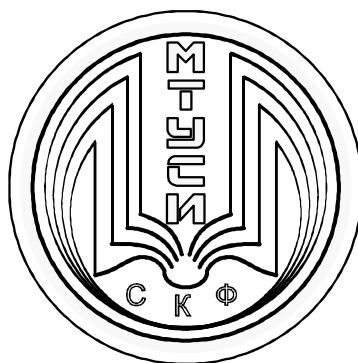


**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Северо-Кавказский филиал
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»



КАФЕДРА ОБЩЕНАУЧНОЙ ПОДГОТОВКИ

Бородин А.В.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Методическое пособие

для проведения лабораторных работ

направление подготовки 10.03.01
Информационная безопасность

Ростов-на-Дону

2022 г.

Бородин А.В. «Электротехника». Методическое пособие для проведения лабораторных работ (направление подготовки 10.03.01 - Информационная безопасность); Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ. 2022. – 75 с.

Составитель: доцент кафедры ОНП Бородин А.В.

Издание рассмотрено и утверждено
на заседании кафедры ОНП
29.08.2022 года (протокол № 1)

Дисциплина «Электротехника» изучается студентами направления 10.03.01 Информационная безопасность.

Целью освоения учебной дисциплины «Электротехника» является изучение основных понятий и законов теории электрических цепей, методов анализа линейных и нелинейных цепей в переходном и установившемся режимах, принципов действия и характеристик компонентов и узлов электронной аппаратуры, методов их расчета.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НАПРЯЖЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Снятие внешних характеристик источников напряжения и тока и определение параметров их схем замещения.

1. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Изучить литературу [1], конспект лекций по данной теме и теоретическую часть лабораторной работы.

Источники электрической энергии делятся на источники (генераторы) напряжения и источники (генераторы) тока. В зависимости от наличия потерь энергии внутри источника различают идеальные и реальные источники. У идеального источника потери внутри самого источника равны нулю. Поэтому внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю и напряжение на его внешних зажимах не зависит от нагрузки, подключенной к этим зажимам. Внутреннее сопротивление идеального источника тока равно бесконечности (соответственно внутренняя проводимость источника равна нулю) и поэтому ток этого источника не зависит от нагрузки, подключенной к зажимам источника.

В реальных источниках имеются потери энергии внутри самого источника и поэтому напряжение на зажимах реального источника напряжения и ток, генерируемый реальным источником тока, зависят от сопротивления нагрузки, подключенной к их внешним зажимам.

Реальный источник напряжения может быть представлен в виде схемы замещения (рис. 1), состоящей из идеального источника напряжения и включенного последовательно с ним резистора с сопротивлением R_i , называемого внутренним сопротивлением источника напряжения.

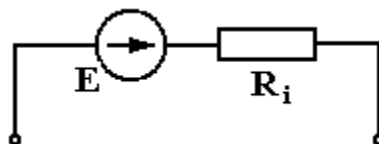


Рис. 1. Схема замещения реального источника напряжения

На практике предполагают, что реальный источник напряжения можно считать идеальным, если его характеристики отличаются от идеальных не более чем на 10%, а это возможно в случае, если выполняется следующее соотношение между внутренним сопротивлением реального источника R_i и сопротивлением нагрузки R_n :

$$R_i < 0.1 R_n \quad (1)$$

Для снятия внешней характеристики реального источника напряжения и определения параметров его схемы замещения необходимо собрать схему, приведенную на рис. 2.

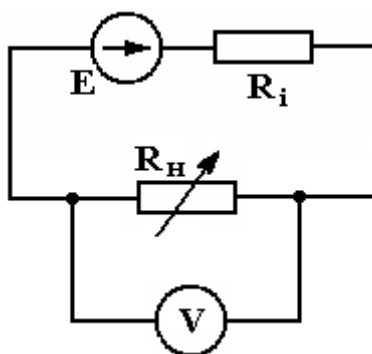


Рис. 2. Схема для определения внешней характеристики реального источника напряжения

С помощью магазина сопротивлений величину R_n можно изменять в широких пределах. Если сопротивление нагрузки отключить ($R_n = \infty$), то ток в цепи будет близким к нулю, так как входное сопротивление вольтметра V очень велико (единицы и десятки МОм) и током в его входной цепи можно пренебречь. В этом случае вольтметр показывает напряжение холостого хода U_{xx} , численно равное э. д. с. источника напряжения E :

$$U_{xx} = E \quad (2)$$

Если сопротивление нагрузки R_n уменьшать, то ток в цепи будет возрастать, падение напряжения на внутреннем сопротивлении будет увеличиваться, а на нагрузке напряжение будет уменьшаться в соответствии с выражением:

$$U_n = E - I \cdot R_i \quad (3)$$

Если сопротивление нагрузки сделать равным внутреннему сопротивлению источника, то напряжение U_{xx} будет поровну распределено между R_i и R_n и таким образом можно определить величину R_i экспериментально. Следовательно сопротивление нагрузки, при котором падение напряжения на нем составляет $0,5E$, численно равно внутреннему сопротивлению источника напряжения. Если подобрать сопротивление R_n , при котором $U_n = 0,5E$ (переменное сопротивление, подключенное к зажимам источника, может изменяться только с определенным шагом), не представляется возможным, то нужно подобрать такое сопротивление нагрузки, при котором U_n максимально приблизится к значению $0,5E$, и вычислить R_i по формуле:

$$R_i = \left(\frac{E}{U_n} - 1 \right) \cdot R_n \quad (4)$$

Внешней или **нагрузочной характеристикой** источника напряжения называют зависимость напряжения на его зажимах от тока, протекающего через эти зажимы. Внешняя характеристика реального источника напряжения (рис. 3) может быть приближенно представлена в виде прямой линии, проходящей через две точки:

- точку, соответствующую режиму холостого хода, при котором: $R_n = \infty$, $I = 0$, $U = U_{xx}$,

- и точку, соответствующую режиму короткого замыкания, при котором: $R_n = 0$, $U = 0$, $I = I_{кз}$. (значение $I_{кз}$ называется током короткого замыкания):

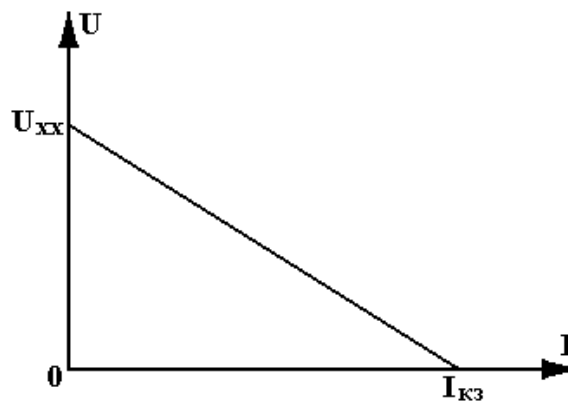


Рис. 3. График внешней характеристики реального источника напряжения

Реальный источник тока может быть представлен в виде схемы замещения (рис. 4), состоящей из идеального источника тока и параллельно включенного с ним резистора с проводимостью G_i , называемой внутренней проводимостью источника тока.

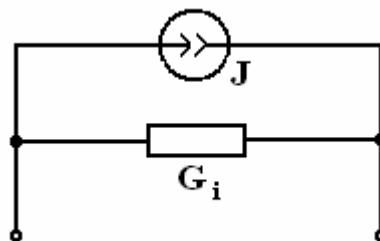


Рис. 4. Схема замещения реального источника тока

На практике предполагают, что реальный источник тока можно считать идеальным, если его характеристики отличаются от характеристик идеального источника не более чем на 10%, а это возможно в случае, если выполняется следующее соотношение между внутренней проводимостью реального источника G_i и проводимостью нагрузки G_n :

$$G_i < 10 G_n \quad (5)$$

Внешняя характеристика реального источника тока устанавливает связь между напряжением и током на его зажимах и определяется аналогично (рис.5) внешней характеристике реального источника напряжения. Эта характеристика (рис. 6) имеет такой же вид, как и внешняя характеристика реального источника напряжения. Если подобрать такое значение сопротивления нагрузки R_n , при котором ток, протекающий через нагрузку, будет равен $0.5 J$, то тогда $G_i = G_n = 1/R_n$, т.е. внутренняя проводимость (сопротивление) источника тока будет равна проводимости (сопротивлению) нагрузки. Так можно экспериментально определить внутреннюю проводимость G_i источника тока.

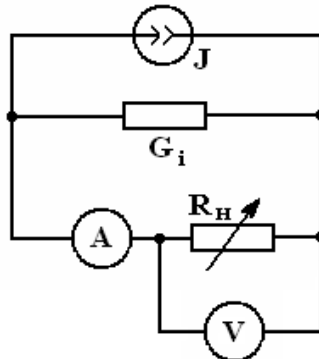


Рис. 5. Схема для определения внешней характеристики реального источника тока

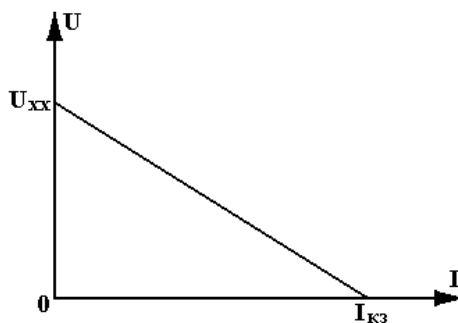


Рис. 6. График внешней характеристики реального источника тока

2. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

2.1. Снятие внешней характеристики источника напряжения с помощью универсального лабораторного стенда

2.1.1. Подготовка схемы лабораторной установки

Для снятия внешней характеристики источника напряжения E_1 с помощью универсального лабораторного стенда, на нем нужно собрать схему, приведенную на рис. 7. Клеммы магазина сопротивлений R_V соединить с выводами источника и параллельно к ним подключить вольтметр V . На магазине сопротивлений установить переключатель величины сопротивления в положение ∞ . Включить питание лабораторного стенда и вольтметра. При этом вольтметр V покажет напряжение холостого хода: $U_n = U_{xx} = E$. Значения сопротивления нагрузки и напряжения U_n занести в табл. 1.

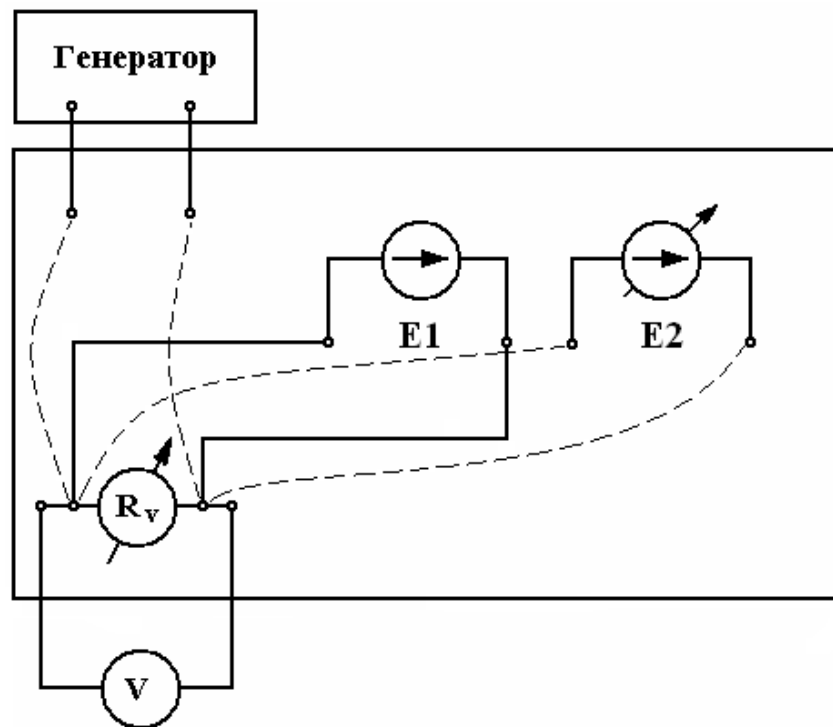


Рис. 7. Схема лабораторной установки для определения внешней характеристики источника напряжения

2.1.2. Порядок проведения эксперимента

Изменяя переключателем магазина R_V значение сопротивления нагрузки от максимального до минимального, фиксировать значения сопротивления и измеренного напряжения. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Первый источник			Второй источник			Третий источник		
Измерения		Расчет	Измерения		Расчет	Измерения		Расчет
R_V , Ом	U, В	I, мА	R_V , Ом	U, В	I, мА	R_V , Ом	U, В	I, мА
$R_i =$			$R_i =$			$R_i =$		

Подключить к магазину сопротивлений R_V источник напряжения E_2 . По заданию преподавателя установить на выходе источника в режиме холостого хода необходимое напряжение и по аналогии выполнить такие же, как в пункте 2.1.2. измерения. Полученные результаты занести в табл. 1.

Включить питание генератора, установить на нем частоту $f_{ген} = 5$ кГц и выходное напряжение $U_{ген\ хх} = 3В$. Подключить генератор к магазину сопротивлений и выполнить такие же измерения, как в п.п.2.1.2. Результаты занести в табл. 1.

