

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению практических работ
по дисциплине «Электротехника»
для студентов направления подготовки
10.03.01 Информационная безопасность
Направленность (профиль)
«Организация и технологии защиты информации
(по отрасли или в сфере профессиональной деятельности)»

Содержание

Лабораторная работа 1	4
Базовые понятия дисциплины. Электрические цепи постоянного тока. (3ч)	
Лабораторная работа 2	28
Основы линейных электрических цепей синусоидального тока. (3ч)	
Лабораторная работа 3	48
Анализ линейных электрических цепей переменного тока. (3ч)	
Лабораторная работа 4	62
Магнитные цепи и индуктивно связанные электрические цепи. (3ч)	
Лабораторная работа 5	77
Переходные процессы в линейных электрических цепях. (3ч)	
Лабораторная работа 6.....	106
Электрические цепи несинусоидального тока и нелинейные электрические цепи. (3ч)	
Лабораторная работа 7.....	114
Основы теории четырехполюсников. (3ч)	
Лабораторная работа 8.....	123
Частотные характеристики четырехполюсников. (3ч)	
Лабораторная работа 9.....	132
Электрические цепи с распределенными параметрами.(3ч)	
Список рекомендуемой литературы.....	138

Введение

1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля)

Целью изучения дисциплины «Физические основы защиты информации» является формирование набора профессиональных компетенций специалиста по направлению подготовки 10.03.01 – Информационная безопасность «Организация и технология защиты информации», способствующих углубленной подготовке к решению профессиональных задач в области защиты информации.

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-4 Способен применять необходимые физические законы и модели для решения задач профессиональной деятельности	ИД-2 ОПК-4 Применяет основные законы физики при решении задач профессиональной деятельности; способен проводить физический эксперимент и обрабатывать его результаты	полноценно использует необходимые физические законы для решения задач профессиональной деятельности; -корректно использует необходимые модели для решения задач профессиональной деятельности; -представляет последовательность шагов по использованию необходимых физических законов и моделей для решения задач профессиональной деятельности.
	ИД-3 ОПК-4 анализирует физическую сущность явлений и процессов, лежащих в основе функционирования микроэлектронной техники, применять основные физические законы и модели для решения задач профессиональной деятельности	- моделирует известные процессы, происходящие в электронных устройствах, для решения задач профессиональной деятельности

Лабораторная работа 1

Базовые понятия дисциплины. Электрические цепи постоянного тока.

Электрические цепи постоянного тока. (3ч)

Цель и содержание

Цель работы: Экспериментально изучить законы Кирхгофа для резистивных цепей, содержащих источники напряжения и тока. Убедиться в справедливости принципа наложения для линейных резистивных цепей.

Содержание работы:

- 1 Исследование внешних характеристик реальных источников напряжения и тока.
- 2 Экспериментальное исследование токораспределения в разветвленной резистивной цепи.
- 3 Исследование разветвленной цепи методом наложения.

Теоретическое обоснование

1 Источники ЭДС и тока

Условные обозначения на схемах идеального источника ЭДС (источника напряжения) и идеального источника тока показаны на рисунке 1.1.

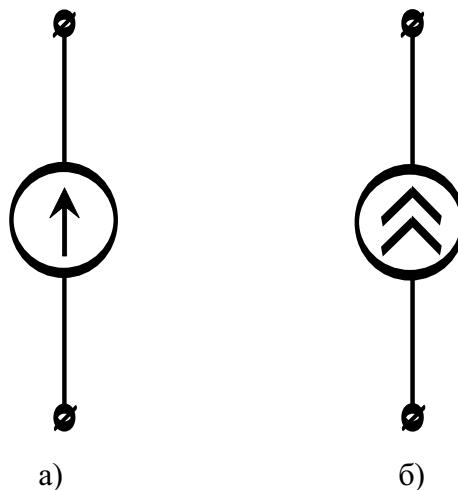


Рисунок 1.1 – Условные обозначения идеальных источников: а) ЭДС; б) тока

Идеальным источником ЭДС или источником напряжения называется источник постоянного или переменного напряжения, имеющий внутреннее сопротивление $R_i = 0$. Напряжение на его зажимах не изменяется при подключении к нему любого сопротивления нагрузки. При сопротивлении нагрузки $R_f = 0$, подключенной к зажимам идеального источника ЭДС, в нагрузку потечет бесконечно большой ток.

Идеальный источник тока – это такой источник постоянного или переменного тока, который имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление. При любом сопротивлении нагрузки R_f , подключенной к источнику тока, ток в нагрузке не зависит от ее сопротивления.

Любой реальный источник энергии имеет внутреннее сопротивление R_i конечной величины. Поэтому реальный источник может быть изображен в виде схемы идеального источника ЭДС и последовательно включенного R_i (рисунок 1.2 а) или схемы идеального источника тока и параллельно включенного сопротивления R_i (рисунок 1.2 б). Схемы на рисунке 1.2 эквивалентны.

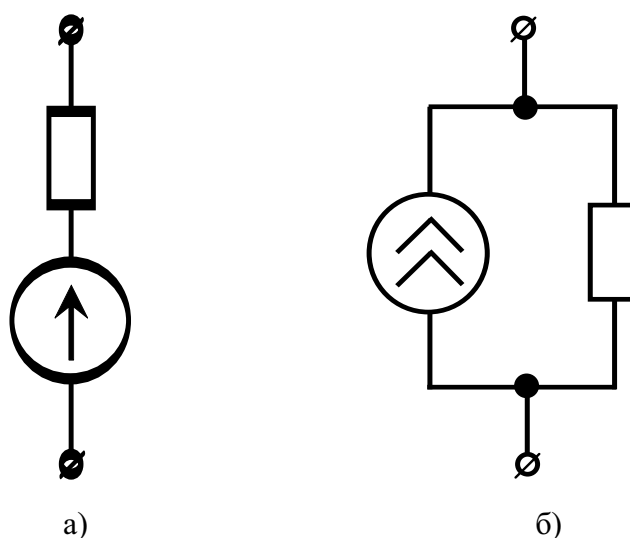


Рисунок 1.2 – Условные графические обозначения реальных источников, имеющих внутреннее сопротивление

Реальные источники допустимо считать идеальными, если их характеристики отличаются от идеальных не более чем на 10%. Реальный источник (рисунок 1.2 а) является практически идеальным источником напряжения в тех случаях, когда сопротивление нагрузки R_f превышает внутреннее сопротивление R_i на порядок. Аналогично, источником тока, близким к идеальному, является реальный источник, схема замещения которого соответствует показанной на рисунке 1.2 б, и сопротивление нагрузки на порядок меньше внутреннего сопротивления R_i . Таким образом, при $0 < R_f < 0,1 \cdot R_i$ источник является практически идеальным источником тока, а при $10 \cdot R_i < R_f < \infty$ – идеальным источником напряжения.

Для определения параметров эквивалентных схем реальных источников собирают цепь, схема которой показана на рисунке 1.3.

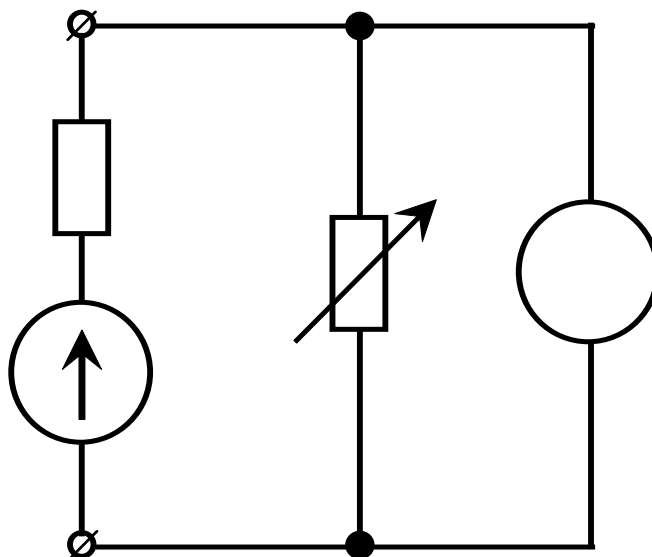


Рисунок 1.3

С помощью магазина резисторов R_M сопротивление можно изменять в широких пределах. Если R_M разомкнуть (или установить его сопротивление достаточно большим), то ток в цепи будет близким к нулю, т. к. входное сопротивление электронного вольтметра велико, и током его входной цепи можно пренебречь. В этом случае вольтметр показывает напряжение холостого хода $U_{X\bar{O}}$, численно равное ЭДС источника E . Если сопротивление R_M уменьшать, то ток в цепи начнет возрастать, падение напряжения на внутреннем сопротивлении увеличится, а на нагрузке уменьшится: $U = E - R_i \cdot I$. Если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника, то напряжение $U_{X\bar{O}} = E$ будет распределяться поровну между R_i и R_M . Таким образом, сопротивление нагрузки, падение напряжения на которой составляет $0,5 \cdot \dot{A}$, равно внутреннему сопротивлению источника. Если подключить R_M , при котором $U = 0,5 \cdot U_{X\bar{O}}$ не представляется возможным, то в этом случае внутреннее сопротивление

$$R_i = \left(\frac{U_{X\bar{O}}}{U} - 1 \right) R_M,$$

где U – напряжение на R_M .

Внешней или нагрузочной характеристикой источника называют зависимость напряжения на зажимах источника от его тока. Внешняя характеристика реального источника может быть приближенно представлена прямой линией, проведенной через точки $(U = 0, J = J_{\dot{E}})$ и $(J = 0, U = U_{X\bar{O}})$.

2 Законы Кирхгофа для электрической цепи

В цепи, содержащей пассивные элементы и источники напряжения, необходимо определять токи в ветвях цепи, для чего составляют систему уравнений по законам Кирхгофа. При этом по первому закону Кирхгофа следует составить $(q - 1)$ уравнений, где q – число узлов в цепи; а по второму закону – $(m - (q - 1))$ уравнений, где m – число ветвей. В общем случае при наличии источников переменного тока, уравнения записывают для мгновенных значений. Например, для цепи рисунка 1.4 справедливым являются выражения:

$$\begin{aligned} i_1 - i_2 + i_3 &= 0; \\ (R_{i1} + R_1) i_1 + R_2 \cdot i_2 &= e_1; \\ R_2 \cdot i_2 + (R_{i3} + R_3) i_3 &= e_3. \end{aligned}$$

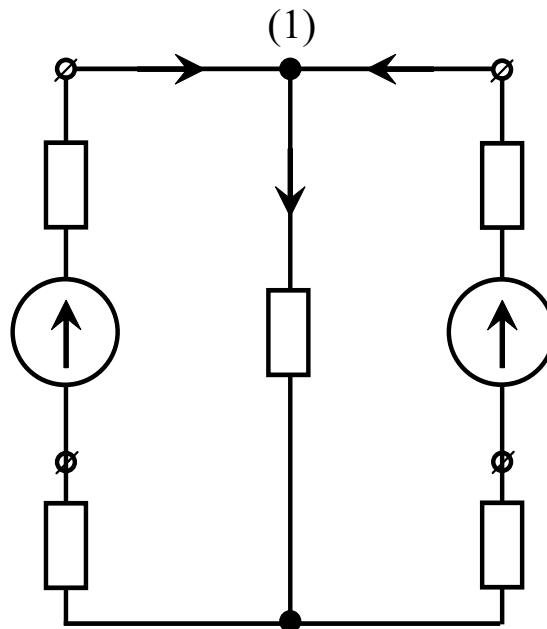


Рисунок 1.4

Если в электрической цепи действуют только источники гармонической ЭДС одинаковой частоты, то уравнения можно записать в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 &= 0; \\ (R_{i1} + R_1) \cdot \dot{I}_1 + R_2 \cdot \dot{I}_2 &= \dot{E}_1; \\ R_2 \cdot \dot{I}_2 + (R_{i3} + R_3) \cdot \dot{I}_3 &= \dot{E}_3. \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}
I_1 \cdot e^{j\varphi_{i1}} - I_2 \cdot e^{j\varphi_{i2}} + I_3 \cdot e^{j\varphi_{i3}} &= 0; \\
(R_{i1} + R_1) \cdot I_1 \cdot e^{j\varphi_{i1}} + R_2 \cdot I_2 \cdot e^{j\varphi_{i3}} &= E_1 \cdot e^{j\varphi_{e1}}; \\
R_2 \cdot I_2 \cdot e^{j\varphi_{i2}} + (R_{i3} + R_3) \cdot I_3 \cdot e^{j\varphi_{i3}} &= E_3 \cdot e^{j\varphi_{e3}}.
\end{aligned}$$

В цепи, состоящей только из резистивных элементов, питаемых от гармонических источников с равными частотами и начальными фазами, все отклики имеют одинаковое значение фазы $\varphi_{e1} = \varphi_{e3} = \varphi_{i1} = \varphi_{i2} = \varphi_{i3} = \varphi$, тогда множители $e^{j\varphi}$ в правых и левых частях уравнений сокращаются:

$$\begin{aligned}
I_1 - I_2 + I_3 &= 0; \\
(R_{i1} + R_1) \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 &= E_1; \\
R_2 \cdot I_2 + (R_{i3} + R_3) \cdot I_3 &= E_3.
\end{aligned}$$

В этом случае явления, происходящие в цепях переменного тока, по энергетическим свойствам схожи с явлениями, имеющими место в цепях постоянного тока. При составлении уравнений знаки у ЭДС и токов определяются следующим образом: ЭДС, положительные направления которых совпадают с выбранным направлением обхода по контуру, имеют знак плюс; а ЭДС, направления которых противоположны направлению обхода – знак минус. Аналогично, со знаком плюс записывают падения напряжений, вызванные токами, положительные направления которых совпадают с направлением обхода по контуру, и наоборот.

Если полученные расчетные значения токов отрицательны, то действительные направления этих токов противоположны выбранным.

Если в исследуемую цепь включить хотя бы один реактивный элемент или изменить соотношения между начальными фазами источников, то уравнения, составленные для действующих значений напряжений и токов, перестают быть справедливыми. В этом случае необходимо записывать уравнения для комплексных или мгновенных значений.

При расчете электрической цепи содержащей источники тока необходимо составить столько уравнений, сколько ветвей в цепи, за исключением ветвей с источниками тока, так как ток в этих ветвях уже известен.

Например, в цепи рисунка 1.5 – три ветви, но в одной из них находится источник тока J , поэтому ток этой ветви известен и определять требуется только два тока, для чего достаточно двух уравнений:

$$\begin{aligned}
I_1 - I_2 + I_3 &= 0; \\
(R_{i1} + R_1) \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 &= E;
\end{aligned}$$

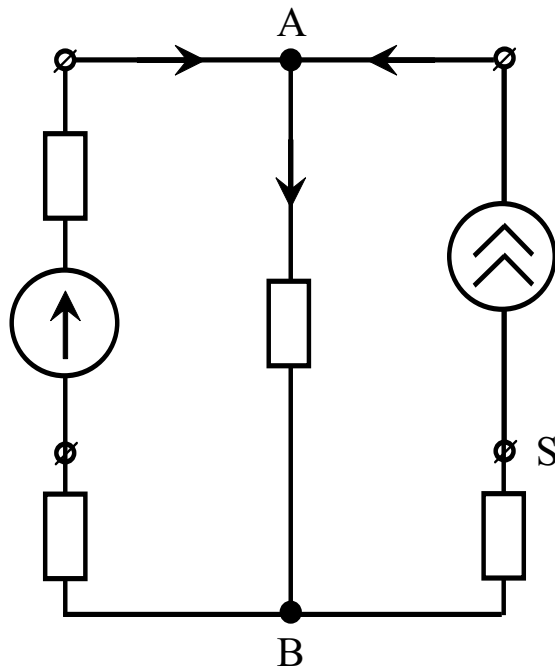


Рисунок 1.5

откуда при указанной полярности источников

$$I_1 = \frac{E - R_2 \cdot J}{R_{i1} + R_1 + R_2}; \quad I_2 = \frac{E + J \cdot (R_{i1} + R_1)}{R_{i1} + R_1 + R_2}.$$

Сопротивление R_3 в данные уравнения не входит, т. к. ток третьей ветви определяется источником тока J и не зависит от сопротивлений, включенных в данную ветвь.

В электрической цепи, состоящей только из резистивных элементов, активная мощность источников P_u равна активной мощности, рассеиваемой в нагрузке P_f .

Активная мощность источников напряжения гармонической формы $P_u = E \cdot I = \frac{E_m \cdot I_m}{2}$

, где E , E_m , I , I_m – действующие и максимальные значения ЭДС и тока соответственно. Если положительное направление ЭДС совпадает с положительным направлением тока, протекающим через источник, то мощность, создаваемая этим источником, является положительной, если противоположно ему, то отрицательной. Активная мощность, рассеиваемая в нагрузке:

$$P_f = I^2 \cdot R = \frac{I_m^2 \cdot R}{2},$$

где I – действующее значение тока, протекающего через нагрузку; R – сопротивление нагрузочного резистора. Так как в нагрузке электрическая энергия необратимо переходит в тепловую, то мощность $P_j > 0$.

3 Метод наложения для электрической цепи

Метод наложения применим только для расчета линейных цепей, т. е. цепей, параметры элементов которых не зависят от значений протекающего тока или приложенного напряжения.

Для расчетов цепей методом наложения составляют столько частных схем, сколько независимых источников энергии имеет исходная цепь. В частной схеме оставляется только один источник, все остальные исключают. Результирующий ток ветви равен алгебраической сумме частных токов, вызванных действием каждого источника в отдельности. При исключении идеальных источников напряжения вместо источника ставится короткозамкнутая перемычка, что соответствует ЭДС, равной нулю при нулевом внутреннем сопротивлении. Ветвь с источником тока, наоборот, размыкается, что соответствует нулевому току при нулевой проводимости.

При расчете частных схем токи, протекающие в ветвях, обозначают двумя индексами. Нижний индекс показывает номер ветви, в которой определяют ток, а верхний – номер источника, действием которого вызывается ток. Например, $I_1^{(3)}$ – ток первой ветви, вызываемый действием третьего источника. При расчете частных схем часто приходится рассчитывать токи в параллельных ветвях. В таких цепях токи

$$\dot{I}_1 = \dot{I} \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \quad \dot{I}_2 = \dot{I} \cdot \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

Для нахождения токов в схеме рисунка 1.5 методом наложения определяют токи в частных схемах, приведенных на рисунках 1.6 и 1.7.

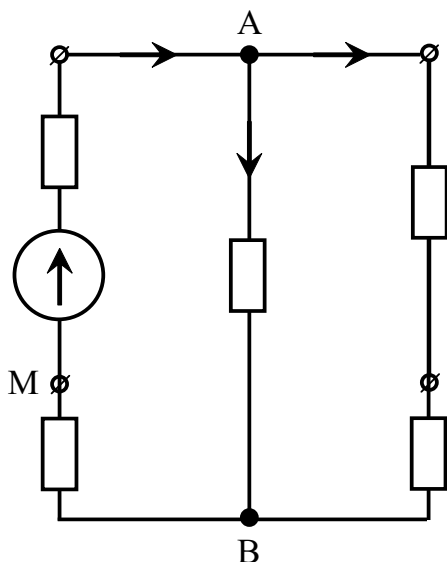


Рисунок 1.6

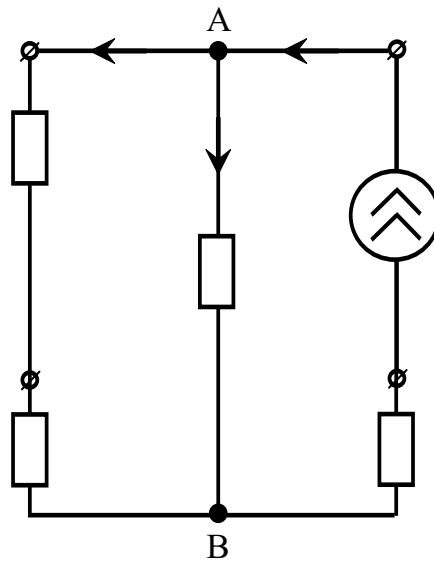


Рисунок 1.7

Для схемы рисунка 1.6:

$$I_2^{(1)} = I_1^{(1)} = \frac{E}{R_{i1} + R_1 + R_2}; \quad I_3^{(1)} = 0;$$

Для схемы рисунка 1.7

$$I_3^{(2)} = J; \quad I_2^{(2)} = J \cdot \frac{R_1 + R_{i1}}{R_{i1} + R_1 + R_2}; \quad I_1^{(2)} = \frac{R_2}{R_{i1} + R_1 + R_2};$$

Токи в исходной схеме:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_1^{(1)} - I_1^{(2)}; \\ I_2 &= I_2^{(1)} + I_2^{(2)}; \\ I_3 &= J. \end{aligned}$$

Аппаратура и материалы

Для выполнения всех лабораторных работ в данных методических указаниях, необходим специализированный лабораторный стенд «Луч», включающий в себя:

- комплекс источников электрических сигналов;
- комплекс исследуемых элементов и устройств;
- комплекс измерительных приборов.

Комплекс источников сигналов включает в свой состав: генератор сигналов; преобразователь; усилитель мощности – выходной каскад.

Генератор вырабатывает сигналы гармонической и прямоугольной разнополярной формы в диапазоне частот от 200 Гц до 200 кГц с разбивкой на три диапазона: 200 Гц – 2 кГц; 2 кГц – 20 кГц; 20 кГц – 200 кГц. Схема генератора построена по классу RC-генераторов с использованием современной элементной базы.

Преобразователь осуществляет преобразование сигналов фиксированной частоты $f = 2$ кГц, поступающих с генератора сигналов в сигналы различных форм:

- гармонического с переменной частотой от 200 Гц до 200 кГц;
- прямоугольного с периодами от 5 мс до 5 мкс;
- треугольного с изменением до пилообразного при $T = 500$ мкс;
- прямоугольной с переменной скважностью от 2 до 20, при $T = 500$ мкс;
- гармонического с двусторонним ограничением на 25% в каждую сторону;
- однополупериодного с плавным изменением до двухполупериодного;
- острых двусторонних с плавным перемещением отрицательных импульсов от 0 до $0,45 T$;
- острых односторонних сигналов;
- сигналов прямоугольной формы с $T = 5$ мс;
- радиоимпульсов с заполнением в диапазоне (2 – 20) кГц.

Преобразователь обеспечивает регулировку выходных сигналов по амплитуде, размаху и скважности.

Усилитель мощности обеспечивает напряжение гармонической формы с размахом не менее 5 В.

Схема измерителя напряжения используется также для измерения калибровочного сигнала, подаваемого на вход двух каналов электронного коммутатора.

Комплекс измерительных приборов содержит в своем составе следующие измерительные приборы: двухлучевой осциллограф; анализатор спектра; измеритель напряжения; измеритель напряжения и фазы.

Двухлучевой осциллограф состоит из двух блоков – электронного коммутатора (ЭК) и осциллографа (ОСЦ).

Электронный коммутатор обеспечивает:

- возможность получения на экране осциллографа двухлучевого изображения с перемещением каждой горизонтальной оси не менее, чем на $0,5 \varnothing$, где $\varnothing$ – диаметр экрана осциллографа;
- автоматической синхронизации изображения в диапазоне частоты от 200 Гц – 200 кГц;
- тарировки каждого канала сигналов прямоугольной формы;
- осуществление развертки как от внутреннего, так и от внешнего генераторов.
- изменения частоты развертки не менее чем в 10 раз в каждом диапазоне;
- изменение усиления по вертикальному каналу не менее чем в 100 раз.

Анализатор спектра работает совместно с электронным коммутатором и осциллографом. На I канале осциллографа отображается форма исследуемого сигнала, а на II канале – спектральная составляющая исследуемого сигнала в виде узких прямоугольных положительных импульсов, расположенных вдоль частотной оси (оси X). При этом при включении тумблера «Анализатор спектра», клеммы «Вход I» и «Вход II», а также регулятор «Развертка» на передней панели ЭК отключаются от схемы. На экране осциллографа укладывается 4 периода исследуемого сигнала, причем его амплитуда зависит от положения регулятора «Вых. напряжение». Анализатор спектра ведет выделение гармонических составляющих на фиксированных частотах 2; 4; 6; 8; 10 кГц.

Измеритель напряжения V2 измеряет действующее значение переменной величины и имеет пределы измерения (0,1 – 1 – 10 – 100) с

автоматическим переключением пределов измерения и светодиодной индикацией используемого предела.

Измеритель напряжения и фазы представляет собой комбинированный аналоговый электронный прибор, совмещающий в себе функции электронного вольтметра с пределами измерения 1 и 10 В и электронного фазометра с пределами измерения $\pm 90^\circ$.

Комплекс исследуемых элементов и устройств представляет собой набор широко применяемых на практике различных электронных схем и устройств, объединенных в комплексе под названием «Плата активных элементов» и «Умножитель частоты».

В состав комплекса входит и «плата пассивных элементов», на которой размещены резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы. Они предназначены для составления и исследования различных электрических цепей.

Указания по технике безопасности

Представленные ниже указания по технике безопасности распространяются для всех лабораторных работ данных методических указаний.

1. Перед началом занятий в лаборатории необходимо ознакомиться с настоящими методическими указаниями и пройти инструктаж по «Технике безопасности для студентов, выполняющих учебные занятия в лабораториях кафедры теоретической и общей электротехники Северо-Кавказского государственного технического университета». Инструктаж фиксируется преподавателем в журнале. Студенты, не прошедшие инструктаж по технике безопасности, к работе не допускаются.

2. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен. Во время сборки цепи нужно прокладывать провода так, чтобы было меньше их пересечений. Не использованные соединительные провода

следует убрать с лабораторного стола. О включении напряжения следует предупредить всех членов бригады, совместно выполняющих эту работу.

3. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.

4. Все работы на лабораторных стендах должны производиться не менее чем двумя лицами.

5. Изменения в электрической цепи должны быть проверено преподавателем.

6. В ходе работы запрещается оставлять включенный стенд без наблюдения.

7. После окончания испытания или при перерыве в работе стенд отключают от сети.

8. При неисправностях в аппаратах, приборах, проводах стенд отключить и известить об этом преподавателя.

9. Разборку электрической цепи осуществлять только по разрешению преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

1 Исследование внешних характеристик реальных источников напряжения и тока

1.1 Познакомиться с устройствами, из которых в работе собираются исследуемые цепи: генератором; электронным вольтметром; источниками напряжения и тока; магазином сопротивлений; регуляторами и переключателями.

Все элементы, из которых собираются исследуемые цепи, размещены на блоке пассивных элементов (нижняя правая панель стенда). В данном эксперименте на блоке пассивных элементов используется магазин резисторов R_M , на котором можно набирать сопротивления (10...5120) Ом. Источники напряжения и тока находятся на блоке активных элементов (нижняя левая панель). Для нормальной работы этих источников необходимо

гнезда «Вход» на блоке ГЗ соединить проводниками с гнездами «От генератора», находящихся в левой части блока активных элементов, причем верхнее гнездо следует соединить с верхним гнездом «От генератора», а нижнее – соответственно с нижним (рисунок 1.8).

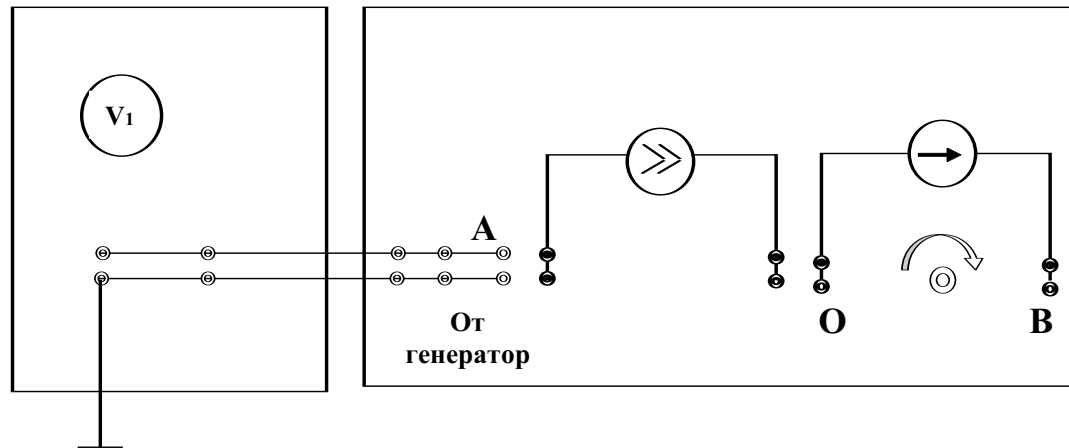


Рисунок 1.8

1.2 На блоке питания включить тумблеры: «Сеть», «Генератор», «Коммутатор-осциллограф», «V2». Установить на генераторе сигнал синусоидальной формы с частотой 2 кГц: для этого переключатель ПФ (переключатель формы сигнала) на блоке Г2 установить в положение  – 2 кГц (позиция 3). На блоке ГЗ тумблер «Пределы» вольтметра V_1 установить в положение 10 В. Регулятором выходного напряжения вольтметра V_1 установить наибольшее выходное напряжение (до отказа по часовой стрелке).

1.3 Исследовать источник энергии E . Подключить вольтметр V_2 к клеммам источника (корпусные клеммы « $\perp$ » соединить между собой). Проверить работу регулятора «E-var», для чего повернуть его до отказа по часовой стрелке. При этом напряжение на зажимах источника будет наибольшим, и вольтметр V_2 покажет напряжение численно равное ЭДС источника U_{XO} . Собрать схему рисунка 1.9. В качестве нагрузочного сопротивления использовать магазин R_M . Зажимы магазина R_M соединить с выводами источника E . На магазине R_M установить сопротивление 5 кОм.

Изменять значение сопротивления R_M от максимального до нулевого, результаты измерений напряжения занести в таблицу 1.1.

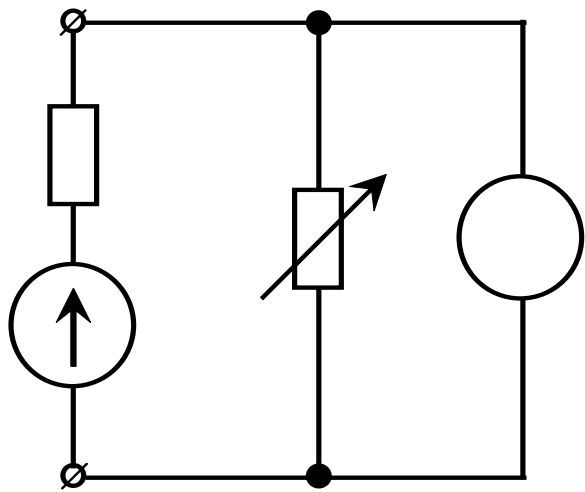


Рисунок 1.9

Таблица 1.1

Первый источник «E»			Второй источник «J»		
Измерено при эксперименте		Рассчитано по экспер. данным	Измерено при эксперименте		Рассчитано по экспер. данным
R_M , Ом	U_2 , В	I , мА	R_M , Ом	U_2 , В	I , мА
5120			5120		
2560			2560		
1280			1280		
640			640		
320			320		
160			160		
80			80		
40			40		
20			20		
10			10		

Изменять значение сопротивления R_M от максимального до нулевого, результаты измерений напряжения занести в таблицу 1.1. Найти значение сопротивления R_M , при котором вольтметр показывает напряжение U_{XO} . Значение полученного сопротивления – это величина внутреннего сопротивления R_i источника E . Если такое сопротивление подобрать не

удается, то необходимо взять ближайшее значение R_M , соответствующее $0,5 \cdot U_{x\delta}$. Рассчитать внутреннее сопротивление источника по формуле:

$$R_i = \left(\frac{U_{x\delta}}{U} - 1 \right) R_M,$$

где U и R_M – граничные величины напряжения и сопротивления.

