаты; постройте векторную диаграмму токов и напряжений трансформатора под резистивной нагрузкой. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы экспериментов с указанием типов приборов и опытные данные по определению параметров магнитосвязанных катушек.
3. Схемы экспериментов с указанием типов приборов и опытные данные по исследованию последовательного соединения согласно и встречно включенных обмоток, расчеты режима коллективной работы таких обмоток, векторные диаграммы тока и напряжений, расчет ложной емкости, выводы о сравнении опытных и расчетных результатов, а также сравнительные выводы о влиянии соединения обмоток на режим их коллективной работы.
3. Схема эксперимента с указанием типов приборов по исследованию режима трансформатора, Т-схема замещения трансформатора, расчет режима по этой схеме, векторная диаграмма токов и напряжений трансформатора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните физический смысл коэффициента взаимной индукции.
2. Оцените глубину магнитной связи между обмотками.
3. Как зависит характер эквивалентного сопротивления последовательного соединения обмоток от их согласного и встречного включения?
4. В чем состоит эффект ложной емкости?
5. В чем особенность построения векторных диаграмм напряжений согласного и встречного соединения обмоток?
6. Объясните принцип действия трансформатора.
7. Объясните построение Т-схемы замещения трансформатора.
8. Объясните построение векторной диаграммы трансформатора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

БЕЗИНДУКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Цель работы: экспериментальное исследование входных и передаточных частотных характеристик пассивных разветвленных и неразветвленных безиндуктивных электрических фильтров.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Электрический фильтр – это пассивный четырехполюсник, пропускающий определенную полосу частот с малым затуханием; вне этой полосы частот затухание велико. Полоса частот, при которых затухание мало, называется полоса пропускания фильтра; остальная область частот – полоса задерживания.

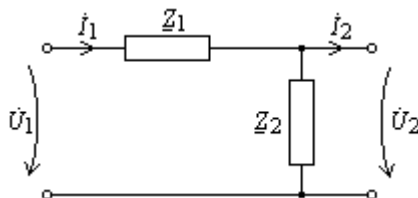


Рис. 1. Г-образный фильтр

Наименьшее число элементов, из которых может состоять фильтр, равно двум: Г-образный фильтр, рис. 1. Четырехполюсник обладает свойствами фильтра только тогда, когда сопротивления Z_1 и Z_2 имеют разный характер – индуктивный и емкостный: $Z_1 = \pm jx_1$; $Z_2 = \mp jx_2$.

Четырехполюсник, образующий фильтр, следующими характеристическими параметрами: характеристическое сопротивление Z_c и коэффициент передачи g . Соотношения между напряжениями и токами на входе и выходе четырехполюсника записываются еще и в других параметрах: Z , Y , H , G , A и B параметры. Наибольшее распространение имеют A -параметры:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= A_{11}\dot{U}_2 + A_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 &= A_{21}\dot{U}_2 + A_{22}\dot{I}_2 \end{aligned} \right\}.$$

Коэффициенты в этих уравнениях имеют следующий физический смысл:

$A_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_2=0}$ – коэффициент передачи напряжения при ХХ на выходе;

$A_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_2=0}$ – величина, обратная передаточной проводимости $\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$ при КЗ

на выходе;

$A_{21} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{I_2=0}$ – величина, обратная передаточному сопротивлению $\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$ при

ХХ на выходе;

$A_{22} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_2=0}$ – коэффициент передачи при КЗ на выходе.

Часто применяются уравнения четырехполюсника в $\underline{Z}$ – параметрах:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 &= Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 \end{aligned} \right\},$$

где $Z_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{I_2=0}$ – входное сопротивление со стороны 1 при ХХ на выходе:

$$Z_{11} = Z_{ex1} \Big|_{I_2=0} = Z_{1x};$$

$Z_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{I_1=0}$ – передаточное сопротивление со стороны 2 при ХХ на входе;

$Z_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{I_2=0}$ – передаточное сопротивление со стороны 1 при ХХ на выходе;

$Z_{22} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right|_{I_1=0}$ – входное сопротивление со стороны 2 при ХХ на входе:

$$Z_{22} = Z_{ex2} \Big|_{I_1=0} = Z_{2x}.$$

Аналогично определяются и другие коэффициенты.