3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработка результатов измерений, полученных в процессе эксперимента на лабораторном стенде, производится в следующем порядке.

1. Вычисляется значение тока для каждого из измерения при исследовании источников напряжения. Полученные результаты заносятся в табл. 1.

2. Найденное экспериментально или рассчитанное значение внутреннего сопротивления каждого источника напряжения заносится в табл. 1.

3. Строятся графики нагрузочных характеристик $U = f(I)$ и $U = f(R)$ для каждого источника напряжения.

4. Определяется значение нагрузочных сопротивлений, при которых каждый источник напряжения является практически идеальным.

5. По результатам измерений и вычислений определяются параметры схемы замещения каждого из исследуемых источников напряжения.

По результатам лабораторного исследования источников тока определяется параметры схемы замещения каждого источника тока: его внутренняя проводимость и ток идеального источника J . Найденные параметры заносятся в табл. 3. Далее строятся графики нагрузочных характеристик $I_n = f(U)$ и $I_n = f(R_n)$ для каждого из источников и определяются значение нагрузочного сопротивления, при котором каждый из них считается практически идеальным.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- схемы исследования внешних характеристик на стенде и на компьютере;
- таблицы результатов измерений;
- расчеты токов в цепях;
- графики внешних характеристик $U = f(I)$ и $U = f(R)$ источников напряжения, полученные на лабораторном стенде;
- значения нагрузочных сопротивлений для каждого источника, при которых источники напряжения и тока можно считать идеальными;
- параметры схем замещения исследуемых источников напряжения и тока;
- выводы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Какие источники электрической энергии называются источниками напряжения, какие источниками тока?
2. В чем отличие независимого источника от зависимого (управляемого)?
3. В чем отличие идеального источника от реального?
4. Сколько типов управляемых источников существует, перечислите их?
5. Сколько и какие элементы содержит схема замещения идеального и реального источника напряжения и тока?
6. Сколько и какие элементы содержит схема замещения каждого из управляемых источников?
7. Как произвести замену источника напряжения эквивалентным источником тока и наоборот?
8. Какая характеристика источника называется внешней и как ее определяют?
9. Какие характеристики называются линеаризованными?
10. Какие характерные точки есть у внешней характеристики источника электрической энергии?
11. Как установить режим холостого хода или короткого замыкания на выходе источника?
12. Как определить внешнюю характеристику источника напряжения (тока)?
13. Как определить параметры схемы замещения источника напряжения (тока) расчетным путем и экспериментально?
14. Как рассчитывается мощность, вырабатываемая или потребляемая источником постоянного (переменного) напряжения (тока)?
15. Может ли источник напряжения (тока) не генерировать, а потреблять энергию?
16. Какую мощность генерирует источник постоянного (переменного) напряжения (тока), в каких единицах она измеряется?
17. Как экспериментально определяется внешняя характеристика источника напряжения (тока) на универсальном лабораторном стенде?

18. Как экспериментально определить параметры схемы замещения источника напряжения (тока) на лабораторном стенде?
19. Для чего используется заземление при сборке схемы цепи на лабораторном стенде?
20. Как установить и изменить номинальное значение параметра схемы цепи?
21. Как измерить ток в цепи при помощи вольтметра?
22. Что такое шунт и для чего он используется в схемах?
23. Какой режим работы источника считается согласованным, как его установить, для чего он нужен?
24. Коэффициент полезного действия источника, его физический смысл, в каких пределах он меняется?
25. Как определить внутреннее сопротивление источника напряжения (внутреннюю проводимость источника тока) с помощью внешней характеристики источника?
26. В каких пределах может меняться внутреннее сопротивление источника напряжения (внутренняя проводимость источника тока)?
27. Как влияет величина внутреннего сопротивления источника напряжения (внутренней проводимости источника тока) на внешнюю характеристику источника?
28. Почему не рекомендуется проводить режим короткого замыкания при снятии внешней характеристики на лабораторном стенде?

Лабораторная работа № 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ КИРХГОФА В РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЯХ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментально проверить выполнение законов Кирхгофа в резистивных электрических цепях.

1. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить литературу[1];
- изучить описание данной лабораторной работы и подготовить табл. 2.1, 2.3;
- ответить на вопросы для самоконтроля.

1.1. Основные теоретические положения

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий э.д.с., тока и напряжения.

Все элементы электрических цепей можно разделить на источники и приемники электрической энергии, а также соединительные провода. Как правило, электрическая цепь состоит из ряда элементов, соединенных между собой определенным образом. Описать свойства любой электрической цепи и рассчитать токи и напряжения на ее элементах можно с помощью уравнений электрического равновесия цепи, составленных для нее на основе известных физических законов Ома и Кирхгофа. При составлении указанных уравнений широко используются разнообразные модели электрических цепей.

Основными элементами, из которых состоят электрические цепи, являются: резистор, конденсатор, катушка индуктивности, источники электрической энергии, операционный усилитель. Однако каждый реальный элемент электрической цепи кроме основного полезного качества имеет ряд паразитных свойств. Так реальная катушка индуктивности характеризуется: сопротивлением провода, из которого она изготовлена; емкостью, существующей между витками катушки и между катушкой и землей; и собственно индуктивностью самой катушки. То же самое относится к другим элементам электрической цепи. Если учитывать все качества реального элемента цепи, то задача анализа режима цепи становится очень сложной и громоздкой, а в ряде случаев и неразрешимой. Для упрощения указанной задачи анализа режима электрических цепей с сосредоточенными параметрами полагают, что все реальные элементы этих цепей состоят из определенного числа идеализированных элементов. Каждый идеализированный элемент обладает только одним основным качеством реального элемента. При переходе к идеализированным элементам, каждый реальный элемент цепи заменяется определенной эквивалентной схемой замещения, состоящей из конкретного набора идеализированных элементов. Эти элементы соединяются между собой с помощью идеальных проводников, для которых основные параметры: $R = L = C = 0$. Математическое описание полученной схемы замещения должно отражать доминирующие процессы в реальном элементе цепи, или те из них, которые необходимо учесть при решении конкретной задачи.

Таким образом, получается расчетная схема замещения каждого реального элемента цепи и из этих схем замещения в дальнейшем составляется расчетная схема замещения всей цепи.

Введение понятия идеализированные элементы позволяет при анализе реальной электрической цепи приближенно, но с достаточной для практики точностью, заменить ее некоторой моделью, состоящей из совокупности идеализированных элементов.

Система уравнений, описывающих свойства такой модели, представляет собой математическую модель электрической цепи. Условно-графическое изображение модели электрической цепи называется ее расчетной схемой замещения, которая состоит из взаимосвязанных схем замещения отдельных реальных элементов, и служит расчетной моделью реальной цепи.

Каждая схема замещения имеет определенную топологическую (геометрическую) структуру, для описания свойств которой используются понятия: ветвь, узел, контур.

Ветвью называют участок цепи с двумя выводами, по которому протекает один и тот же ток. Ветвь, как правило, располагается между двумя узлами цепи и состоит из одного или нескольких последовательно соединенных элементов.

Узлом называется место соединения двух и более ветвей. Если в узле соединены только две ветви, то он называется простым или устранимым. В дальнейшем будем рассматривать узлы, в которых соединены более двух ветвей.

Для схемы, приведённой на рис. 1, число узлов $n_y = 4$, число ветвей $n_v = 6$, шестая ветвь содержит источник тока \dot{J} .

Контуром называется замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям электрической цепи так, что один из узлов является началом и концом пути. Контур, который содержит хотя бы одну ветвь, не входящую в другие контуры, называется независимым. На рис. 1 показаны два независимых контура.

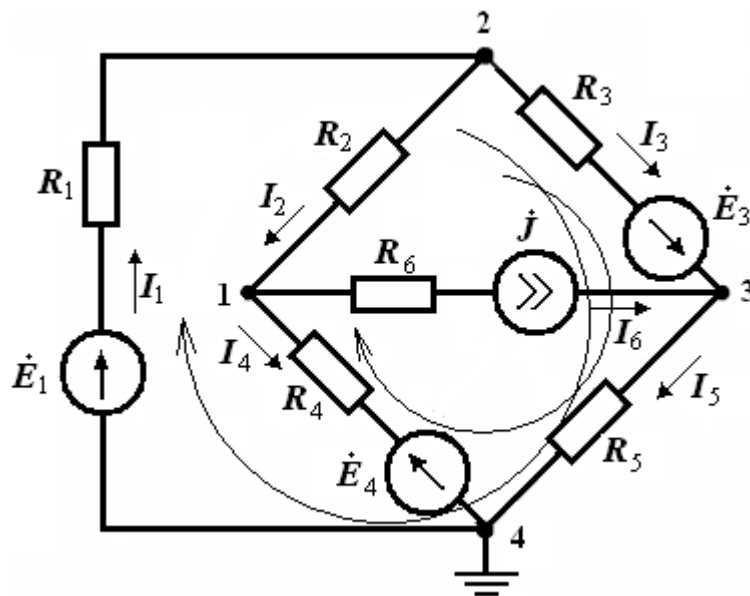


Рис. 1. Схема электрической цепи

1.2. Законы Кирхгофа

Законы Кирхгофа (первый и второй) являются следствием всеобщего закона сохранения энергии. Они применяются для определения токов в ветвях линейных и нелинейных схем при любом законе изменения во времени токов и напряжений. На их базе составляются уравнения электрического равновесия в электрических цепях, используемые в различных методах анализа и синтеза электрических цепей.

Первый закон Кирхгофа выражает закон сохранения количества электричества (движение зарядов в цепи происходит таким образом, что ни в одном из узлов они не скапливаются), применяется для узлов электрической цепи и формулируется следующим образом:

- **алгебраическая (с учетом знаков) сумма токов ветвей, сходящихся в любом узле электрической схемы в любой момент времени, равна нулю:**

$$\sum_K I_K = 0 \quad (1)$$

При этом токи, направленные к узлу принято записывать со знаком плюс, а направленные от узла - со знаком минус.

Например, для узла электрической цепи, представленного на рис. 2, уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа, имеет вид:

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + J_1 - J_2 = 0 \quad (2)$$

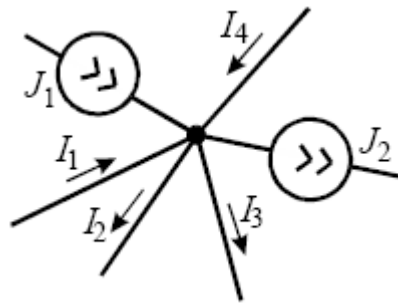


Рис. 2. Узел электрической цепи

Данный закон может быть сформулирован и следующим образом:

- **сумма токов, втекающих в конкретный узел, равна сумме токов, вытекающих из данного узла.**

Для рассмотренного примера это записывается так:

$$J_1 + I_1 + I_4 = J_2 + I_2 + I_3 \quad (3)$$

Второй закон Кирхгофа применяется к контурам электрической цепи и формулируется следующим образом:

- **алгебраическая (с учетом направления) сумма падений напряжений на элементах в любом замкнутом контуре электрической цепи равна нулю:**

$$\sum_K U_K = 0 \quad (4)$$

Данный закон может быть сформулирован и в другом виде:

- **алгебраическая сумма падений напряжения на пассивных элементах любого замкнутого контура равна алгебраической сумме э.д.с., входящих в этот контур:**

$$\sum_K R_K I_K = \sum_N E_N \quad (5)$$

В уравнениях (4,5) направления напряжения и э.д.с. считаются положительными, если совпадают с направлением обхода контура, выбираемым заранее в произвольную сторону.

Для рассматриваемой цепи (рис. 3) уравнения по второму закону Кирхгофа имеют следующий вид:

$$U_1 - U_2 + U_3 + U_4 - U_5 = 0. \quad (6)$$

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2 - E_1.$$

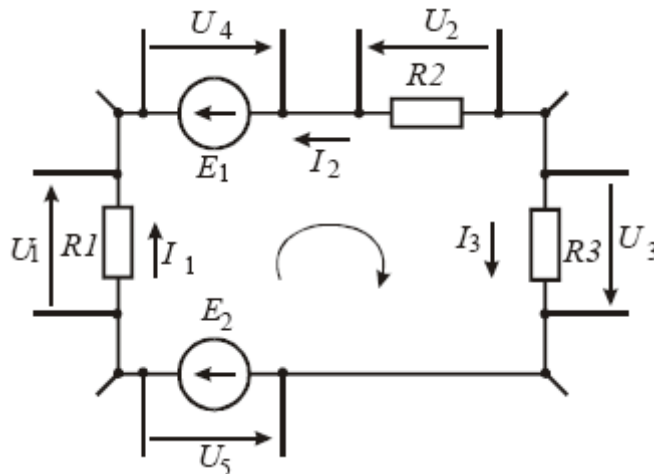


Рис. 3. Контур электрической цепи

1.3. Расчет электрической цепи методом законов Кирхгофа (МЗК)

При расчете режима работы электрической цепи заданными обычно являются: схема и элементы цепи, а также параметры пассивных и активных элементов, а определить требуется токи во всех ветвях и напряжения на отдельных элементах цепи. Для решения такой задачи с помощью МЗК требуется составить по первому и второму законам Кирхгофа систему линейных алгебраических уравнений с учетом принятых положительных направлений токов в ветвях и решить ее относительно искомых токов ветвей. Положительные направления токов выбираются произвольно до начала расчета и указываются на схеме цепи стрелкой. Решение системы алгебраических уравнений представляет собой довольно трудоемкую задачу, а объем вычислений, который необходимо выполнить, возрастает с увеличением сложности цепи (числа ветвей).