1.4 Исследовать источник тока J . Магазин сопротивления R_M и вольтметр V2 отключить от зажимов источника напряжения и подключить к зажимам источника тока J . Тумблер П1 источника тока установить в положение «независимый». Изменять сопротивление R_M от максимального до нулевого, результаты измерений занести в таблицу 1.1.

2 Экспериментальное исследование токораспределения в разветвленной резистивной цепи

2.1 Подключить вольтметр V2 и осциллограф к клеммам источника E (рисунок 1.10).

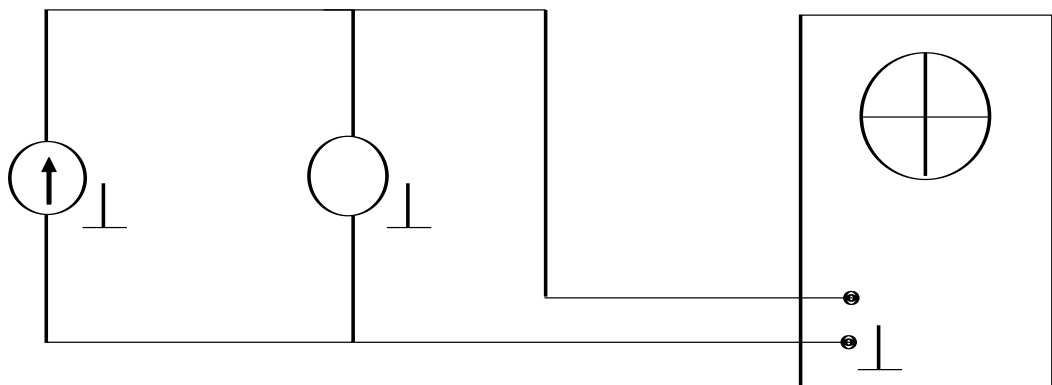


Рисунок 1.10

Регулятор «E-var» повернуть до отказа по часовой стрелке. Регуляторы на ЭК (экран коммутатора осциллографа) установить в положение: тумблер «каналы» – 2 канал (правое); тумблер «вход X» – «внутр»; тумблер «ослабление 2 канала» – 1:10; плавный регулятор усиления 2 канала – в среднее положение; регуляторы «расхождение», «↔», «↕», в такие положения, при которых на экране видна синусоидальная кривая. Регулятор «усиление» канала 2 в положение, при котором кривая находится в пределах

сетки. Регулятором «развертка» («вход X») получить два периода синусоиды. Регулятором « $\leftrightarrow$ » установить максимум синусоиды на средней вертикальной линии сетки (рисунок 1.11 а). После произведенных установок изменять положение регуляторов осциллографа и генератора не следует. Отметить значение ЭДС E (вольтметр V2) в таблице 1.2.

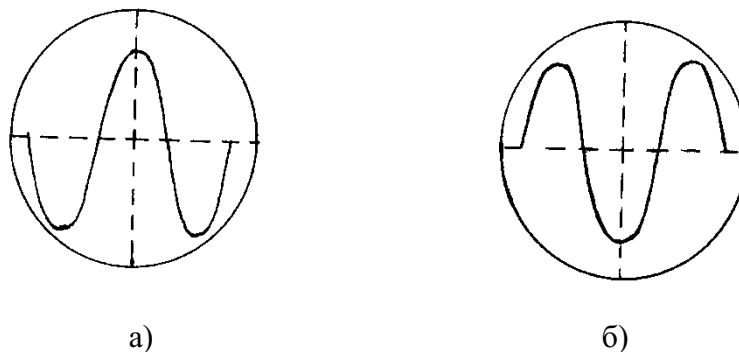


Рисунок 1.11

Таблица 1.2

При $E =$ В; $R_A = R_{III} = 100$ Ом, $R_B = 500$ Ом, $R_D = 1$ кОм, $R_F = 3$ кОм, $R_M =$								
Подключены	φ_A , В	φ_B , В	φ_D , В	φ_F , В	φ_G , В	φ_M , В	φ_N , В	φ_S , В
E, J								
$E, J = 0$								
$E = 0, J$	0							

2.2 Собрать цепь по схеме рисунка 1.12. Значение сопротивления R_M задается преподавателем. При сборке схемы иметь в виду, что после соединения блока ГЗ с панелью активных элементов точка «А» окажется на верхних гнездах «от генератора» (или на потенциальном гнезде блока ГЗ); точка «В» – на правом, а точка «О» – на левом гнезде источника E (рисунок 1.8). Внутреннее сопротивление R_i источника E из внешних элементов не набирается. Переключатель режимов источника тока J находится в положении «независимый», при этом ток источника не зависит от положения регулятора «E-var». Следует обратить внимание, что левые гнезда источника E внутри стенда соединены с общей корпусной точкой « $\perp$ », а у источника тока ни один из выводов внутри стенда с корпусом не соединен. Положительный вывод источника тока (то есть точка, к которой

обращена стрелка источника) соответствует точке G, а отрицательная – точке N (рисунок 1.12).

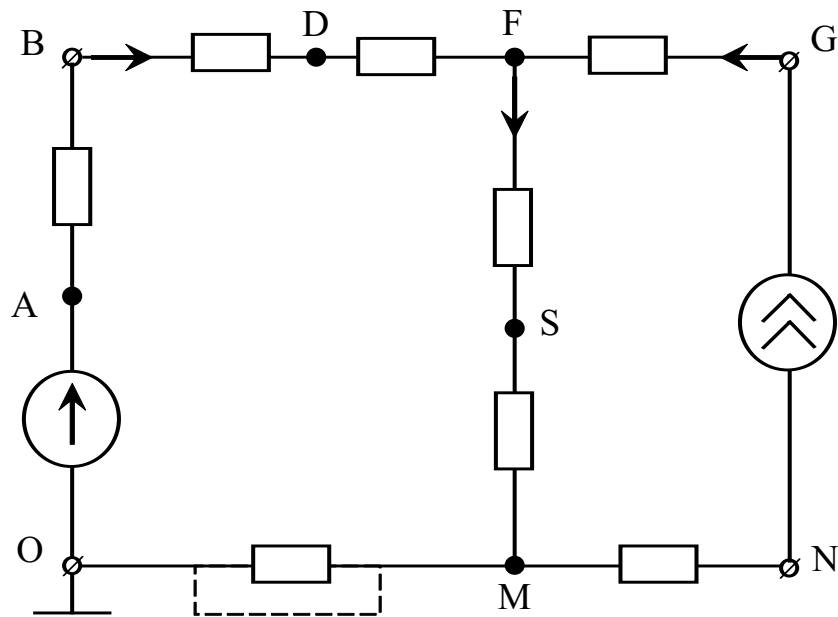


Рисунок 1.12

Резисторы R_A , R_B , R_D , R_F , R_M , $R_{Ш 3}$, $R_{Ш 6}$ находятся на панели пассивных элементов (правая горизонтальная панель). Сборку схемы рекомендуется производить в такой последовательности: вначале собрать внешний контур $A - B - D - F - G - N - M - O$, а затем подключить ветвь $F - S - M$. Резистор $R_{Ш 6}$ закоротить внешним проводником. При подключении резисторов следует также придерживаться условного правила: вывод резистора, который на схеме обозначен с правой стороны (сверху) соответствует правому (верхнему) гнезду соответствующего элемента на панели стенда. Источники следует подключать в соответствии с направлениями их действия.

2.3 С помощью вольтметра V2 и осциллографа измерить потенциалы точек: A, B, D, F, G, M, N, S. Так как корпусная точка прибора соединена внутри стенда с корпусной точкой источника напряжения, то есть точкой «О», то принимаем ее потенциал за опорный (равный нулю). Так как цепь состоит из резистивных элементов, то кривая на экране осциллографа может иметь на средней вертикальной оси либо максимум (рисунок 1.11 а), либо минимум (рисунок 1.11 б) и не может иметь промежуточных значений. В

первом случае потенциал является положительным и записывается со знаком «плюс», во втором случае отрицательным (знак «минус»). Результаты занести в таблицу 1.2.

2.4 Исследовать, как влияет изменение величин сопротивлений в ветвях цепи на ток во второй верви I_2 . Для этого входные проводники от второго канала осциллографа и вольтметра V2 подключить к точке «S». При этом будет измеряться падение напряжения на резисторе R_A , которое пропорционально току во второй ветви. Данные последующих измерений занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

$R_A = R_{III} = 100 \text{ Ом}, R_B = 500 \text{ Ом}, R_D = 1 \text{ кОм}, R_F = 3 \text{ кОм}, \varphi_o = 0$					
$U, \text{ В}$	сопротивления	$U, \text{ В}$	$I_1, \text{ мА}$	$I_2, \text{ мА}$	$I_3, \text{ мА}$
U_{SO}	$(R_M, R_B, R_D) \neq 0$				
	$R_M = 0$				
	$R_B = 0$				
	$R_D = 0$				
U_{NO}	$(R_M, R_B, R_D) \neq 0$				
	$R_M = 0$				
	$R_B = 0$				
	$R_D = 0$				
U_{MO}	$(R_M, R_B, R_D) \neq 0$				
	$R_M = 0$				
	$R_B = 0$				
	$R_D = 0$				

Затем внешним проводником закоротить сопротивление R_B . Падение напряжения и, следовательно, ток во второй ветви при этом изменяются. Снять перемычку с резистора R_B и закоротить резистор R_M . Убедиться, что ток во второй ветви изменился. Снять перемычку с резистора R_M и внешним проводником закоротить резистор R_D . В этом случае ток во второй ветви

остается без изменения по отношению к первому измерению, так как не изменился ток в третьей ветви, определяемый источником тока и не зависящий от сопротивления этой ветви R_D .

2.5 Исследовать ток в третьей ветви. Вольтметр V2 отключить от точки «S» и подключить к точке «N». Вход второго канала осциллографа оставить подключенным к точке «S». При этом размер изображения на экране осциллографа будет пропорционален напряжению на участке «S – M» и, следовательно, току во второй ветви. Закорачивая поочередно резисторы R_B и R_M , убедиться, что ток в третьей ветви остается неизменным, но токи в первых двух ветвях изменяются, что и наблюдается на осциллографе. Снять перемычки с резисторов R_B и R_M , замкнуть сопротивление R_D . Убедиться, что токи во всех ветвях остаются без изменения.

2.6 Исследовать ток в первой цепи. Для этого снять перемычку с резистора $R_{ш6}$ и замкнуть резистор $R_{ш3}$. Общее сопротивление первой ветви и ток в ней останутся неизменными, но становится возможным измерить падение напряжения на участке «O – M» и, следовательно, ток в первой ветви. Отключить входной зажим вольтметра V2 от точки «N» и подключить к точке «M». Поочередно замкнуть резисторы R_B , R_M и R_D . Убедиться, что изменение сопротивлений R_B и R_M влияет на ток первой ветви, а изменение сопротивления R_D – не влияет. Результаты измерений занести в таблицу 1.3.

3 Исследование разветвленной цепи методом наложения

3.1 Восстановить цепь согласно схеме рисунка 1.12. Для исследования вклада каждого источника в токораспределение цепи отключить источник тока J , для этого тумблер П1 перевести в позицию «откл.». Провести измерения потенциалов точек аналогично п.2.3. Результаты занести в таблицу 1.2.

3.2 С помощью регулятора «E-var» уменьшить ЭДС источника E до нуля (внутреннее сопротивление R_i остается неизменным). Подключить

источник тока, для этого тумблер П1 перевести в положение «независим». Измерить потенциалы точек аналогично п.2.3. Результаты занести в таблицу 1.2.

Содержание отчета, форма и правила оформления отчета

- 1 Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.
- 2 Название и цель работы.
- 3 Схемы исследуемых цепей.
- 4 Таблицы и графики, построенные и заполненные по результатам измерений и аналитических расчетов; векторные диаграммы.
- 5 Выводы.

ЗАДАНИЕ 1

- 1.1 По экспериментальным данным (п.п.1.3–1.4) рассчитать ток в цепи

$$I = \frac{U_2}{R_i}.$$

- 1.2 Построить нагрузочные характеристики $U = f(I)$, $U = f(R_i)$ для каждого из источников.

- 1.3 Найти параметры элементов последовательной (E , R_i) и параллельной (J , G) схем замещения исследованных источников. Внутреннее сопротивление источника тока J принять равным 30 кОм.

- 1.4 Рассчитать по экспериментальным данным мощность, рассеиваемую во внешней нагрузке P_f , мощность источника $P_{\text{ист}}$, мощность, рассеиваемую на внутреннем сопротивлении R_i , КПД () при различных внешних нагрузках R_i .

- 1.5 Построить графики зависимости $P_H(R_M)$; $P_{\text{ист}}(R_M)$; $\eta(R_M)$ исследуемых источников.

- 1.6 Рассчитать максимальную мощность, которая может рассеиваться во внешней нагрузке, подключенной к источнику энергии E .

ЗАДАНИЕ 2

2.1 Определить напряжения на всех элементах цепи (рисунок 1.12).
Результаты расчетов занести в таблицу 1.4.

2.2 По экспериментальным данным рассчитать значения токов во всех ветвях при различных сопротивлениях ветвей. Результаты расчетов занести в таблицы 1.3 и 1.4.

2.3 Проверить выполнение первого закона Кирхгофа в узлах и второго – в контурах цепи (рисунок 1.12).

Таблица 1.4

Получено при эксперименте					Теор. рассчитано
	E, J	$E = 0, J$	$E, J = 0$	E, J (метод наложения)	E, J
$U_{AB}, \text{В}$					
$U_{BD}, \text{В}$					
$U_{DF}, \text{В}$					
$U_{FS}, \text{В}$					
$U_{SM}, \text{В}$					
$U_{MA}, \text{В}$					
$U_{MN}, \text{В}$					
$U_{NG}, \text{В}$					
$U_{GF}, \text{В}$					
$I_1, \text{мА}$					
$I_2, \text{мА}$					
$I_3, \text{мА}$					
$P_E, \text{Вт}$					
$P_I, \text{Вт}$					
$\sum P_{EI}, \text{Вт}$					
$\sum P_R, \text{Вт}$					

2.4 На основании полученных экспериментальных данных сделать выводы о зависимости токов в ветвях с источниками напряжений и источниками токов от сопротивлений ветвей.

2.5 Рассчитать и сравнить мощность, отдаваемую источниками, с активной мощностью, рассеиваемой в резисторах. Проверить выполнение баланса мощностей в цепи.

УКАЗАНИЕ. Мощность, отдаваемая источником напряжения P_E , определяется из выражения $P_E = E \cdot I$, где E – ЭДС, I – ток, текущий через источник напряжения. Если направление ЭДС и тока совпадают, то мощность положительна, если не совпадают – отрицательна. Мощность источника тока P_I определяется из выражения:

$$P_I = U_I \cdot J,$$

где U_I – напряжение на зажимах источника тока; J – ток источника тока, причем, если стрелка источника тока обращена к точке с большим потенциалом («плюсу» падения напряжения), то мощность источника положительна, а если к «минусу» – отрицательна. Мощность, рассеиваемая в резисторе R , определяется из выражения

$$P_R = I^2 \cdot R$$

где I – ток, протекающий через резистор с сопротивлением R .

Так как измерительная аппаратура обладает некоторой погрешностью, то при выполнении экспериментов мощности источников и нагрузок могут отличаться, но эта разница не должна превышать 3%.

2.6 Рассчитать любым методом токи I_1 , I_2 , I_3 в цепи рисунка 1.5. Значение внутреннего сопротивления источника напряжения R_i берут по результатам измерений в задании 1.

2.7 Рассчитать напряжения на участках AB, BD, DF, FS, SM, MA, MN, NG, GF цепи рисунка 1.12. Результаты расчетов занести в таблицу 1.4, столбец «рассчитано».

ЗАДАНИЕ 3

3.1 По экспериментальным данным рассчитать падение напряжения на всех элементах цепи и токи во всех ветвях для режимов работы, когда $(E, J = 0)$, $(E = 0, J)$. Результаты расчетов занести в таблицу 1.4.

3.2 Рассчитать по данным п.3.1 методом наложения токи и напряжения в схеме рисунка 1.12. Сравнить результаты расчетов с величинами, полученными в задании 2 (таблица 1.4).

Контрольные вопросы и защита работы

1 Дайте определение независимым идеальным источникам напряжения и тока.

2 Каким образом экспериментально находятся ЭДС и внутреннее сопротивление источников?

3 Какие схемы замещения источников вы знаете?

4 Каким образом измеряются токи с помощью вольтметров?

5 Для цепи рисунка 1.9 рассчитать и построить кривую мощности, рассеиваемой во внешней нагрузке при изменении ее сопротивления от нуля до бесконечности.

6 Рассчитайте мощность источника, рассеиваемую на внутреннем сопротивлении R_i (рисунок 1.9) при изменении R_M от 0 до ∞ .

7 Какая наибольшая мощность может рассеяться во внешней нагрузке, подключенной к источнику с параметрами $E = 10$ В; $R_i = 5$ Ом? Какое сопротивление должна иметь внешняя нагрузка R_H , чтобы в ней выделялась мощность 4 Вт?

8 Рассчитайте КПД цепи рисунка 1.9 и постройте кривую $\eta = f(R_M)$.

9 Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений.

10 В каких случаях уравнения по законам Кирхгофа могут быть написаны в комплексном виде?

11 Может ли на зажимах участка цепи (рисунок 1.13) напряжение равняться нулю? Если может, то при каких условиях?

12 Какие особенности существуют при составлении уравнений по законам Кирхгофа при наличии в цепи источников тока?

13 Каким образом рассчитывают активную мощность, отдаваемую:

а) источниками напряжения; б) источниками тока?

14 Как изменится ток в ветвях цепи рисунка 1.14, если сопротивление резистора R_3 : а) уменьшить в два раза; б) увеличить в два раза?

15 Рассчитайте действующее значение напряжения между точками М и S в цепи рисунка 1.14.

16 Замените в цепи рисунка 1.14 источник напряжения эквивалентным источником тока. Определите токи I_1 , I_2 , I_3 для эквивалентной цепи, сравните с токами I_1 и I_2 , полученными до замены источников.

17 При каком значении E в цепи рисунка 14 ток $I_1 = 0$?

18 Могут ли в цепи рисунка 1.14 токи I_2 и I_3 быть равными нулю?

19 В чем сущность метода наложения и какие ограничения он имеет?

20 Можно ли рассчитать мощность методом наложения? Если нельзя, то почему?

Защита лабораторной работы производится при наличии отчета в виде устного опроса. Подготовка к защите осуществляется по настоящим методическим указаниям.

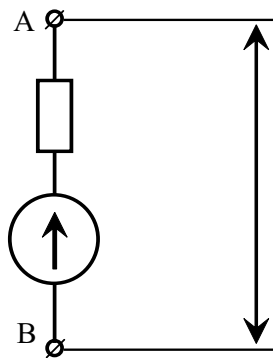


Рисунок 1.13

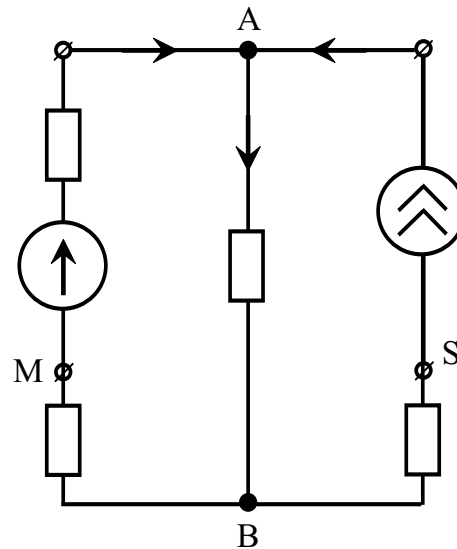


Рисунок 1.14

Рекомендуемая литература: [1], [2], [3]

Лабораторная работа 2

Основы линейных электрических цепей синусоидального тока. (3ч)

Цель и содержание

Цель работы:

- 1 Изучить формы откликов тока в резистивных, емкостных и индуктивных цепях при воздействиях напряжения произвольной формы.
- 2 Научиться экспериментально определять действующие значения и начальные фазы токов и напряжений в RLC-цепи при постоянной частоте.

Содержание работы:

- 1 Исследование формы откликов тока, получающихся в резистивных, емкостных и индуктивных цепях при воздействиях напряжения произвольной формы.
- 2 Экспериментальное измерение действующих значений и начальных фаз токов во всех ветвях и падений напряжения на всех элементах RLC-цепи при постоянной частоте. Проверить справедливость законов Кирхгофа для RLC-цепи.

Теоретическое обоснование

Элементами схем замещения цепей синусоидального тока являются источники синусоидального тока и синусоидальной ЭДС, резистивные, индуктивные и емкостные элементы.

Сопротивление переменному току оказывают как элементы цепи, в которых выделяется энергия в виде тепла (резистивные R), так и элементы, в которых энергия запасается в магнитном (индуктивные L) и электрическом (емкостные C) полях.

О резистивном элементе можно судить по вольт-амперной характеристике (зависимость величины тока на сопротивлении от приложенного напряжения); индуктивном элементе – вебер-амперной характеристике (зависимость потокосцепления в катушке индуктивности от протекающего тока); емкостном элементе – кулон-вольтной характеристике (зависимость заряда на обкладках конденсатора от приложенного напряжения). Эти зависимости могут быть как линейными, так и нелинейными. В данной лабораторной работе исследуются только элементы, обладающие линейными характеристиками.

В резистивных линейных элементах, обладающих сопротивлением R , мгновенные напряжения u и токи i пропорциональны друг другу, связь между ними определяется законом Ома: $u = Ri$. Поскольку пропорциональность между u и i соблюдается в любой момент времени, то формы откликов в резистивных цепях повторяют формы воздействий. Например, к цепи R приложено напряжение прямоугольной формы, следовательно, ток, вызванный этим напряжением в резистивной цепи, будет иметь также прямоугольную

форму. В резистивных цепях закон Ома справедлив для мгновенных (u и i), действующих (U и I) и максимальных (U_m и I_m) значений, поэтому можно записать следующие выражения для рисунка 2.1: $u = Ri$, $U = RI$, $U_m = RI_m$.

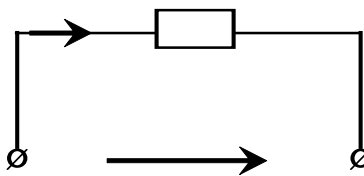


Рисунок 2.1

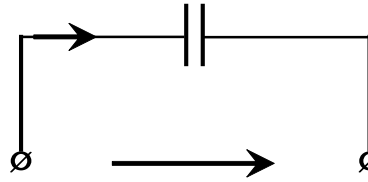


Рисунок 2.2

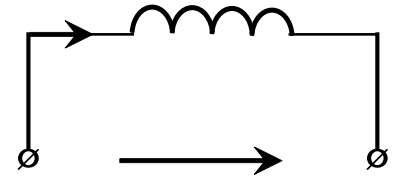


Рисунок 2.3

В цепи с емкостным элементом C (рисунок 2.2) мгновенные напряжения и токи связаны выражением: $i = C \frac{du_C}{dt}$, в цепи с индуктивным элементом L : $u_L = L \frac{di}{dt}$ (рисунок 2.3). Из приведенных соотношений следует, что мгновенные значения напряжений и токов в энергоемких цепях не пропорциональны друг другу и, следовательно, формы воздействия и отклика будут различны. Покажем, каким образом определяется форма отклика в цепях C и L по заданной форме воздействия.

В цепи C мгновенный ток, протекающий через конденсатор, в любой момент времени пропорционален не значению напряжения, приложенного в этот момент времени, а производной по времени этого напряжения. Таким образом, мгновенный ток в конденсаторе будет тем больше, чем больше производная $\frac{du_C}{dt}$, т.е. чем сильнее изменение мгновенных напряжений во времени. Производная представляет величину, пропорциональную тангенсу угла наклона между касательной, проведенной в данной точке кривой, и осью переменной величины. Например, в цепи (рисунок 2.2) к конденсатору емкостью C приложено напряжение u_C треугольной формы, определим форму тока (рисунок 2.4).

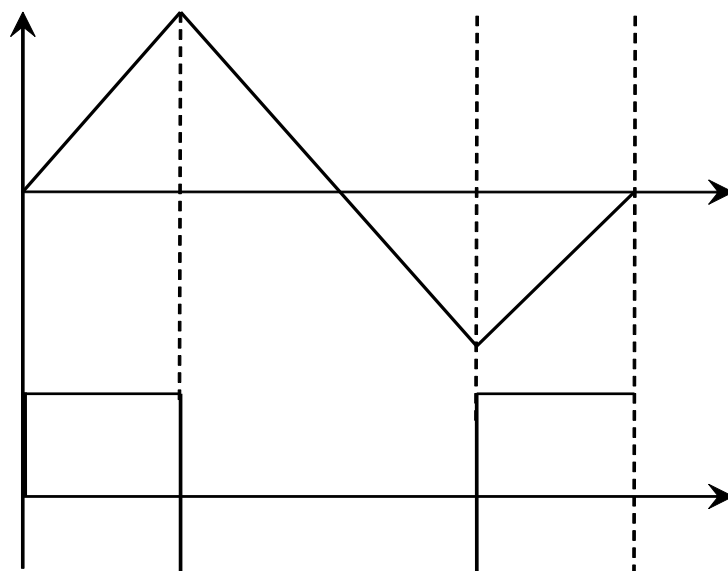


Рисунок 2.4

Как видно из рисунка 2.4, от момента $t = 0$ до $t = t_1$ угол наклона характеристики $u_C = f(t)$ постоянен, значит, тангенс этого угла и производная остаются неизменными. Следовательно ток в цепи С оказывается постоянным, т.е. несмотря на изменения напряжения u_C , значения тока i будут неизменными (рисунок 2.4). В момент времени t_1 знак угла скачком изменяется на отрицательный, но абсолютное значение угла остаётся прежним. Следовательно, ток i также скачком изменяется от положительного до отрицательного и так далее. Таким образом, если к цепи С приложить напряжение треугольной формы, то ток будет иметь не треугольную, как было бы в резистивной цепи, а прямоугольную форму. Если напряжение u_C имеет пилообразную форму (рисунок 2.5), т.е. в интервале от $t = 0$ до $t = t_1$ изменение напряжения происходит медленно (угол наклона характеристики, тангенс угла и производная по времени малы), а в интервале от $t = t_1$ до $t = t_2$ изменение u_C происходит быстро (угол наклона характеристики, тангенс угла и производная по времени велики), то токи в эти моменты времени будут во столько раз больше тока при прямом ходе кривой u_C , во сколько раз тангенс угла наклона характеристики $u_C = f(t)$ при обратном ходе кривой больше аналогичной величины при прямом ходе (рисунок 2.5).

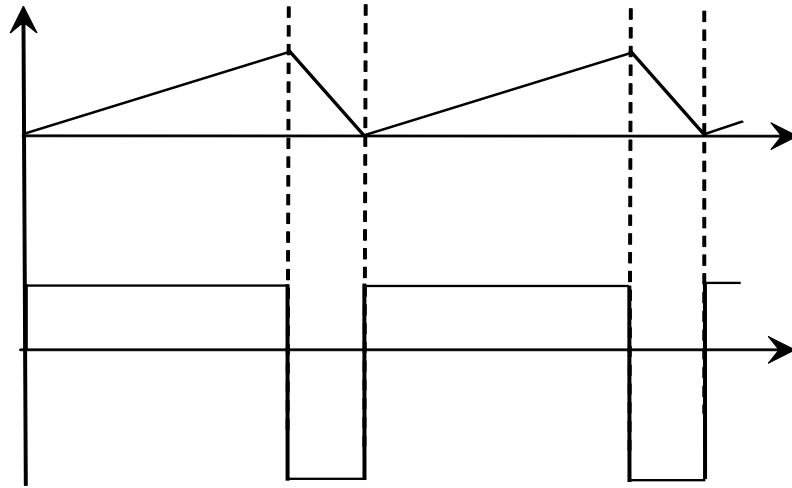


Рисунок 2.5

Таким образом, пилообразное напряжение в цепи C вызывает ток с узкими, короткими «выбросами».

Если бы к конденсатору было приложено напряжение идеально прямоугольной формы (рисунок 2.6), то в интервале времени от $t = 0$ до $t = t_1$ ток равнялся бы нулю, так как производная $\frac{du_C}{dt}$ на данном интервале равна нулю. В момент времени t_1 угол между u_C и осью времени скачком возрастает до 90° , а следовательно, производная (т.е. ток i) должны были увеличиться до бесконечности. Но через время $\Delta t = 0$ угол наклона, а следовательно, и ток в цепи, становятся снова равными нулю, после чего процессы повторяются.

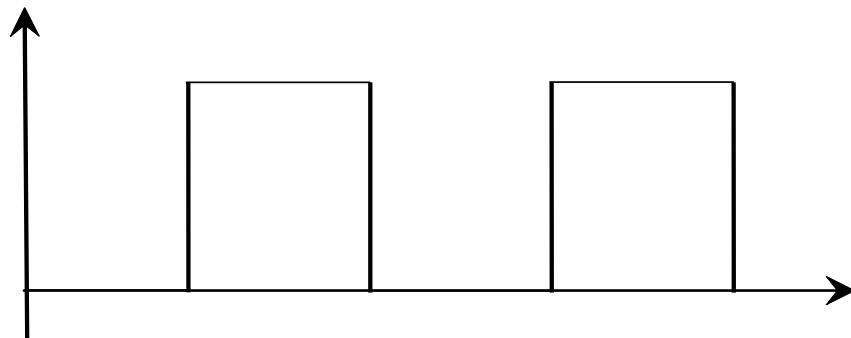


Рисунок 2.6

Таким образом, если бы цепь была чисто емкостной, а входное напряжение имело строго прямоугольную форму, то ток в данной цепи представлял бы импульсы бесконечно малой длительности с бесконечно большими амплитудами. В технике связи напряжения и токи подобной формы называют «импульсными». Так как физически создать ток бесконечно большой величины не представляется возможным, то напряжения (или токи) с

идеально прямоугольной формой создать также невозможно. Любой существующий сигнал прямоугольной формы имеет небольшие скосы фронтов, хотя в ряде случаев эти скосы могут быть весьма небольшими и на глаз практически незаметными. В реальных инженерных устройствах качество прямоугольных сигналов оценивается временем нарастания этого сигнала. Чем меньше времени необходимо для достижения максимального значения напряжения или тока, тем аппаратúra совершеннее (рисунок 2.7). Форма тока, получающегося в цепи С при реальных напряжениях прямоугольной формы, показана на рисунке 2.8. Если угол фронта прямоугольного напряжения, приложенного к цепи С, изменится, например, от $89^{\circ}30'$ до 84° , то ток в цепи уменьшится в 10 раз, так как $\operatorname{tg} 89^{\circ}30' = 100$, а $\operatorname{tg} 84^{\circ} = 10$. Приборы стрелочных типов, не отметят какой-либо разницы в этих напряжениях, в то время как ток, вызванный этими двумя напряжениями, будет отличаться на порядок. Следовательно, производить такие измерения необходимо осциллографами, так как, не зная форму воздействующего сигнала, в большинстве случаев нельзя судить о форме получающихся откликов.