Четырехполюсник является обратимым, если $Z_{12} = Z_{21}$. В этом случае $\underline{A}$ – параметры обладают свойством $A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$. Если четырехполюсник симметричен, то $Z_{11} = Z_{22}$; $A_{11} = A_{22}$.

В четырехполюсниках часто используются параметры холостого хода ХХ (индекс х) и короткого замыкания КЗ (индекс к):

$Z_{1k} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0}$ – входное сопротивление со стороны 1 при КЗ на выходе:

$$Z_{1k} = Z_{ex1} \Big|_{\dot{U}_2=0};$$

$Z_{2k} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_1=0}$ – входное сопротивление со стороны 2 при КЗ на входе:

$$Z_{2k} = Z_{ex2} \Big|_{\dot{U}_1=0}.$$

Параметры ХХ и КЗ в обратимых четырехполюсниках связаны между собой: $\frac{Z_{1к}}{Z_{1х}} = \frac{Z_{2к}}{Z_{2х}}$. Если четырехполюсник симметричный, то $Z_{1к} = Z_{2к}$ и $Z_{1х} = Z_{2х}$.

Параметры ХХ и КЗ выражаются через A – параметры и наоборот:

$$Z_{1к} = \frac{A_{12}}{A_{22}}; \quad Z_{1х} = \frac{A_{11}}{A_{21}}; \quad Z_{2к} = \frac{A_{12}}{A_{11}}; \quad Z_{2х} = \frac{A_{22}}{A_{21}}$$

и наоборот

$$A_{11} = \sqrt{\frac{Z_{1х}}{Z_{2х} - Z_{2к}}}; \quad A_{12} = A_{11} Z_{2к}; \quad A_{21} = \frac{A_{11}}{Z_{1х}}; \quad A_{22} = A_{11} \frac{Z_{2х}}{Z_{1х}}.$$

При наличии нагрузки Z_2 или Z_1 входное сопротивление четырехполюсника определяется через A или Z параметры:

$$Z_{вх1} = \frac{A_{11} Z_2 + A_{12}}{A_{21} Z_2 + A_{22}} = Z_{1х} \frac{Z_{2к} + Z_2}{Z_{2х} + Z_2};$$

$$Z_{вх2} = \frac{A_{22} Z_1 + A_{12}}{A_{21} Z_1 + A_{11}} = Z_{2х} \frac{Z_{1к} + Z_1}{Z_{1х} + Z_1}.$$

Четырехполюсник обладает двумя характеристическими сопротивлениями $Z_{1с}$ и $Z_{2с}$: если четырехполюсник нагрузить на $Z_{2н} = Z_{2с}$, то его входное сопротивление будет равно $Z_{вх1} = Z_{1с}$ и наоборот: при $Z_{1н} = Z_{1с}$, то его входное сопротивление будет равно $Z_{вх2} = Z_{2с}$, рис.2.

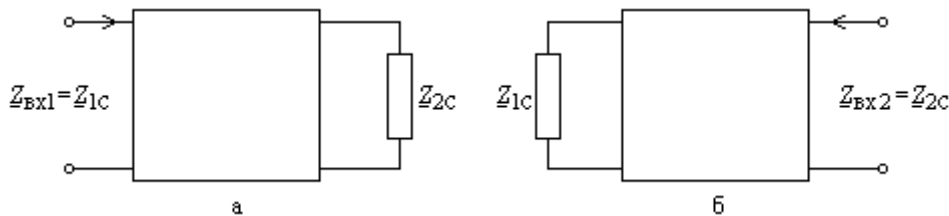


Рис.2. Характеристические сопротивления четырехполюсника:
а) прямое включение; б) обратное включение

Если четырехполюсник симметричный, то два этих характеристических сопротивления равны между собой $Z_{1с} = Z_{2с}$, т.е. входное сопротивление равно подсоединенному сопротивлению нагрузки.