В общем случае число уравнений, которое нужно составить при использовании данного метода, равно числу ветвей в рассматриваемой цепи – n_v . Часть уравнений из этого числа составляется по первому закону Кирхгофа – n_1 , а оставшаяся часть по второму – n_2 .

Число независимых уравнений, которые можно составить по первому закону Кирхгофа, равно:

$$n_1 = n_v - 1 \quad (7)$$

Однако, если в схеме цепи имеется ветвь, состоящая только из идеального источника э.д.с., то тогда потенциал узла, к которому присоединен один вывод источника, принимается равным нулю, и следовательно, потенциал узла, к которому присоединен другой вывод источника, будет равен величине э.д.с. источника с соответствующим знаком (в зависимости от направления э.д.с. источника). В этом случае число независимых уравнений, которые можно составить по первому закону Кирхгофа, будет на единицу меньше, чем рассчитано по (7).

Число уравнений, которые нужно составить по второму закону Кирхгофа, должно быть равно:

$$n_2 = n_b - n_1 = n_b - (n_y - 1) \quad (8).$$

Это число равно числу независимых контуров, которые можно выбрать в схеме цепи. Однако, если в схеме цепи имеются ветви, содержащие источники тока (n_t - количество ветвей с источниками тока), то независимые контуры не могут проходить по этим ветвям, так как напряжение на зажимах источника тока неизвестно (оно может быть определено только после расчета режима всей цепи). Вследствие этого, при выборе независимых контуров в схеме цепи, ветви, содержащие источники тока размыкаются, в полученной схеме выбираются независимые контуры, а затем эти ветви подключаются к схеме и принимаются во внимание при составлении уравнений для независимых контуров по второму закону Кирхгофа. Итак, при наличии источников тока в схеме цепи количество уравнений, которые нужно составить по второму закону Кирхгофа, равно:

$$n_2 = n_b - (n_y - 1) - n_t \quad (9)$$

1.3.1. Порядок расчета электрической цепи МЗК

Применение МЗК для расчета режима работы электрической цепи предполагает выполнение следующих этапов:

1. В расчетной схеме исследуемой цепи обозначаются и нумеруются все узлы.
2. Произвольно выбираются положительные направления токов в ветвях цепи, и все токи обозначаются на схеме.
3. Выбираются независимые контуры и обозначаются на схеме положительные направления их обхода.
4. Составляются уравнения по первому и второму законам Кирхгофа в необходимом количестве.
5. Решается полученная система линейных алгебраических уравнений любым из известных методов, и определяются искомые токи.
6. Для подтверждения правильности расчета режима цепи проверяется баланс мощности.

Соблюдение баланса между выработанной и потребленной в электрической цепи мощностью вытекает из закона сохранения энергии.

Активная мощность, потребленная в цепи, не может быть больше или меньше, а должна быть равна той активной мощности, которую выработали источниками электрической энергии, действующие в цепи. Причем небаланс активной мощности, т. е. разность между произведенной и потребленной мощностью должна составлять доли процента от произведенной мощности. При несоблюдении баланса мощностей расчет режима цепи нужно уточнить.

Активная мощность, израсходованная в цепи, определяется выражением:

$$P_{\text{пот}} = \sum_K R_K I_K^2, \quad (10)$$

где I_k - действующее значение тока в ветви. Активная мощность P всегда имеет положительное значение.

Численное значение активной мощности, выработанной отдельным источником электрической энергии, определяется произведением действующего значения э.д.с. источника $E_{\text{ист}}$ на действующее значение протекающего через него тока I :

$$P_{\text{ист}} = E_{\text{ист}} \times I \quad (11)$$

Если направления э.д.с. и тока совпадают, то мощность $P_{\text{ист}}$ будет иметь положительное значение, и источник будет отдавать выработанную им мощность в цепь. Если же направления э.д.с. и тока не совпадают (противоположны), то мощность источника будет отрицательной, и он не будет отдавать (вырабатывать), а будет потреблять активную мощность из цепи. При отрицательном значении мощности источник потребляет энергию из цепи, а при положительном значении – отдает ее в цепь. Следует иметь в виду, что при расчете мощности источника ток, протекающий через него, нужно брать с тем знаком, который получился в результате расчета режима цепи.

При определении мощности источника тока нужно брать произведение тока источника на напряжение на его зажимах, а это напряжение определяется разностью потенциалов точки, из которой вытекает ток источника тока, и точки, в которую он втекает.

Напомним, что потенциал точки электрической цепи есть скалярная величина, равная работе сил электрического поля по перемещению единичного положительного заряда из данной точки в бесконечно удаленную точку, потенциал которой равен нулю.

1.3.2. Применение МЗК для расчета электрической цепи

Применим МЗК для расчета режима электрической цепи, приведенной на рис. 1. Будем считать узел 4 базисным и примем его потенциал равным нулю. Так как в цепи действуют только источники гармонической э.д.с. и тока одинаковой частоты, то уравнения электрического равновесия цепи можно записать в комплексной форме следующим образом:

$$\begin{aligned}
\dot{I}_2 - \dot{I}_4 - \dot{I}_6 &= 0 \\
\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 &= 0 \\
\dot{I}_3 + \dot{I}_6 - \dot{I}_5 &= 0 \\
R_1 \dot{I}_1 + R_3 \dot{I}_3 + R_5 \dot{I}_5 &= \dot{E}_1 + \dot{E}_3 \\
R_3 \dot{I}_3 + R_5 \dot{I}_5 - R_4 \dot{I}_4 - R_2 \dot{I}_2 &= \dot{E}_3 + \dot{E}_4
\end{aligned} \tag{12}$$

Так как в ветви 6 включен независимый источник тока \dot{J} , то ток I_6 будет равен току \dot{J} . Запишем систему уравнение (12), (13) в показательной форме:

$$\begin{aligned}
I_2 e^{j\psi_2} - I_4 e^{j\psi_4} - J e^{j\psi_j} &= 0 \\
I_1 e^{j\psi_1} - I_2 e^{j\psi_2} - I_3 e^{j\psi_3} &= 0 \\
I_3 e^{j\psi_3} + J e^{j\psi_j} - I_5 e^{j\psi_5} &= 0 \\
R_1 I_1 e^{j\psi_1} + R_3 I_3 e^{j\psi_3} + R_5 I_5 e^{j\psi_5} &= E_1 e^{j\psi_{e1}} + E_3 e^{j\psi_{e3}} \\
R_3 I_3 e^{j\psi_3} + R_5 I_5 e^{j\psi_5} - R_4 I_4 e^{j\psi_4} - R_2 I_2 e^{j\psi_2} &= E_3 e^{j\psi_{e3}} + E_4 e^{j\psi_{e4}}
\end{aligned} \tag{14}$$

В цепи, питаемой от гармонических источников с одинаковыми частотами и одинаковыми начальными фазами и состоящей из чисто резистивных элементов, аргументы всех токов и напряжений будут иметь одинаковые значения. Поэтому аргументы $\psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = \psi_4 = \psi_5 = \psi_j = \psi_{e1} = \psi_{e3} = \psi_{e4} = \psi$ и множители $e^{j\varphi}$ в правых и левых частях уравнений (14) могут быть сокращены и сами уравнения электрического равновесия цепи запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned}
I_2 - I_4 - I_6 &= 0 \\
I_1 - I_2 - I_3 &= 0 \\
I_3 + I_6 - I_5 &= 0 \\
R_1 I_1 + R_3 I_3 + R_5 I_5 &= E_1 + E_3
\end{aligned} \tag{15}$$

$$R_3 I_3 + R_5 I_5 - R_4 I_4 - R_2 I_2 = E_3 + E_4$$

В системе уравнений (15) все переменные гармонические токи и э.д.с. представлены модулями своих действующих значений. Такие же уравнения были бы получены для рассматриваемой цепи, если бы в ней вместо источников гармонических токов и напряжений были бы включены источники постоянного тока.

Если в рассматриваемую цепь включить хотя бы один реактивный элемент или начальные фазы у источников будут разными, то уравнения (15), составленные для действующих значений токов и э.д.с., перестанут быть справедливыми. В этом случае надо применять уравнения (14).

2. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

2.1. Экспериментальная проверка законов Кирхгофа с помощью универсального лабораторного стенда

2.1.1. Подготовка схемы лабораторной установки

Для экспериментальной проверки законов Кирхгофа на универсальном лабораторном стенде нужно собрать схему цепи, приведенную на рис. 4. В качестве источников э.д.с. используются два низкочастотных источника напряжения, входящих в состав стенда, с дискретно изменяющимся выходным напряжением и частотой 50 Гц. Внутренние сопротивления источников (R_i) были определены ранее при выполнении лабораторной работы № 1 на этом же стенде. Сопротивления шунтов - $R_{ш}$ выбираются равными 10 Ом (для удобства проведения вычислений), а значения остальных сопротивлений задаются преподавателем.

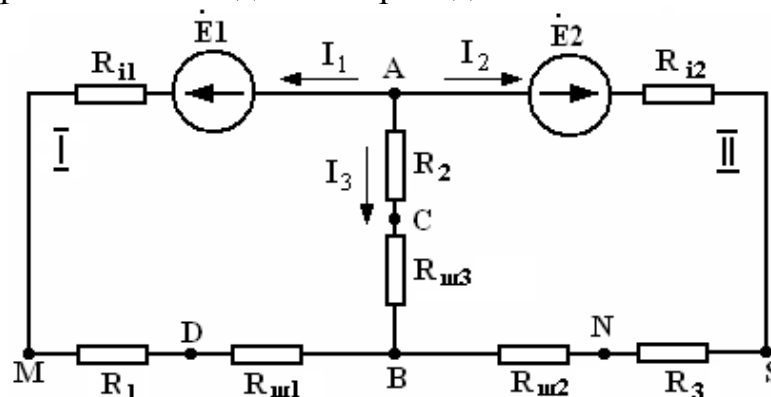


Рис. 4. Расчетная эквивалентная схема исследуемой цепи

2.1.2. Порядок проведения эксперимента и обработки полученных результатов

После ознакомления с описанием лабораторной работы и получения от преподавателя всех необходимых для проведения работы данных: значений э.д.с. источников и величин всех сопротивлений схемы, собрать исследуемую цепь на лабораторном стенде (схема изображена на рис. 5). В рабочей тетради зарисовать схему цепи и перечертить табл. 2.1.

После проверки правильности сбора схемы подать питание на лабораторный стенд, источники питания и вольтметры V_1 и V_2 . С помощью вольтметр V_1 при отключенной нагрузке (в режиме холостого хода) определить напряжение на выходе каждого источника, т.е. измерить э.д.с. E_1 и E_2 каждого источника. Полученные результаты занести в табл. 2.1.

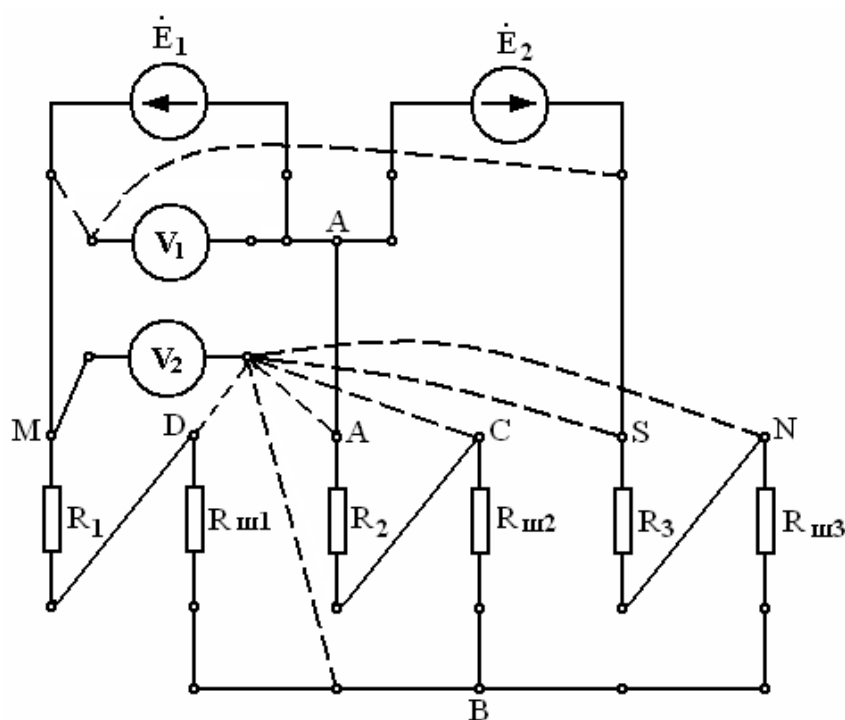


Рис. 5. Схема исследуемой цепи, собранная на лабораторном стенде

Установив корпусной зажим вольтметра V_2 в узел М измерить потенциалы φ всех точек, поименованных на схеме. Результаты измерений занести в табл. 2.1. По найденным потенциалам точек схемы рассчитать напряжения на всех сопротивлениях цепи, а затем по закону Ома найти токи I_1 , I_2 , I_3 . Например, ток I_1 может быть рассчитан по формуле:

$$I_1 = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{\varphi_M - \varphi_D}{R_1}, \quad (16)$$

Результаты расчета всех токов занести в табл. 2.1.