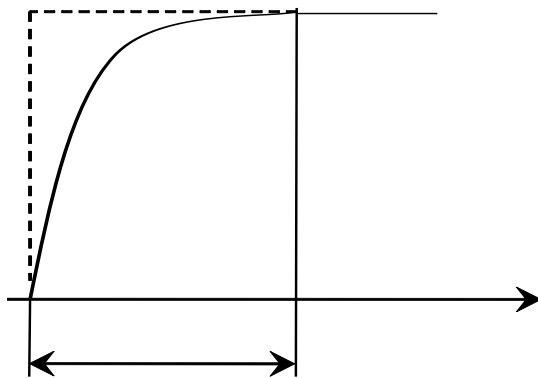


Рисунок 2.7

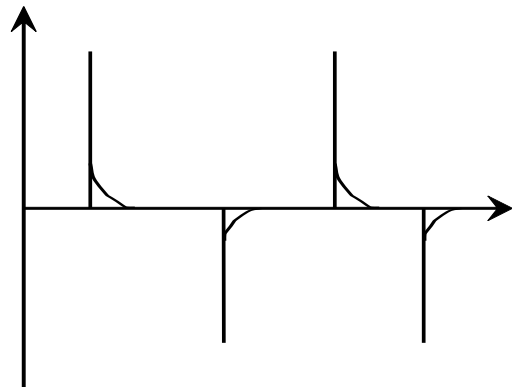


Рисунок 2.8

Пример. Определим максимальное значение тока, если напряжение на конденсаторе емкостью $0,1 \text{ мкФ}$ нарастает от нуля до 10 В за 5 мс :

$$i = C \frac{du_C}{dt} \approx C \frac{\Delta U_C}{\Delta t} = 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10}{5 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ А} = 0,2 \text{ мА}.$$

Полученный малый ток в указанном случае является следствием медленного нарастания фронта напряжения. Если значение $U_m = 10 \text{ В}$ будет достигнуто не за 5 мс , а за 5 мкс , то $i = 10^{-7} \cdot \frac{10}{5 \cdot 10^{-6}} = 200 \text{ мА}$, т.е. увеличивается в 1000 раз.

Разберем еще пример. Пусть напряжение на входе цепи С имеет вид однополупериодной кривой (рисунок 2.9). Определим форму тока в цепи. В интервале от $t = 0$ до $t = t_1$ производная $\frac{du_C}{dt} = 0$, в момент времени t_1 угол между касательной к

кривой u_C и осью времени скачком возрастает (но менее, чем до 90°), производная $\frac{du_C}{dt}$ и ток i в цепи возрастают до некоторого конечного значения. При изменении времени от t_1 до t_2 угол наклона касательной и ток уменьшаются. В момент времени t_2 касательная к кривой $u_C = f(t)$ идет параллельно оси времени, ток становится равным нулю.

В интервале t_2 до t_3 знак производной меняется, а от момента времени t_3 и далее всё повторяется.

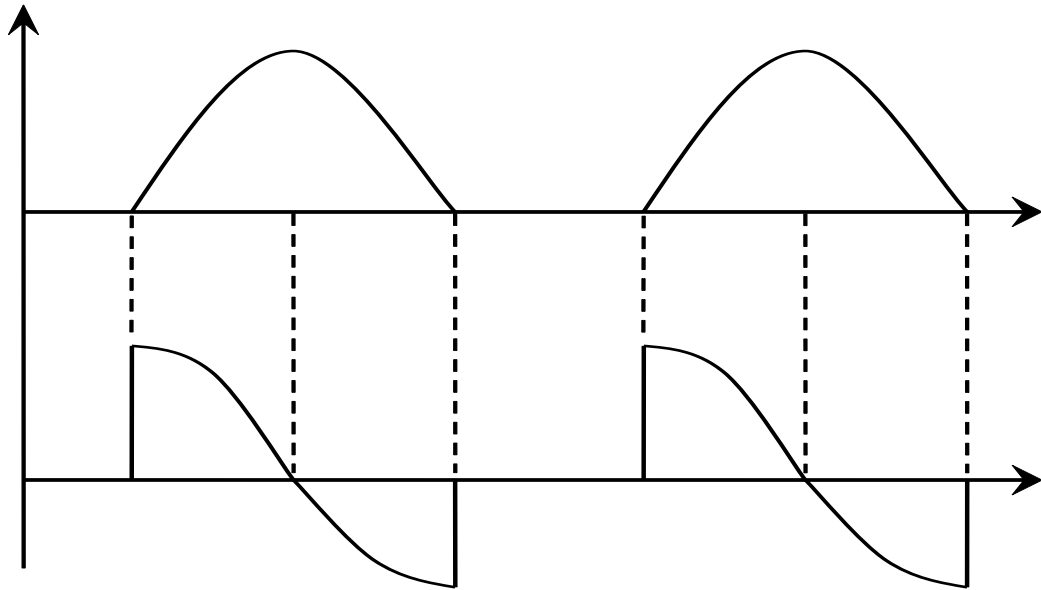


Рисунок 2.9

Если воздействием является ток i , а откликом – напряжение u_C , то расчет производится в соответствии с выражением $u_C = \frac{1}{C} \int i dt$. Например, если кривая тока i имеет прямоугольную форму, то кривая u_C имеет треугольную.

В цепи L: $e_L = L \frac{di}{dt}$, $i = \frac{1}{L} \int e_L dt$. Кривые напряжений и токов в индуктивных цепях строят аналогично цепи C. Следует иметь в виду, что все кривые, относящиеся в цепи C к напряжению, в цепях L относятся к току, а кривые тока в цепи C аналогичны кривым напряжения в цепях L. Это следует из сравнения выражений

$$i = C \frac{du_C}{dt} \text{ и } u_L = L \frac{di}{dt}; u_C = \frac{1}{C} \int i dt \text{ и } i = \frac{1}{L} \int u_L dt.$$

Частный случай. Определим форму тока в цепи C, если ко входу цепи приложено напряжение синусоидальной формы $u = u_{\tilde{N}} = U_m \sin \omega t$. Мгновенные значения тока в этом случае будут определяться из выражения:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d}{dt}(U_m \sin \omega t) = \omega C U_m \cos \omega t.$$

Так как множитель $\omega C U_m$ имеет размерность тока, обозначим его $I_m = \omega C U_m$. Известно, что $\cos \omega t = \sin(\omega t + 90^\circ)$. Таким образом, если к цепи С приложить напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то ток в цепи оказывается $i_{\tilde{N}} = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$. Значит в случае, при котором на зажимах конденсатора имеется напряжение синусоидальной формы, ток в этом конденсаторе имеет также синусоидальную форму, но опережает напряжение на четверть периода, т.е. на 90° (рисунок 2.10 и 2.11). Явление опережения тока на 90° означает, что в момент времени, при котором напряжение равно нулю, ток уже достигает максимума (момент $t = 0$ на рисунке 2.10) и так далее. В этом случае мгновенные напряжения и токи оказываются не пропорциональными друг другу, т.е. в цепях с накопителями энергии закон Ома для мгновенных значений является несправедливым.

В цепях L: $i = \frac{1}{L} \int u_L dt$. Если напряжение, приложенное к катушке индуктивности, имеет синусоидальную форму $u = u_L = U_m \sin \omega t$, то ток в катушке определяется из выражения

$$i = \frac{1}{L} \int U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\omega \cdot L} \cos \omega t = \frac{U_m}{\omega \cdot L} \sin(\omega t - 90^\circ), \quad i_L = I_m \sin(\omega t - 90^\circ),$$

где $I_m = \frac{U_m}{\omega \cdot L}$.

Таким образом, если к цепи L приложить напряжение гармонической формы, то ток будет отставать от напряжения на 90° (рисунок 2.10 2.11).

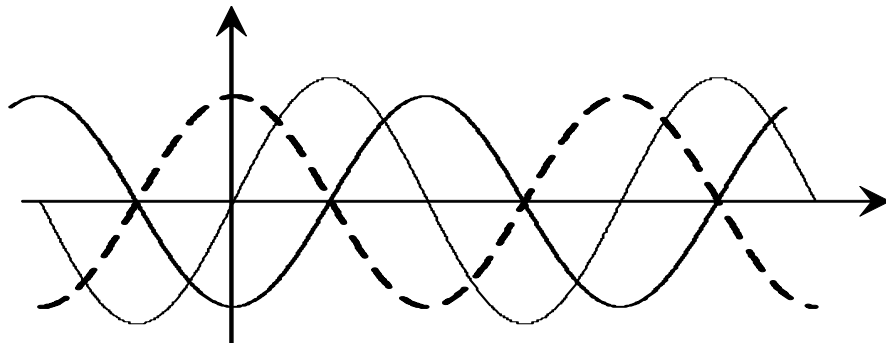


Рисунок 2.10

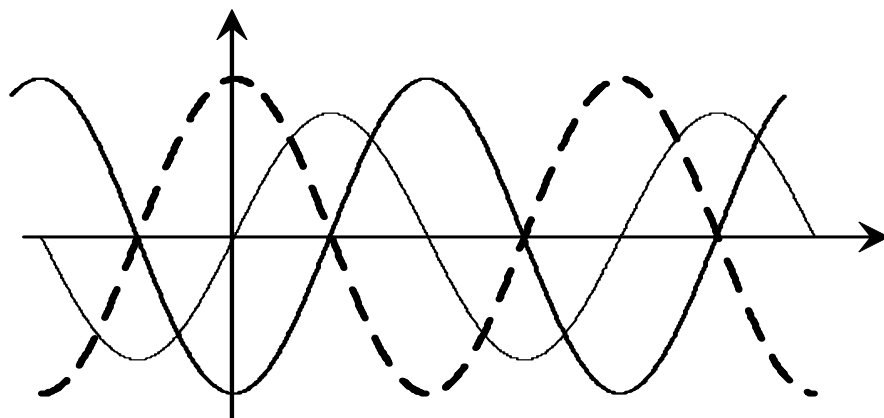


Рисунок 2.11

Таким образом, форма приложенного напряжения совпадает с формой вызванного этим напряжением тока только в резистивных цепях. В цепях с емкостями или индуктивностями формы напряжения и тока отличаются друг от друга. При гармоническом воздействии отличие тока от напряжения состоит в том, что эти процессы оказываются с различными начальными фазами.

В общем случае при подключении к RLC-цепи источников с произвольной формой напряжения любые уравнения, описывающие процессы в данной цепи, могут быть составлены только для мгновенных значений токов и напряжений. Законы Кирхгофа для мгновенных значений являются справедливыми для любых цепей и в любой момент времени. Например, для цепи рисунка 2.12 по законам Кирхгофа можно написать

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

$$u_{R1} + u_L + u_{R2} = e$$

$$-u_{R2} - u_L + u_C + u_{R3} = 0$$

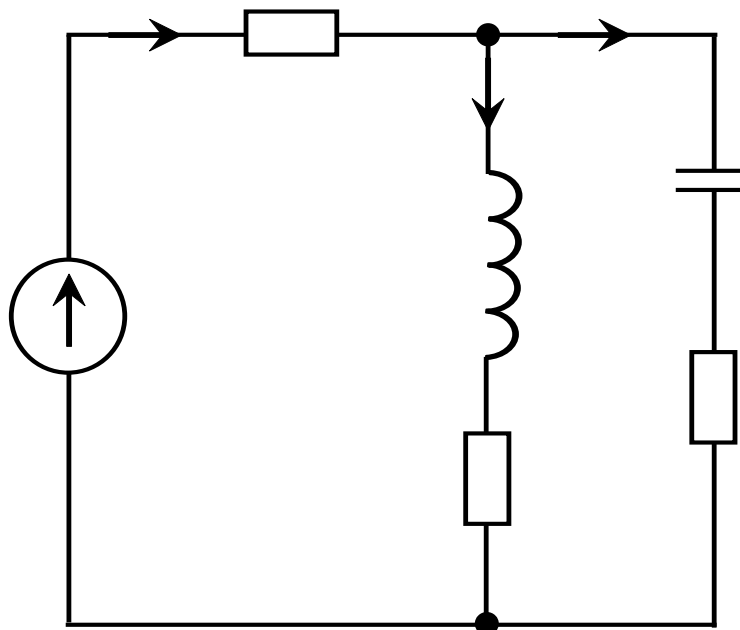


Рисунок 2.12

Выражая мгновенные значения напряжения через мгновенные значения токов, получаем

$$\begin{aligned}i_1 - i_2 - i_3 &= 0 \\R_1 i_1 + L \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 &= e \\-i_2 R_2 - L \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int i_3 dt + R_3 i_3 &= 0\end{aligned}$$

Если ЭДС источника изменяется по гармоническому закону, то расчет цепи можно выполнять в комплексной форме. В этом случае уравнения приобретают вид

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 &= 0 \\R_1 \dot{I}_1 + j\omega L \dot{I}_2 + R_2 \dot{I}_2 &= \dot{E} \\-R_2 \dot{I}_2 - j\omega L \dot{I}_2 + \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_3 + R_3 \dot{I}_3 &= 0\end{aligned}$$

Аппаратура и материалы

Аппаратура и материалы представлены в лабораторной работе 1

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности представлены в лабораторной работе 1

Методика и порядок выполнения работы

1 Исследование формы тока через конденсатор, резистор и катушку индуктивности при различных формах приложенного напряжения

1.1 Собрать цепь по схеме рисунка 2.13. Номинальная величина конденсатора выбирается по вариантам в соответствии с таблицей 2.1.

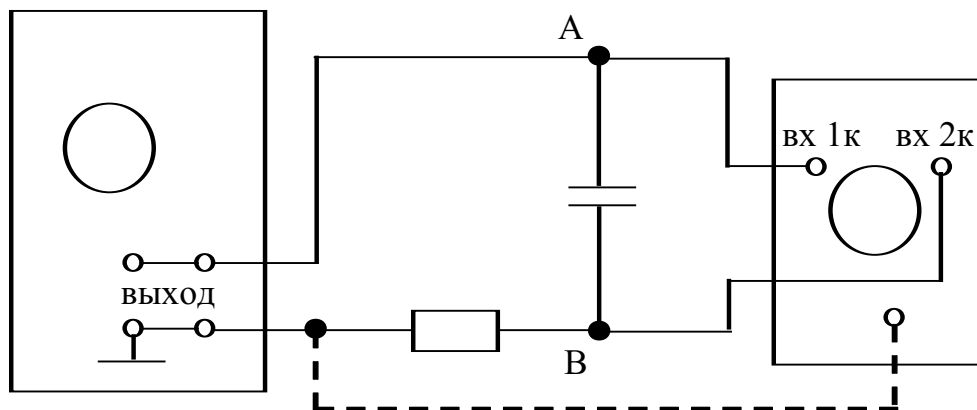


Рисунок 2.13

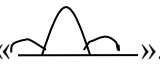
Таблица 2.1

№ варианта	Конденсаторы	Катушки индуктивности
1	C_A	L_A
2	C_B	L_B
3	C_D	L_D
4	C_F	L_F
5	C_A	L_B
6	C_B	L_D
7	C_F	L_A
8	C_A	L_D
9	C_D	L_F
10	C_B	L_A

1.2 Регуляторы на блоках стенда необходимо установить в следующие позиции: на блоке питания включить тумблеры «сеть», «генератор», «коммутатор осциллограф»; на панели активных элементов: переключатель П1 (источник тока J) – в среднее положение (выключено); на блоке ГЗ: тумблер «пределы выходного напряжения» – в положение 10 В, регулятор выходного напряжения повернуть до отказа по часовой стрелке; на блоке Г2: переключатель формы (ПФ) – в позицию «», регулятор «подстройка 2» (около него светится индикатор) – до отказа против часовой стрелки; на блоке Г1: тумблер «генератор» – в положение «внутр.»; на блоке коммутатора осциллографа (ЭК): тумблер «каналы» – в среднее положение (включены оба канала), тумблеры «вход 1 канала» и «вход X» – в положение «внутр.» при этом вход 1 канала подключается к выходу генератора и покажет напряжение подводимое ко входу исследуемой цепи. Регулятор «ослабление 1 канала» в положение 1:10, а регулятор «усиление» этого канала в такое положение, чтобы размах кривой входного напряжения занял на экране осциллографа две клетки. Для второго канала тумблер «ослабление» перевести в положение 1:1, а регулятором «усиление» добиваться изображения необходимого размера. Если при повороте регулятора «усиление» на максимальный угол, изображение на втором канале имеет недостаточные для наблюдения размеры, то увеличить сопротивление резистора R_M . Регулятор «развертка» (вход «X») установить в положение, при котором на экране укладывается два периода исследуемых кривых. Регуляторами «расхождение», «усиление X», « $\updownarrow$ », « $\leftrightarrow$ » установить наилучшее изображение на экране. Зарисовать получившиеся

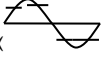
кривые. Отметить на рисунке уровень «тока равного нулю», для чего «усиление 2 канала» вывести на нуль.

1.3 Регулятор «подстройка 2» поворачивать по часовой стрелке. При этом напряжение треугольной формы будет превращаться в пилообразное. Наблюдать за изменением формы тока кривой. Зарисовать изображение в одной позиции. Регулятор «подстройка 2» повернуть до отказа против часовой стрелки (привести в исходное положение).

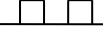
1.4 Переключатель ПФ на блоке Г3 перевести в положение . Напряжение на входе цепи примет однополупериодную форму. Регулятор «усиление 2 канала» на ЭК установить в положение, при котором изображение занимает две клетки (по вертикали). Зарисовать кривые напряжения и тока. Поворачивать регулятор «подстройка 2» по часовой стрелке, при этом кривая напряжения из однополупериодной станет превращаться в двухполупериодную. Зарисовать формы напряжения и тока в характерных точках. Регулятор «подстройка 2» повернуть до отказа против часовой стрелки.

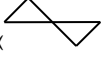
1.5 Переключатель ПФ на блоке Г2 перенести в положение . Установить регуляторы на ЭК в положения, при которых размах напряжения занимает две клетки, а размах тока – три клетки. Регулятором «расхождение» добиться совмещения обеих кривых и убедиться, что импульсы тока совпадают с вертикальными фронтами прямоугольного напряжения на входе цепи. Развести изображения, поместив их друг под другом. Зарисовать кривые напряжения и тока.

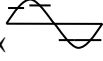
1.6 Измерить значения размаха напряжения и импульсов тока. Для этого необходимо определить цену деления по вертикали каждого канала осциллографа при данном положении регуляторов «усиление». Делается это следующим образом. Регулятор «тарировочное напряжение» следует повернуть до отказа против часовой стрелки, нажать кнопку «тарировка» (первого канала для напряжения, второго канала – для тока), при этом изображение прямоугольного входного напряжения исчезнет и вместо него появится горизонтальная линия, а вольтметр V1 на блоке Г3 покажет нулевое значение. Держа кнопку нажатой, поворачивать регулятор «тарировка» по часовой стрелке до момента, когда тарировочный прямоугольный импульс не достигнет размаха в 1 или 2 клетки. Вольтметр V1 при этом покажет значение тарировочного напряжения для соответствующего канала U_K . Зная величину U_K и количество клеток, занимаемых тарировочным напряжением, можно определить цену деления клетки, а отсюда величины напряжения и тока.

1.7 Переключатель ПФ на блоке Г2 установить в положение «». При этом кривая напряжения будет иметь синусоидальную, а кривая тока – косинусоидальную форму, т.е. ток в этом случае опережает напряжение на угол, близкий к четверти периода. Зарисовать изображение. Ограничить кривую напряжения поворотом регуляторов «подстройка 1 и подстройка 2». При не гармоническом напряжении форма тока становится отличной от напряжения. Зарисовать изображения. Регуляторы «подстройка 1 и 2» повернуть до отказа против часовой стрелки.

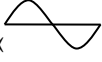
1.8 Отключить от точек «А» и «В» конденсатор и подключить вместо него резистор $R_B = 500 \text{ Ом}$. Установить размеры изображений, удобные для наблюдений. Зарисовать кривые напряжения и тока при напряжениях тех же форм, которые устанавливались при исследовании цепи С (п.п.1.2–1.7). Убедится, что в резистивных цепях форма протекающего в цепи тока повторяет форму приложенного к цепи напряжения.

1.9 Вместо резистора $R_B = 500 \text{ Ом}$ подключить катушку индуктивности. Переключатель ПФ установить в позицию «». Изменяя положение регулятора «подстройка 2», зарисовывать кривые напряжения и тока. Регулятор «подстройка 2» повернуть до отказа против часовой стрелки.

1.10 Переключатель ПФ установить в положение «». Зарисовать получающиеся изображения.

1.11 Переключатель ПФ перевести в положение «». При этом кривые напряжения и тока будут синусоидальной формы, но кривая тока отстает от напряжения на четверть периода. Зарисовать изображение.

2 Измерение действующего значения и начальной фазы токов во всех ветвях и падений напряжений на всех элементах RLC-цепи

2.1 Собрать цепь по схеме рисунка 2.14. На блоке питания включить тумблер «ф–V3»; на блоке Г2: переключатель ПФ – в первую позицию « , f-var»; на блоке Г1: тумблер в положение «2–20 кГц» и регулятором «частота» установить частоту $f = 6 \text{ кГц}$; на фазометре «ф–V3»: тумблер в положение «ф». Установить регулятором на блоке Г3 значение напряжения $U_1 = 2 \text{ В}$ или близкое ему. Значение U_1 записать в таблицу 2.3. В качестве индуктивности и емкости взять элементы согласно варианту из таблицы 2.1. Записать их номинальные величины в таблицу 2.3. $R_2 = 500 \text{ Ом}$, $R_3 = 1 \text{ кОм}$.

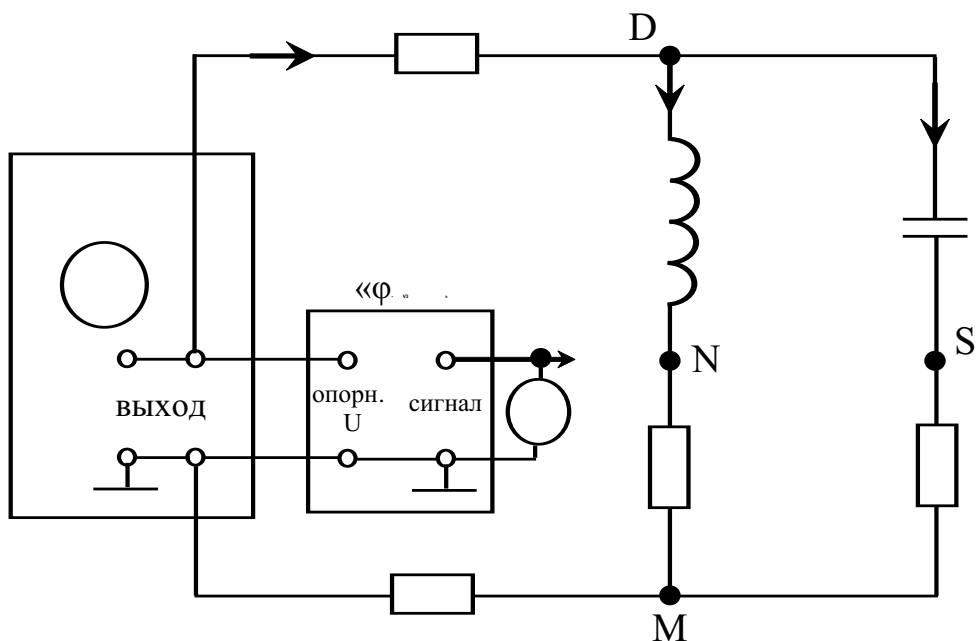


Рисунок 2.14

2.2 Внешним проводником закоротить резистор $R_1 = 100 \text{ Ом}$. Делается это потому, что в данном эксперименте функцию этого резистора выполняет измерительный резистор $R_{шз} = 100 \text{ Ом}$. Потенциальный зажим «Сигнал» фазометра (следовательно, и потенциальный зажим вольтметра V2) подключить к точке М. Фазометр будет измерять разность фаз между напряжением на зажимах генератора и падением напряжения на резисторе $R_{шз}$, то есть разность фаз между напряжением $\dot{U}_1$ и током первой ветви $\dot{I}_1$. Вольтметр V2 измерит действующее значение напряжения на резисторе $R_{шз}$. Если начальную фазу напряжения на генераторе принять за нулевую (т.е. $\dot{U}_1 = U_1$), то комплексное значение тока в первой ветви будет $\dot{I}_1 = \left(\frac{U_2}{R_{шз}} \right) e^{j\varphi}$,

где φ – показание фазометра. Уменьшить частоту в два раза (до 3 кГц). Записать показания приборов в таблицу 2.2. Установить исходную частоту.

Таблица 2.2

Точки измерения		Измеряемая величина	При частоте f		При частоте $0,5 f$	
			Показания V2, В	Показание фазометра φ , град	Показания V2, В	Показание фазометра φ , град
М	Рис.	$U_{Rшз}$				

N	2.14	U_{R2}				
D		U_{DM}				
S		U_{R3}				
N	Рис.	U_L				
S	2.15	U_C				

2.3 Снять перемычку, замыкающую резистор R_1 и закоротить резистор $R_{ш3}$. Электрические параметры цепи остаются без изменения, но нижние (рисунок 2.14) выводы резисторов R_2 и R_3 при этом будут соединены с корпусом генератора. Перенести потенциальный вывод фазометра и вольтметра V2 из точки М в точку N. Вольтметр V2 покажет действующее значение напряжения на резисторе R_2 , а фазометр – разность фаз между напряжением на выходе генератора и током во второй ветви. При этом

$$\dot{I}_2 = \frac{U_2}{R_2} e^{j\varphi}; \quad \dot{U}_{R_2} = U_{R_2} \cdot e^{j\varphi}.$$

Записать показания приборов на частотах f и $0,5f$.

2.4 Перенести потенциальный вывод «Р» из точки «N» в точку «D». При этом будет измерено комплексное действующее значение напряжения на участке DM: $\dot{U}_{DM} = U_{DM} \cdot e^{j\varphi_{DM}}$. Записать показания приборов для двух частот f и $0,5f$.

2.5 Перенести потенциальный вывод «Р» из точки «D» в точку «S». Аналогичным образом измерить комплексные действующие значения напряжения $\dot{U}_{R_3} = U_{R_3} \cdot e^{j\varphi}$ и тока $\dot{I}_3 = \frac{U_{R_3}}{R_3} \cdot e^{j\varphi}$.

2.6 Измерить комплексные действующие значения напряжения на индуктивной катушке L и конденсаторе C. Для этого необходимо один зажим катушки и конденсатора соединить с корпусом генератора так, чтобы электрические параметры цепи остались без изменений: резистор R_2 , катушку L, резистор R_3 и емкость C поменять местами. Цепь после таких перестановок принимает вид, показанный на рисунке 2.15. Подключить потенциальный вывод фазометра и вольтметра V2 «Р» поочередно к точкам «N» и «S». В первом случае будем измерять комплексное напряжение на индуктивной катушке L, во втором – на конденсаторе C: $\dot{U}_L = U_L \cdot e^{j\varphi_{U_L}}; \quad \dot{U}_C = U_C \cdot e^{j\varphi_{U_C}}$. Измерения произвести на частотах f и $0,5f$.

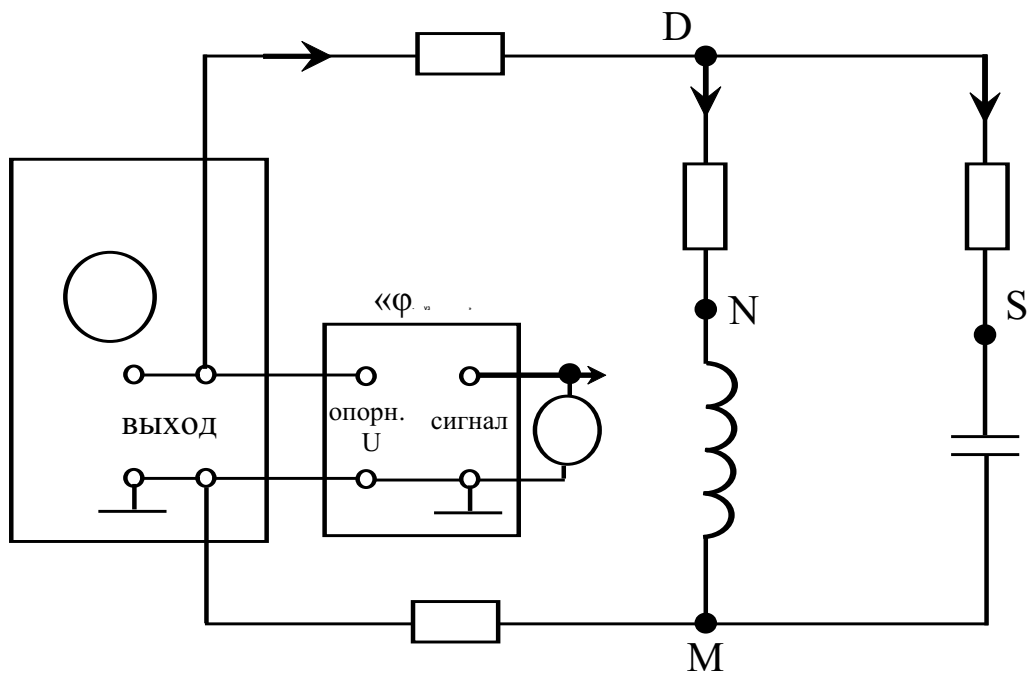


Рисунок 2.15

Содержание отчета, форма и правила оформления отчета

Форма отчета соответствует лабораторной работе 1, а содержание отчета должно включать выполнение следующих заданий:

ЗАДАНИЕ 1

1.1 Проанализировать результаты выполненных экспериментов п.п. 1.2–1.11, сравнить кривые тока в емкостной, резистивной и индуктивной цепях, полученные экспериментально.

1.2 Рассчитать время нарастания фронта прямоугольного напряжения при эксперименте в емкостной цепи. Для этого необходимо проделать следующее:

- по тарировочным экспериментам определить размах напряжений на конденсаторе С и резисторе R_M ;

- определить размах тока в цепи С, зная размах падения напряжения на резисторе R_M и значение сопротивления этого резистора;

- из выражения $i = C \frac{du_C}{dt}$ определить время нарастания фронта прямоугольного напряжения Δt .

1.3 Определить угол сдвига начальных фаз между напряжением и током, если напряжение синусоидальной формы приложено:

а) к цепи R;

б) к цепи L;

в) к цепи C.

ЗАДАНИЕ 2

2.1 Зная действующие значения и фазы токов в ветвях и напряжений на элементах, записать выражения для комплексных действующих значений токов $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_3$ и напряжений $\dot{U}_1$, $\dot{U}_{R1}$, $\dot{U}_{R\emptyset 3}$, $\dot{U}_{R2}$, $\dot{U}_{R3}$, $\dot{U}_L$, $\dot{U}_C$ в таблицу 2.3.

2.2 Записать мгновенные значения величин, рассчитанных в п.2.1.

2.3 Сравнить сумму действующих значений токов ($I_2 + I_3$) со значением I_1 и убедиться в их неравенстве. Сопоставить аналогичные результаты, полученные в лабораторной работе 1. Объяснить, почему в цепях, рассмотренных в предыдущей работе, алгебраическая сумма модулей токов в каждом узле равнялась нулю, а в данной – отлична от нуля. Сравнить аналогичные комплексные величины $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2 + \dot{I}_3$. Объяснить, почему для модулей токов в RLC-цепях первый закон Кирхгофа несправедлив, а для комплексных действующих значений токов – справедлив. Сравнить мгновенные токи i_1 и $i_2 + i_3$.

Таблица 2.3

Измеренные величины	$U_1 =$; $R_1 = R_{\emptyset 3} = 100 \text{ Ом}; R_2 = 500 \text{ Ом}; R_3 = 1000 \text{ Ом};$ $L =$; $C =$.		
	При частоте f		При частоте $0,5 f$
	Получено по экспериментальным данным	Получено по расчету	Получено по экспериментальным данным
$U_{R\emptyset 3}, \text{ В}$			
$I_1, \text{ мА}$			
$I_2, \text{ мА}$			
$I_3, \text{ мА}$			
$U_{R1}, \text{ В}$			
$U_{R2}, \text{ В}$			
$U_{R3}, \text{ В}$			
$U_L, \text{ В}$			
$U_C, \text{ В}$			
$U_{DM}, \text{ В}$			

2.4 Сравнить модули и комплексные действующие значения напряжения между точками DM и напряжениями на катушке L и резисторе R_2 , а также – между напряжением на конденсаторе C и резисторе R_3 (см. рисунок 2.14).

2.5 Сравнить сумму модулей и комплексных для напряжений на генераторе и на элементах R_1, L, R_2 или R_1, C, R_3 .