Характеристические сопротивления связаны с A – параметрами и выражаются через них:

$$Z_{1с} = \frac{A_{11} Z_{2с} + A_{12}}{A_{21} Z_{2с} + A_{22}}; \quad Z_{2с} = \frac{A_{22} Z_{1с} + A_{12}}{A_{21} Z_{1с} + A_{11}}.$$

Отсюда следует

$$Z_{1с} = \sqrt{\frac{A_{11} A_{12}}{A_{21} A_{22}}} = \sqrt{Z_{1х} Z_{1к}}; \quad Z_{2с} = \sqrt{\frac{A_{22} A_{12}}{A_{21} A_{11}}} = \sqrt{Z_{2х} Z_{2к}}.$$

Еще один комплексный характеристический параметр – коэффициент распространения $\underline{g} = a + jb$, где a – коэффициент затухания; b – коэффициент фазы. Эти характеристические параметры связаны с $\underline{A}$ – параметрами и выражаются через них:

$$A_{11} = \sqrt{\frac{Z_{1c}}{Z_{2c}}} \operatorname{ch} \underline{g}; \quad A_{12} = \sqrt{Z_{1c} Z_{2c}} \operatorname{sh} \underline{g}; \quad A_{22} = \sqrt{\frac{Z_{2c}}{Z_{1c}}} \operatorname{ch} \underline{g}; \quad A_{21} = \frac{1}{\sqrt{Z_{1c} Z_{2c}}} \operatorname{sh} \underline{g}$$

и $\operatorname{th} \underline{g} = \sqrt{\frac{Z_{1k}}{Z_{1x}}} = \sqrt{\frac{Z_{2k}}{Z_{2x}}}$. Отсюда получаем $e^{\underline{g}} = \sqrt{A_{11} A_{22}} + \sqrt{A_{12} A_{21}}$.

При согласованной нагрузке формулы упрощаются:

$$\dot{U}_1 = \sqrt{\frac{Z_{1c}}{Z_{2c}}} \dot{U}_2 e^{\underline{g}}; \quad \dot{I}_1 = \sqrt{\frac{Z_{2c}}{Z_{1c}}} \dot{I}_2 e^{\underline{g}}; \quad e^{\underline{g}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \bigg|_{Z_2=Z_c} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \bigg|_{Z_2=Z_c}$$

$$\text{и коэффициент затухания } a = \ln \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \bigg|_{Z_2=Z_c} = \ln \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \bigg|_{Z_2=Z_c}.$$

Для Г-образной схемы характеристические параметры легко выражаются через продольное и поперечное сопротивления:

$$Z_{1c} = \sqrt{Z_1(Z_1 + Z_2)}; \quad Z_{2c} = Z_2 \sqrt{\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}}; \quad \operatorname{ch} \underline{g} = \sqrt{1 + \frac{Z_1}{Z_2}}.$$

Изготовление индуктивных катушек для фильтров, работающих в области низких частот, сопряжено с трудностями, особенно когда катушки должны иметь большую индуктивность при высоком коэффициенте добротности. Увеличение сечения обмотки повышает массу, размеры и стоимость катушки. Применение магнитопровода создает зависимость индуктивности от тока, проходящего по обмотке.

Во избежание получения громоздких фильтров с низкой добротностью катушек применяются безиндуктивные фильтры (rC -фильтры), состоящие из активных сопротивлений и емкостей.

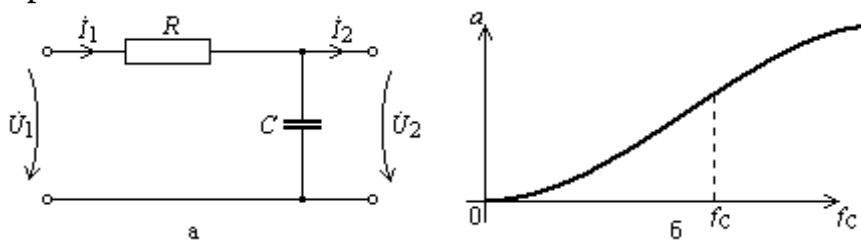


Рис.3. rC -фильтр нижних частот:

а) схема фильтра: б) характеристика собственного затухания

На рис. 3, а показан rC -фильтр нижних частот. При низких частотах, когда емкостное сопротивление велико, напряжение на выходе фильтра немногим меньше напряжения на его входе и, следовательно, затухание возрастает.

На рис. 3, б показана частотная характеристика коэффициента затухания такого фильтра. Ввиду малой крутизны кривой затухания часто

применяются двух или трехзвенные фильтры. В отличие от реактивных фильтров, rC -фильтр не имеет области частот, в которой коэффициент затухания равен нулю.