Зная потенциалы всех точек схемы, определить направления токов в ветвях, имея в виду, что ток в ветви протекает от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом. После этого убедиться в правильности первого закона Кирхгофа, подставив найденные значения токов с учетом знаков в уравнение для узла А или В:

$$\sum_1 I_K = 0$$

Рассчитать действующие значения напряжения на внутренних сопротивлениях источников по формуле

$$U_{Ri} = I_i \cdot R_i \quad (17)$$

и убедиться в справедливости второго закона Кирхгофа, составив уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров I и II. Например, для контура I это уравнение, при принятых на рис. 4 направлениях токов в ветвях и выбранном положительном направлении обхода контура, будет иметь вид:

$$I_1(R_{i1} + R_1 + R_{u1}) - I_2(R_{u2} + R_2) = E_1 \quad (18)$$

Таблица 2.1

Режимные параметры цепи	Расчетные значения параметров	Экспериментальные значения параметров	
		На лабораторном стенде	При компьютерном моделировании
$E_1, В$	---		
$E_2, В$	---		
$\varphi_A, В$			
$\varphi_C, В$			
$\varphi_B, В$			
$\varphi_D, В$			
$\varphi_N, В$			
$\varphi_S, В$			
$U_{R1}, В$			
$U_{R2}, В$			
$U_{R3}, В$			
$U_{Rи1}, В$			
$U_{Rи2}, В$			
$U_{Rи3}, В$			

I_1, A			
I_2, A			
I_3, A			
$P_{ист}, Вт$			
$P_{потр}, Вт$			

Произвести расчет режима работы рассматриваемой цепи с помощью МЗК теоретически по исходным данным. Результаты расчетов занести в табл. 2.1. Сравнить результаты, полученные экспериментально и расчетным путем. Определить мощности источников и потребителей, используя расчетные и экспериментальные данные и формулы (10), (11):

$$\sum P_{nom} = (R_1 + R_{u1} + R_{i1})I_1^2 + (R_2 + R_{u2})I_2^2 + (R_3 + R_{u3} + R_{i2})I_3^2$$

$$\sum P_{ист} = E_1 I_1 + E_2 I_3$$

Проверить баланс активных мощностей и рассчитать погрешность баланса:

$$\delta = \frac{\left| \sum P_{ист} - \sum P_{номп} \right|}{\sum P_{ист}} \cdot 100\% \quad (19)$$

Небаланс δ не должен превышать 1%.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- схемы исследуемых цепей для стенда и компьютера и номинальные значения элементов схем;
- таблицы результатов измерений и рассчитанных значений токов, напряжений и других параметров;
- используемые при расчетах формулы и сами расчеты токов, напряжений, мощностей;
- проверку баланса мощностей и анализ полученных результатов;
- выводы о результатах исследования.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Сформулируйте первый и второй закон Кирхгофа для цепей постоянного и переменного тока?
2. Сколько независимых уравнений можно составить по первому и по второму закону Кирхгофа?
3. Что такое идеализированные элементы электрической цепи?
4. Какие цепи называются резистивными?
5. Как производится расчет токов в цепи методом законов Кирхгофа?
6. Что такое расчетная эквивалентная схема замещения цепи и как она составляется?
7. Какие топологические элементы электрической цепи существуют?
8. Из каких реальных элементов состоит электрическая цепь?
9. Какие идеализированные элементы используются при составлении расчетной схемы замещения цепи?
10. Что такое потенциал точки электрической цепи?
11. Какой узел электрической цепи считается базисным?
12. Как выбрать положительное направление тока в ветви?
13. Какие электрические величины называются мгновенными?
14. Какой источник называется источником э.д.с.?
15. Какой источник называется источником тока?
16. Что называется падением напряжения и в чем оно измеряется?
17. Как определить направление тока в ветви, если известны потенциалы узлов?
18. Что такое баланс мощностей?
19. Может ли источник электрической энергии потреблять мощность?
20. Что такое генератор?
21. Чем отличается постоянный ток от переменного тока?
22. Что такое действующее значение переменного тока или напряжения?
23. Какая связь между постоянным током и действующим значением переменного тока?
24. Как рассчитать токи в двух параллельных ветвях?
25. Как рассчитать напряжение при последовательно соединенных резисторах?
26. Какие колебания называются гармоническими?
27. Что называется фазой и начальной фазой гармонического колебания?
28. Что такое показательная форма комплексного числа?
29. Как записывается закон Ома для участка цепи, не содержащего и содержащего источник напряжения?

ИССЛЕДОВАНИЕ RLC-ЦЕПИ НА ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться рассчитывать и экспериментально определять действующие значения и начальные фазы токов и напряжений в RLC-цепях при гармоническом воздействии.

1. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить литературу [1];
- изучить данное описание лабораторной работы и подготовить табл. 1;
- ответить на вопросы для самоконтроля.

1.4. Основные теоретические положения

В общем случае при подключении к RLC-цепи источника с произвольной формой тока или напряжения любые уравнения, описывающие процессы в данной цепи, могут быть составлены только для мгновенных значений токов и напряжений. Например, для цепи на рис.1 по законам Кирхгофа можно записать

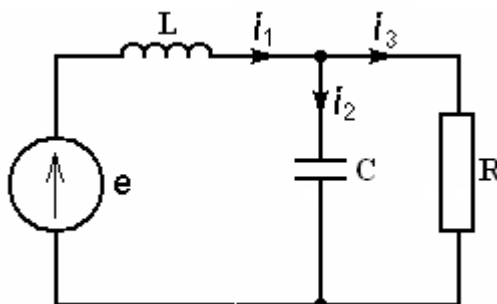


Рис. 1. Схема RLC-цепи

$$\begin{aligned} i_1 - i_2 - i_3 &= 0; \\ u_L + u_C &= e; \\ u_{R3} - u_C &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Если выразить мгновенные значения напряжений через мгновенные значения токов, то система уравнений (1) запишется в виде:

$$\begin{aligned} i_1 - i_2 - i_3 &= 0; \\ L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt &= e; \\ Ri_3 - \frac{1}{C} \int i_2 dt &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

Если э.д.с. или ток источника электрической энергии изменяется по гармоническому закону, то расчет цепи можно выполнять символическим (комплексным) методом с помощью комплексных чисел.

Рассмотрим порядок расчета режима цепи, приведенной на рис. 1, с помощью символического метода. Требуется определить все токи и напряжения ветвей, построить векторные диаграммы токов и напряжений.

Вначале расчета необходимо токи и напряжения всех источников электрической энергии, включенных в цепь, записать в комплексной форме.

Действующий в рассматриваемой цепи источник напряжения $u(t)$ генерирует синусоидальное напряжение

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) , \quad (3)$$

где U_m – амплитудное (максимальное) значение напряжения,
 φ - начальная фаза синусоидального напряжения,
 ω - угловая частота (фазовая скорость) синусоидального напряжения, вычисляемая по формуле:

$$\omega = 2\pi f,$$

где f - циклическая частота, измеряемая в Гц.

Примем следующие значения параметров источника и элементов цепи:

$$U_m = 10\text{В}, \quad \omega = 10^3 \text{ рад/с}, \quad \varphi = 0^\circ, \\ R_l = 10 \text{ Ом}, \quad L = 10 \text{ мГн}, \quad C = 100 \text{ мкФ}.$$

Тогда действующее значение напряжения источника в комплексной форме запишется в виде:

$$\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\varphi} = \frac{10}{\sqrt{2}} \cdot e^{j \cdot 0^\circ} = 7,07\text{В}$$

Далее необходимо все элементы в схеме цепи, заменить комплексными двухполюсниками (рис. 2).

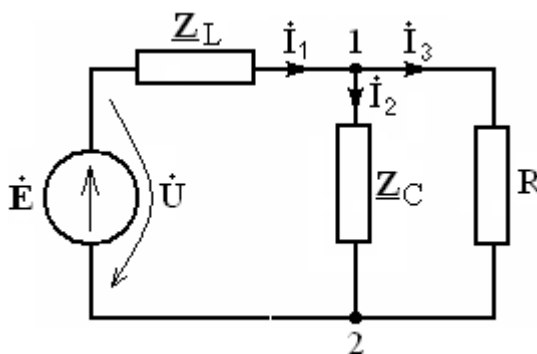


Рис. 2. Схема замещения цепи в комплексной форме

Сопротивления двухполюсников выразим через параметры элементов и рассчитаем их значения. Сопротивления индуктивности L и ёмкости C определяются с помощью выражений:

$$\underline{Z}_L = j\omega L = j \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = j10 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_C = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{1}{10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = -j10 \text{ Ом}.$$

Далее рассчитаем сопротивление Z_{12} , параллельного соединения R и C , а затем входное сопротивление $Z_{\text{вх}}$ цепи:

$$\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{Z}_C \cdot R}{\underline{Z}_C + R} = \frac{-j10 \cdot 10}{-j10 + 10} = \frac{-j10}{-j+1} = \frac{10 \cdot e^{-j90^\circ}}{\sqrt{2} \cdot e^{-j45^\circ}} = 7,07 \cdot e^{-j45^\circ}, \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_{12} = 7,07 \cdot \cos 45^\circ - j7,07 \cdot \sin 45^\circ = 5 - j5, \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{12},$$

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = j10 + 5 - j5 = 5 + j5 = 7,07 \cdot e^{j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Расчет токов в ветвях и напряжений на элементах цепи проводим в следующем порядке:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{\text{вх}}} = \frac{7,07 \cdot e^{j0^\circ}}{7,07 \cdot e^{j45^\circ}} = 1 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{U}_L = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_L = 1 \cdot e^{-j45^\circ} \cdot 10 \cdot e^{j90^\circ} = 10 \cdot e^{j45^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{12} = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_{12} = 1 \cdot e^{-j45^\circ} \cdot 7,07 \cdot e^{-j45^\circ} = 7,07 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{12}}{\underline{Z}_C} = \frac{7,07 \cdot e^{-j90^\circ}}{10 \cdot e^{-j90^\circ}} = 0,707 \text{ А},$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{12}}{R} = \frac{7,07 \cdot e^{-j90^\circ}}{10} = 0,707 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ А}.$$

Зная все токи и напряжения в схеме, можно перейти к построению векторных диаграмм.

Для построения векторной диаграммы токов необходимо составить уравнение по первому закону Кирхгофа для рассматриваемого узла. Составим уравнение по первому закону Кирхгофа для узла 1:

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0$$

Подставим в уравнение комплексные значения токов

$$1 \cdot e^{-j45^\circ} - 0,707 - 0,707 \cdot e^{-j90^\circ} = 0$$

и преобразуем его составляющие сумму векторов

$$1 \cdot e^{-j45^\circ} + 0,707 \cdot e^{j180^\circ} + 0,707 \cdot e^{j90^\circ} = 0.$$

Перед построением диаграммы выберем масштаб векторов токов. Примем масштаб: 0.1А/см (т.е. 1 см длины вектора соответствует 0.1А).

Векторная диаграмма строится из начала координат и каждый последующий вектор строится из конца предыдущего. Диаграмма представлена на рис. 3.

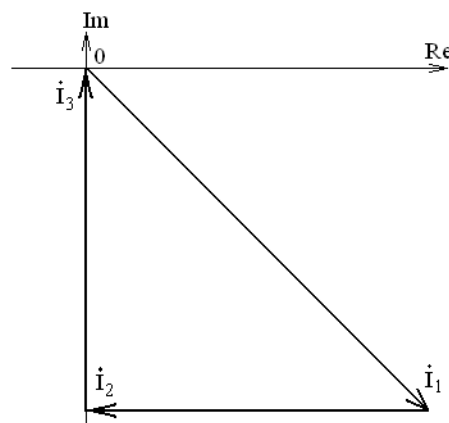


Рис. 3. Векторная диаграмма токов для узла 1.

Для построения векторной диаграммы напряжений составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура цепи (источник – индуктивность – сопротивление Z_{12}):

$$\dot{U} - \dot{U}_L - \dot{U}_{12} = 0$$

Подставим в уравнение численные значения векторов:

$$7,07 - 10 \cdot e^{j45^\circ} - 7,07 \cdot e^{-j90^\circ} = 0,$$

и преобразуем уравнение в сумму векторов:

$$7,07 + 10 \cdot e^{j-135^\circ} + 7,07 \cdot e^{j90^\circ} = 0.$$

Для построения диаграммы выберем масштаб: 1В/см. Векторная диаграмма строится аналогично и представлена на рис. 4.