2.6 Записать комплексные действующие значения напряжений и токов при частоте $0,5f$; сравнить с аналогичными величинами, полученными при частоте f . Сделать вывод о зависимости их от частоты.

2.7 Рассчитать любым методом для цепи рисунка 2.14 комплексные действующие значения токов $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ и напряжений на каждом элементе, а также на участке DM, если $f = 6$ кГц; $R_1 = 0$; $R_{шз} = 100$ Ом, а остальные параметры элементов определяются вариантом задания. Результаты расчетов занести в таблицу 2.3.

2.8 Построить по рассчитанным данным векторную диаграмму токов и напряжений, причем векторы напряжений нанести одним цветом, а векторы тока – другим.

2.9 Качественно (без выполнения расчетов) начертить векторную диаграмму напряжений и токов для частоты в два раза меньшей.

Контрольные вопросы и защита лабораторной работы

1 В каких цепях закон Ома для мгновенных значений напряжений и токов справедлив, и в каких нет?

Вопросы с 2 по 10 относятся к цепи с емкостным элементом

2 Докажите, что $i = C \frac{du_C}{dt}$.

3 Нарисуйте кривую тока, если напряжение изменяется в соответствии с кривой, состоящей из двух экспонент (рисунок 2.16).

4 Нарисуйте кривую тока, если $U_C = at^2$, где a – постоянная величина.

5 Нарисуйте кривые токов, если напряжение имеет формы, показанные на рисунках 2.17 а; б; в; г.

6 Нарисуйте на одном графике кривые тока, если напряжение изменяется в соответствии с кривыми а, б рисунка 2.18.

7 Напряжение изменяется по трапециевидному закону (рисунок 2.18 а). Нарисуйте кривую тока.

8 Напряжение изменяется по кривой, близкой к прямоугольной форме. При каком времени нарастания фронта напряжения импульс тока в цепи окажется 10 мА, если $C = 1$ мкФ?

9 Какую форму имеет напряжение, если ток в цепи изменяется в соответствии с кривой рисунка 2.19, причем в интервалах от t_1 до t_2 и от t_3 до t_4 кривая имеет косинусоидальную форму?

10 Постройте кривые токов и отношений $\frac{u_R}{i}$ в цепи R для напряжений, указанных в пунктах 3–9.

11 Докажите, что в цепи L: $i = \frac{1}{L} \int u_L dt$.

12 Постройте кривую напряжения в цепи L, если ток имеет:

а) прямоугольную, б) синусоидальную формы. Нарисуйте кривые $\frac{u_L}{i}$ для обоих случаев.

13 Составьте уравнения состояния цепи (рисунок 2.14) для:

а) мгновенных значений; б) комплексных значений.

14 В каких пределах изменяется разность фаз между входным напряжением и током, если $\omega = 1000$ рад/с; $L = 0,5$ Гн; $R = (100\text{--}2000)$ Ом в цепи:

а) рисунка 2.20; б) рисунка 2.21.

15 Для цепи рисунка 2.22 $f = 5$ кГц; $L = 15,9$ мГн; $R_1 = R_2 = 50$ Ом. Определите $\frac{U_2}{U_1}$.

16 В цепи рисунка 2.20 $R = 1$ кОм; $L = 0,1$ Гн; $f = 2757$ Гц. Рассчитать R и L цепи рисунка 2.21, если входные характеристики обеих цепей одинаковые.

17 Вычислить элементы схемы замещения цепи, векторная диаграмма которой показана на рисунке 2.23, если $U = 15$ В; $I = 5$ А; $\varphi = 35^\circ$; $f = 500$ Гц.

Защита лабораторной работы проводится при наличии отчета в виде устного опроса. Подготовка к защите осуществляется по настоящим методическим указаниям.

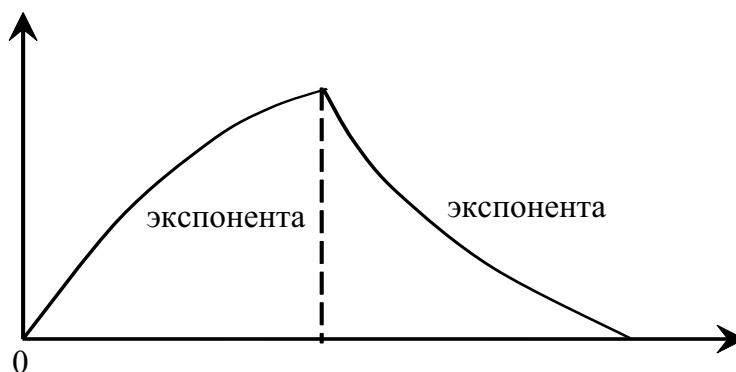
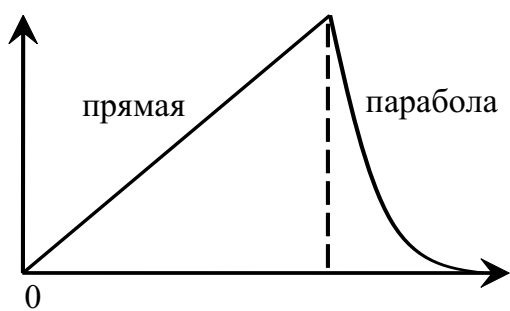


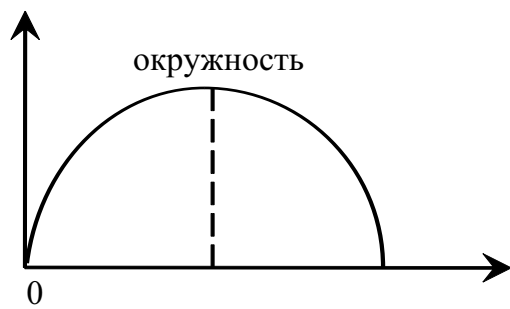
Рисунок 2.16



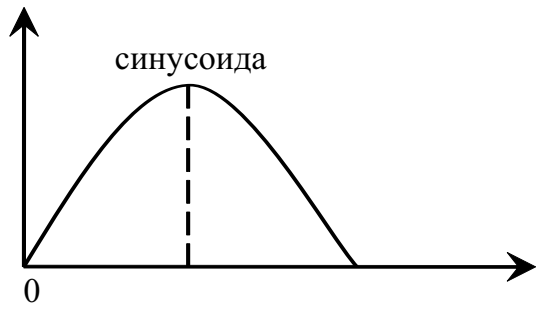
а)



б)

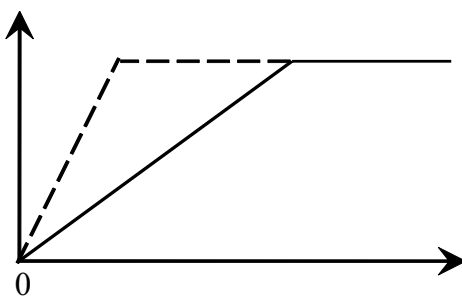


в)

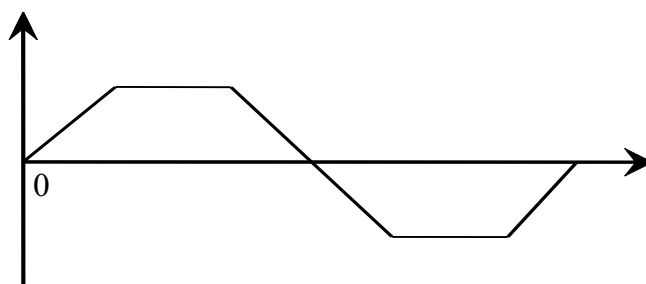


г)

Рисунок 2.17



а)



б)

Рисунок 2.18

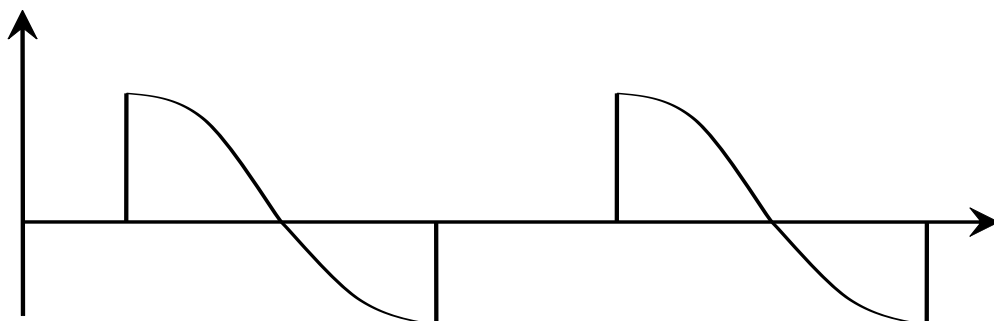


Рисунок 2.19

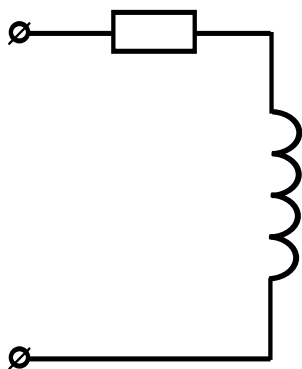


Рисунок 2.20

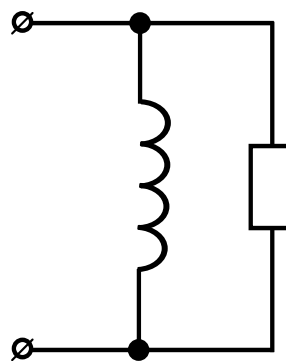


Рисунок 2.21

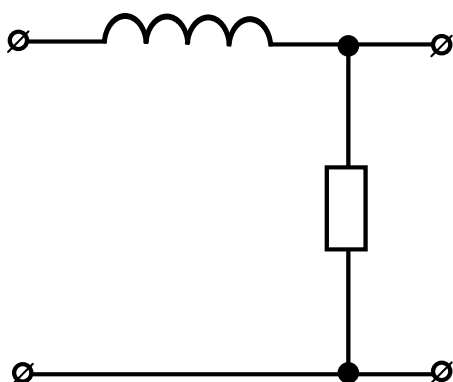


Рисунок 2.22

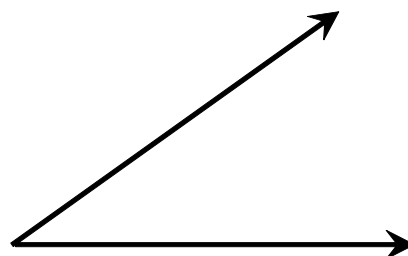


Рисунок 2.23

Рекомендуемая литература: [1], [2], [3]

Лабораторная работа 3

Анализ линейных электрических цепей переменного тока. (3ч)

Цель и содержание

Цель работы: Экспериментально исследовать режимы работы цепи с параллельным соединением участков цепи, содержащих R , L и C элементы, в том числе режима «резонанса токов».

Содержание работы:

1 Исследование токораспределения в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора при различных величинах емкости конденсатора. Определение условия резонанса в параллельной цепи.

2 Исследование частотных характеристик цепи с параллельным соединением R , L и C элементов.

Теоретическое обоснование

В качестве критерия режима резонанса в электрических цепях, содержащих катушки индуктивности и конденсаторы, принимается совпадение по фазе тока и напряжения на входных зажимах, т.е. фазовый резонанс. Ток совпадает по фазе с напряжением, если входное реактивное сопротивление или входная реактивная проводимость всей цепи оказываются равными нулю. Возможны два основных типа резонанса: при последовательном соединении катушки индуктивности и конденсатора – резонанс напряжений и при их параллельном соединении – резонанс токов.

Резонанс напряжений возможен на неразветвленном участке электрической цепи, который содержит индуктивный L , емкостной C и резистивный R элементы, т. е. в последовательном колебательном контуре (рисунок 3.1).

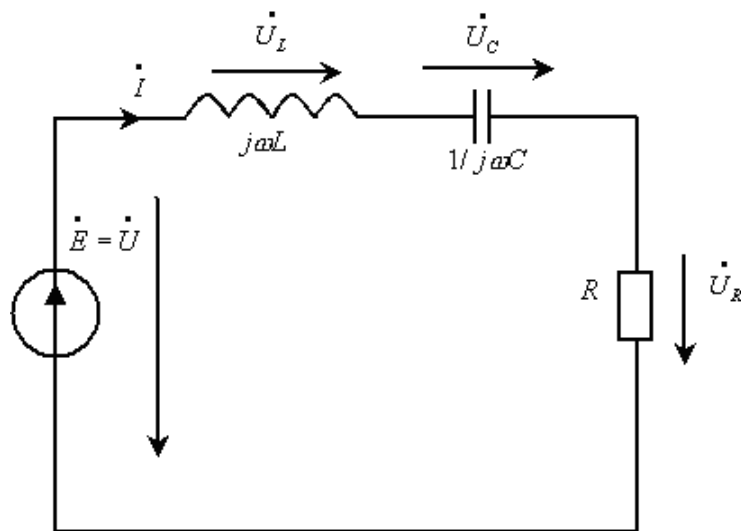


Рисунок 3.1 – Последовательный колебательный контур

По закону Ома комплексная величина тока в контуре определяется

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{U e^{j\psi_U}}{Z e^{j\varphi}},$$

где $\underline{Z} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$ – комплексное входное сопротивление,

$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ – его модуль (полное сопротивление),

$\varphi = \psi_U - \psi_i = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ – его аргумент.

Действующее значение тока: $I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$

Режим работы неразветвленного участка цепи, при котором ее ток и напряжение совпадают по фазе $\psi_u = \psi_i$, $\varphi = 0$, называется резонансом напряжений. В режиме резонанса напряжение на емкостном и напряжение на индуктивном элементах равны и находятся в противофазе (рисунок 3.2).

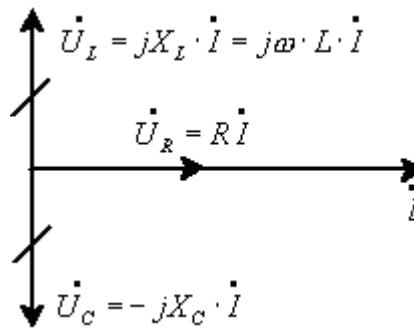


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма при резонансе напряжений

Резонансного режима можно достичь, изменяя частоту приложенного к цепи напряжения или параметры цепи: индуктивность катушки и емкость конденсатора. Величины угловой частоты ω_i , индуктивности L_o и емкости C_o , в резонансном режиме:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

Если напряжение U на зажимах цепи и активное сопротивление R цепи не изменяются, то ток при резонансе имеет наибольшее значение, равное $I_p = \frac{U}{R}$ и не зависящее от величин реактивных сопротивлений. Напряжения на емкостном и индуктивном элементах могут во много раз превысить напряжение питания, если $\omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{\frac{L}{C}} > R$, где $\sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$ – характеристическое (волновое) сопротивление колебательного контура. Отношение $\frac{U_{C_p}}{U} = \frac{U_{L_p}}{U} = \frac{\rho}{R} = Q$ определяет кратность превышения напряжения на зажимах индуктивного и емкостного элементов над напряжением питания и называется добротностью контура.

Практическое значение имеют зависимости действующих или амплитудных значений токов и напряжений от частоты для цепей, в которых возможен резонанс. Эти зависимости называются резонансными кривыми (рисунок 3.3).

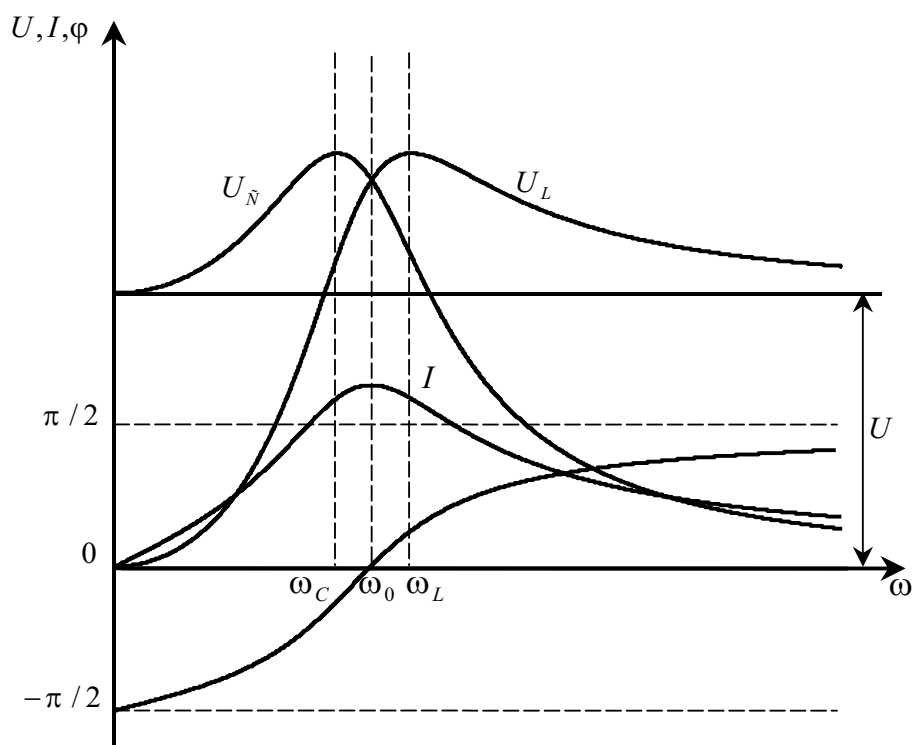


Рисунок 3.3 – Резонансные кривые

Для оценки избирательных свойств электрической цепи введено понятие ширины резонансной кривой или полосы пропускания контура, которую определяют как разность верхней ω_B и нижней ω_H частотами, между которыми $\frac{I}{I_P} > \frac{1}{\sqrt{2}}$. Чем выше добротность Q , тем уже полоса пропускания контура.

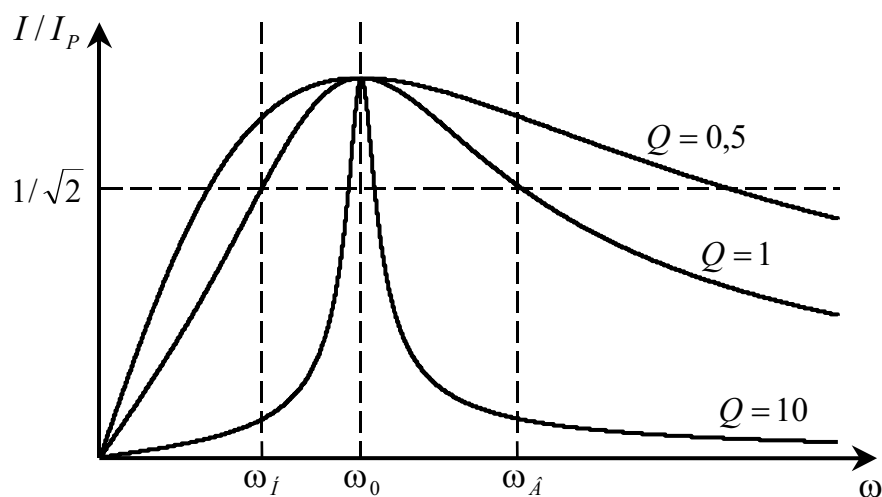


Рисунок 3.4 – Полоса пропускания контура

Резонанс токов может возникнуть в параллельном колебательном контуре (рисунок 3.5).

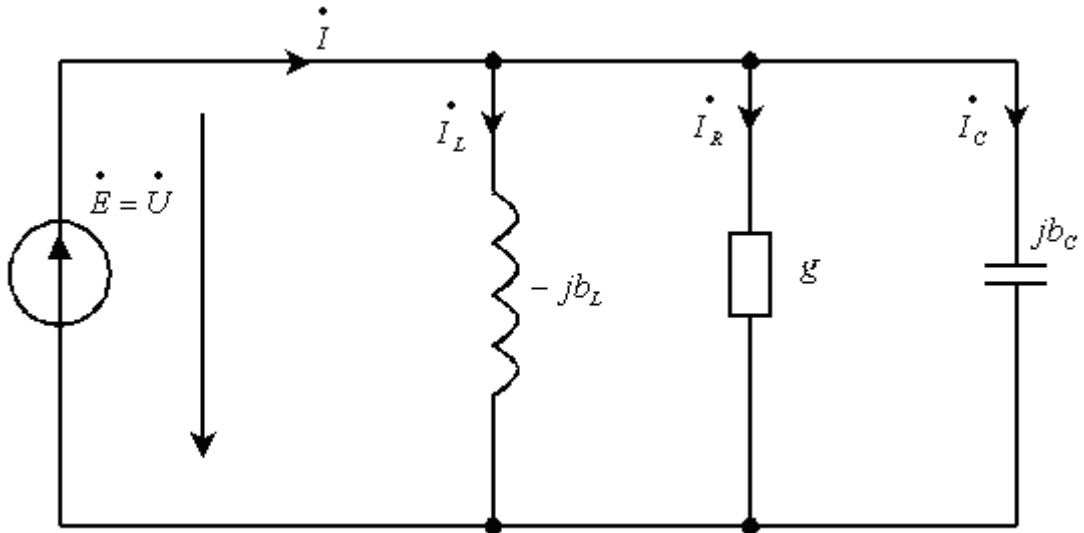


Рисунок 3.5 – Параллельный колебательный контур

При напряжении питания $\dot{U} = Ue^{j\psi_U}$ комплексное значение общего тока будет равно:

$$\dot{I} = \underline{Y} \cdot \dot{U} = Y e^{-j\varphi} U e^{j\psi_U},$$

где $\underline{Y} = g - jb = g - j(b_L - b_C)$ – комплексная проводимость цепи;

$Y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}$ – ее модуль (полная проводимость) и

$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg \frac{\frac{1}{\omega L} - \omega C}{g}$ – аргумент. Действующее значение тока

$$I = Y \cdot U = U \cdot \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}.$$

При угловой частоте $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ индуктивная $b_L = \frac{1}{\omega L}$ и емкостная $b_C = \omega C$

проводимости ветвей одинаковы $b_L = b_C$, угол сдвига фаз тока и напряжения $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$. Полная проводимость цепи $Y = g$, и общий ток $I_p = g \cdot U$. Если напряжение U на зажимах цепи и активная проводимость g цепи не изменяются, то общий ток при резонансе имеет наименьшее значение. Токи в индуктивном и емкостном элементах равны по величине и находятся в противофазе. (рисунок 3.6).

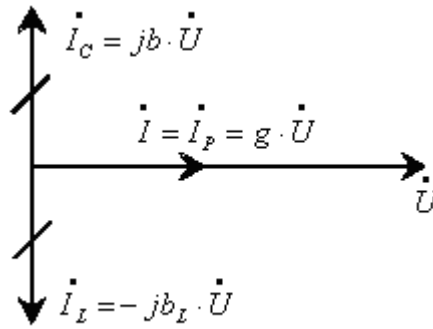


Рисунок 3.6 – Векторная диаграмм при резонансе токов

Если в ветвях с индуктивным и емкостным элементами включены резисторы R_L и R_C , то условием резонанса токов в цепи будет равенство индуктивной и емкостной проводимостей ветвей (рисунок 3.7):

$$\frac{\omega L}{R_L^2 + (\omega L)^2} = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{1}{R_C^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}, \text{ резонансная частота } \omega = \omega_o \cdot \sqrt{\frac{\rho^2 - R_L^2}{\rho^2 - R_C^2}}.$$

Если $R_C = 0$, то резонанс наступает при: $\frac{\omega L}{R_L^2 + \omega^2 \cdot L^2} = \omega C$ (рисунок 3.8).

Добротность для параллельного контура $Q = \frac{I_L}{I_P} = \frac{I_C}{I_P} = \frac{\gamma}{g} = \frac{\rho}{R_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}}}$ определяет кратность превышения тока в индуктивном и емкостном элементах над общим током при резонансе, где $R_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление $R_{\hat{Y}\hat{E}\hat{A}} = \frac{L}{RC} = \frac{\rho^2}{R} = Q \cdot \rho = Q^2 \cdot R$;

$\gamma = \sqrt{\frac{C}{L}}$ – волновая проводимость.

Резонансные свойства контура характеризуют также величиной, носящей название затухание контура $d = \frac{1}{Q}$.

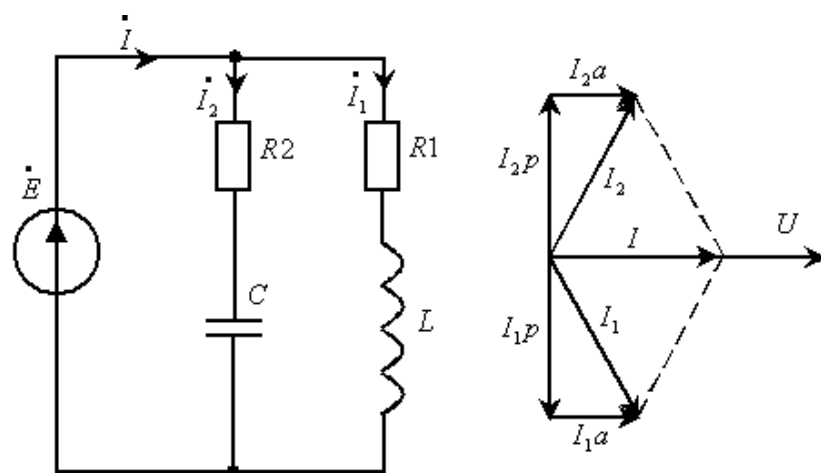


Рисунок 3.7 – Колебательный контур с потерями и векторная диаграмма

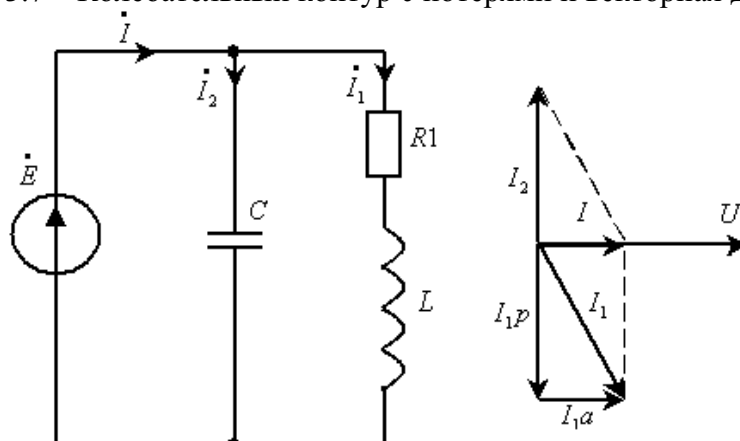


Рисунок 3.8 – Колебательный контур и векторная диаграмма при $R_C = 0$

Аппаратура и материалы

Аппаратура и материалы представлены в лабораторной работе 1

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности представлены в лабораторной работе 1

Методика и порядок выполнения работы

1 Исследование токораспределения в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора при различных величинах емкости конденсатора

1.1 Собрать цепь по схеме рисунка 3.9. Цепь состоит из катушки индуктивности L_A , емкости C_A и резисторов R_M , $R_{шз}$, R_A ($R_L = 25$ Ом – резистивное сопротивление катушки индуктивности).

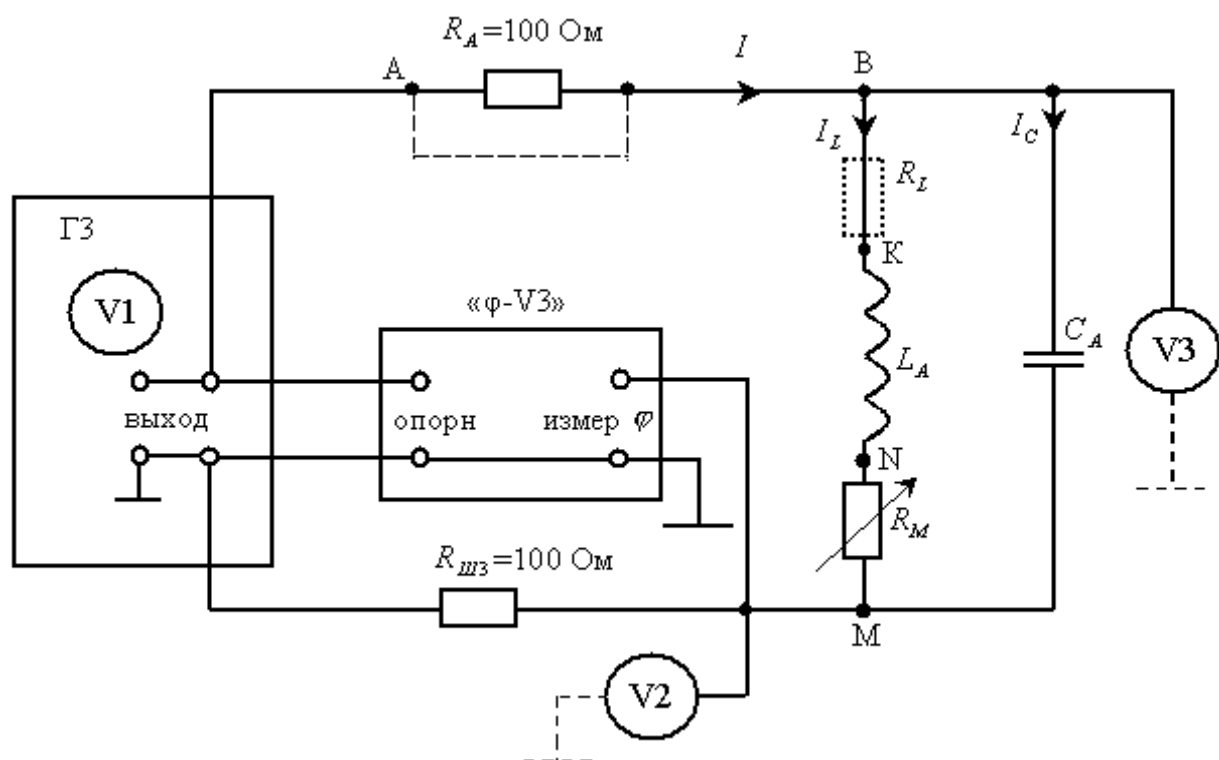


Рисунок 3.9 – Электрическая цепь с параллельным соединением L и C элементов

Регуляторы на блоках стенда установить в следующие позиции:

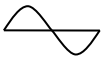
- на блоке питания включить тумблеры «Сеть»; «Генератор», «V2» и «φ-V3»;
- на блоке Г1: тумблер «генератор» – в положение «внутр.», переключатель диапазонов – (2–20) кГц; регулятор «частота плавно» – до отказа против вращения часовой стрелки;
- на блоке Г2 переключатель формы ПФ сигнала установить в первое положение (, f-var);
- на блоке Г3 тумблер «пределы» вольтметра V1 установить в положение 10 В. Регулятором выходного напряжения вольтметра V1 установить напряжение ≈ 2 В (записать величину напряжения в таблицу 3.1);
- на блоке «φ-V3» установить переключатель вида работы в положение «φ» (измерение разности фаз между током и напряжением);
- переключатель на магазине установить в положение $R_M = 160$ Ом;
- резистор R_A замкнуть проводником.

Таблица 3.1

$U_1 =$; $R_M = 160 \text{ Ом}$; $R_L = 25 \text{ Ом}$; $R_{шз} = R_A = 100 \text{ Ом}$; $L_A =$, $f_0 =$.						
Значение и величина емкости, C , нФ	$R_{шз}$			R_M		
	U_2 , мВ	φ , град	U_3 , В	U_2 , мВ	φ , град	U_3 , В
$C_A = 33$						
$C_B = 23$						
$C_K = 1.2$						
$C_H = 270$						

1.2 Исследовать цепь в режиме резонанса. Для этого медленно увеличивать частоту на блоке Г1. По мере приближения к резонансной частоте входное сопротивление цепи будет возрастать, а ток в неразветвленной части цепи уменьшаться. Найти резонансную частоту f_0 по минимуму показания вольтметра V2. Убедиться, что выходное напряжение генератора остается практически неизменным. Произвести измерения падения напряжения на резисторе $R_{шз}$ вольтметром V2 для определения тока в неразветвленной части цепи $\dot{I} = \frac{U_2}{R_{шз}} e^{j\psi_U}$. Результаты измерений занести в таблицу 1. Фаза ψ также будет

иметь минимум при резонансной частоте f_0 (принять $\psi = 0$). Вольтметром V3 измерить падение напряжения на емкости.