Частотные характеристики rC -фильтра нижних частот строятся по выражениям для a и b при значениях ω , для которых $2\omega RC \ll 1$:

$$\operatorname{sh} a \approx a \approx \sqrt{2\omega RC},$$

в общем случае

$$\operatorname{sh} a = \sqrt{2(\omega RC)^2 + 2\omega RC \sqrt{1 + (\omega RC)^2}}.$$

За частоту среза rC -фильтра нижних частот принимается частота, при которой равны активное и емкостное сопротивления ветвей Γ -фильтра

$$R = \frac{1}{\omega_c C}.$$

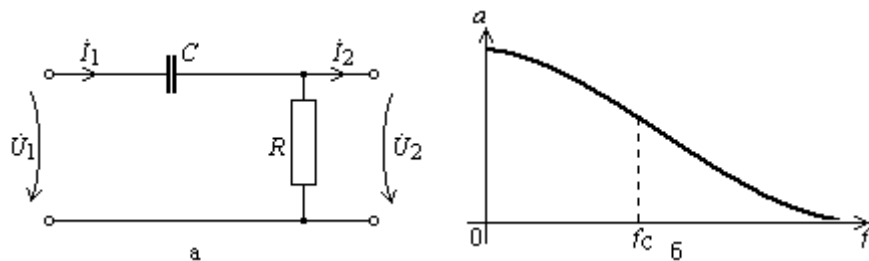


Рис.4. rC -фильтр верхних частот:

а) схема фильтра: б) характеристика собственного затухания

На рис. 4, а представлен rC -фильтр верхних частот и график частотной характеристики затухания. При значениях ω , при которых $\frac{2}{\omega RC} \ll 1$

$\operatorname{sh} a \approx a \approx \sqrt{\frac{2}{\omega RC}}$, и условие для частоты среза имеет прежний вид $R = \frac{1}{\omega_c C}$.

В общем случае [1]

$$\operatorname{sh} a = \sqrt{\frac{2}{(\omega RC)^2} + \frac{2}{\omega RC} \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega RC)^2}}}.$$

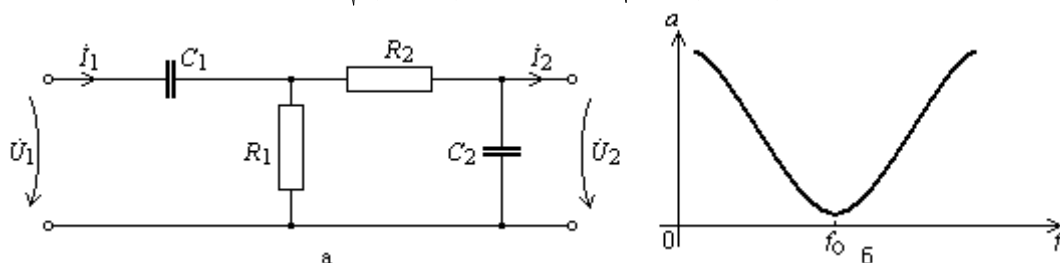


Рис.5. rC – полосовой фильтр:

а) схема фильтра: б) характеристика собственного затухания

На рис. 5, а приведены схема и примерная частотная характеристика затухания полосового rC -фильтра. Этот фильтр основан на том, что емкость первого звена обуславливает затухание более низких частот, а емкость второго – затухание более высоких частот. Средняя частота полосы

пропускания, при которой собственное затухание фильтра минимально, ориентировочно равна $\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде «Однофазные цепи переменного тока». В качестве источника напряжения используется регулируемый источник E_1 . Для измерения напряжения используется аналоговый вольтметр $PV1$. Входной ток и угол разности фаз между входом и выходом измеряется универсальным измерителем $PP1$. В работе используется емкость $C_2 = 6,7 \text{ мкФ}$, $C_3 = 10 \text{ мкФ}$ и сопротивления $R_2 = 47 \text{ Ом}$; $R_3 = 80 \text{ Ом}$.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Выключите напряжение источника E_1 . Соберите схему по рис.6 для получения характеристик фильтра нижних частот; емкость $C_4 = 22 \text{ мкФ}$, сопротивление $R_3 = 80 \text{ Ом}$. Включите напряжение питания, установите 5 В, частоту 40 Гц. Запишите в таблицу 1 входное и выходное напряжения, ток и угол разности фаз φ . Повторите измерения, увеличивая частоту на 70...80 Гц. Обратите внимание на снижение выходного напряжения. Выключите напряжение питания.