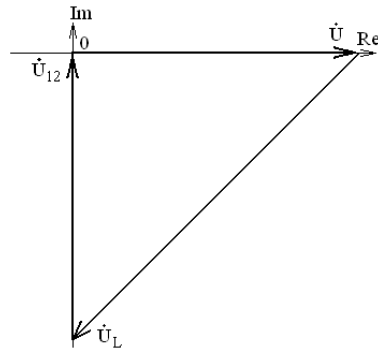


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений

Для наглядного представления расположения векторов токов и напряжений на элементах цепи относительно друг друга построим векторные диаграммы токов и напряжений вместе на общей диаграмме (рис. 5). Из диаграммы видно:

- ток \dot{I}_1 в индуктивности отстает от приложенного к ней напряжения на 90° ,
- ток в активном сопротивлении \dot{I}_3 совпадает с приложенным к нему напряжением \dot{U}_{12} ,
- ток в емкости \dot{I}_2 опережает приложенное к нему напряжение \dot{U}_{12} на 90°

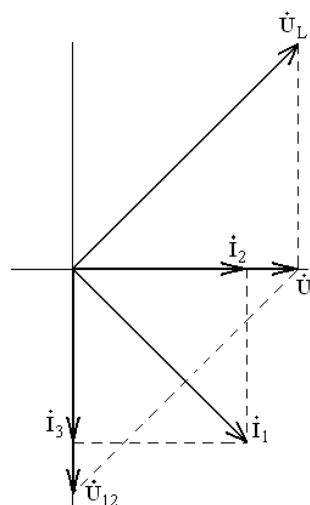


Рис. 5 Совмещенные диаграммы токов и напряжений

Векторные диаграммы, как правило, являются конечным результатом решения задач, подобных рассмотренной. Векторная диаграмма позволяет проверить правильность проведенных расчетов, по ней для сложных цепей можно определить напряжения в комплексной форме между точками, непосредственно не связанными друг с другом.

При необходимости перейти от комплексных выражений токов и напряжений к выражениям мгновенных значений токов или напряжений, это делается очень просто. Умножив действующее значение напряжения на индуктивности $U_L = 10\text{В}$ на $\sqrt{2}$, получаем амплитудное значение напряжения

$u_L(t)$: $U_m = 14.14\text{В}$. Начальная фаза φ напряжения $u_L(t)$ равна аргументу комплексного напряжения \dot{U}_L , равному 45° . Следовательно, мгновенное значение напряжения на индуктивности запишется в виде:

$$u_L(t) = 10 \sin(\omega t + 45^\circ), \text{В}$$

1.2 Назначение и использование измерителя разности фаз

Измеритель разности фаз (фазометр) представляет собой прибор, позволяющий измерять разность фаз двух напряжений гармонической формы. Напряжение, относительно которого измеряется сдвиг фаз (опорное), подается на разъем 2, а напряжение, фазу которого необходимо измерить (сигнальное), подается на разъем 1. Разъемы расположены на лицевой панели прибора. В лаборатории используется фазометр Ф2 – 34.

При проведении измерений недопустимо подавать на разъемы 1 и 2 напряжения, действующие значения которых превышают 7 В.

Схема включения фазометра приведена на рис. 6:

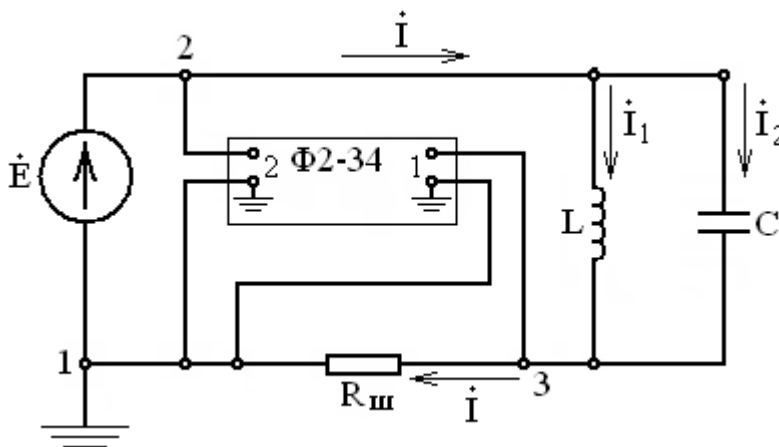


Рис. 6. Схема включения измерителя разности фаз Ф2-34

При подключении соединительных кабелей фазометра к исследуемой цепи в первую очередь подключается заземленный проводник кабеля, отмеченный специальным образом (черным цветом или специальным обозначением). При подключении соединительных кабелей следует соблюдать полярность подключения: заземленный проводник кабеля необходимо подключать только к заземленному контакту цепи (в противном случае, может произойти короткое замыкание, или прибор будет показывать неверные результаты).

В рассматриваемой схеме (рис. 6) фазометр измеряет сдвиг фаз напряжения \dot{U}_{31} (сигнального) относительно напряжения \dot{U}_{21} (опорного). Следует отметить, что оба напряжения сигнальное и опорное обязательно должны иметь общую точку (в данном случае узел 1), которая должна быть заземлена.

После подключения фазометра в схему перед началом измерения разности фаз необходимо нажать кнопку «Ф» на лицевой панели прибора. После нажатия кнопки происходит цикл установки нуля (примерно 70 секунд). Об окончании этого цикла свидетельствует периодическое мигание нижнего сегмента индикатора «°» (градусы). После этого через 3 – 5 секунд на табло прибора высвечивается значение угла сдвига фаз исследуемого сигнала относительно опорного.

Если значение сдвига фаз на приборе находится в пределах $0 - 180^\circ$, то оно соответствует действительному сдвигу фаз между напряжениями. Если же значение угла сдвига фаз находится в пределах $180 - 360^\circ$, то из значения, показываемого прибором, следует вычесть 360° . Полученное таким образом значение будет соответствовать имеющему место сдвигу фаз между двумя напряжениями (в данном случае сдвиг фаз между напряжениями будет отрицательным, т.е. сигнальное напряжение по фазе будет опережать опорное).

При переключении сигнального проводника соединительного кабеля к другому узлу исследуемой цепи для измерения угла сдвига фаз между соответствующими напряжениями, повторно кнопку «Ф» нажимать не надо. Значение фазового сдвига установится через 3 – 5 сек после переключения. Кнопку «Ф» необходимо нажимать повторно при отключении и последующем включении генератора, а также при изменении схемы цепи или схемы измерений.

2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

2.1. Задание на выполнение лабораторной работы

Провести исследование RLC - цепи, схема которой представлена на рис. 7. Схему цепи перерисовать в рабочую тетрадь и занести в табл. 1 исходные данные для составления схемы и проведения вычислений:

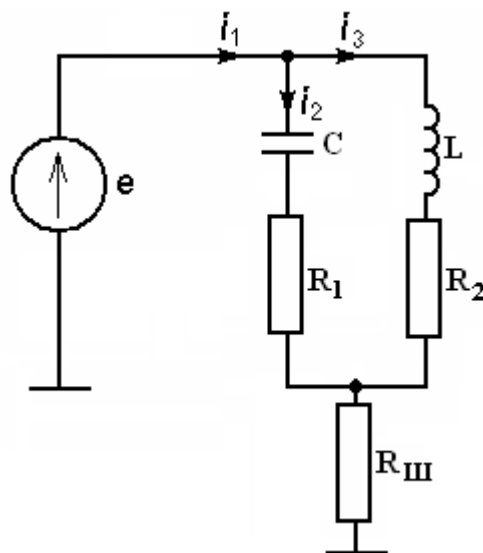


Рис. 7. Схема RLC – цепи

$$U_{\text{вх}} = 5 \text{ В}, \quad f = 5 \text{ кГц},$$

$$R_1 = 500 \text{ Ом}, \quad R_2 = 300 \text{ Ом}, \quad R_{\text{III}} = 100 \text{ Ом},$$

$$L = 13 \text{ мГн}, \quad C = 0,02 \text{ мкФ}.$$

При проведении лабораторной работы учебной группой исходные данные каждой бригаде задаёт преподаватель, проводящий занятие в группе.

Рассчитать теоретически, а также определить с помощью лабораторного стенда и программы компьютерного моделирования Electronics Workbench (EWB) действующие значения и начальные фазы следующих напряжений и токов:

- $U_{R_{\text{III}}}, U_{R_1}, U_{R_2}, U_L, U_C$;
- I_1, I_2, I_3 ;
- начальные фазы: $\varphi_{R_{\text{III}}}, \varphi_{R_1}, \varphi_{R_2}, \varphi_L, \varphi_C$.

Результаты, полученные различными способами необходимо занести в табл. 1.

2.2. Теоретический расчет режима цепи

Теоретический расчет режима цепи – RLC был рассмотрен ранее в разделе 1.1. Используя приведенные в нем формулы, необходимо выполнить подобный расчет для рассматриваемой цепи (рис. 7) с заданными в разделе 2.1 исходными данными. Полученные результаты нужно занести в столбец «Результаты расчетов» табл. 1.

2.3. Исследование RLC - цепи на лабораторном стенде

2.3.1. Подготовка схемы на лабораторном стенде к измерениям

Для экспериментального исследования RLC - цепи на универсальном лабораторном стенде нужно собрать на нем схему цепи, приведенную на рис. 7. В качестве источника э.д.с. используется генератор ГЗ-112. В

качестве элементов цепи используются элементы, размещенные в лабораторном стенде. Для измерения действующих значений напряжений и токов используются два милливольтметра ВЗ-38, а для измерения разности фаз - фазометр Ф2-34.

Таблица 1

Измеряемые величины	$U_{вх} = 5 \text{ В}, \quad f = 5 \text{ кГц}, \quad R_1 = 500 \text{ Ом}, \quad R_2 = 300 \text{ Ом},$ $R_{III} = 100 \text{ Ом}, \quad L = 13 \text{ мГн}, \quad C = 0,02 \text{ мкФ}$		
	Результаты расчетов	Результаты измерений	Результаты моделирования
$U_{R_{III}}, \text{ В}$			
$U_{R1}, \text{ В}$			
$U_{R2}, \text{ В}$			
$U_L, \text{ В}$			
$U_C, \text{ В}$			
$I_1, \text{ А}$			
$I_2, \text{ А}$			
$I_3, \text{ А}$			
$\varphi_{R_{III}}, \text{ град.}$			
$\varphi_{R1}, \text{ град.}$			
$\varphi_{R2}, \text{ град.}$			
$\varphi_L, \text{ град.}$			
$\varphi_C, \text{ град.}$			

2.3.2. Порядок проведения эксперимента и обработки полученных результатов

Вначале следует ознакомиться с описанием лабораторной работы и освоить правила проведения измерений с помощью фазометра Ф2-34.

Далее на универсальном лабораторном стенде собирается первая исследуемая цепь (рис. 8). После проверки правильности сборки схемы преподавателем включается питание генератора, вольтметров V_1 и V_2 и измерителя разности фаз. На генераторе устанавливается частота 5 кГц и выходное напряжение, равное 5В. Выходное напряжение устанавливается с помощью милливольтметра V_1 . Милливольтметр V_2 используется для измерения напряжения $\dot{U}_{R_{III}}$ на резисторе R_{III} , а прибором Ф2-34 измеряется разность фаз $\varphi_{R_{III}}$ между напряжением $\dot{U}_{R_{III}}$ (сигнальным напряжением \dot{U}_{31}) и опорным напряжением \dot{U}_{21} . Полученные результаты занести в табл. 1.

С помощью закона Ома, используя измеренное напряжение $U_{R_{III}}$ и известное значение R_{III} , определяется действующее значение тока I_1 . Полученный результат занести в столбец «Результаты измерений» в табл. 1.