1.3 Отключить конденсатор C_A , произвести измерения $U_{R_{шз}}$, φ . Вместо конденсатора C_A поочередно подключать конденсаторы C_B , C_K и C_H и произвести измерения аналогично п.1.2. Показания приборов занести в таблицу 3.1.

1.4 Исследовать токи в параллельных ветвях цепи. Для этого снять перемычку «короткое» с резистора R_A и замкнуть резистор $R_{шз}$. Потенциальный зажим «измер.» фазометра и потенциальный зажим вольтметра V2 отключить от точки М и подключить к точке N (рисунок 3.9). Поочередно подключить емкости C_A , C_B , C_K и C_H и провести измерения падения напряжения на резисторе R_M вольтметром «V2» и разности фаз « φ_N » фазометром « φ -V3» при резонансной частоте, полученной по п.1.2. Вольтметром V3 измерить падение напряжения на емкости U_C . Данные занести в правую часть таблицы 3.1.

2 Исследование частотных характеристик цепи с параллельным соединением R , L и C элементов

2.1 Восстановить электрическую цепь согласно схемы рисунка 3.9, для этого снять перемычку «короткое» с резистора $R_{шз}$ и внешним проводником закоротить резистор R_A . Подключить потенциальные выводы фазометра «φ-V3» и вольтметра «V2» к точке М.

2.2 Снять частотные зависимости тока и угла сдвига фаз в неразветвленной части схемы: $I = f(f)$ и $\varphi = f(f)$ при емкости C_A и сопротивлении резистора $R_M = 160$ Ом. Для этого, кроме резонансной частоты f_0 , найти частоты, при которых ток в неразветвленной цепи увеличиться в 1,41; 2; 3; 4 и 5 раз по сравнению с током при резонансе (соответственно во столько раз изменится падение напряжения на резисторе $R_{шз}$). Изменение частоты проводить как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения от f_0 . При $I = 1,41 \cdot I_0$ частоты будут граничными. Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

2.3 Исследовать влияние на зависимость $I = f(f)$ величины сопротивления резистора R_M . Для этого установить значение $R_M = 320$ Ом. Определить резонансную частоту цепи, установив наименьший ток в неразветвленной части цепи изменением частоты генератора. Изменяя частоту генератора, снять зависимости $I = f(f)$ и $\varphi = f(f)$ аналогично п.2.2. Результаты занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Точки измерения	$R_M = 160 \text{ Ом}, C = C_A$				$R_M = 320 \text{ Ом}, C = C_A$				$R_M = 160 \text{ Ом}, C = C_B$			
	f , кГц	U_2 , мВ	φ , град	I , мА	f , кГц	U_2 , мВ	φ , град	I , мА	f , кГц	U_2 , мВ	φ , град	I , мА
U_0												
$1,41U_0$												
$2U_0$												
$3U_0$												
$4U_0$												
$5U_0$												

2.4. Исследовать влияние на зависимости $I = f(f)$ и $\varphi = f(f)$ величины емкости конденсатора. Для этого вместо конденсатора C_A подключить конденсатор C_B при величине сопротивления резистора $R_M = 160$ Ом. Провести измерения согласно п.2.3.

Содержание отчета и его форма

Форма отчета соответствуют лабораторной работе №1, а содержание отчета должно включать выполнение следующих заданий:

ЗАДАНИЕ 1

1.1 По экспериментальным данным для схемы рисунка 3.9 при всех исследованных значениях емкостей C_A , C_B , C_K и C_H определить действующее значение тока I в неразветвленной части цепи и его начальную фазу ψ_i . Результаты занести в таблицу 3.3. Построить график зависимости $I = f(C)$.

1.2 Определить ток I_1 в индуктивной ветви цепи по падению напряжения на резисторе и величине сопротивления резистора $R_M = 160$ Ом. Зная падения напряжения на конденсаторах C_A , C_B , C_K и C_H , определить токи I_C в емкостной ветви при частоте f_0 . Результаты расчетов занести в таблицу 3.3.

1.3. По экспериментальным данным построить векторные диаграммы токов и напряжений для схемы рисунка 3.9 при всех изменениях параметров емкости п.1.2–1.4 методики выполнения работы.

Таблица 3.3 – Результаты исследования

Определяемые величины	Величины емкости			
	C_A	C_B	C_K	C_H
$\dot{I} = \dot{I}_0$				
$\dot{I}_L = \dot{I}_1$				
$\dot{I}_C = \dot{I}_2$				
$\dot{I}_1 / \dot{I}$				
$\dot{I}_2 / \dot{I}$				
$\dot{U}_{\bar{H}}$				
$\dot{U}_{\bar{H}N}$				
$\dot{U}_{\bar{H}\bar{E}}$				
$\dot{U}_{\bar{E}\bar{A}}$				
$\bar{D}_L$				
$\bar{D}_{R_0 \ 3}$				
$Z_{\bar{A}\bar{O}}$				

ЗАДАНИЕ 2

2.1 Рассчитать отношения токов $\frac{I_1}{I}$ и $\frac{I_2}{I}$, где I_1 , I_2 , I – их действующие значения в индуктивной, емкостной ветвях и неразветвленной части электрической цепи при резонансе ($C = C_A$, $R_M = 160 \text{ Ом}$, $f = f_0$). Сравнить токи I_1 , I_2 и сделать выводы. Результаты расчетов занести в таблицу 3.3

2.2 По результатам исследования п.2 методики и порядка выполнения работы построить зависимости тока неразветвленного участка электрической цепи от частоты $I = f(f)$ при всех изменениях параметров схемы рисунка 3.9.

2.3 Рассчитать добротность контура $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$, где Δf – полоса пропускания контура: $\Delta f = f_{\text{гв}} - f_{\text{дн}}$. Результаты занести в таблицу 3.4.

ЗАДАНИЕ 3

3.1 Для схемы рисунка 3.9 аналитически (используя любой метод) рассчитать токи, падение напряжения на всех элементах цепи при резонансной частоте $f = f_0$, приняв активное сопротивление индуктивной ветви равным $R_L + R_M$, $U = 2 \text{ В}$, $R_M = 160 \text{ Ом}$, $R_L = 25 \text{ Ом}$. Построить векторную диаграмму токов и напряжений при резонансной частоте f_0 .

Таблица 3.4 – Избирательные свойства контура

Рассчитано аналитически					Получено экспериментально			
	Q	Δf	f_0	$R_{\text{ЭКВ}}$	Q	Δf	f_0	$R_{\text{ЭКВ}}$
$C_A, R_M = 160 \text{ Ом}$								
$C_B, R_M = 160 \text{ Ом}$								
$C_A, R_M = 320 \text{ Ом}$								

3.2 Рассчитать аналитически резонансные частоты и добротность контура, сопротивление параллельного колебательного контура на частоте резонанса $R_{\text{ЭКВ}}$, для исследованных режимов работы цепи рисунка 3.9 при:

- 1) $C = C_A$, $R_M = 160 \text{ Ом}$; 2) $C = C_A$, $R_M = 320 \text{ Ом}$; 3) $C = C_B$, $R_M = 160 \text{ Ом}$.

Результаты занести в таблицу 4. Сравнить результаты, полученные экспериментально, с расчетными.

3.3 По экспериментальным данным п.1.2–1.3 рассчитать:

- 1) активную мощность P_L , выделяемую в индуктивной ветви;

2) $P_{R_{шз}}$, выделяемую на $R_{шз}$ при $R_M = 160 \text{ Ом}$ в случаях включения C_A, C_B, C_K, C_H и когда емкость отключена. Построить зависимости $P_{R_{шз}} = f(C), P_L = f(C)$.

3.4 По экспериментальным данным рассчитать модуль входного сопротивления Z_{BX} исследованной цепи (полное сопротивление контура) при различных значениях C и частоты f . Построить зависимости $Z_{\dot{A}\dot{O}} = f(f)$ и $\varphi = f(f)$.

Контрольные вопросы и защита лабораторной работы

- 1 Как рассчитать резонансную частоту параллельного контура при:
а) малых потерях; б) больших потерях. Начертите векторную диаграмму для токов и напряжений параллельного контура при резонансе и расстройке.
- 2 Как определить добротность: а) ненагруженного контура; б) нагруженного контура.
- 3 Как найти входное сопротивление параллельного контура при:
а) резонансе; б) расстройке?
- 4 Как вычислить токи в ветвях цепи при: а) резонансе; б) расстройке?
- 5 Нарисуйте кривые $I = f(f)$; $I_1 = f(f)$; $I_2 = f(f)$; $\varphi_{Z_{\dot{A}\dot{O}}} = f(f)$; $U_C = f(f)$ для схемы рисунка 9.
- 6 Выразите ток I через токи в ветвях I_{10} и I_{20} , если $f = f_0$ для схемы рисунка 9.
- 7 На каких частотах $\varphi_{Z_{\dot{A}\dot{O}}}$ равно: а) $+45^\circ$; б) -45° ?
- 8 На какой частоте $I = \sqrt{1,64} \cdot I_0$, если $Q = 20$?
- 9 Как рассчитать активную мощность, потребляемую контуром при:
а) при резонансной частоте; б) на граничной частоте?
- 10 Определить входное сопротивление параллельного контура без потерь при: а) резонансной частоте; б) на граничной частоте.
- 11 Как изменятся характеристики контура, если емкость C увеличить в два раза?
- 12 Какова добротность контура Q , если при $\Delta f = f_0 / 40$, $Z_{\dot{A}\dot{O}} = R_0 / 1,08$?
- 13 Каким образом следует изменить сопротивление R_L , чтобы относительная ширина полосы пропускания резонансной кривой:
а) увеличилась в два раза; б) уменьшилась в два раза.
- 14 Как изменится ширина полосы пропускания резонансной кривой, если емкость контура C : а) увеличить в три раза; б) уменьшить в три раза.
- 15 Что изменится, если сопротивление R_L : а) увеличить до бесконечности; б) уменьшить до нуля?

- 16 Как изменится $Q_{ЭКВ}$, если сопротивление R_H увеличить в два раза?
- 17 Какой режим называется «резонансом токов». Условие возникновения резонанса в параллельной цепи.
- 18 Что называется компенсацией сдвига фаз для энергоемких потребителей, например, крупных предприятий?

Рекомендуемая литература: [1], [2], [3]

Лабораторная работа 4

Магнитные цепи и индуктивно связанные электрические цепи. (3ч)

Цель и содержание

Цель работы: Экспериментально исследовать цепи переменного тока при наличии в них индуктивно связанных элементов.

Содержание работы:

- 1 Экспериментальное определение взаимной индуктивности M и коэффициента связи k двух магнитосвязанных катушек.
- 2 Исследование токораспределения в цепи с магнитосвязанными катушками.
- 3 Исследование различных режимов работы трансформатора.

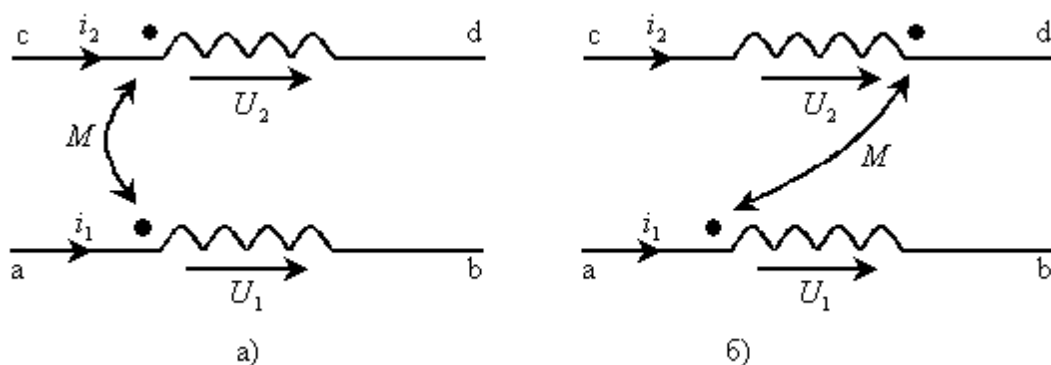
Теоретическое обоснование

1 Индуктивно связанные элементы

Если две катушки изготовлены таким образом, что магнитный поток одной пересекает витки другой, то между катушками имеется взаимная индуктивность M . При согласном включении катушек магнитный поток, вызванный током одной катушки, совпадает по направлению с магнитным потоком, вызванным током другой катушки ($M > 0$). Соединение катушек, при котором магнитные потоки направлены в противоположные стороны, является встречным ($M < 0$).

На схемах замещения электрических цепей точками обозначены одноименные выводы (начала катушек). При согласном включении катушек токи направлены одинаково относительно одноименных выводов (рисунок 4.1 а).

Если токи направлены по-разному относительно одноименных выводов (рисунок 4.1 б), то катушки включены встречно.



REF

SHAPE * MERGEFORMAT

Рисунок 4.1 – Схема замещения электрической цепи

Напряжения на индуктивных элементах при наличии индуктивной связи определяется при согласном включении как

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \quad u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

при встречном включении $u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}, \quad u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}.$

В режиме синусоидального тока комплексные значения напряжения на индуктивных элементах при согласном включении определяются:

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2, \quad \dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}_1;$$

при встречном включении –

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2, \quad \dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1.$$

На практике для экспериментального определения взаимной индуктивности необходимо измерить общую индуктивность катушек при последовательном встречном и последовательном согласном включениях (рисунок 4.2).

При согласном включении эквивалентная индуктивность цепи равна $L_{\tilde{A}\tilde{I}\tilde{A}\tilde{E}} = L_1 + L_2 + 2\dot{I}$, при встречном – $L_{\hat{A}\hat{N}\hat{O}\hat{D}} = L_1 + L_2 - 2\dot{I}$, где L_1 и L_2 – индуктивности катушек. Тогда взаимную индуктивность можно определить:

$$M = \frac{L_{\tilde{A}\tilde{I}\tilde{A}\tilde{E}} - L_{\hat{A}\hat{N}\hat{O}\hat{D}}}{4}.$$

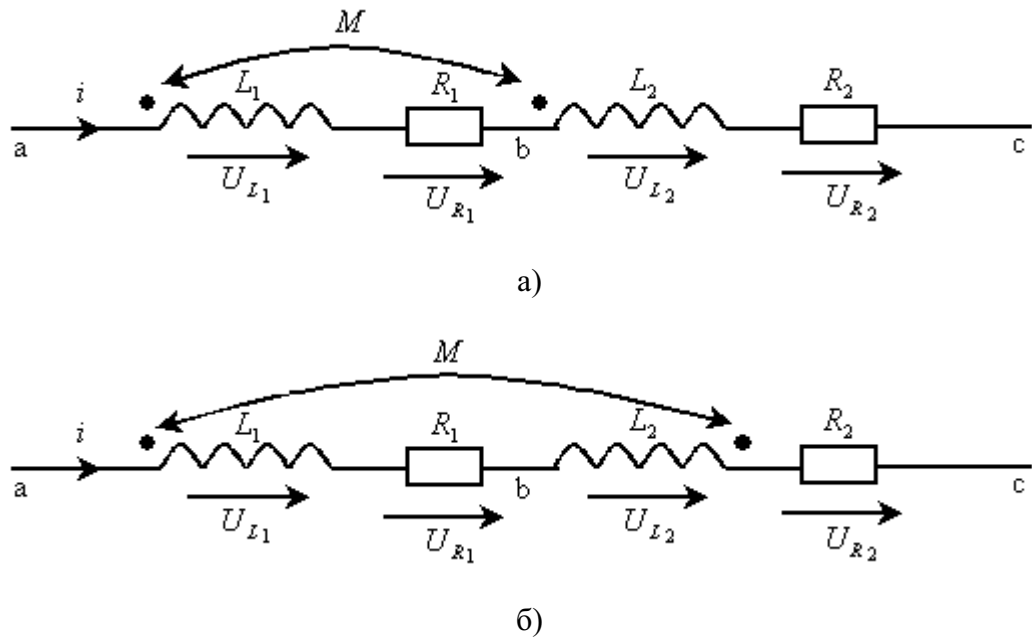


Рисунок 4.2

Определить взаимную индуктивность M можно также из эксперимента с двумя катушками, соединенными параллельно. При этом, когда активными сопротивлениями катушек индуктивности можно пренебречь, эквивалентная индуктивность цепи

определяется по формуле $L_{\text{экв}} = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \pm 2M}$.

Знак «минус» в знаменателе ставится при согласном включении, а знак «плюс» – при встречном. Тогда, при согласном включении катушек

$$M = L_{\text{св}} - \sqrt{L_{\text{св}}^2 + L_1 L_2 - L_{\text{св}}(L_1 + L_2)},$$

а при встречном

$$M = -L_{\text{св}} - \sqrt{L_{\text{св}}^2 + L_1 L_2 - L_{\text{св}}(L_1 + L_2)}.$$

Точность измерений при параллельном соединении катушек ниже, так как в конечную расчетную формулу для определения M входит разность двух близких по значению величин.

Степень индуктивной связи двух элементов цепи характеризуется коэффициентом связи $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$. При $k = 1$ ($\dot{I} = \sqrt{L_1 L_2}$) имеем совершенную

связь обмоток – весь поток, создаваемый одной обмоткой, пересекает сечение витков второй катушки, и рассеяние магнитного потока отсутствует. К этому режиму можно приблизиться, помещая обе катушки на общем сердечнике, материал которого имеет высокую магнитную проницаемость, или располагая их витки бесконечно близко друг другу. Практически всегда $k < 1$.

Изменения индуктивной связи между двумя катушками достигают перемещением их относительно друг друга. Приборы, состоящие из двух взаимно перемещающихся катушек, называют вариометрами.

2 Цепи с трансформаторами

Трансформатор используется для преобразования токов и напряжений, развязки и согласования отдельных участков цепи. Он состоит из двух или нескольких индуктивно связанных обмоток или катушек.

Рассмотрим работу трансформатора в синусоидальном режиме. Для его схемы замещения (рисунок 4.3) запишем уравнения по второму закону Кирхгофа в комплексной форме (токи направлены согласно одноименным клеммам катушек)

$$\begin{aligned}(R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 + j\omega M\dot{I}_2 &= \dot{U}_1; \\ j\omega M\dot{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_2 + \underline{Z}_H\dot{I}_2 &= 0\end{aligned}$$

где $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$ – комплексное сопротивление нагрузки трансформатора.

Перепишем уравнения:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 + j\omega M\dot{I}_2; \\ -j\omega M\dot{I}_1 &= (R_{22} + jX_{22})\dot{I}_2,\end{aligned}$$

где $R_{22} = R_2 + R_H$, $X_{22} = \omega L_2 + X_H$. Объединив уравнения, получим

$$\dot{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_{22} + jX_{22}}\dot{I}_1.$$

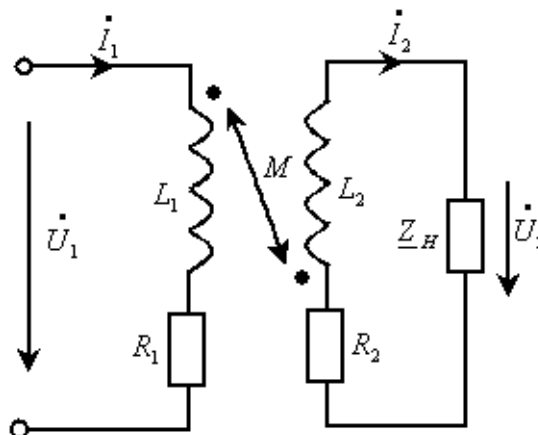


Рисунок 4.3 – Схема замещения трансформатора

Следовательно, комплексное входное сопротивление всей цепи равно

$$\underline{Z}_{\hat{A}\hat{O}} = \frac{U_1}{\underline{I}_1} = \left(R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22} \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22} \right).$$

Выделим действительную и мнимую составляющие $\underline{Z}_{\hat{A}\hat{O}} = R + jX$, где

$$R = R_1 + R_{\hat{A}\hat{i}}; \quad X = \omega L_1 + X_{\hat{A}\hat{i}} = \omega(L_1 + L_{\hat{A}\hat{i}}), \text{ где}$$

$$R_{\hat{A}\hat{i}} = \frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22}, \quad X_{\hat{A}\hat{i}} = -\frac{\omega^2 M^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22}.$$

Составляющие $R_{\hat{A}\hat{i}}$ и $X_{\hat{A}\hat{i}}$ называют, соответственно, вносимым активным и вносимым реактивным сопротивлениями. Вносимые сопротивления представляют собой такие сопротивления, которые следовало бы «внести» в первичную цепь (включить последовательно с R_1 и X_1), чтобы учесть влияние нагрузки вторичной цепи трансформатора на ток в его первичной цепи.

Рассмотрим свойства трансформаторов в предельных идеализированных случаях.

Предположим, что $R_1 = R_2 = 0$ и $k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} = 1$,

Тогда
$$\dot{U}_1 = -n\dot{U}_2, \quad \dot{I}_1 = -\frac{n\dot{U}_2}{j\omega L_1} - \frac{1}{n}\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1} - \frac{1}{n}\dot{I}_2.$$

Трансформатор, для которого соблюдается условие $\frac{U_1}{U_2} = n$ при любой нагрузке,

называется совершенным трансформатором (n – коэффициент трансформации). Если принять $L_1 = \infty$ (практически L_1 должно иметь достаточно большое значение, чтобы

можно было пренебречь составляющей тока $\frac{U_1}{\omega L_1}$ по сравнению с $\frac{1}{n}I_2$), то между токами

и напряжениями на первичной и вторичной обмотках трансформатора имеют место соотношения:

$$\dot{U}_1 = -n\dot{U}_2; \quad \dot{I}_1 = -\frac{1}{n}\dot{I}_2.$$

Трансформатор, для которого соблюдаются эти условия, называется идеальным трансформатором. Такой трансформатор обладает свойством изменять токи и напряжения независимо от значения сопротивления, включенного во вторичный контур, в определенное число раз. Для идеального трансформатора получим

$$\underline{Z}_{\dot{A}\dot{O}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{-n\dot{U}_2}{-\frac{1}{n}\dot{I}_2} = n^2 \underline{Z}_l .$$

При помощи идеального трансформатора можно произвести также и изменение сопротивления в определенное число раз, не зависящее от характера этого сопротивления.

Схема замещения входного сопротивления реального нагруженного трансформатора в общем случае представляет резистивное и индуктивное сопротивления, соединенные параллельно (рисунок 4.4). Индуктивная составляющая $X_{L\dot{A}\dot{O}}$ обуславливается током намагничивания, а резистивная – сопротивлением нагрузки и резистивным сопротивлением обмоток.

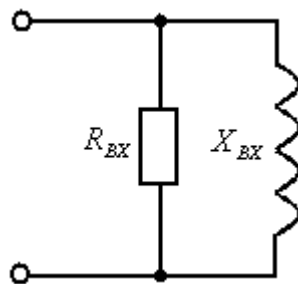


Рисунок 4.4 – Схема замещения входного сопротивления трансформатора

Приблизить характеристики трансформатора к идеальным можно за счет использования сердечника из ферромагнитного материала: сплавов на основе железа, никеля, магнитодиэлектриков – ферритов. Трансформаторы с ферромагнитными сердечниками при этом являются нелинейными элементами электрических цепей, но эта нелинейность незначительно влияет на соотношения между первичными, вторичными токами и напряжениями. Это позволяет использовать соотношения, полученные для линейного трансформатора, с поправочными коэффициентами.

В идеальных трансформаторах намагничивающий ток мал и сопротивление $X_{L\dot{A}\dot{O}}$ – бесконечно велико. В этом случае оказывается, что при нагрузке трансформатора на резистивный элемент R_H входное сопротивление является чисто резистивным и определяется из выражения

$$R_{\dot{A}\dot{O}} = n^2 (R_l + R_2),$$

где R_2 – резистивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора.

В совершенном трансформаторе индуктивная проводимость имеет конечное значение, но если $X_{L\dot{A}\dot{O}} \geq 3R_{\dot{A}\dot{O}}$, то реактивной составляющей можно пренебречь и считать входное сопротивление трансформатора чисто резистивным.

Чтобы экспериментально определить входное сопротивление трансформатора, необходимо знать действующее значение напряжения U_1 и тока $I_{\dot{A}\dot{O}}$ на первичной обмотке трансформатора и фазовый угол между ними. В этом случае резистивная

$$R_{\hat{A}\hat{O}} = \frac{U_1}{I_{\hat{D}\hat{A}\hat{C}\hat{A}\hat{O}}} = \frac{U_1}{I_{\hat{A}\hat{O}} \cos \varphi} \quad , \quad X_{\hat{A}\hat{O}} = \frac{U_1}{I_{\hat{D}\hat{A}\hat{E}\hat{O}\hat{A}\hat{O}}} = \frac{U_1}{I_{\hat{A}\hat{O}} \sin \varphi} \quad .$$

- на блоке питания включить тумблеры: «сеть», «генератор», «V2»;
 - на блоке Г1: тумблер «генератор» – в положение «внутр.», переключатель диапазонов – в позицию (2–20) кГц, регулятор «частота плавно» – до отказа против часовой стрелки (в положение минимальной частоты);
 - на блоке Г2: переключатель ПФ – в первое положение ($\Delta \nabla$, f - var);
 - на блоке Г3: тумблер «пределы» – в положение «10 В», а регулятором выходного напряжения установить на вольтметре «V1» напряжение 2 В;
 - на плате активных элементов: тумблер П1 (источник тока J) – в среднее положение (выключено);
 - на магазине сопротивлений R_M установить сопротивление 160 Ом;
- катушку L_F оставить разомкнутой.

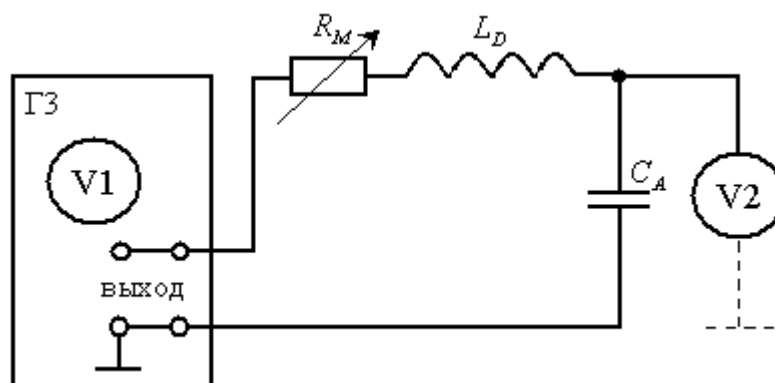


Рисунок 4.5 – схема электрической цепи

Изменяя частоту на блоке Г1, найти резонансную частоту f_0 по максимальному показанию прибора V2. Показания приборов в данном и последующих экспериментах заносить в таблицу 4.1. Зная значение C_A и резонансную частоту f_0 , определить индуктивность катушки L_D .

Таблица 4.1 – Определение параметров катушек

	Измерено при: $U_1 = 2 \text{ В};$ $C = C_A =$.		Рассчитано по экспериментальным данным		
	f_0 , Гц	U_2 , В	L , мГн	$R_{квн}$, Ом	$L_{вн}$, мГн
L_D					
L_F					
$L_D + L_F$ (при согласном включении)					
$L_D + L_F$ (при встречном включении)					
$L_D - L_{внOC}$ (при закороченной L_F)					
(при закороченной L_F на сопротивление $R_F = 3 \text{ кОм}$)					

1.2 Отключить от цепи катушку L_D и подключить вместо нее катушку индуктивности L_F . Резонансную частоту определить аналогично п.1.1.

1.3 Вместо катушки L_F подключить две катушки L_D и L_F , соединенные последовательно (рисунок 4.6). При этом получится индуктивность цепи $L_{\tilde{H}\tilde{A}\tilde{E}} = L_D + L_F + 2M$, которая значительно больше индуктивности каждой из катушек. Определить резонансную частоту. Записать показания приборов в таблицу 4.1.

1.4 Для одной из катушек (L_D или L_F) выводы поменять местами, при этом получится встречное включение. Определить резонансную частоту. Записать показания приборов в таблицу 4.1.

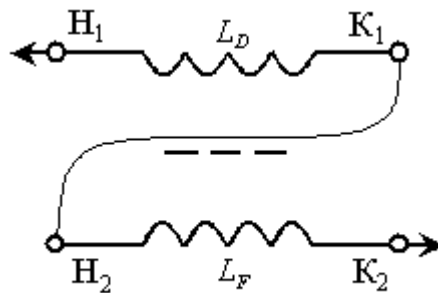


Рисунок 4.6 – Последовательное соединение катушек

2 Исследование токораспределения в цепи с индуктивно связанными катушками

2.1 Вместо двух катушек L_D и L_F включить катушку L_D (рисунок 4.7 а), а индуктивно связанную с ней катушку L_F внешним проводником замкнуть накоротко. Эквивалентная схема цепи будет состоять из индуктивности катушки L_D и отрицательной индуктивности, получившейся за счет вносимого реактивного сопротивления от короткозамкнутой катушки L_F . Так как общая индуктивность цепи $L_D + L_{\tilde{A}\tilde{I}}$ меньше индуктивности L_D , то резонансная частота цепи увеличится. Определить резонансную частоту аналогично п.1.1 и записать показания приборов в таблицу 4.1.

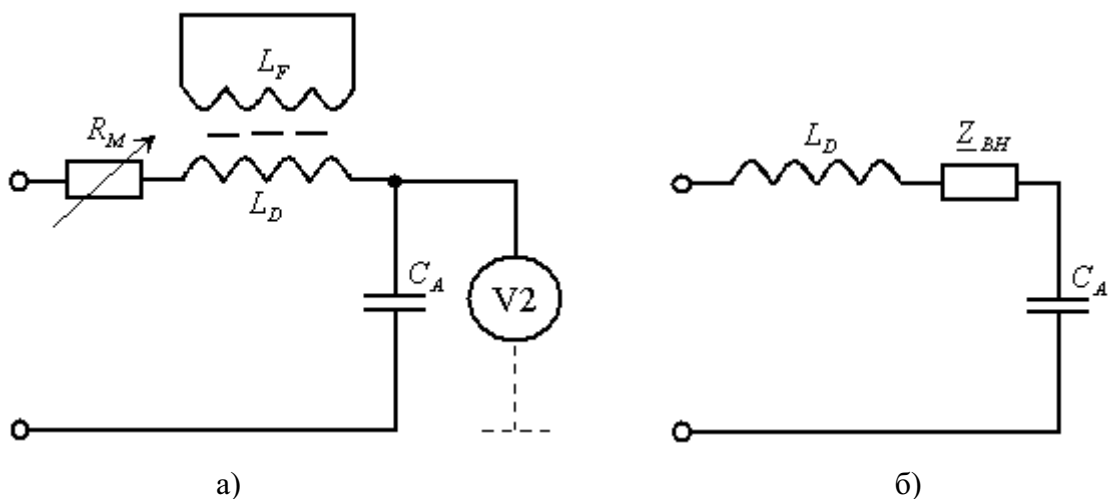


Рисунок 4.7 – Цепь с индуктивно связанными катушками (а)
и ее эквивалентная схема (б)

2.2 Снять проводник, замыкающий катушку L_F и замкнуть катушку на резистор $R_F = 3$ кОм (рисунок 4.7 б). Из-за большой величины резистивного сопротивления L_{Ai} оказывается пренебрежительно малой, а R_{BH} – весьма заметной. Так как резистивное сопротивление цепи возрастает, то добротность контура, а, следовательно, показания вольтметра «V2» уменьшатся. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

3 Исследование различных режимов работы трансформатора

3.1 Собрать цепь по схеме рисунка 4.8. Регуляторы на блоках стенда установить в следующие положения:

- на блоке питания включить тумблер «ф–V3»;
- переключатель ПФ на блоке Г2 перевести в положение (Δ , 2 кГц);
- на блоке Г3 установить выходное напряжение 2 В;
- на блоке «ф–V3» тумблер вида измерений установить в позицию «ф».