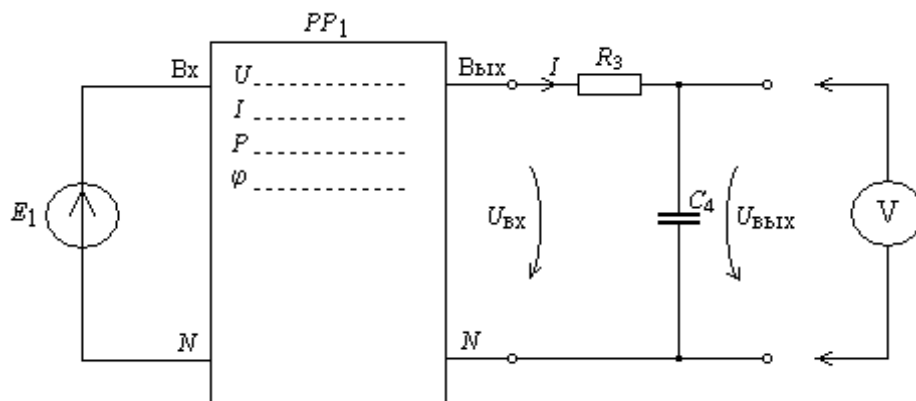


Рис.5. Схема исследования характеристик фильтра нижних частот

Таблица 1

Характеристики фильтра нижних частот

f , Гц	U_2 , В	φ , Град	a , Нп	a , Дб	b , рад
40					
120					
200					
280					
360					
400					

2. Соберите схему по рис. 7 для получения характеристик фильтра верхних частот; емкость $C_3 = 10 \text{ мкФ}$, сопротивление $R_4 = 120 \text{ Ом}$. Включите напряжение питания, установите 5 В, частоту 40 Гц. Запишите в таблицу 2 входное и выходное напряжения, ток и угол разности фаз φ . Повторите измерения, увеличивая частоту на 70...80 Гц. Обратите внимание на увеличение выходного напряжения. Выключите напряжение питания.

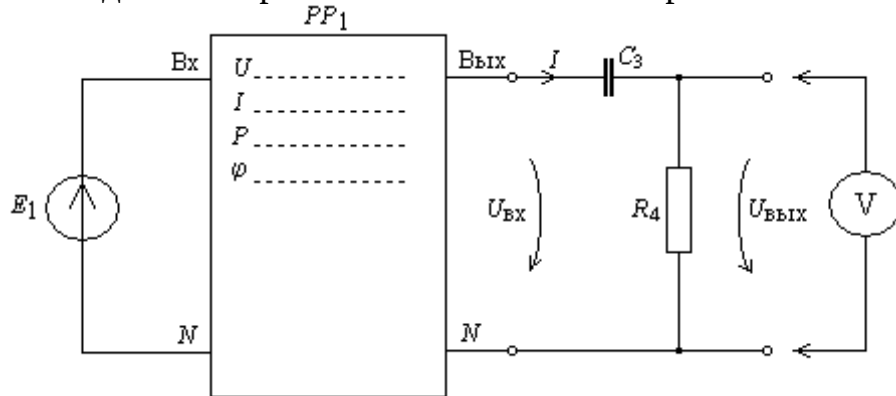


Рис.7. Схема исследования характеристик фильтра верхних частот

Таблица 2

Характеристики фильтра верхних частот

f , Гц	U_2 , В	φ , Град	a , Нп	a , Дб	b , рад
40					
120					
200					
280					
360					
400					

3. Соберите схему по рис. 8 для получения характеристик полосового фильтра. Включите напряжение питания, установите 5 В, частоту 40 Гц. Запишите в таблицу 3 входное и выходное напряжения, ток и угол разности фаз φ . Повторите измерения, увеличивая частоту на 70...80 Гц. Обратите внимание на увеличение выходного напряжения в полосе пропускания. Выключите напряжение питания.