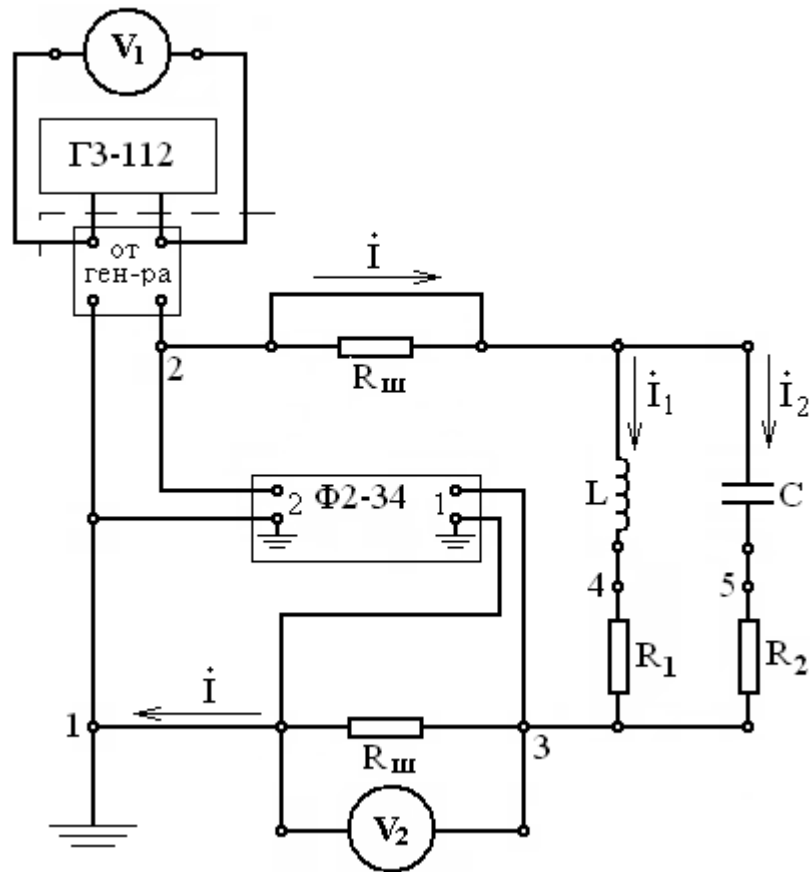


Рис. 8. Схема для измерения действующего значения напряжения $U_{R_{III}}$ и его начальной фазы $\varphi_{R_{III}}$

Так как в активном сопротивлении ток и напряжение совпадают по фазе, то найденное значение начальной фазы $\varphi_{R_{III}}$ напряжения $U_{R_{III}}$, будет также начальной фазой φ_{I_1} тока \dot{I}_1 .

Для измерения действующих значений и начальных фаз φ_{R_1} и φ_{R_2} напряжений \dot{U}_{R_1} и \dot{U}_{R_2} следует в исследуемой схеме (рис. 8) зашунтировать (закоротить) резистор R_{III} в ветви 1-3 и расшунтировать (включить в схему) такой же резистор R_{III} в ветви 2-4. Это необходимо для того, чтобы схема цепи не изменилась, и в ней можно было бы определить сдвиг фаз напряжений \dot{U}_{43} и \dot{U}_{53} относительно опорного напряжения \dot{U}_{21} . В схеме цепи все эти напряжения должны иметь общий заземленный узел (им является узел 1). Если в схеме не будет общей заземленной точки у этих напряжений, то фазометр будет давать неверные показания.

Схема, соответствующая указанным преобразованиям, приведена на рис. 9. Ее необходимо собрать на лабораторном стенде. Затем с помощью милливольтметра V_2 и фазометра измерить действующие значения U_{R_1} и U_{R_2} и начальные фазы φ_{R_1} и φ_{R_2} этих напряжений \dot{U}_{R_1} и \dot{U}_{R_2} . Полученные результаты необходимо занести в столбец «Результаты измерений» табл. 1. Используя измеренные напряжения U_{R_1} и U_{R_2} и известные значения R_1 и R_2 , рассчитать токи I_2 и I_3 . Полученные результаты также занести в табл. 1 в столбец «Результаты измерений».

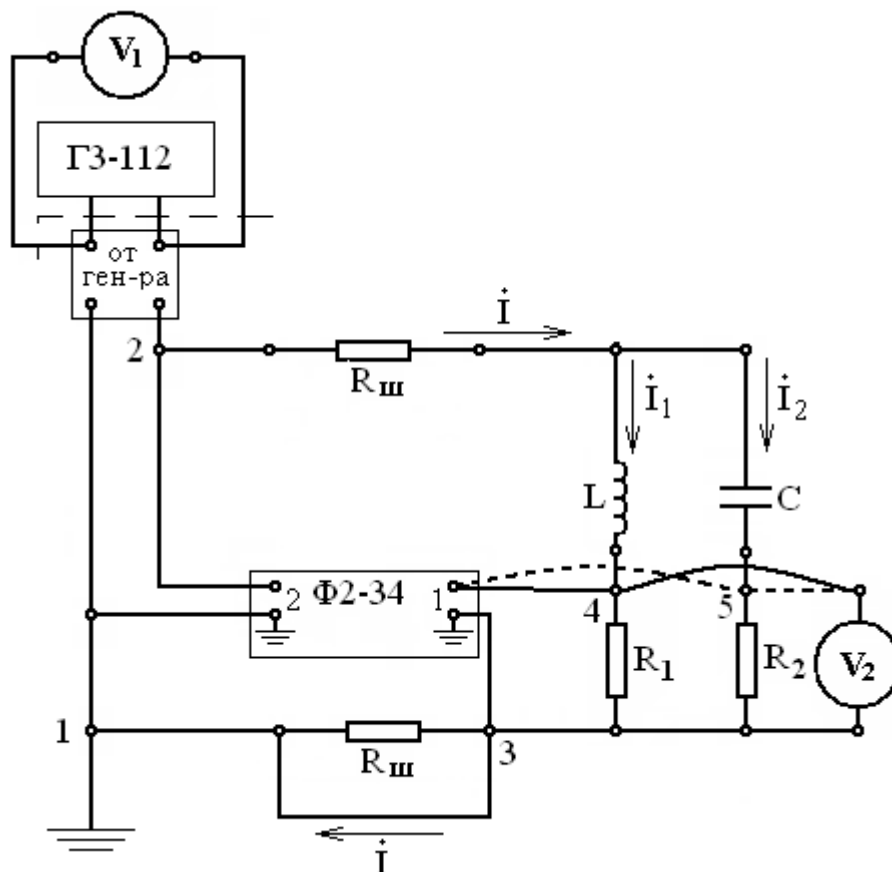


Рис. 9. Схема измерения действующих значений напряжений \dot{U}_{R1} , \dot{U}_{R2} и их начальных фаз φ^{R1} и φ^{R2}

Для измерения действующих значений и начальных фаз напряжений \dot{U}_L и \dot{U}_C в каждой из параллельных ветвей схемы нужно поменять местами реактивный элемент с резистором. Тогда у напряжений \dot{U}_L , \dot{U}_C и опорного напряжения \dot{U}_{21} будет общий заземленный узел 1, и можно будет определить сдвиг фаз между напряжениями на реактивных элементах и опорным напряжением.

Схема, соответствующая этим изменениям приведена на рис. 10.

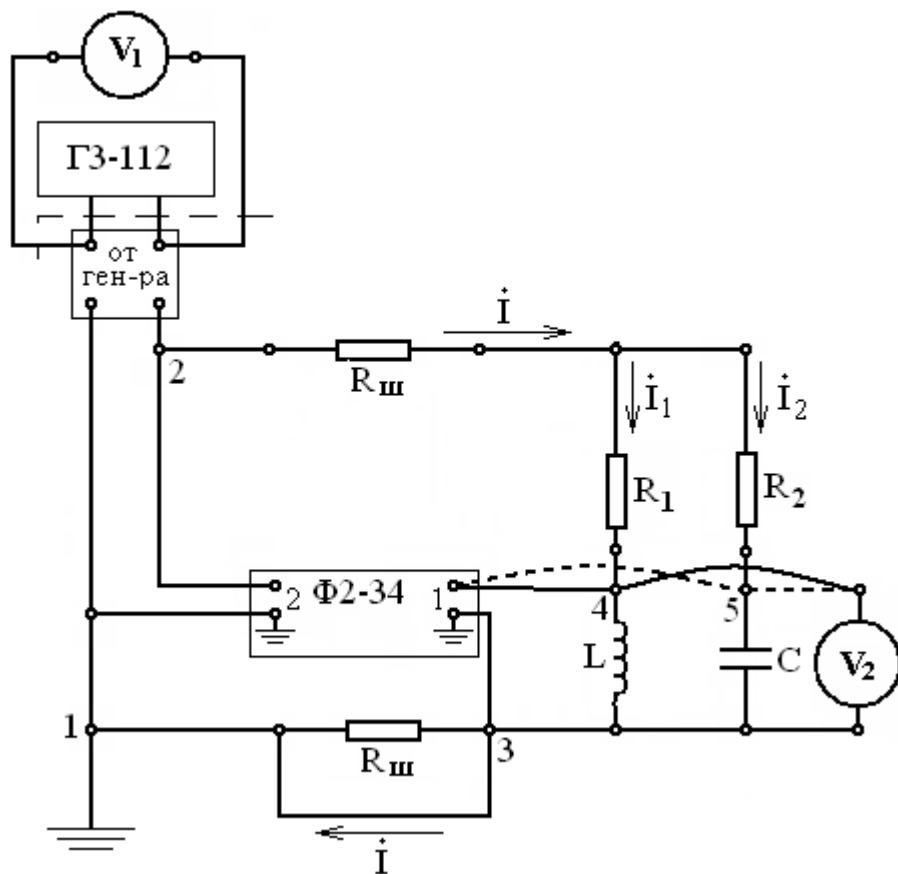


Рис. 10. Схема для измерения действующих значений и начальных фаз φ_L и φ_C напряжений \dot{U}_L , \dot{U}_C

Собрать данную схему. По аналогии с предыдущими измерениями \dot{U}_{R1} и \dot{U}_{R2} произвести измерения действующих значений напряжений \dot{U}_L и \dot{U}_C , а также их начальных фаз φ_C и φ_L . Результаты измерений занести в таблицу 1.

Сравнить начальные фазы напряжения \dot{U}_L и тока \dot{I}_1 в индуктивности. Их разность должна составлять величину близкую к 90° , так как напряжение на идеальной индуктивности (активное сопротивление которой равно нулю) опережает протекающий по ней ток на угол, равный 90° . В схеме макета используется реальная индуктивность, представляющая собой катушку индуктивности, имеющая определенное активное сопротивление. Поэтому в данном случае угол сдвига фаз между напряжением и током в индуктивности будет меньше 90° .

Сравнить также нужно начальные фазы напряжения и тока, протекающего через емкость. В идеальной емкости напряжение отстает от протекающего через нее тока на 90° . В рассматриваемой схеме используется реальный конденсатор, обладающий определенным активным сопротивлением. Следовательно, в исследуемой схеме разность начальных фаз напряжения и тока должна быть близка к значению (-90°) .

По результатам проведенных в разделе 2.3. исследований построить векторные диаграммы токов и напряжений на элементах рассмотренной RLC – цепи.

Сравнить результаты расчетов токов и напряжений в рассмотренной цепи, полученные теоретически и экспериментально на универсальном

лабораторном стенде. Расхождения в результатах расчетов должны составлять не более 5%. Возникновение их связано с тем, что при проведении экспериментальных исследований возникают погрешности измерений, обусловленные классом точности используемых приборов и погрешностью номинальных значений элементов, используемых в универсальном лабораторном стенде, указанной на самих элементах.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- схемы исследуемых цепей для стенда и компьютера и номинальные значения элементов схем;
- таблицу результатов измерений и рассчитанных значений токов и напряжений;
- используемые при расчетах формулы и сами расчеты токов и напряжений;
- векторные диаграммы токов и напряжений по результатам расчетов и измерений на лабораторном стенде;
- выводы о результатах исследования.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Из каких реальных элементов состоит электрическая цепь?
2. Какие идеализированные элементы используются при составлении расчетной схемы замещения цепи?
3. Какой узел электрической цепи считается базисным?
4. Как определить направление тока в ветви, если известны потенциалы узлов?
5. Какие колебания называются гармоническими?
6. Какие электрические величины называются мгновенными?
7. Что такое действующее значение переменного тока или напряжения?
8. Что называется фазой и начальной фазой гармонического колебания?
9. Какое число называется комплексным?
10. Какие существуют формы записи комплексного числа?
11. Как определить модуль и аргумент комплексного числа?
12. Как складываются, вычитаются, умножаются и делятся комплексные числа?
13. Что такое сдвиг фаз и что он характеризует?
14. Какой угол сдвига фаз между напряжением и током в активном сопротивлении?
15. Какой угол сдвига фаз между напряжением и током в индуктивности и емкости?
16. Как рассчитать теоретически и определить экспериментально сдвиг фаз между напряжением и током?