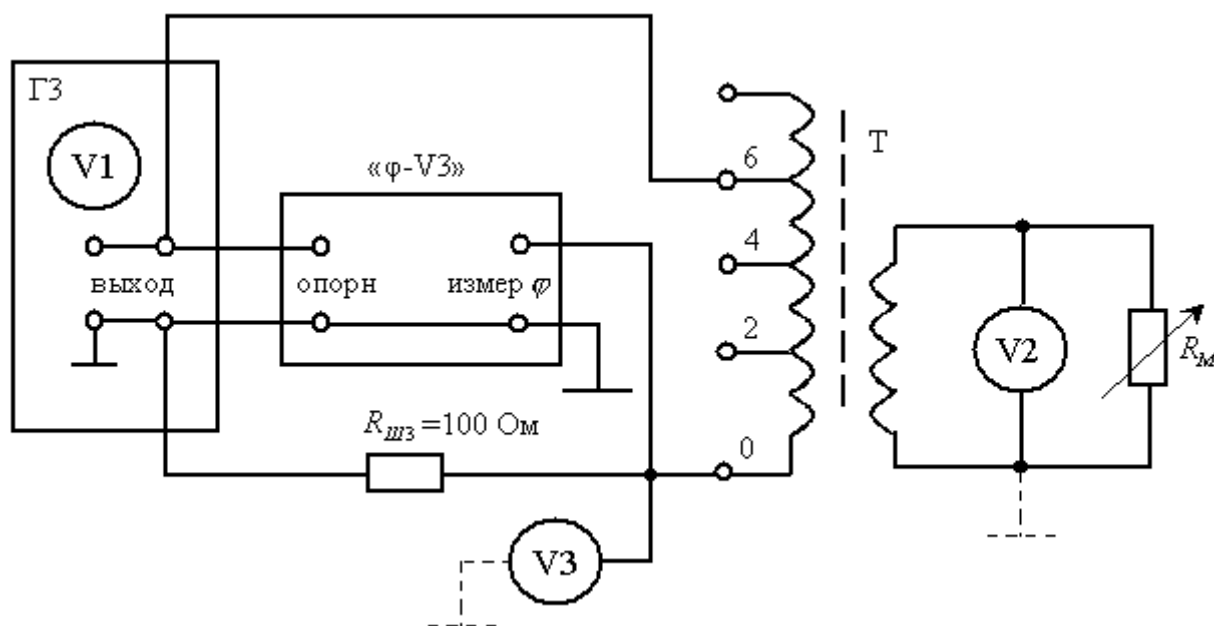


Рисунок 4.8 – Электрическая цепь с трансформатором

Выходной потенциальный зажим генератора на блоке ГЗ соединить с отпайкой «4» первичной обмотки трансформатора, находящегося на блоке пассивных элементов. Коэффициент трансформации n трансформатора при этом равен четырем. Отключить от вторичных зажимов трансформатора магазин сопротивлений R_M . При этом вольтметр V2 покажет падение напряжения пропорциональное току холостого хода в первичной обмотке, а фазометр – угол, соответствующий соотношениям реактивной и резистивной проводимостям первичной обмотки трансформатора. Если трансформатор был бы идеальным, то ток холостого хода равнялся бы нулю, но так как исследуемый трансформатор – реальный, то ток холостого хода будет отличен от нуля. Показания приборов занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

R_M , Ом	При $f = 2$ кГц; $U_1 = 2$ В; $R_2 = 15$ Ом; $n_{4\text{экспер}} =$; $n_{6\text{экспер}} =$.			
	Получено в эксперименте		Рассчитано по Экспериментальным данным	
	n_4	n_6	n_4	n_6

	U_2 , мВ	U_3 , мВ	φ , гр.	U_2 , мВ	U_3 , мВ	φ , гр.	R_{BX} , Ом	X_{BX} , Ом	R_{BX} , Ом	X_{BX} , Ом
∞										
0										
10										
20										
40										
80										

3.2 Измерить вольтметрами V2 и V3 величины напряжения на первичной (между точками «4» и «0») и вторичной обмотках трансформатора. Рассчитать коэффициент трансформации $n = \frac{U_2}{U_3}$.

3.3 Подключить к вторичной обмотке трансформатора магазин сопротивлений R_M и установить на нем сопротивление, равное нулю. Получившаяся при этом резистивная составляющая входного сопротивления равна $n^2 \cdot R_2$, где R_2 – сопротивление вторичной обмотки трансформатора. Показания приборов занести в таблицу 4.2.

Устанавливая поочередно на магазине R_M сопротивления (10–20–40–80) Ом, записать показания приборов.

3.4 Входной проводник перенести с отпайки трансформатора «4» на отпайку «6». Отключить магазин R_M от выводов вторичной обмотки. Определить ток холостого хода, фазный угол, измерить напряжение на вторичной обмотке трансформатора и рассчитать коэффициент трансформации, полученный экспериментально.

3.5 Подключив к вторичной обмотке магазин сопротивлений R_M , устанавливать поочередно значения его сопротивления (0–10–20–40–80) Ом. При этом показания приборов заносить в таблицу 4.2.

Содержание отчета и его форма

Форма отчета соответствуют лабораторной работе 1, а содержание отчета должно включать выполнение следующих заданий:

ЗАДАНИЕ 1

1.1 По результатам эксперимента, произведенного согласно п.1.1–1.4 и величине емкости C_A , рассчитать индуктивности катушек и цепи: L_D , L_F , L_{BCTP} и $L_{COГЛ}$. Результаты расчета занести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

$L_{COГЛ} = L_D + L_F + 2M$, мГн	$L_{BCTP} = L_D + L_F - 2M$, мГн	M , мГн	k

1.2 Рассчитать взаимную индуктивность M и коэффициент связи k между катушками L_D и L_F .

1.3 По экспериментальным данным п.2 определить добротность контура L_D , C_A ($Q = \frac{U_C}{U_1}$): а) при разомкнутой катушке L_F ; б) при закороченной катушке L_F ; в) при замкнутой катушке L_F на сопротивление $R = 3$ кОм.

1.4 Определить величину активного сопротивления контура R_K как:

$$R_{\hat{E}} = \frac{1}{\omega_0 \tilde{N}_A Q} = \frac{1}{2\pi f_0 C_A Q},$$

а) при разомкнутой катушке L_F ;

б) при закороченной катушке L_F ;

в) при замкнутой катушке L_F на сопротивление $R = 3$ кОм.

1.5 Определить вносимое сопротивление R_{BH} в контуре L_D C_A при L_F закороченной и L_F замкнутой на $R = 3$ кОм, как: $R_{\hat{A}i(a,\hat{a})} = R_{\hat{E}(a,\hat{a})} - R_{\hat{E}(\hat{a})}$.

1.6 Определить вносимое реактивное сопротивление в контуре L_D , C_A при L_F закороченной и L_F замкнутой на $R = 3$ кОм, как: $L_{\hat{A}i} = L_{\hat{E}} - L_D$.

1.7 Используя рассчитанные значения M и $R_H = 3$ кОм, рассчитать аналитически вносимое сопротивление $Z_{\hat{A}i} = R_{\hat{A}i} + jX_{\hat{A}i}$ для эквивалентной схемы рисунка 4.7 б. Сравнить с результатами, полученными экспериментально.

ЗАДАНИЕ 2

2.1 Вычислить по экспериментальным данным входное сопротивление нагруженного трансформатора. Результаты расчетов занести в таблицу 4.2.

2.2 Рассчитать входное сопротивление цепи (рисунок 4.8) и показания вольтметра «V2» при коэффициентах трансформации и сопротивлениях нагрузки, используемых в работе, если $U_1 = 2 \text{ В}$, $f = 2 \text{ кГц}$, и трансформатор является совершенным.

Контрольные вопросы и защита лабораторной работы

1 Что понимается под «взаимной индуктивностью» M ? Какие способы определения взаимной индуктивности Вы знаете?

2 Почему индуктивность L отрицательной быть не может, а взаимная индуктивность M – может?

3 Каков физический смысл коэффициента связи k при включении в цепь катушек с одинаковыми индуктивностями?

4 При последовательном соединении катушек индуктивностью 30 мГн каждая, результирующая индуктивность оказалась равной 100 и 20 мГн. Рассчитайте M и k .

5 При параллельном согласном соединении катушек по 30 мГн каждая, результирующая индуктивность – 25 мГн. Определите M и k .

6 Рассчитайте комплексное входное сопротивление цепи (рисунок 4.4 и 4.5) при согласном и встречном соединении катушек.

7 Докажите, что при последовательном соединении двух катушек при наличии взаимной индуктивности M между ними $L_{\text{ЭК.СОГЛ}} = L_1 + L_2 \pm 2M$.

8 Докажите, что при параллельном соединении двух катушек со взаимной индуктивностью M между ними $L_{\text{ЭВ.ВСТР}} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2 \pm 2M}$.

9 Докажите, что входное сопротивление нагруженного трансформатора

$$Z_{\text{вх}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot Z_f, \text{ где } N_1, N_2 - \text{число витков в обмотках.}$$

10 Внутреннее сопротивление источника 4800 Ом, сопротивление нагрузки 3 Ом. Каким должен быть коэффициент трансформации, чтобы в нагрузке выделилась наибольшая мощность (рисунок 4.8).

Защита лабораторной работы проводится при наличии отчета в виде устного опроса. Подготовка к защите осуществляется по методическим указаниям.

Рекомендуемая литература: [1], [2], [3]

Лабораторная работа 5

Переходные процессы в линейных электрических цепях. (3ч)

Цель и содержание

Цель работы: Экспериментальное и теоретическое определение параметров четырехполюсника; исследование четырехполюсника с помощью основных уравнений и векторной диаграммы.

Содержание работы:

1. Экспериментальное определение параметров Т – образного четырехполюсника и его входных сопротивлений.
2. Теоретическое определение входных сопротивлений четырехполюсника и его коэффициентов $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$ и $\underline{D}$.
3. Исследование нагрузочного режима четырехполюсника с помощью его основных уравнений $\underline{A}$ – формы. Построение векторных диаграмм токов и напряжений четырехполюсника.

Теоретическое обоснование

При исследовании четырехполюсника необходимо, установить зависимости между величинами, определяющими режим его работы: напряжениями и токами на первичных и вторичных выводах (рисунок 5.1). Эти зависимости могут быть записаны в различной форме. Если считать две из указанных величин заданными, например $\dot{U}_2$ и $\dot{I}_2$, то две другие величины будут связаны с ним системой двух уравнений, которые называются уравнениями четырехполюсника. Например, уравнение А-формы:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2\end{aligned}\quad (5.1)$$

$\underline{A}$ и $\underline{D}$ – безразмерные коэффициенты, $\underline{B}$ имеет размерность сопротивления, $\underline{C}$ – размерность проводимости.

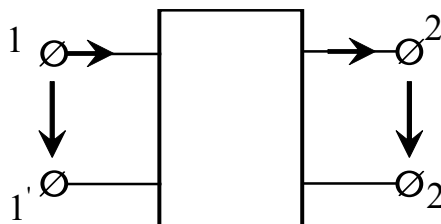


Рисунок 5.1

Всего можно записать шесть различных по форме, но по существу эквивалентных, т.е. математически равносильных уравнений, пар уравнений типа A, B, Y, Z, H, G.

Комплексные коэффициенты уравнений (5.1) постоянны (при заданной частоте) и определяется только структурой четырехполюсника и параметрами составляющих его элементов, а не параметрами источника питания и приемника. С точки зрения режима на первичных и вторичных выводах четырехполюсники, имеющие одинаковые значения коэффициентов, неотличимы, т.е. эквивалентны, хотя их внутренняя структура может быть различной.

Таким образом, можно утверждать, что четырехполюсник задан, если известны его коэффициенты. Для каждого четырехполюсника их можно определить расчетным или опытным путем.

У пассивных четырехполюсников коэффициенты каждой из матриц первичных параметров связаны дополнительными условиями

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1, \quad (5.2)$$

т.е. число независимых коэффициентов равно трем.

Четырехполюсник называют симметричным, если при перемене местами источника питания и нагрузки токи в источнике питания и нагрузке не изменяются. В симметричных четырехполюсниках $\underline{A} = \underline{D}$.

Комплексные коэффициенты $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$, входящие в уравнения, можно определить по формулам, если схема внутренних соединений четырехполюсника и ее параметры известны, или используя входные сопротивления четырехполюсника, полученные опытным или расчетным путем:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{X1} \underline{Z}_{\hat{E}1}}{\underline{Z}_{\hat{E}2} (\underline{Z}_{\hat{O}1} - \underline{Z}_{\hat{E}1})}}; \quad \underline{\hat{A}} = \underline{A} \underline{Z}_{\hat{E}2}; \quad \underline{\tilde{N}} = \underline{\hat{A}} / \underline{Z}_{\hat{E}1}; \quad \underline{D} = \underline{\hat{A}} / \underline{Z}_{\hat{E}1},$$

где $\underline{Z}_{\hat{E}1}$, $\underline{Z}_{\hat{O}1}$, $\underline{Z}_{\hat{E}2}$ комплексное входное сопротивление четырехполюсника при трех различных режимах его работы:

1) при питании от стороны 1 – 1' и разомкнутой ветви 2 – 2' (холостой ход):

$$\underline{Z}_{\hat{O}1} = \dot{U}_{\hat{O}1} / \dot{I}_{\hat{O}1}$$

2) при питании со стороны зажимов 1 – 1' и короткого замыкания ветви 2 – 2' («короткое замыкание»):

$$\underline{Z}_{\hat{E}1} = \dot{U}_{\hat{E}1} / \dot{I}_{\hat{E}1}$$

3) при питании со стороны зажимов 2 – 2' и короткого замыкания зажимов 1 – 1':

$$\underline{Z}_{\hat{E}2} = \dot{U}_{\hat{E}2} / \dot{I}_{\hat{E}2}$$

Функции пассивного взаимного четырехполюсника как передаточного звена между источником питания и нагрузкой может выполнять Т-схема или эквивалентная ей П-схема замещения (рисунок 5.2).

Предполагается, что частота f фиксирована. Сопротивления Т- или П-схемы подсчитываются с учетом того, что схема замещения должна обладать теми же коэффициентами $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$, что и заменяемый ею четырехполюсник.

Задача эта однозначна, так как схема замещения содержит три элемента, и четырехполюсник характеризуется тоже тремя параметрами (одна связь между $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ задана уравнением $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$).

Формулы $\underline{Z}_1 = (\underline{A} - 1) / \underline{C}$; $\underline{Z}_2 = (\underline{D} - 1) / \underline{C}$; $\underline{Z}_3 = 1 / \underline{C}$ позволяют определить сопротивления $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$ по коэффициентам четырехполюсника $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$. Для П-схемы $\underline{Z}_4 = \underline{B}$; $\underline{Z}_5 = \underline{B} / (\underline{D} - 1)$; $\underline{Z}_6 = \underline{B} / (\underline{A} - 1)$ (рисунок 5.2а и 2б).

Если четырехполюсник симметричный, то $\underline{A} = \underline{D}$, и в Т-схеме замещения $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$, а в П-схеме $\underline{Z}_5 = \underline{Z}_6$.

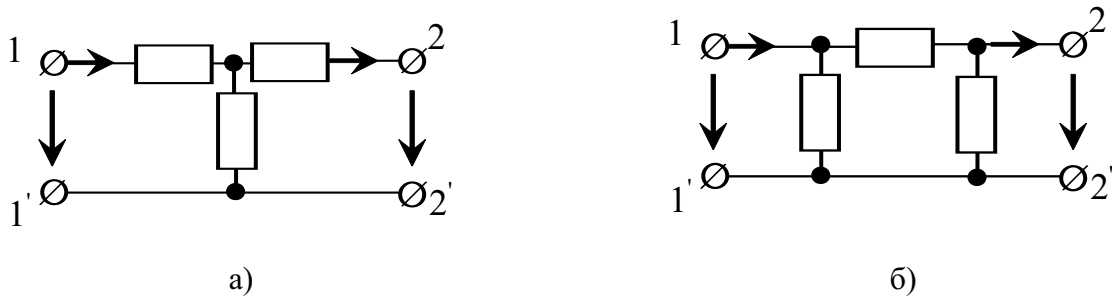


Рисунок 5.2

Использование различных форм основных уравнений четырехполюсника при определении параметров схем сложных четырехполюсников

Параллельное соединение четырехполюсников (рисунок 5.3).

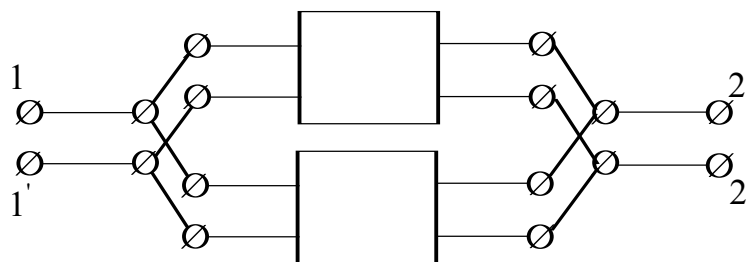


Рисунок 5.3

Матричное уравнение параметров четырехполюсника (рисунок 5.3)

$$[Y] = [Y'] + [Y'']$$

Последовательное соединение четырехполюсников (рисунок 5.4)

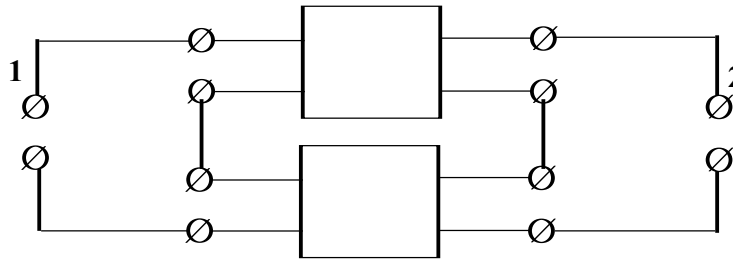


Рисунок 5.4

Матричное уравнение параметров четырехполюсника (рисунок 5.4)

$$[Z] = [Z'] + [Z'']$$

Каскадное соединение четырехполюсников (рисунок 5.5).

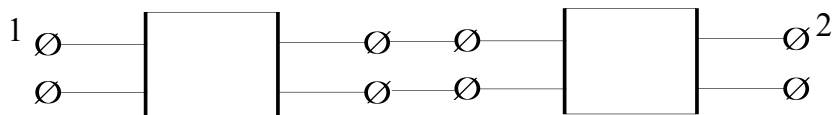


Рисунок 5.5

Матричное уравнение параметров четырехполюсника (рисунок 5.5).

$$[A] = [A'] \cdot [A'']$$

Аппаратура и материалы

Аппаратура и материалы представлены в лабораторной работе 1

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности представлены в лабораторной работе 1

Методика и порядок выполнения работы

В работе исследуется простейший четырехполюсник, имеющий Т-схему соединений элементов.

1 Экспериментальное определение параметров Т-образного четырехполюсника и его входных сопротивлений

1.1 Собрать схему, приведенную на рисунок 5.6. Нагрузку R_j к зажимам $2 - 2'$ не подключать. Значения L, C, R выбираются в соответствии с номером варианта из таблицы 5.1.

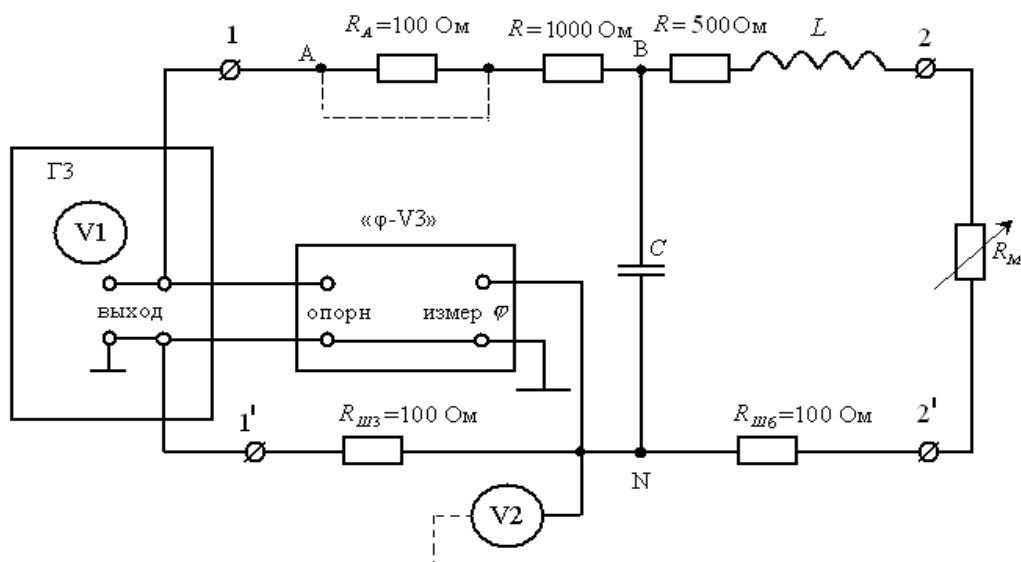


Рисунок 5.6

Таблица 5.1

№ варианта	1	2	3	4	5	6
L	L_D	L_0	L_A	L_B	L_M	L_0
C	C_A	C_0	C_F	C_D	C_B	C_A
$R_M, \text{ Ом}$	640	1280	2560	640	1280	2560

1.2 Регуляторы на блоках стенда установить в следующие позиции. На блоке питания включить тумблеры: «сеть», «генератор», «V2», «φ-V3»; на блоке Г-1: тумблер «генератор» установить в положение «внутр.», переключатель диапазонов в положение (2-20 кГц); на блоке Г-2: переключатель ПФ – в третье положение (2 кГц); на блоке Г-3: «пределы» – 10 В, плавным регулятором входного напряжения установить и поддерживать в последующих экспериментах напряжение 2 В; на блоке «φ-V3» тумблер вида работы установить в позицию «φ», тумблер «пределы» вольтметра V3 – в позицию «1 В».

1.3 Определить входное сопротивление холостого хода $Z_{1\delta}$ четырехполюсника относительно зажимов 1–1'. Для этого проверить отсутствие закоротки на клеммах 2–2'. Затем на зажимы 1–1' подать напряжение и записать показания приборов в таблицу 5.2. По опытным данным определить $Z_{1\delta} = \dot{U}_{1\delta} / \dot{I}_{1\delta}$, где $\dot{I}_{1\delta} = (U_2 / R_{\phi 3}) \cdot e^{j\varphi}$, а U_2 – показания вольтметра V2.

Таблица 5.2

$L = \quad , R_M = \quad , C = \quad , f = \quad , U_1 = \quad , R_\theta = \quad .$											
В реж. хх 1–1'		В реж. кз 1–1'			В реж. кз 2–2'		В режиме нагрузки 1–1'				
$U_{2X},$ мВ	$\varphi_I,$ град.	$U_{2K},$ мВ	$R_\theta,$ Ом	$\varphi_I,$ град.	$U_{2K},$ мВ	$\varphi_I,$ град.	$U_{2I},$ мВ	$\varphi_{I1},$ град.	$U_2,$ мВ	$\varphi_{I2},$ град.	$U_{2I2},$ мВ

1.4 Определить входное сопротивление короткого замыкания четырехполюсника $\underline{Z}_{1\hat{E}}$. Для этого закоротить зажимы 2–2', а на зажимы 1–1' подать напряжение и записать показания приборов. Дешунтировать зажимы 2–2'. По опытным данным определить $\underline{Z}_{1\hat{E}} = \dot{U}_{1\hat{E}} / \dot{I}_{1\hat{E}}$.

1.5 Эксперименты, выполняемые при питании четырехполюсника со стороны его выходных зажимов 2–2'. Проверить отсутствие закоротки на зажимах 2–2'. Присоединить генератор к зажимам 2–2', а R_j к зажимам 1–1'.

1.6 Определить входное сопротивление короткого замыкания четырехполюсника относительно зажимов 2–2': закоротить входные зажимы 1–1' четырехполюсника; на его выходные зажимы 2–2' подать напряжение. Записать показания приборов. По данным опыта рассчитать сопротивление $\underline{Z}_{2\hat{E}}$.

2 Исследование нагрузочных режимов работы четырехполюсника

2.1 Вернуть схему в исходное положение (питание со стороны зажимов 1–1'). Убедиться в отсутствии закоротки на зажимах 2–2', к зажимам 2–2' подключить нагрузку R_j (рисунок 5.6).

Подать на вход четырехполюсника напряжение, записать показания приборов и определить $\underline{Z}_{\hat{A}\hat{O}}$.

2.2 Определить ток $\dot{I}_2$ на нагрузке. Для этого снять закоротку с $R_{\theta\hat{A}}$ и закоротить $R_{\theta\hat{B}}$, при этом узел 1' будет заземлен. Проводники, соединенные с гнездом «измер.» фазометра и вольтметра V2, перенести из точки N в точку 2'. Результаты измерения занести в таблицу 5.2. Определить ток $\dot{I}_2 = (U_2 / R_\theta) \cdot \dot{a}^{j\varphi}$.

2.3 Определить напряжение $\dot{U}_2$. Для этого поменять местами сопротивление нагрузки R_j и $R_{\theta\hat{B}}$ (рисунок 5.7). Произвести измерение. Определить $\dot{U}_2 = U_2 \dot{a}^{j\varphi}$.

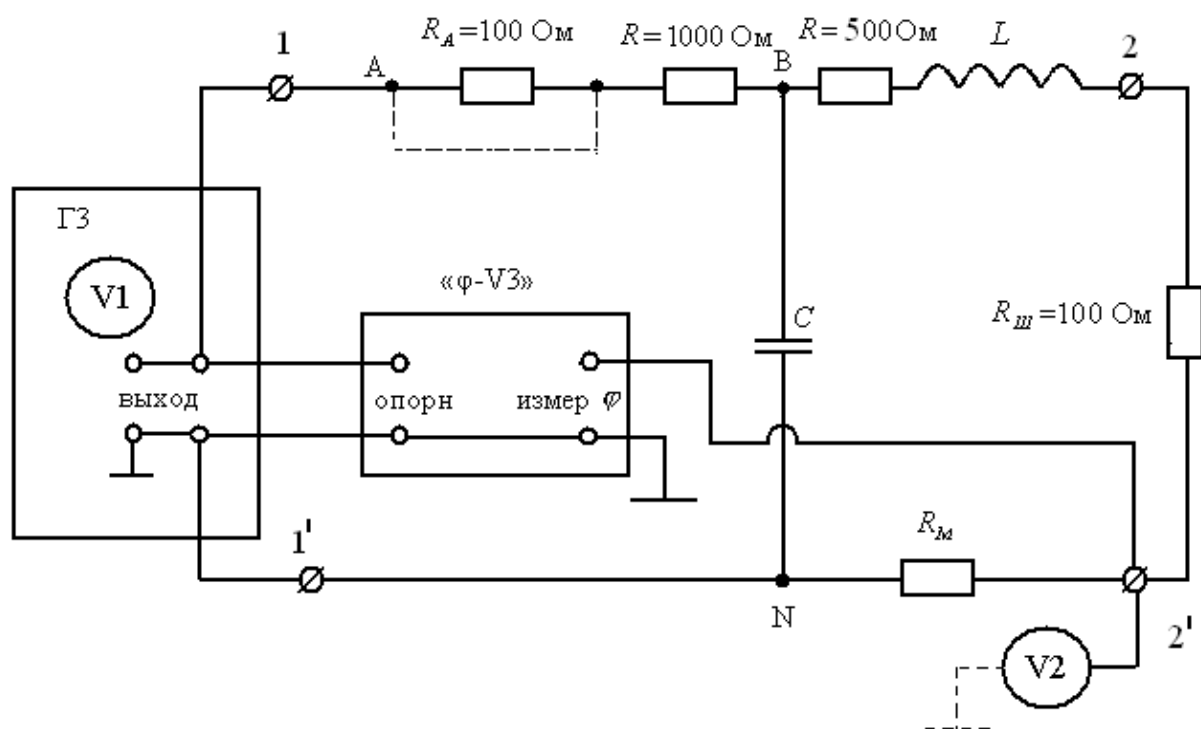


Рисунок 5.7

Содержание отчета и его форма

Форма отчета соответствуют лабораторной работе 1, а содержание отчета должно включать выполнение следующих заданий:

- 1 Рассчитать по экспериментальным данным сопротивления

$$\underline{Z}_{1x}, \underline{Z}_{1\hat{E}}, \underline{Z}_{2\hat{E}}.$$

- 2 Определить параметры А-формы четырехполюсника по результатам опыта холостого хода и короткого замыкания. После определения коэффициентов убедиться в справедливости уравнения:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1.$$

- 3 Аналитически определить входные сопротивления четырехполюсника со схемой соединения элементов, приведенной на рисунке 5.4. Для этого необходимо воспользоваться выражениями:

$$\underline{Z}_{1\hat{O}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3; \underline{Z}_{1\hat{E}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 / (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3); \underline{Z}_{2\hat{E}} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 / (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3).$$

Объяснить, какие были использованы предпосылки при выводе выражений. Учесть, что в ветвях $\underline{Z}_1$ и $\underline{Z}_2$ присутствуют сопротивления $R_\emptyset$. Сопоставить рассчитанные величины входных сопротивлений с аналогичными, найденными экспериментально на основе опытов холостого хода и короткого замыкания четырехполюсника.

4 Используя основные уравнения четырехполюсника А- формы для полученных при эксперименте значений $\dot{U}_2$ и $\dot{I}_2$, определить $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$. Рассчитанные величины сопоставить с $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$, полученными экспериментально.

5 Используя основные уравнения четырехполюсника, определить его входное сопротивление $\underline{Z}_{\hat{A}\hat{O}}$ при нагрузке:

$$\underline{Z}_{\hat{A}\hat{O}} = \frac{\underline{A} \cdot \underline{Z}_i + \underline{B}}{\underline{C} \cdot \underline{Z}_i + \underline{D}}, \text{ где } \underline{Z}_i = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}$$

Найденное сопротивление $\underline{Z}_{\hat{A}\hat{O}}$ сопоставить с величиной входного сопротивления, полученного на основании показаний приборов $\underline{Z}_{\hat{A}\hat{O}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}$.

6 Построить векторную диаграмму токов и напряжений четырехполюсника.

На основании данных $\dot{U}_2$, $\dot{I}_2$, полученных в п.2, а также сопротивлений $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$, определить необходимые для построения токи и напряжения для схемы рисунка 5.4 и построить векторную диаграмму для четырехполюсника. Найденные из векторной диаграммы значения $\dot{U}_1$, $\dot{I}_1$ сопоставить с полученными значениями в п.2.

7 Записать уравнение данного четырехполюсника в Z- и Y-формах.

8 Заменить исследуемый Т-образный четырехполюсник эквивалентным П-образным. Вычислить сопротивления элементов эквивалентного П-образного четырехполюсника.

9 Теоретически рассчитать коэффициенты А-, Z-, Y-форм для четырехполюсника, изображенного на рисунке 5.8. Считать, что частота f соответствует частоте, определенной в п.1.3.