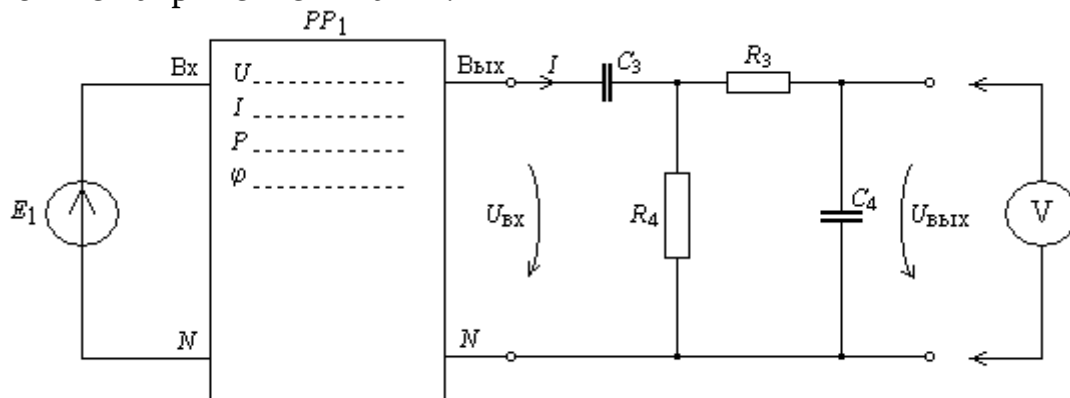


Рис. 8. Схема исследования характеристик полосового фильтра

Характеристики полосового фильтра

f , Гц	U_2 , В	φ , Град	a , Нп	a , Дб	b , рад
40					
120					
200					
280					
360					
400					

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Рассчитайте частоту среза для фильтра нижних частот, коэффициент собственного затухания a в Неперах и Децибелах, а также коэффициент фазы, занесите в таблицу 1. Постройте графики выходного напряжения, угла разности фаз φ , коэффициентов затухания и фазы в зависимости от частоты. Отметьте на графиках частоту среза. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений для частоты среза. На основании графиков объясните принцип работы фильтра нижних частот.

2. Рассчитайте частоту среза для фильтра верхних частот, коэффициент собственного затухания a в Неперах и Децибелах, а также коэффициент фазы, занесите в таблицу 2. Постройте графики зависимости выходного напряжения, угла разности фаз φ , коэффициентов затухания и фазы в зависимости от частоты. Отметьте на графиках частоту среза. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений для частоты среза. На основании графиков объясните принцип работы фильтра верхних частот.

3. Рассчитайте среднюю частоту f_0 полосы пропускания для полосового фильтра, коэффициент собственного затухания a в Неперах и Децибеллах, а также коэффициент фазы, занесите в таблицу 3. Постройте графики зависимости выходного напряжения, угла разности фаз φ , коэффициентов затухания и фазы в зависимости от частоты. Отметьте на графиках полосу пропускания. На основании графиков объясните принцип работы полосового фильтра.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы опытов и таблицы опытных и данных.
3. Основные расчетные формулы и результаты теоретических расчетов в таблицах.
4. Теоретические графики частотных характеристик собственного затухания и коэффициента фазы трех рассмотренных фильтров с

нанесенными на них опытными точками. Выводы о частотных диапазонах этих фильтров.

5. Векторные диаграммы токов и напряжений фильтров для частоты среза в двухэлементных схемах.

6. Выводы о соответствии опытных и теоретических результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем достоинства и недостатки безиндуктивных фильтров?
2. Какова предпочтительная область применения безиндуктивных фильтров?
3. Как определяется их частота среза?
4. Как определяется характеристический коэффициент собственного ослабления?
5. Как определяется коэффициент фазы?
6. Как определяется полоса пропускания фильтров?

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. Попов В. П. Основы теории цепей. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1998. – 575 с.
13. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – М.: Высшая школа, 1990. – 544 с.
14. Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники: сборник задач / Н. В. Коровкин, Е. Е. Селина [и др.]. – СПб.: Изд-во «Питер», 2004. – 512 с.
15. 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.

ТЕОРИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания

В двух частях

Часть 2

Составители: **Пронина** Анна Константиновна,
Канов Лев Николаевич

В авторской редакции

Изд. № 43/2023. Объем 3,5 п.л. Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3,43.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»