17. Запишите в комплексной форме закон Ома для участка цепи, содержащего источник напряжения, активное сопротивление, индуктивность и емкость?
18. Что такое шунт и для чего он используется в схемах?
19. Как измерить начальную фазу тока в ветви?
20. Как измерить ток в цепи при помощи вольтметра?
21. Как перейти от записи тока или напряжения в синусоидальной форме к записи их в комплексной форме и наоборот?
22. Нарисуйте треугольник сопротивлений последовательной RLC – цепи.
23. Как зависят реактивные сопротивления индуктивности и емкости от частоты?
24. Как определяется сдвиг фаз между двумя синусоидальными напряжениями?
25. Как определить угол сдвига фаз между синусоидальным напряжением и синусоидальным током?
26. Как называется модуль комплексного сопротивления?
27. Как называется аргумент комплексного сопротивления?
28. Запишите в комплексной форме закон Ома для последовательной RLC – цепи.
29. Для чего используется заземление при сборке схемы цепи на лабораторном стенде и на компьютере?
30. Как установить и изменить номинальное значение параметра элемента схемы цепи при компьютерном моделировании?
31. Какой прибор называется измерителем разности фаз. Как и разность каких фаз он измеряет?
32. Правила включения измерителя разности фаз в схему.
33. Как измерить напряжение между двумя узлами?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНЫХ И ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСТЕЙШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1. Общие положения

К простейшим электрическим цепям переменного тока относятся цепи первого порядка, представляющие собой неразветвленные двухэлементные четырехполюсники с одним реактивным элементом. Примеры таких цепей приведены на рисунке 1:

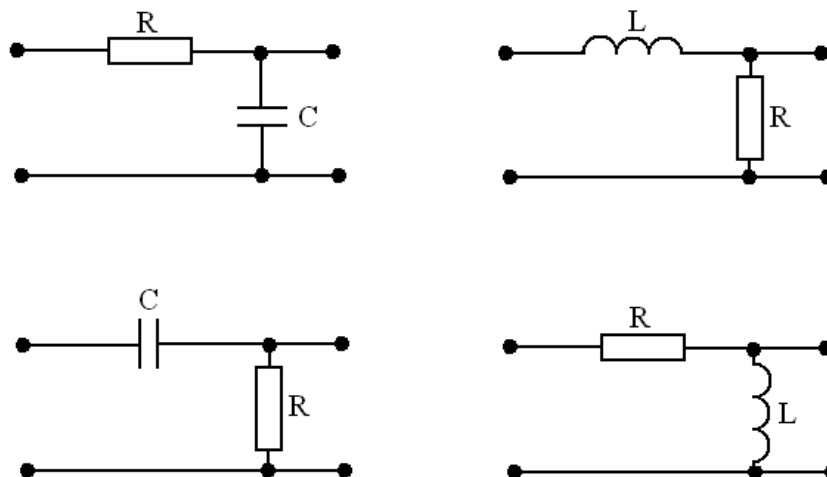


Рисунок 1 - Двухэлементные неразветвленные цепи первого порядка

Важнейшими частотными характеристиками таких цепей являются входные и передаточные характеристики. В число входных характеристик входят входное комплексное сопротивление $\underline{Z}_{BX}(j\omega)$ и входная комплексная проводимость $\underline{Y}_{BX}(j\omega)$. В число передаточных характеристик входят: передаточные функции цепи по напряжению $H_U(j\omega)$ и току $H_I(j\omega)$, а также передаточное сопротивление $H_Z(j\omega)$ и передаточная проводимость $H_Y(j\omega)$. Входное комплексное сопротивление представляет собой отношение входного комплексного напряжения к входному комплексному току:

$$\underline{Z}_{BX}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{I}_{вх}} \quad (1)$$

При изменении частоты сопротивления реактивных элементов L и C изменяются, а, соответственно, изменяются модуль и аргумент комплексного сопротивления $\underline{Z}_{BX}(j\omega)$. Зависимость модуля входного комплексного сопротивления от частоты называется входной амплитудно-частотной характеристикой цепи (АЧХ), а зависимость аргумента комплексного входного сопротивления от частоты называется входной фазочастотной характеристикой цепи (ФЧХ). При анализе простейших электрических цепей выражение комплексного входного сопротивления легко записать по виду схемы цепи.

Если на вход любой из приведенных схем (рисунок 1) подключить источник, а на выход – нагрузку, то каждую из схем можно рассматривать как передаточное звено. Для каждой из схем в этом случае можно записать выражение любой из передаточных функций цепи, отмеченных выше. В общем случае любая из передаточных функций представляет собой отношение комплексного значения выходного напряжения или тока к

комплексному значению входного напряжения или тока. Наиболее широко при исследовании электрических цепей используется комплексная передаточная функция цепи по напряжению $H_U(j\omega)$, иногда называемая комплексным коэффициентом передачи цепи по напряжению $K_U(j\omega)$. Комплексная передаточная функция цепи по напряжению представляет собой отношение комплексного действующего значения выходного напряжения $\dot{U}_{вых}$ к комплексному действующему значению входного напряжения $\dot{U}_{вх}$:

$$H_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх}}. \quad (2)$$

Выражение $H_U(j\omega)$ можно записать в показательной форме (индекс U в дальнейшем указывать не будем, так как выражение этой характеристики в отличие от выражений других характеристик, как правило, записывается без индекса):

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \cdot e^{j\varphi(\omega)}. \quad (3)$$

Модуль комплексной передаточной функции по напряжению $|H(j\omega)| = H(\omega)$, представляющий собой отношение модуля выходного напряжения к модулю входного напряжения, называется амплитудно-частотной характеристикой цепи (АЧХ), а аргумент комплексной передаточной функции по напряжению $\varphi(\omega)$, представляющий собой разность начальных фаз выходного и входного напряжений, называется фазочастотной характеристикой цепи (ФЧХ).

При изменениях значений напряжений на входе и выходе цепи в широких пределах пользуются логарифмическим масштабом и логарифмической единицей измерения - децибел (дБ).

Значение модуля $H(\omega)$, выраженное в децибелах, записывается в виде:

$$H(\omega) = 20 \lg |H(j\omega)|, \text{ дБ} \quad (4)$$

Производная аргумента комплексной передаточной функции по частоте

$$\tau_s = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (5)$$

называется временем задерживания (ВЗ). ВЗ показывает время задержки спектральной составляющей сигнала с частотой ω при прохождении его через цепь.

Для неискаженной передачи входного сигнала через цепь необходимо, чтобы АЧХ цепи в заданной полосе частот была постоянной, а ФЧХ – линейной (ВЗ - константа). АЧХ и ФЧХ таких цепей имеют вид (рисунок 2):

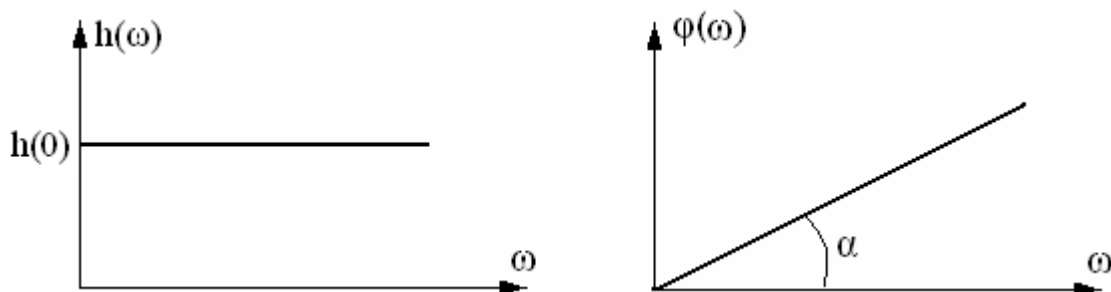


Рисунок 2 - АЧХ и ФЧХ цепи, обеспечивающей неискаженную передачу сигнала

Если АЧХ цепи имеет постоянное значения, то все спектральные составляющие передаваемого сигнала изменяются на одинаковое значение по амплитуде. В этом случае в выходном сигнале соотношения между амплитудами спектральных составляющих будут такими же, как во входном сигнале и поэтому в выходном сигнале будут отсутствовать амплитудно-частотные искажения его формы. Величина $\operatorname{tg} \alpha$ определяет время задерживания каждой из спектральных составляющих входного сигнала при конкретном значении частоты ω . Если угол наклона ФЧХ α постоянен для всего диапазона частот, то время задерживания τ_z , равное $\operatorname{tg} \alpha$ будет одинаковым для всех спектральных составляющих входного сигнала. Вследствие этого угол сдвига фаз между всеми спектральными составляющими в выходном сигнале сохранится таким же во входном сигнале, и в выходном сигнале будут отсутствовать фазочастотные искажения формы входного сигнала. При выполнении этих двух условий форма входного и выходного сигналов будет одинаковой, т.е. не произойдет ее искажения.

На практике достаточно выполнение данных условий в пределах ширины спектра входного сигнала.

При невыполнении указанных условий, в выходном сигнале возникают амплитудные и фазовые искажения, и форма сигнала на входе и выходе цепи будут отличаться, и соответственно будет искажена информации, передаваемая с помощью этих сигналов.

Входные и передаточные функции цепи могут выражаться в двух формах: операторной и комплексной.

При записи функций в операторной форме используется прямое преобразование Лапласа. Входное сопротивление цепи в операторной форме представляет собой отношение входного операторного напряжения к входному операторному току. Для его записи в выражении (1) нужно заменить переменную $j\omega$ оператором Лапласа p :

$$Z_{BX}(p) = \frac{U_{ex}(p)}{I_{ex}(p)} \quad (6)$$

Выражение входной операторной проводимости $Y(p)$ обратно выражению операторного входного сопротивления.

Выражения операторных напряжений и токов известных напряжений и токов получают с помощью изображений по Лапласу, изображения неизвестных токов и напряжений получают в процессе расчетов с помощью законов Ома и Кирхгофа при записи сопротивлений элементов цепи в операторной форме. Выражение активного сопротивления одинаково при записи в комплексной и операторной форме. Выражения сопротивлений реактивных элементов получаются из выражений этих сопротивлений в комплексной форме путем замены в них переменной $j\omega$ оператором Лапласа p .

Для индуктивности производится следующая замена:

$$\underline{Z}_L(j\omega) = j\omega L \quad \underline{Z}_L(p) = p L, \quad (7)$$

для емкости аналогичная замена:

$$\underline{Z}_C(j\omega) = 1/j\omega C \quad \underline{Z}_C(p) = 1/p C \quad (8)$$

Выражения передаточной функции по напряжению в операторной форме также можно получить из $H(j\omega)$ путем замены в нем переменной $j\omega$ оператором p :

$$H_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх}} \quad H_U(p) = \frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)} \quad (9)$$

Рассмотрим определение выражений входного сопротивления и передаточной функции по напряжению электрической цепи, приведенной на рисунке 3:

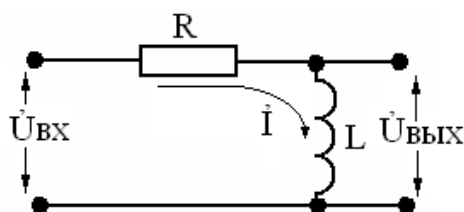


Рисунок 3 - Электрическая цепь RL

По схеме цепи запишем выражение ее входного сопротивления в операторной форме:

$$Z_{ex}(p) = R + Lp, \quad (10)$$

из которого можно получить выражение входного комплексного сопротивления:

$$Z_{\text{вх}}(j\omega) = R + j\omega L \quad (11)$$

Выражения модуля входного сопротивления $Z_{\text{вх}}(\omega)$ (входной АЧХ) и аргумента $\varphi_{Z_{\text{вх}}}(\omega)$ (входной ФЧХ) записываются в виде:

$$Z_{\text{вх}}(\omega) = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (12)$$

$$\varphi_{Z_{\text{вх}}}(\omega) = \arctg \frac{\omega L}{R} \quad (13)$$

Графики функций $Z_{\text{вх}}(\omega)$ и $\varphi_{Z_{\text{вх}}}(\omega)$ комплексного входного сопротивления цепи, изображенной на рисунке 3, приведены на рисунках 4 и 5:

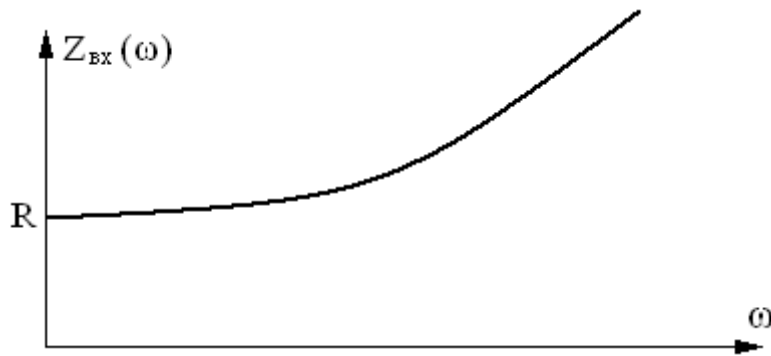


Рисунок 4 – График входной АЧХ электрической цепи RL

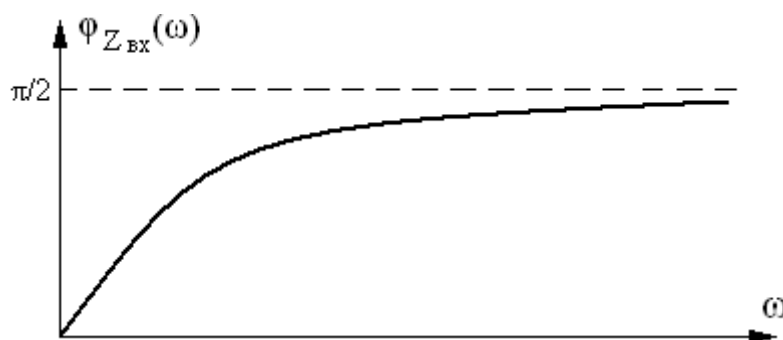


Рисунок 5 – График входной ФЧХ электрической цепи RL

Для расчета передаточной функции в операторной форме вначале запишем выражение входного тока в цепи:

$$I(p) = \frac{U_{\text{вх}}(p)}{Z_{\text{вх}}(p)} = \frac{U_{\text{вх}}(p)}{R + Lp} \quad (14)$$