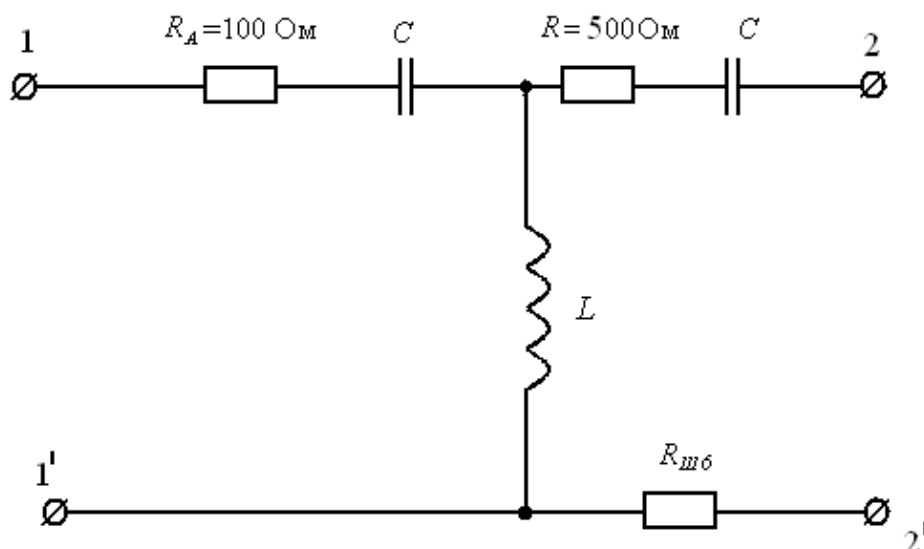


Рисунок 5.8

10 Рассчитать коэффициенты Y -матрицы при параллельном соединении четырехполюсника, исследованного экспериментально, и четырехполюсника, указанного в п.9, коэффициенты Z -матрицы при последовательном соединении этих четырехполюсников и A -матрицы при каскадном соединении четырехполюсников.

Контрольные вопросы и защита лабораторной работы

- 1 Какие системы параметров четырехполюсников вы знаете?
- 2 Какой физический смысл параметров $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$ и $\underline{D}$?
- 3 Докажите, что для взаимного четырехполюсника $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$.
- 4 Каким образом можно рассчитать параметры четырехполюсника по опытам холостого хода и короткого замыкания?
- 5 В симметричном четырехполюснике $\underline{A} = 400$; $\underline{B} = 500$ Ом. Определите $\underline{Z}_X$ и $\underline{Z}_{\hat{E}}$.
- 6 Дано: $\underline{Z}_X = 100$ Ом; $\underline{Z}_{\hat{E}} = 50$ Ом. Найти $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$ и $\underline{D}$ и $\underline{Z}_{\hat{A}\hat{O}}$ симметричного четырехполюсника, нагруженного на $\underline{Z}_{\hat{N}}$.
- 7 Доказать, что коэффициенты A -формы записи четырехполюсника можно определить как

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{X1} \cdot \underline{Z}_{\hat{E}1}}{\underline{Z}_{\hat{E}2} \cdot (\underline{Z}_{\hat{O}1} - \underline{Z}_{\hat{E}1})}}; \quad \underline{\hat{A}} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{\hat{E}2}; \quad \underline{\hat{N}} = \underline{\hat{A}} / \underline{Z}_{\hat{E}1}; \quad \underline{D} = \underline{\hat{A}} / \underline{Z}_{\hat{E}1}.$$

Защита лабораторной работы проводится при наличии отчета в виде устного опроса. Подготовка к защите осуществляется по методическим указаниям.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Электрические цепи несинусоидального тока и нелинейные электрические цепи.

(3ч)

Цель работы

1. Исследовать электрическое состояние линейной неразветвленной цепи синусоидального тока при различных потребителях электрической энергии.
2. Приобрести навыки расчета параметров отдельных элементов электрической цепи при последовательном соединении R -, L - и C -элементов.

3. Экспериментально подтвердить теоретические знания, полученные на лекциях и самостоятельных занятиях по неразветвленным электрическим цепям синусоидального тока.

Общие сведения

Резонанс напряжений наблюдается в электрической цепи однофазного переменного тока при последовательном соединении катушки индуктивности (с сопротивлением: активным R_K и индуктивным X_L) и конденсатора (с емкостным сопротивлением X_C , активным же сопротивлением R_C за его малостью пренебрегаем). В такой цепи резонанс напряжений может наступить при условии равенства индуктивного сопротивления катушки и емкостного сопротивления конденсатора, т. е. при $X_L = X_C$. Это выражение является **условием резонанса напряжений**.

В цепях переменного тока существует два вида нагрузок:

- Активная (ее сопротивление обозначается R).
- Реактивная, которая может быть индуктивной (с сопротивлением X_L) и емкостной (с сопротивлением X_C).

Активной нагрузкой являются все те потребители, на которых происходит преобразование электрической энергии в другие виды энергии – тепловую, световую, лучистую, механическую и т. д. На реактивных нагрузках происходит обмен энергией между катушкой индуктивности и конденсатором, причём индуктивность забирает из сети реактивную составляющую, а ёмкость отдаёт её в сеть.

Изменением ёмкости конденсатора или индуктивности катушки можно добиться равенства реактивных составляющих $X_L = X_C$, тогда в цепи остаётся одна активная составляющая и вся электрическая цепь ведёт себя как цепь с чисто активной нагрузкой. Это явление и происходит при резонансе напряжений.

Полное сопротивление цепи переменного тока при последовательном соединении нагрузок, указанных выше, обозначается Z . В комплексном виде: $Z = R + j(X_L - X_C)$.

Действующее значение полного сопротивления – это модуль комплексного числа, т. е. $Z = |Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

Закон Ома для такой цепи определяется выражением:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

Отсюда следует, что при резонансе напряжений ток в цепи максимальный. Действительно, если $X_L = X_C$, то $Z = R$; $I = \frac{U}{R}$.

В данной лабораторной работе резонанса добиваемся изменением ёмкости конденсатора. Для трёх характерных точек (до резонанса, резонанс и после резонанса) необходимо построить векторные диаграммы.

При построении векторных диаграмм необходимо выбрать основной (базисный) вектор. В данном случае за базисный берётся вектор тока $\dot{I}$, так как при последовательном соединении нагрузок в каждый момент времени он одинаков. Этот вектор откладывается в произвольном направлении, причём конец вектора, обозначенный стрелкой, определяет не только его направление, но и его величину в выбранном масштабе. Все остальные вектора, а именно $\dot{U}_K$ и $\dot{U}_C$, откладываются строго определённо относительно вектора тока: вектор $\dot{U}_K$ опережает вектор тока на угол φ_K (угол между током и напряжением катушки), а вектор $\dot{U}_C$ отстает от вектора тока на угол $\varphi_C = 90^\circ$ с учётом того, что активным сопротивлением конденсатора пренебрегаем.

Необходимо помнить, что положительным направлением вращения векторов считается направление против часовой стрелки. Угол φ_K определяется через $\cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{R_K}{\sqrt{R_E^2 + X_L^2}}$.

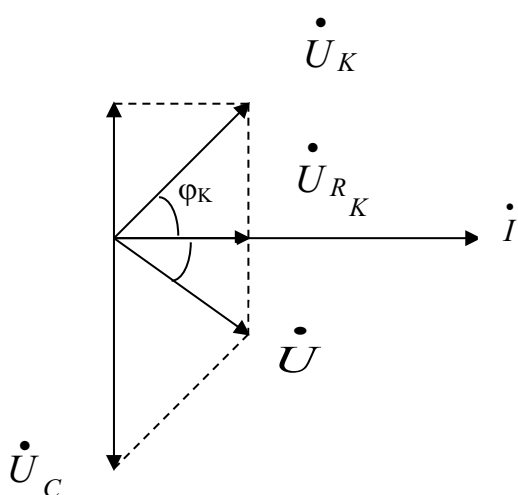
Значения R_K и X_L определяются по измеренным данным, как указано далее в расчётной части. Этот угол для всех трёх точек на векторных диаграммах будет оставаться одним и тем же, так как значения X_L и R_K не меняются.

Далее, согласно второму закону Кирхгофа ($\dot{U} = \dot{U}_K + \dot{U}_C$) надо векторно (по правилу параллелограмма) сложить ранее построенные вектора $\dot{U}_K$ и $\dot{U}_C$, чтобы найти вектор полного напряжения $\dot{U}$. Угол между этим вектором и вектором тока

называется углом сдвига фаз – угол φ . Если векторную диаграмму построить в масштабе, то значение полного напряжения должно получиться, равным подведённому к схеме напряжению, а угол φ должен быть равен расчётному.

Коэффициент мощности ($\cos \varphi = \frac{R}{Z}$), рассчитанный или полученный из векторной диаграммы, является важным энергетическим параметром и показывает, какая часть электрической энергии может быть превращена в другой вид энергии. При резонансе напряжений $\cos \varphi = 1$, а это значит, что в случае резонанса вся электрическая энергия превращается в другой вид энергии, которая может быть полезно использована.

Пример построения векторной диаграммы для случая, когда $\dot{U}_C > \dot{U}_K$, приведен на рис. 1.



Для других случаев векторные диаграммы строятся аналогично, только надо учесть, что действительные значения векторов напряжений будут иными.

Рис. 1

Схема лабораторной установки

Лабораторная установка по исследованию неразветвленной электрической цепи включает контрольно-измерительные приборы, коммутационно-защитные аппараты и потребители электрической энергии.

Питание установки осуществляется от сети переменного тока через регулирующий автотрансформатор ЛАТР.

На рис. 2 приведена электрическая схема лабораторной установки для исследования линейной неразветвленной электрической цепи синусоидального тока.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему экспериментальной установки (рис. 2) для проведения исследований резонанса напряжений и предъявить для проверки инженеру.

2. С разрешения преподавателя установить с помощью регулирующего автотрансформатора ЛАТР требуемую величину напряжения и в процессе опыта поддерживать ее постоянной ($U = 20 \text{ В}$).

3. Изменяя емкость магазина от 5 до 30 мкФ, измерять с помощью вольтметров PV_2 и PV_3 величины напряжения U_K , U_C , а также ток I с помощью амперметра PA .

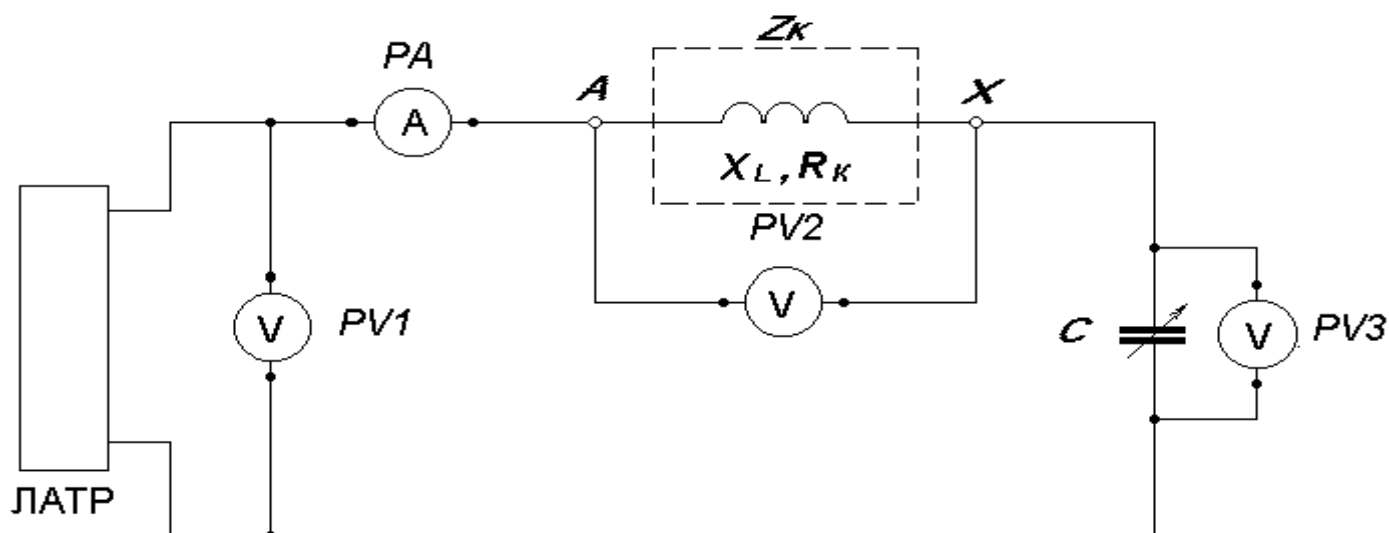


Рис. 2. Электрическая схема неразветвленной электрической цепи:
 ЛАТР – лабораторный автотрансформатор; $PV1$ – вольтметр на 30 В;
 $PV2$ – вольтметр на 75 В; $PV3$ – вольтметр на 75 В; PA – амперметр на 300 мА;
 Z_K – катушка индуктивности; C – магазин емкостей

Данные наблюдений занести в табл. 1.

Таблица 1

№ опыта	Измеряемые величины				Вычисляемые величины		
	C , мкФ	I , мА	U_K , В	U_C , В	X_C , Ом	Z , Ом	$\cos \varphi$
1	5						
2	10						
3	15						
4	20						
5	25						

$$Z = \frac{U}{I}; \quad \cos \varphi = \frac{R_K}{Z}; \quad \cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K}.$$

Значения емкостного сопротивления X_C для различных значений емкости определяются по формуле:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC},$$

где f – стандартная частота тока в сети ($f = 50$ Гц); C – значение емкости берется в фарадах ($1\text{мкФ} = 10^{-6}\text{Ф}$).

4. Для определения угла сдвига фаз между током и напряжением катушки, необходимо знать значения X_L и R_K . Эти значения определяются из точки резонанса.

Действительно, если учесть, что при резонансе $X_L = X_C$, то значение X_L надо взять равным вычисленному значению X_C для точки резонанса. Кроме того, в точке резонанса $Z = R_K$,

$$Z = \sqrt{R_K^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

По опытным данным подсчитываются Z , $\cos \varphi$ и строятся:

– график зависимостей

$$U_K = f_1(C); U_C = f_2(C); I = f_3(C);$$

– три векторные диаграммы исследуемой последовательной цепи при

$$X_L < X_C; X_L = X_C; X_L > X_C.$$

Содержание отчета

1. Электрическая схема экспериментальной установки.
2. Таблицы с вычисленными и измеренными величинами.
3. Теоретические и экспериментальные характеристики.
4. Векторные диаграммы.
5. Использованные формулы.
6. Краткие выводы. Сопоставление теоретических и экспериментальных характеристик с известными характеристиками из теории.

Контрольные вопросы

При допуске к лабораторной работе:

1. Что называется резонансом напряжений?
2. Почему при резонансе напряжений ток в цепи достигает своего наибольшего значения?
3. При каком условии в цепи наступает резонанс напряжений?

4. Как рассчитать действующий ток в неразветвленной цепи синусоидального тока с потребителями электрической энергии, характеризуемыми сосредоточенными параметрами R , L и C ?

5. От каких величин зависит полное сопротивление электрической цепи при последовательном соединении R , L и C элементов?

6. Как записывается закон Ома для цепи с последовательным соединением разных по характеру нагрузок?

При **защите** лабораторной работы студент должен ответить на вопросы, проработанные при допуске к лабораторной работе, а также должен знать:

1. Как определить коэффициент мощности цепи и чему он равен при резонансе напряжений?

2. От каких параметров зависит значение угла сдвига фаз между напряжением и током?

3. По какой формуле рассчитывают активную, реактивную и полную мощности в линейной электрической цепи синусоидального тока?

4. Как строятся векторные диаграммы для цепи с последовательным соединением катушки индуктивности и емкости?

5. Чему равно полное сопротивление цепи при резонансе напряжений?

6. Какой характер (по нагрузке) имеет цепь с последовательным соединением катушки индуктивности и емкости при резонансе напряжений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Основы теории четырехполюсников. (3ч)

Цель работы

1. Опытным путем найти соотношение между действующими фазными и линейными напряжениями и токами при равномерной и неравномерной нагрузке.

2. Установить роль нулевого провода в работе трехфазной установки при различных нагрузках.

3. Экспериментально подтвердить теоретические знания, полученные на лекциях и самостоятельных занятиях по трехфазным электрическим цепям при соединении звездой.

Общие сведения

Соединение звездой в трёхфазной цепи переменного тока – это такое соединение, при котором концы фаз приёмников соединяются в одну точку, называемую нейтральной или нулевой, а начала выводятся на источник питания – трёхфазный генератор.

Трёхфазный генератор всегда соединяется звездой и всегда симметричен. Фазы генератора обозначаются заглавными буквами A, B, C , нейтральная точка – заглавной буквой N . Начала фаз приёмника обозначаются строчными буквами a, b, c , концы фаз – x, y, z , а нулевая точка – строчной буквой n .

Преимуществом трёхфазной цепи при соединении звездой является наличие двух напряжений – линейного и фазного.

Линейным проводом называется провод, соединяющий начало каждой фазы генератора с началом соответствующей фазы приёмника.

Линейные напряжения обозначаются: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – для генератора и U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} – для приёмника. Они измеряются между двумя линейными проводами. Поскольку генератор всегда симметричен, то при любой нагрузке (симметричной и несимметричной) линейное напряжение $U_{\text{л}} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{ab} = U_{bc} = U_{ca}$.

Провода, соединяющие концы фаз приёмника с нейтральной (нулевой) точкой называются фазными проводами, а напряжение, измеренное между началом и концом каждой фазы, называется фазным напряжением, соответственно они обозначаются U_A, U_B, U_C для генератора и U_a, U_b, U_c – для приёмника. При симметричной нагрузке фаз приёмника они равны между собой, при несимметричной – не равны.

Провод, соединяющий нейтральную точку генератора N с нейтральной точкой приёмника n , называется нейтральным (нулевым) проводом, а напряжение, измеренное на нём при его размыкании, называется напряжением смещения нейтрали и обозначается U_{Nn} . Это напряжение может быть измерено только в случае несимметричной нагрузки. Его значение можно определить по формуле меж-узлового напряжения

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_a + \dot{U}_B \underline{Y}_b + \dot{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

где $\dot{U}_A$; $\dot{U}_B$; $\dot{U}_C$ – комплексные значения фазных напряжений генератора; $\underline{Y}_a$; $\underline{Y}_b$; $\underline{Y}_c$ – комплексные значения полных проводимостей фаз приёмника, при этом надо помнить, что полная проводимость каждой фазы – это величина, обратная полному сопротивлению ($\underline{Z}$) той же фазы. Тогда при несимметричной нагрузке фаз комплексные значения фазных напряжений приёмника равны (согласно второму закону Кирхгофа):

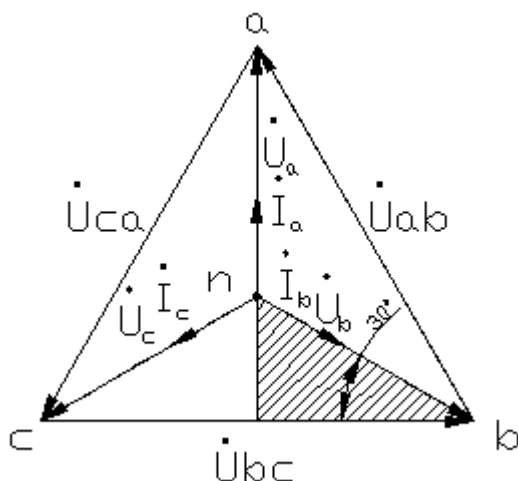
$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}.$$

При построении векторной диаграммы фазных и линейных напряжений для **симметричной** нагрузки надо учесть, что согласно второму закону Кирхгофа для каждого из трех контуров (включающего две фазы, например: a и b или a и c или b и c) можно записать

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a.$$

Если потенциал нейтральной точки принять за начало отсчета, то фазные напряжения строятся от этой точки под углом 120° друг относительно друга, тогда (на основании вышеприведённых уравнений) линейные напряжения равны векторной разности фазных напряжений и образуют замкнутый равносторонний треугольник. При активной нагрузке (как в данной работе) фазные токи также равны и направлены по фазным напряжениям ($\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$). Ток в нулевом проводе даже при его

включении равен нулю и диаграмма представлена на рис. 1.



Из этой диаграммы определяется соотношение между линейными и фазными напряжениями.

Действительно:

из заштрихованного треугольника можно записать $\frac{U_A}{2} = U_a \cos 30^\circ$,

иначе: $U_n = U_\phi \sqrt{3}$.

Рис. 1

При **несимметричной** нагрузке и отсутствии нулевого провода, когда фазные напряжения и токи не равны, напряжение смещения нейтрали $\dot{U}_{Nn} \neq 0$ поэтому потенциал нейтральной точки приёмника ϕ_n смещается относительно потенциала нейтральной точки генератора ϕ_N , т. е. из центра треугольника линейных напряжений. Векторная диаграмма в этом случае представлена на рис. 2.

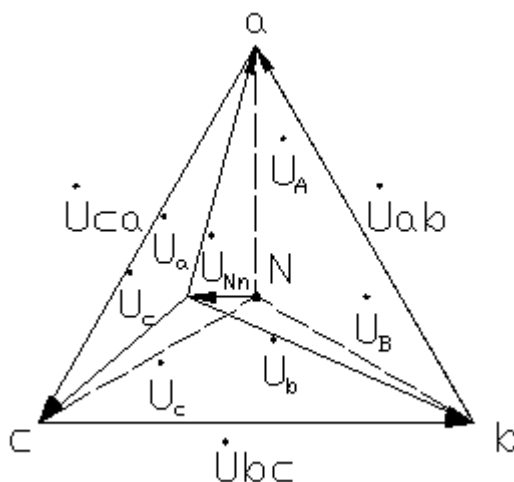


Рис. 2

При несимметричной нагрузке фаз и включённом нулевом проводе происходит выравнивание фазных напряжений приёмника за счёт перераспределения токов в фазах, но появляется ток в нулевом проводе, равный векторной сумме фазных токов

$\dot{I}_{Nn} = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$. В этом случае векторная диаграмма представлена на рис. 3.

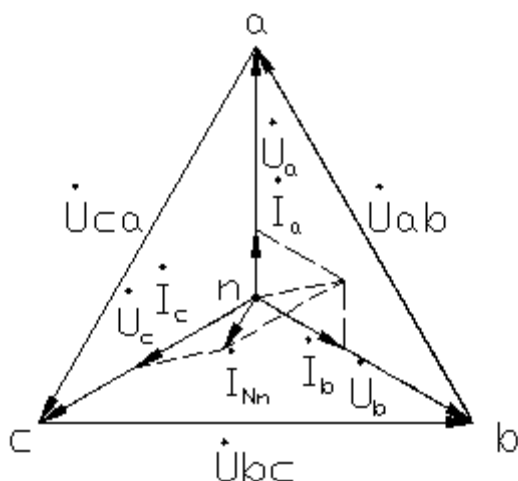


Рис. 3

Схема лабораторной установки

Лабораторная работа по исследованию трехфазных электрических цепей включает контрольно-измерительные приборы, коммутационно-защитные аппараты и потребители электрической энергии.

Питание установки осуществляется от сети переменного трехфазного тока.

На рис. 4 приведена электрическая схема лабораторной установки для исследования трехфазной цепи при соединении приемников звездой. В качестве приемников в этой схеме используются три ламповых реостата.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с электрической схемой, приборами, аппаратами, элементами экспериментальной установки для проведения опыта и записать их технические характеристики в отчет.

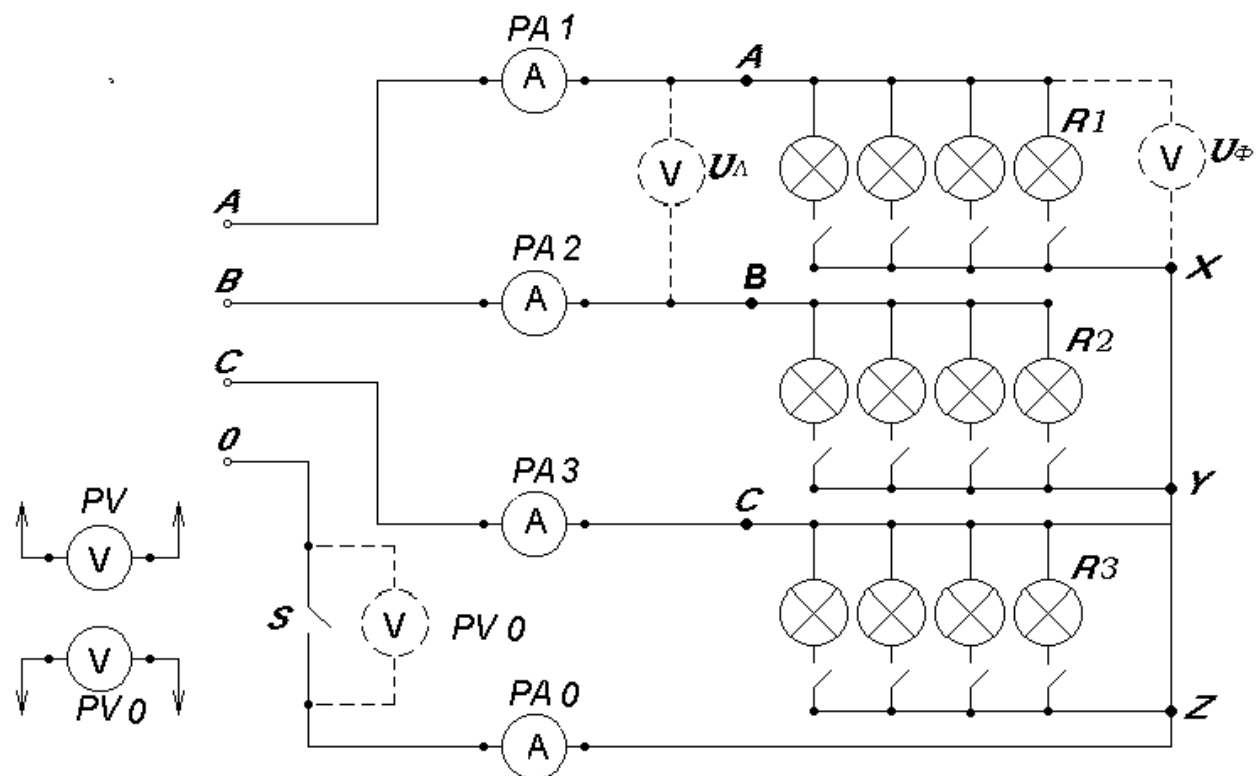


Рис. 4. Электрическая схема при соединении приемников звездой:

амперметры $PA1$, $PA2$, $PA3$ на 300 мА; амперметр $PA0$ на 0,25 А – переносной прибор;

вольтметр PV на 150 – 300 В; вольтметр $PV0$ на 75 В; $R1$, $R2$, $R3$ – ламповые реостаты,

S – выключатель

2. Собрать электрическую схему экспериментальной установки (рис. 4) и предъявить для проверки лаборанту. С разрешения преподавателя провести опыты.

П р и м е ч а н и е. Действующие значения линейных токов, равные фазным токам, определяются по амперметрам PA_1 , PA_2 , PA_3 , а ток в нулевом проводе – по амперметру PA_0 . Линейные и фазные напряжения измеряются одним вольтметром путем касания его щупами начала и конца фазы при измерении фазных напряжений, а также начал двух фаз при измерении линейных напряжений. Напряжение U_0 измеряется на выключателе S .

3. При всех отключенных лампах в фазах (проверяется по состоянию их выключателей) и разомкнутом выключателе S в нулевом проводе подать напряжение на схему нажатием кнопки «ВКЛ».

Последовательно установить различные режимы работы приемников, соединенных звездой, изменяя количество включенных в фазе ламп.

Режимы работы, подлежащие рассмотрению:

– максимальная равномерная нагрузка трех фаз ($R_1 = R_2 = R_3$) без нулевого провода;

– то же с нулевым проводом;

– неравномерная нагрузка фаз ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$) без нулевого провода;

– то же с нулевым проводом;

– неравномерная нагрузка фаз ($R_1 = R_2$; $R_3 = \infty$), без нулевого провода;

– то же с нулевым проводом;

Показания приборов записываются в табл. 1.

Следует иметь в виду, что вольтметр PV_0 , будет давать показания, отличные от нуля, только в случае неравномерной нагрузки фаз и отключенном выключателе S . Амперметр PA_0 будет давать показания, отличные от нуля, в случае неравномерной нагрузки фаз и включенном выключателе S . Соотношение между линейными и фазными напряжениями определяется только при равномерной нагрузке фаз.

Мощности и сопротивления фаз рассчитываются по формулам:

$$P_a = U_a I_a; \quad P_b = U_b I_b; \quad P_c = U_c I_c$$

$$P = P_a + P_b + P_c.$$

$$R_a = \frac{U_a}{I_a}; \quad R_b = \frac{U_b}{I_b}; \quad R_c = \frac{U_c}{I_c}.$$

Таблица 1

[illegible]

Результаты вычислений записать в табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	$\frac{U_L}{U_\Phi}$	P_a , Вт	P_b , Вт	P_c , Вт	P , Вт	R_a , Ом	R_b , Ом	R_c , Ом
1								
2								
3								
4								
5								
6								

4. Предъявить данные опытов для проверки преподавателю и с его разрешения схему разобрать. Рабочее место привести в исходное состояние и предъявить лаборанту.

5. Построить векторные диаграммы напряжений и токов для исследованных режимов работы.

Содержание отчета

1. Электрическая схема лабораторной установки.
2. Таблицы с измеренными и вычисленными величинами.
3. Использованные формулы.
4. Векторные диаграммы напряжений и токов.
5. Краткие выводы. Сопоставление опытных и расчетных данных с известными положениями из теории.

Контрольные вопросы

При допуске к лабораторной работе:

1. Какое соединение трехфазной цепи называется соединением звездой?
2. Как называются провода, отходящие от трехфазного генератора?
3. Какая нагрузка фаз называется симметричной?
4. Какие соотношения между действующими фазными и линейными напряжениями можно получить, и для каких режимов работы они справедливы?
5. Для какой нагрузки целесообразно включение нулевого провода?
6. При какой нагрузке фаз применяется четырехпроводная система?
7. В каком соотношении находятся линейные и фазные токи при соединении звездой?
8. Как находится активная мощность каждой фазы и всей цепи?

При **защите** лабораторной работы студент должен ответить на вопросы, проработанные при допуске к лабораторной работе, а также должен знать:

1. Что произойдет, если нагрузка фаз будет неравномерной, а нулевой провод не подключен?
2. Как сказывается обрыв нейтрального провода на работе трех-фазной установки при различных режимах?
3. К чему приводит обрыв линейного провода в трехфазной установке?
4. Чему равен ток в нулевом проводе?
5. Как построить векторные диаграммы токов и напряжений соединения звездой для всех указанных режимов?
6. В каком соотношении находятся линейные напряжения при несимметричной нагрузке?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

Частотные характеристики четырехполюсников.

Цель работы

1. Приобрести практические навыки по использованию и испытанию трансформаторов.
2. Научиться опытным путем определять основные параметры и характеристики трансформаторов.
3. Экспериментально подтвердить теоретические знания, полученные на лекциях и самостоятельных занятиях.

Общие сведения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения той же частоты.

Трансформаторы применяют в линиях электропередачи, в технике связи, автоматике, измерительной технике и других областях. В соответствии с назначением различают: силовые трансформаторы для питания электрических двигателей и электрических сетей; специальные трансформаторы для питания сварочных аппаратов, электропечей и других потребителей, измерительные трансформаторы для подключения измерительных приборов.

По числу фаз трансформаторы делят на одно- и трехфазные. По числу обмоток различают двухобмоточные и многообмоточные трансформаторы.

Трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод, на котором расположены две или несколько обмоток. Для уменьшения потерь на гистерезис магнитопровод изготавливают из магнитомягкого материала – трансформаторной стали, имеющей узкую петлю намагничивания. Для уменьшения потерь на вихревые токи (токи Фуко) в материал магнитопровода вводят примесь кремния, повышающую его электрическое сопротивление, а сам магнитопровод собирают из отдельных листов

электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм, изолированных друг от друга теплостойким лаком или специальной бумагой.

Обмотки трансформатора изготавливают из медного провода и располагают на одном и том же или на разных стержнях, рядом или одна под другой. В последнем случае непосредственно к стержню примыкает обмотка низшего напряжения, а поверх нее размещается обмотка высшего напряжения.

Обмотку трансформатора, к которой подводится напряжение питающей сети, называют первичной. Обмотку, к которой подсоединяется нагрузка – вторичной.

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции. При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока напряжением U_1 по обмотке начинает проходить ток I_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток. Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней э.д.с. E_2 , которую можно использовать для питания нагрузки.

Одним из основных параметров трансформатора является коэффициент трансформации K

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

где U_1 , U_2 – напряжения на первичной и вторичной обмотках; w_1 , w_2 – число витков обмоток трансформатора (соответственно).

При работе трансформатора за счет токов в обмотках, а также перемагничивания магнитопровода и вихревых токов выделяется теплота, т. е. часть подводимой к трансформатору электрической мощности расходуется на потери. Обычно потери мощности составляют 1–5 % от номинальной мощности трансформатора. Потери разделяют на два вида:

– потери в стали сердечника (складываются из потерь, создаваемых перемагничиванием сердечника и вихревыми токами) – $P_{ст}$;

– потери в меди обмоток – $P_{м}$.

Потери в меди складываются из потерь в первичной обмотке $I_1^2 R_1$ и потерь во вторичной обмотке $I_2^2 R_2$

$$P_{\text{м}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

Потери в стали зависят от конструкции сердечника трансформатора и свойств использованных материалов, а также величины магнитного потока в сердечнике, который в свою очередь определяется напряжением на первичной обмотке трансформатора U_1 . От нагрузки трансформатора потери в стали не зависят. Потери в меди, напротив, зависят от нагрузки.

Коэффициент полезного действия трансформатора η определяется как отношение полезной мощности (активной мощности вторичной обмотки – P_2) к затраченной (активной мощности, потребляемой первичной обмоткой трансформатора P_1)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{но}} + P_1}.$$

Опыт холостого хода трансформатора. Холостым ходом трансформатора называется работа трансформатора без нагрузки, т. е. при разомкнутой вторичной обмотке. При проведении опыта холостого хода к вторичной обмотке трансформатора подключают вольтметр для измерения напряжения U_{10} . Так как сопротивление измерительной обмотки вольтметра велико, его включение имитирует размыкание вторичной обмотки.

К первичной обмотке подводится напряжение близкое к номинальному. В этом случае по первичной обмотке протекает ток холостого хода I_{10} , ток во вторичной обмотке I_{20} равен нулю. В опыте холостого хода можно определить коэффициент трансформации, мощность потерь в стали, коэффициент мощности, ток холостого хода трансформатора.

Опыт короткого замыкания. Режимом короткого замыкания называется такой режим, когда выводы вторичной обмотки замыкаются токопроводом с сопротивлением равным нулю. В опыте короткого замыкания вторичная обмотка трансформатора замыкается на амперметр. Сопротивление измерительной обмотки амперметра мало, что практически идентично короткому замыканию.

При коротком замыкании вторичной обмотки трансформатора по ней протекает большой ток, так как ее сопротивление стремится к нулю. Поэтому опыт короткого замыкания производят на пониженном напряжении $U_{1\text{к.з.}}$. Напряжение на вторичной

обмотке $U_{2к.з}$ равно нулю. Значения токов в первичной и вторичной обмотках не должны превышать номинальных значений. В опыте короткого замыкания определяются следующие параметры: потери в меди, величины сопротивлений обмоток, процентное значение первичного напряжения при коротком замыкании.

Схема лабораторной установки

Лабораторная установка, предназначенная для испытания однофазного силового трансформатора, состоит из источника питания, однофазного трансформатора с воздушным охлаждением, контрольно-измерительных приборов, коммутационно-защитных аппаратов и потребителей энергии. Номинальные данные исследуемого в лабораторной работе трансформатора: $S_n = 60$ ВА; $U_{1н} = 220$ В; $U_{2н} = 12$ В; $I_{1н} = 0,425$ А; $I_{2н} = 5$ А.

На рис. I приведены электрические схемы лабораторной установки для проведения опыта холостого хода (рис. 1, а), опыта короткого замыкания (рис. 1, б) и исследования работы трансформатора при нагрузке (рис. 1, в). Питание установки осуществляется от сети переменного тока. Входное напряжение регулируется автотрансформатором.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с электрической схемой, приборами, аппаратами и другим оборудованием экспериментальной установки, которое используется для испытания трансформаторов, и записать их технические характеристики и данные в отчет.

2. Собрать электрическую схему экспериментальной установки (рис. 1, а) для проведения опыта холостого хода и предъявить для проверки инженеру. При проведении опыта холостого хода использовать приборы: амперметр $PA1$ на 500 мА, вольтметр $PV1$ на 250 В, ваттметр PW на 300 В; 0,5 А, вольтметр $PV2$ на 30 В.

При выполнении опыта первичная обмотка трансформатора включается на клеммы 220 В (нижние клеммы), а вторичная – на 12 В (крайние клеммы).

3. После проверки правильности соединений и получения разрешения на проведение опыта включить стенд, установить с помощью ЛАТР номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора. Вторичная обмотка трансформатора при опыте холостого хода замкнута на вольтметр. Ток во вторичной обмотке трансформатора $I_2 = 0$. Данные наблюдения опыта холостого хода (U_{10} , I_{10} , P_{10} , U_{20}) записать в табл. 1.

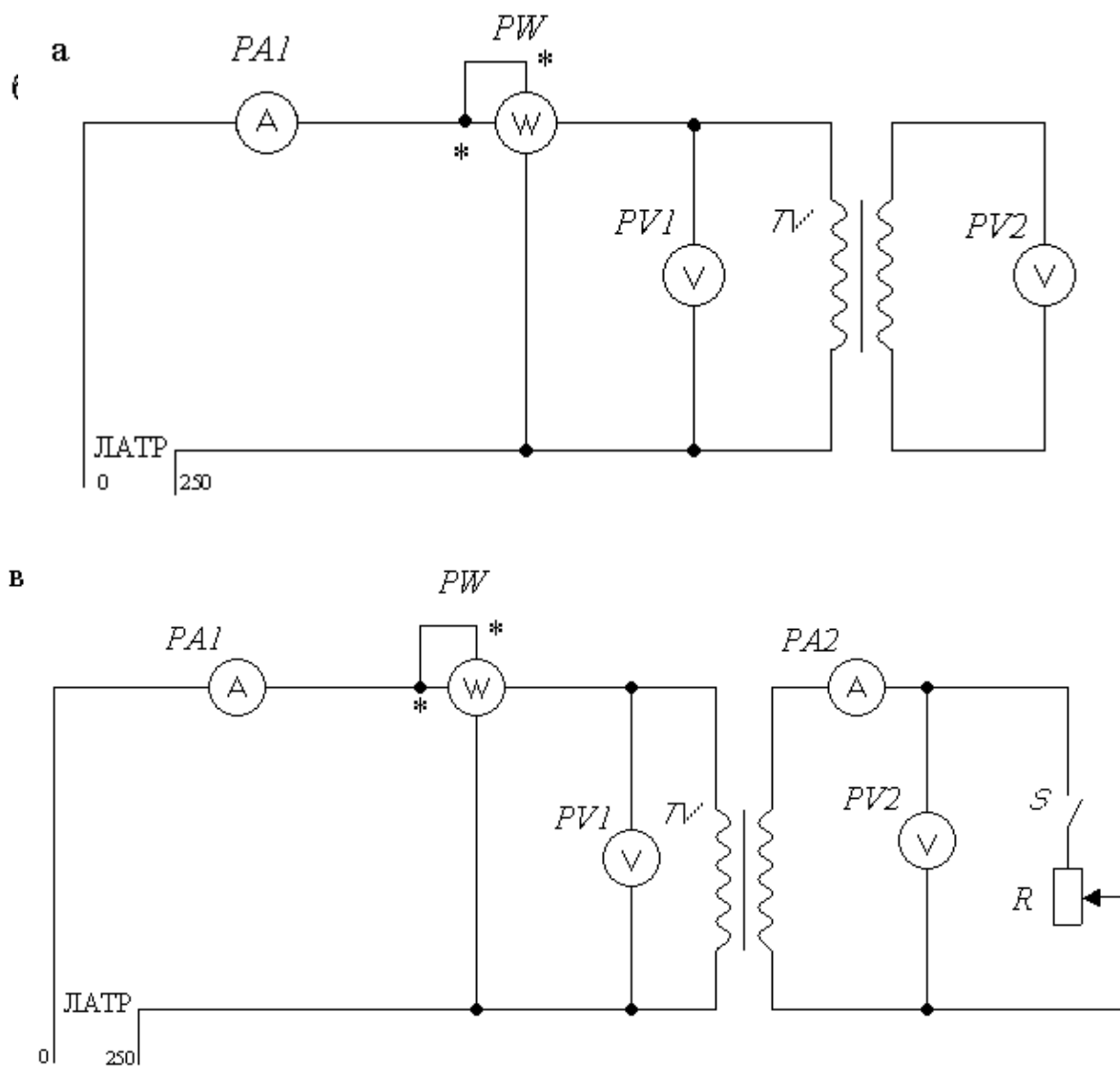


Рис. 1. Электрическая схема испытания трансформатора:
 а – опыт холостого хода; б – опыт короткого замыкания; в – при нагрузке
 PW – ваттметр; $PA1$, $PA2$, $PV1$, $PV2$ – амперметры и вольтметры в первичной
 и вторичной цепях; S – выключатель нагрузки; (0–250 В) – выход ЛАТРа;
 R – активная нагрузка

Таблица 1

Измеряемые величины				Вычисляемые величины			
U_{10} , В	I_{10} , А	P_{10} , Вт	U_{20} , В	K_{12}	$\cos \varphi$	I_{10}^* , %	$P_{ст}$, Вт

4. На основании опытных данных вычислить коэффициент трансформации $K_{12} = \frac{U_{10}}{U_{20}}$, процентное значение тока холостого хода $I_{10}^* = \frac{I_{10}}{I_{1i}} 100$, коэффициент мощности $\cos \varphi = \frac{P_{10}}{I_{10} U_{10}}$.

5. Записать потери в стали $P_{ст}$, приняв их равными активной мощности, потребляемой трансформатором в опыте холостого хода (т. е. приравняв их к показаниям ваттметра).

6. Собрать электрическую схему экспериментальной установки (рис. 1, б) для проведения опыта короткого замыкания и предъявить для проверки инженеру.

Ручка регулирующего автотрансформатора до включения схемы должна быть установлена в нулевое положение, (т. е. в крайнее левое) во избежание повреждения трансформатора!

При проведении опыта короткого замыкания используются приборы: амперметр $PA1$ на 500 мА, вольтметр $PV1$ на 150 В, ваттметр PW на 75 В; 0,5 А, амперметр $PA2$ на 5 А.

После проверки правильности соединений и получения разрешения на проведение опыта включить стенд и, регулируя ЛАТР, установить номинальный ток во вторичной обмотке трансформатора $I_{2н} = 5$ А, при этом напряжение на вторичной обмотке U_2 будет равно нулю. Данные наблюдений опыта короткого замыкания записать в табл. 2.

Таблица 2

Измеряемые величины				Вычисляемые величины				
$U_{1к.з.}$, В	$I_{1к.з.}$, А	$P_{1к.з.}$, Вт	$I_{2к.з.}$, А	$U_{1\hat{e},\zeta}^*$, %	R_k , Ом	Z_k , Ом	X_k , Ом	P_m , Вт

--	--	--	--	--	--	--	--	--

7. На основании опытных данных вычислить процентное значение первичного напряжения

$$U_{1\hat{e}.q}^* = \frac{U_{1\hat{e}.q}}{U_{1i}} 100,$$

где $U_{1к.з}$ – напряжение, подводимое к первичной обмотке при коротком замыкании трансформатора; $U_{1н}$ – номинальное первичное напряжение трансформатора.

8. Записать потери в меди P_m , приняв их равными активной мощности потребляемой трансформатором в опыте короткого замыкания (т. е. приравняв их к показаниям ваттметра).

9. Определить параметры трансформатора:

– активное сопротивление обмоток

$$R_k = \frac{D_{1\hat{e}.q}}{D_{1\hat{e}.q}^2}; \quad R_1 \approx R_2' = \frac{R_k}{2};$$

– полное сопротивление обмоток

$$Z_k = \frac{U_{1\hat{e}.q}}{I_{1\hat{e}.q}};$$

– реактивное сопротивление обмоток

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2};$$

$$X_1 \approx X_2' = \frac{X_k}{2}; \quad X_2 = \frac{X_2'}{k^2}.$$

10. Собрать электрическую схему экспериментальной установки (рис. 1, в) для исследования работы трансформатора при нагрузке и предъявить инженеру. При исследовании трансформатора использовать следующие приборы: амперметр $PA1$ на 500 мА, амперметр $PA2$ на 5 А, вольтметр $PV1$ на 250 В, вольтметр $PV2$ на 30 В, ваттметр $PW2$ на 300 В; 0,5 А, реостат $R1$ на 15 Ом; 5 А.

После проверки правильности соединений и получения разрешения на проведение опытов установить с помощью ЛАТРа на зажимах обмотки трансформатора номинальное напряжение U_{1H} и поддерживать его постоянным при изменении нагрузки. Нагрузку изменять с помощью реостата от 0 до I_{2H} (снять 5–6 точек). Данные наблюдений записать в табл. 3.

Таблица 3

№ опыта	Измеряемые величины					Вычисляемые величины		
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	P_2 , Вт	$\cos \varphi_1$	$\eta_{оп}$
1	220				0			
2	220				1,5			
3	220				2			
4	220				3			
5	220				4			
6	220				5			

11. На основании данных вычислить для каждого опыта:

– коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1};$$

– полезную мощность

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2;$$

где $\cos \varphi_2 = 1$, так как нагрузка трансформатора – активная;

– опытное значение КПД

$$\eta_{оп} = \frac{P_2}{P_1}.$$

12. Предъявить данные опытов для проверки преподавателю и с его разрешения схему разобрать. Рабочее место привести в исходное состояние и предъявить инженеру.

Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

1. Номинальные данные трансформатора и электроизмерительных приборов.
2. Электрическая схема лабораторной установки для всех опытов.
3. Таблицы с измеренными и вычисленными величинами.
4. Рабочие характеристики трансформатора U_2 ; $\eta_{\text{оп}}$; $\cos \varphi_1$; I_1 ; P_1 в функции полезной мощности P_2 .
5. Используемые формулы.
6. Краткие выводы. Сопоставление опытных и расчетных данных с известными положениями из теории.

Контрольные вопросы

При **допуске** к лабораторной работе:

1. Каковы цель и порядок выполнения работы?
2. С какой целью проводится опыт холостого хода? Порядок проведения опыта холостого хода.
3. Куда затрачивается мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода?
4. С какой целью проводится опыт короткого замыкания? Порядок проведения опыта короткого замыкания. Какое напряжение подводится к первичной обмотке при опыте короткого замыкания?
5. Куда затрачивается мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания?
6. Что называется коэффициентом трансформации и как он выражается?
7. Что называется коэффициентом полезного действия трансформатора?

При **защите** лабораторной работы студент должен ответить на вышеперечисленные вопросы, а также должен знать:

1. Что понимают под режимом холостого хода трансформатора? Уравнение равновесия э.д.с. и напряжений для первичной и вторичной обмоток трансформатора.
2. Из каких составляющих состоит ток холостого хода трансформатора?
3. Для чего делают приведение токов и э.д.с. вторичной обмотки к первичной?
4. Что называют внешней характеристикой трансформатора? Какие факторы влияют на изменение напряжения трансформатора при нагрузке?
5. Устройство и принцип действия трансформатора?

6. Как определить номинальный ток однофазного трансформатора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Электрические цепи с распределенными параметрами. (3ч)

Цель работы

1. Приобрести практические навыки по использованию и испытанию асинхронных двигателей (АД).
2. Экспериментально подтвердить теоретические знания, полученные на лекциях и самостоятельных занятиях по АД.

Общие сведения

Асинхронные двигатели – самые распространенные из всех видов электрических машин из-за их простоты, надежности, меньших в сравнении с другими машинами весогабаритных показателей, стоимости и иных достоинств.

Трехфазный асинхронный двигатель представляет собой двигатель переменного тока, который преобразует электрическую энергию в механическую. Процесс преобразования осуществляется посредством создаваемого обмотками статора вращающегося магнитного поля, которое заставляет вращаться ротор. Скорость вращения ротора асинхронного двигателя меньше скорости вращения поля статора.

Асинхронные двигатели состоят из двух частей: неподвижной части – статора и подвижной части – ротора, разделенных воздушным зазором.

Статор асинхронного двигателя представляет собой полый цилиндр, собранный из штампованных пластин электротехнической стали толщиной 0,35–0,5мм. В пазы на внутренней поверхности статора укладываются проводники обмотки статора. Обмотку статора выполняют в виде одно- или многовитковых катушек, имеющих одинаковые размеры. Каждая фаза статорной обмотки состоит из нескольких последовательно включенных катушек, находящихся в соседних пазах. Обмотки статора питаются от сети трехфазного переменного тока.

Ротор асинхронного двигателя набирается из штампованных пластин электротехнической стали, которые запрессовываются на вал, входящий при сборке

машины в боковые подшипниковые щиты. В пазах на внешней поверхности цилиндрического ротора располагается обмотка ротора.

Различают два вида обмоток ротора: короткозамкнутую обмотку и фазную обмотку. Короткозамкнутая обмотка имеет вид беличьей клетки и состоит из толстых проводящих стержней, соединенных по торцам кольцами. Короткозамкнутую обмотку изготавливают путем заливки расплавленного металла (меди или алюминия) в пазы ротора. Одновременно с обмоткой ротора отливаются лопасти вентилятора, обеспечивающие охлаждение машины.

Принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании *вращающегося* магнитного поля и законов электротехники. При включении в сеть трехфазного тока в статоре образуется вращающееся магнитное поле. Скорость

вращения поля n_1 определяется соотношением $n_1 = \frac{60f}{p}$, где f – частота питающей сети,

p – число пар магнитных полюсов. Силовые линии вращающегося магнитного поля пересекают проводники обмотки ротора. При этом, согласно закону электромагнитной индукции, в обмотке ротора индуцируется э.д.с., пропорциональная частоте пересечения силовых линий. Под воздействием индуцированной э.д.с. в короткозамкнутой обмотке возникают значительные токи. В соответствии с законом Ампера на проводники с током, находящиеся в магнитном поле, действуют механические силы, которые по принципу Ленца стремятся устранить причину, вызывающую индуцированный ток, т. е. пересечение стержней обмотки ротора силовыми линиями. Таким образом, возникшие механические силы будут раскручивать ротор в направлении вращения поля, уменьшая скорость пересечения стержней обмотки силовыми линиями. В реальных условиях ротор не может достичь частоты вращения поля. Поэтому в асинхронных двигателях ротор вращается с частотой n_2 , меньшей частоты поля статора n_1 , т. е. не синхронно с полем (асинхронно).

Частоту вращения магнитного поля относительно ротора, выраженную в долях частоты вращения поля называют скольжением s

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Скольжение зависит от нагрузки двигателя. При номинальной нагрузке его значение составляет около 0,05 у машин небольшой мощности и около 0,02 у мощных машин. Вращающий момент, развиваемый двигателем, зависит от скольжения.

Механической характеристикой называется зависимость частоты вращения ротора n_2 от момента на валу при неизменных напряжении и частоте питающей сети. С увеличением момента нагрузки частота вращения двигателя уменьшается незначительно.

Изменение направления вращения ротора называется реверсированием. Для обеспечения реверсирования необходимо изменить направление вращения магнитного поля, т. е. изменить порядок чередования фаз. Для реверсирования асинхронного двигателя достаточно поменять местами две любые фазы на клеммовой колодке двигателя.

Схема лабораторной установки

Лабораторная установка (на рис. 1 приведена ее электрическая схема) включает в себя трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, который питается от сети через трехполюсный пакетный выключатель, контрольно-измерительные приборы, коммутационные аппараты и нагрузочное устройство.

В качестве нагрузочного устройства в работе использован электромагнитный тормоз (ЭТ). Электромагнитный тормоз предназначен для создания тормозного момента на валу электродвигателя. Он состоит из электромагнитной системы, связанной с противовесом и системой отсчета по шкале, а также металлического диска, жестко связанного с валом электродвигателя. Питание электромагнитной системы осуществляется постоянным током через выпрямитель.

При протекании постоянного тока в катушках электромагнитной системы возникает постоянное магнитное поле. Во вращающемся диске при пересечении магнитным полем наводятся вихревые токи. Взаимодействие постоянного магнитного поля и вихревых токов, наводимых в диске, вызывает тормозной момент, и электромагнитная система отклоняется на определенный угол, фиксируя величину момента по шкале.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с электрической схемой, приборами, аппаратами и другим оборудованием экспериментальной установки. Записать их технические данные в отчет.
2. Собрать электрическую схему экспериментальной установки для испытания асинхронного двигателя (рис. 1) и предъявить для проверки инженеру.

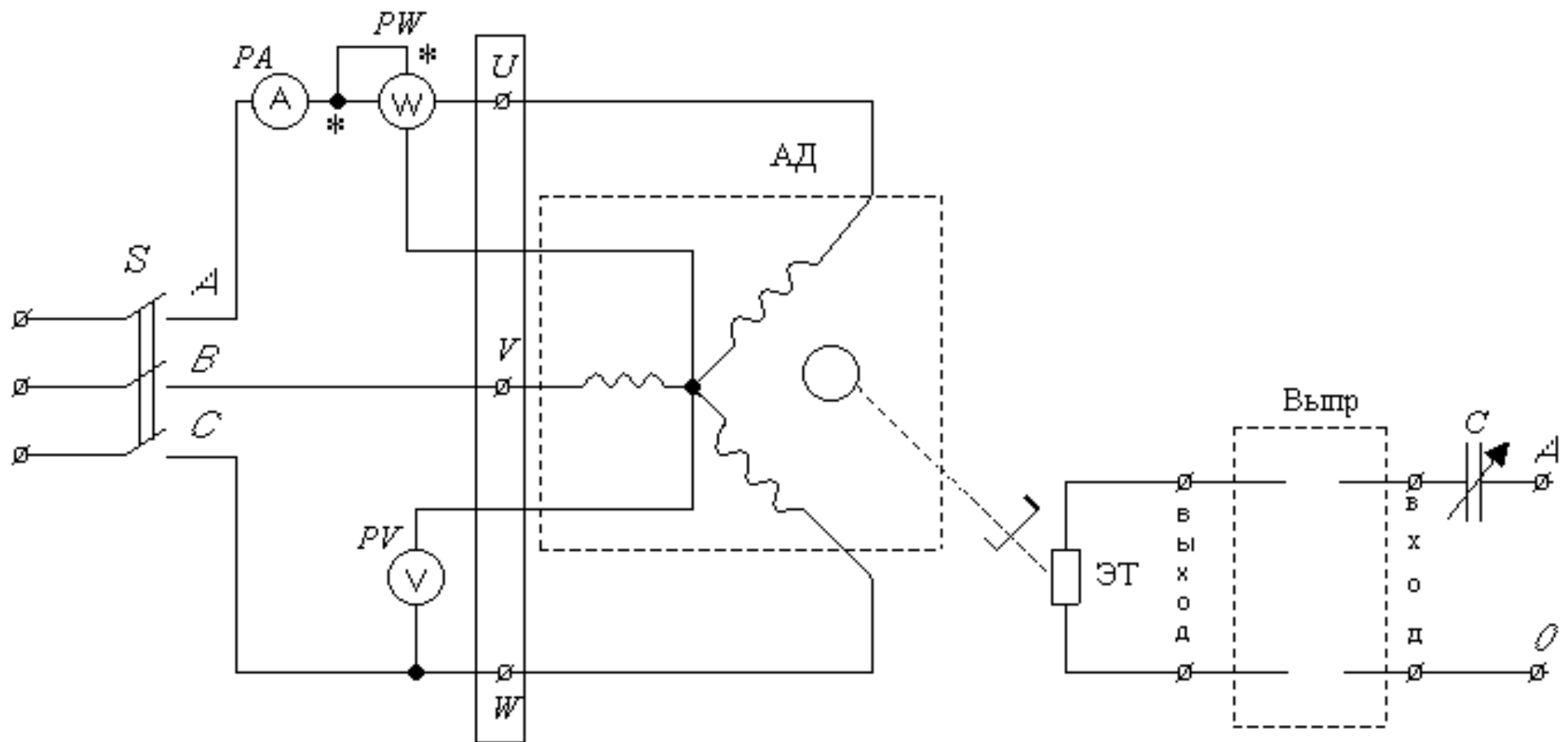


Рис. 2. Электрическая схема испытания трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:
S – пакетный выключатель; АД – асинхронный двигатель; *РВ* – ваттметр; *РА* – амперметр в цепи статора АД;
РВ – вольтметр в цепи статора АД; Выпр. – выпрямитель; ЭТ – электромагнитный тормоз с обмоткой

При проведении испытаний асинхронного двигателя в схеме используются приборы: амперметр PA на 500 мА, вольтметр PV на 150 В, ваттметр PW на 150 В и 0,5 А.

3. После проверки правильности соединений и получения разрешения преподавателя на проведение опытов осуществить прямой пуск АД. Для осуществления прямого пуска АД необходимо подать питание на электродвигатель, замкнув сеть выключателем S . Для остановки двигателя необходимо его отключить от сети с помощью выключателя S .

4. Осуществить изменение направления вращения электродвигателя (реверс). С этой целью при обесточенной электрической схеме поменять местами линейные провода любых двух фаз (например, А и В или А и С или В и С) двигателя и потом подать питание выключателем S . Убедиться, что электродвигатель изменил направление вращения ротора на противоположное.

5. Провести испытание электродвигателя под нагрузкой при соединении обмоток фаз статора звездой. Нагрузка на валу электродвигателя создается с помощью электромагнитного тормоза.

При испытании асинхронного двигателя под нагрузкой проводят 5–7 опытов. Первый опыт проводится при отсутствии нагрузки на валу двигателя – режим холостого хода (ток в обмотке электромагнитного тормоза отсутствует). После этого включается электромагнитный тормоз. Регулируя величину тока в обмотке, провести еще несколько опытов.

Показания приборов при каждом опыте записывать в табл. 1.

Таблица 1

№ пп	Измеряемые величины					Вычисляемые величины					
	I_l , А	U_Φ , В	P_Φ , Вт	n_2 , об/мин	M , Н·м	S , ВА	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η , %	s , %	$\cos \varphi$
1					0						
2											
3											
4											
5											
6											

Частота вращения электродвигателя определяется по формуле:

$$n_2 = nK,$$

где n – показания прибора ФТ4-1; K – множительный коэффициент, равный 5.

6. Из опыта холостого хода (1-я строка табл. 1) определяем вращающийся момент холостого хода двигателя M_0 (Н·м):

$$M_0 = \frac{10P_0}{n_1},$$

где $P_0 = 3P_\phi$; $n_1 = 1500$ об/мин – синхронная частота вращения асинхронного двигателя.

7. На основании данных измерений для каждого опыта вычислить:

– полную мощность, потребляемую двигателем $S = 3U_\phi I_1$;

– активную мощность $P_1 = 3 P_\phi$, где P_ϕ – мощность, измеренная с помощью ваттметра;

– полезную мощность на валу двигателя $P_2 = 0,1M n_2$;

– коэффициент полезного действия $\eta = \frac{P_2}{P_1}$;

– скольжение $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$;

– коэффициент мощности $\cos \varphi = \frac{P_\phi}{U_\phi I_1}$.

8. Построить по опытным данным:

а) механическую характеристику $n_2 = f(M)$

б) рабочие характеристики $n_2, s, M, I_1, \cos \varphi$ в функции от P_2 ;

в) график зависимости вращающего момента от скольжения $M = f(s)$.

9. Сделать выводы по работе. Сопоставить полученные результаты с известными данными из теоретического курса по асинхронным двигателям.

10. Предъявить данные опытов для проверки преподавателю, и после разрешения схему разобрать. Рабочее место привести в исходное состояние и предъявить инженеру.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

1. Номинальные данные асинхронного электродвигателя и электроизмерительных приборов.

2. Электрическая схема лабораторной установки по испытанию асинхронного двигателя.

3. Таблицы с измеряемыми и вычисляемыми величинами.
4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя в одной координатной системе: n_2 ; s , M , I_1 ; $\cos \varphi_1$ и в функции полезной мощности P_2 .
6. Зависимость величины момента на валу двигателя от скольжения $M = f(s)$.
7. Механическая характеристика асинхронного двигателя $n_2 = f(M)$.
8. Используемые формулы.
9. Краткие выводы. Сопоставление опытных и расчетных данных с известными положениями из теории.

Контрольные вопросы

При **допуске** к лабораторной работе:

1. Какова цель и порядок выполнения работы?
2. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
3. Как обозначаются начала и концы фаз обмотки статора?
4. Принцип действия асинхронного двигателя. Как создается вращающееся магнитное поле в статоре асинхронного двигателя?
5. Как изменить направление вращения трехфазного асинхронного двигателя?
6. Какую зависимость называют механической характеристикой?
7. Как изменяется коэффициент мощности асинхронного двигателя при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке на валу?
8. Почему при перемене двух фаз изменяется направление вращения трехфазного асинхронного двигателя?
9. Что такое синхронная частота вращения? Какой формулой она выражается?
10. Что такое скольжение асинхронного двигателя?

При **защите** лабораторной работы студент должен ответить на вышеперечисленные вопросы, а также должен знать:

1. Какие потери имеют место в статоре и роторе асинхронного двигателя и от каких факторов они зависят?
2. Зависимость КПД от полезной мощности.
3. Как влияет напряжение на величину вращающего момента?
4. Зависимость вращающего момента от скольжения.
5. Способы регулирования частоты вращения.
6. Способы торможения асинхронных двигателей.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению практических работ
по дисциплине «Электротехника»
для студентов направления подготовки
10.03.01 Информационная безопасность
Направленность (профиль)
«Организация и технологии защиты информации
(по отрасли или в сфере профессиональной деятельности)»

Ставрополь, 2026

Технологическая карта самостоятельной работы студента

Код реализуемой компетенции	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Объем часов
3 семестр				
ОПК-4	Самостоятельное изучение учебного материала по темам № 2, 4, 9 лекций.	Лабораторные работы	Компьютерное тестирование	18.0
ОПК-4	Самостоятельное изучение темы № 3 лабораторных работ.	Изучение лекций	Собеседование	18.0
Итого:				36.0

Список рекомендуемой литературы

Рекомендуемая литература

1. Основная литература:

- [illegible]

2. Дополнительная литература:

- [illegible]

3. Методическая литература:

- 1 Конспект лекций «Электротехника» [Электронный ресурс]: Направление подготовки: 10.03.01 Информационная безопасность / сост. К. М. Сагдеев. - Ставрополь: СКФУ, 2017. экземпляров неограниченно.
- 2 Методические рекомендации к лабораторным работам по дисциплине «Электротехника» [Электронный ресурс]: Направление подготовки: 10.03.01

Информационная безопасность / сост. К. М. Сагдеев. - Ставрополь: СКФУ, 2017. экземпляров неограниченно.

- 3 Методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине «Электротехника» [Электронный ресурс]: Направление подготовки: 10.03.01 Информационная безопасность / сост. К. М. Сагдеев. - Ставрополь: СКФУ, 2017. экземпляров неограниченно.
- 4 Методические рекомендации к самостоятельной работе студентов по дисциплине «Электротехника» [Электронный ресурс]: Направление подготовки: 10.03.01 Информационная безопасность / сост. К. М. Сагдеев. - Ставрополь: СКФУ, 2017. экземпляров неограниченно.

4. Интернет-ресурсы:

1. Сайт по вопросам электротехники. – <http://elektro-tex.ru/>
2. Сайт по радиотехнике и электротехнике. - <http://www.radioingener.ru/>
3. Сайт по электротехнике. – <http://electrono.ru/>
4. Электротехника и электроника для начинающих. - <http://electrik.info/main/school/459-elektrotehnika-i-elektronika-dlya-nachinayuschih.html>