Выражение операторного напряжения на выходе определим по закону Ома:

$$U_{\text{вых}}(p) = I(p) \cdot Z_{\text{вых}}(p) = \frac{U_{\text{вх}}(p) \cdot Lp}{R + Lp} \quad (15)$$

Операторная передаточная функция цепи по напряжению в результате запишется в виде:

$$H(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{Lp}{R + Lp}. \quad (16)$$

Для перехода от операторной передаточной функции к комплексной заменим переменную p на $j\omega$:

$$H(j\omega) = \frac{j\omega L}{R + j\omega L}. \quad (17)$$

Из (17) определим выражения для АЧХ и ФЧХ передаточной функции:

$$|H(j\omega)| = H(\omega) = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}; \quad (18)$$

$$\varphi(\omega) = \Theta(\omega) = \arctg \frac{\omega L}{0} - \arctg \frac{\omega L}{R} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega L}{R} \quad (19)$$

Графики функций $H(\omega)$ и $\Theta(\omega)$ передаточной функции цепи, изображенной на рисунке 3, приведены на рисунках 6 и 7:

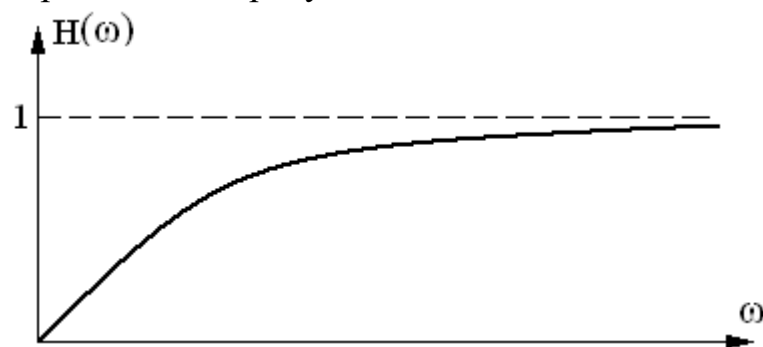


Рисунок 6 – АЧХ электрической цепи RL

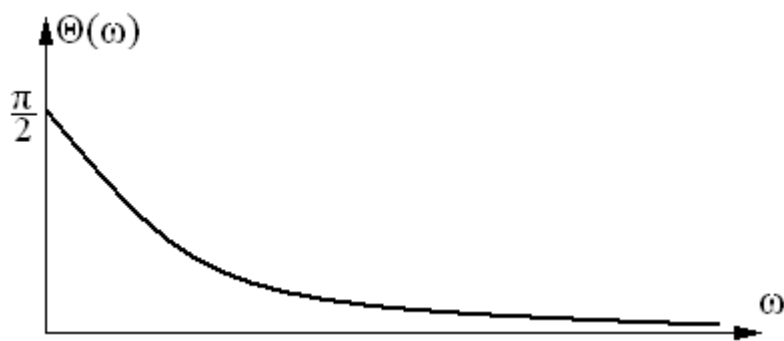


Рисунок 7 - ФЧХ электрической цепи RL

2. Задание на лабораторную работу

Целью данной лабораторной работы является исследование входных и передаточных амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик простейших электрических цепей с одним реактивным элементов.

Данные характеристики определяются для одной из указанных выше схем цепей расчетным и экспериментальным путями. Исследуемую цепь и ее параметры задает преподаватель, проводящий занятие. Порядок проведения исследований описан ниже. Проводятся они на универсальном лабораторном стенде и с помощью программы компьютерного моделирования Electronics Workbench (EWB).

Полученные экспериментально и рассчитанные теоретическим путем результаты заносятся в таблицы, а затем по ним строятся графики исследуемых характеристик. Все эти результаты, а также схемы исследуемых цепей, формулы, используемые при расчетах, и сами расчеты заносятся в отчет по лабораторной работе.

3. Экспериментальное исследование входных характеристик электрической цепи RL

3.1. Подготовка исследуемой цепи на лабораторном стенде

Для экспериментального исследования частотных характеристик входного сопротивления исследуемой электрической цепи с одним реактивным элементом с помощью универсального лабораторного стенда, необходимо собрать схему этой цепи на данном стенде. Для исследования выберем цепь, приведенную на рисунке 6:

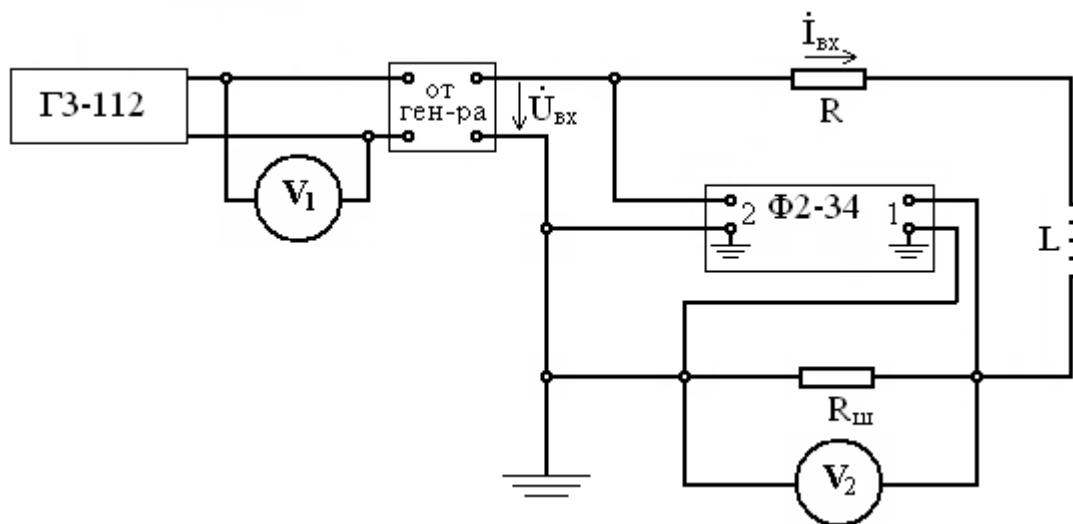


Рисунок 6 - Схема исследуемой электрической цепи RL

В качестве источника э.д.с. в цепи используется генератор ГЗ-112, а в качестве элементов цепи используются элементы, размещенные в лабораторном стенде. Для измерения действующих значений напряжений используются два милливольтметра ВЗ-38, а для измерения разности фаз - фазометр Ф2-34.

Выберем следующие значения элементов цепи:

- сопротивления резисторов: $R = 100 \text{ Ом}$, $R_{\text{ш}} = 100 \text{ Ом}$,
- величина индуктивности $L = 10 \text{ мГн}$.

Генератор ГЗ-112 и милливольтметры ранее широко использовались при выполнении лабораторных работ по дисциплине ТЭЦ, а фазометр Ф2-34 применялся редко, поэтому рассмотрим порядок его использования.

3.2. Порядок использования фазометра Ф2 - 34

Измеритель разности фаз (фазометр) представляет собой прибор, измеряющий разность фаз двух напряжений гармонической формы. Напряжение, относительно которого измеряется сдвиг фаз (опорное), подается на разъем 2, а напряжение, фазу которого необходимо измерить (сигнальное), подается на разъем 1. Разъемы расположены на лицевой панели прибора. В лаборатории используется фазометр Ф2 – 34.

При проведении измерений недопустимо подавать на разъемы 1 и 2 напряжения, действующие значения которых превышают 7 В.

Схема включения фазометра приведена на рисунке 7:

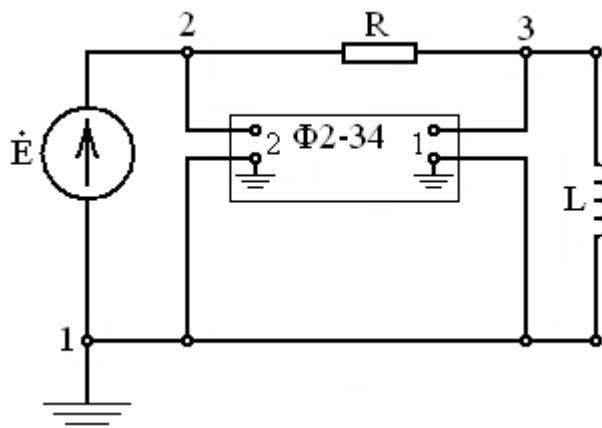


Рисунок 7 - Схема включения измерителя разности фаз $\Phi 2-34$ при исследовании передаточной функции

При подключении соединительных кабелей фазометра к исследуемой цепи в первую очередь подключается заземленный проводник кабеля, отмеченный специальным образом (черным цветом или специальным обозначением). При подключении соединительных кабелей следует соблюдать полярность подключения: заземленный проводник кабеля необходимо подключать только к заземленному контакту цепи (в противном случае, может произойти короткое замыкание, или прибор будет показывать неверные результаты).

В рассматриваемой схеме (рисунок 7) фазометр измеряет сдвиг фаз напряжения \dot{U}_{31} (сигнального) относительно напряжения \dot{U}_{21} (опорного). Следует отметить, что оба напряжения: сигнальное и опорное обязательно должны иметь общую точку (в данном случае узел 1), которая должна быть заземлена.

После подключения фазометра в схему перед началом измерения разности фаз необходимо нажать кнопку «Ф» на лицевой панели прибора. После нажатия кнопки происходит цикл установки нуля (примерно 70 секунд). Об окончании этого цикла свидетельствует периодическое мигание нижнего сегмента индикатора «°» (градусы). После этого через 3 – 5 секунд на табло прибора высвечивается значение угла сдвига фаз исследуемого сигнала относительно опорного.

Если значение сдвига фаз на приборе находится в пределах $0 - 180^\circ$, то оно соответствует действительному сдвигу фаз между напряжениями. Если же значение угла сдвига фаз находится в пределах $180 - 360^\circ$, то из значения, показываемого прибором, следует вычесть 360° . Полученное таким образом значение будет соответствовать имеющему место сдвигу фаз между двумя напряжениями (в данном случае сдвиг фаз между напряжениями будет отрицательным, т.е. сигнальное напряжение по фазе будет опережать опорное).

При переключении сигнального проводника соединительного кабеля к другому узлу исследуемой цепи для измерения угла сдвига фаз между соответствующими напряжениями, повторно кнопку «Ф» нажимать не надо. Значение фазового сдвига установится через 3 – 5 сек после переключения. Кнопку «Ф» необходимо нажимать повторно при отключении и последующем включении генератора, а также при изменении схемы цепи или схемы измерений.

3.3. Экспериментальное исследование входных характеристик цепи RL на лабораторном стенде

После того, как схема собрана и проверена преподавателем, проводящим занятие, необходимо включить питание всех приборов: генератора ГЗ-112, милливольтметров ВЗ-38 и фазометра Ф2-34. На выходе генератора нужно установить напряжение синусоидальной формы, равное 5В с помощью вольтметра V_1 . Поддерживая неизменным это напряжение при каждом измерении, производим изменение частоты генератора в пределах: 1 – 10 кГц (8 - 10 значений). При установке каждого значения частоты измеряем напряжение U_2 и разность фаз $\varphi_{U_{ВХ}} - \varphi_{U_{Ш}}$ между входным напряжением и напряжением на сопротивлении $R_{Ш}$. В процессе исследования требуется определить модуль входного сопротивления $Z_{ВХ}(\omega)$ и его аргумент $\varphi_{Z_{ВХ}}(\omega)$, которые рассчитываются с помощью следующих выражений:

$$Z_{ВХ}(\omega) = U_{ВХ} / I_{ВХ}, \quad (26)$$

где $U_{ВХ} = U_1$,

а модуль входного тока $I_{ВХ}$ определяется по формуле:

$$I_{ВХ} = U_2 / R_{Ш} \quad (27)$$

$$\varphi_{Z_{ВХ}}(\omega) = \varphi_{U_{ВХ}}(\omega) - \varphi_{I_{ВХ}}(\omega) \quad (20)$$

Так как фаза напряжения на активном сопротивлении $R_{Ш}$ совпадает с фазой протекающего по нему входного тока $I_{ВХ}$:

$$\varphi_{U_{Ш}}(\omega) = \varphi_{I_{ВХ}}(\omega) \quad (22)$$

то измеренный фазометром сдвиг фаз будет соответствовать аргументу входного сопротивления.

Значение аргумента входной проводимости $\varphi_{Y_{ВХ}}$ равно измеренному фазометром значению $\varphi_{Y_{ВХ}}$, взятому с обратным знаком:

$$\varphi_{Y_{ВХ}}(\omega) = - \varphi_{Z_{ВХ}}(\omega) \quad (25)$$

Схема электрической RL-цепи при исследовании ее входного сопротивления и порядок включения измерителя разности фаз представлены на рисунке 8:

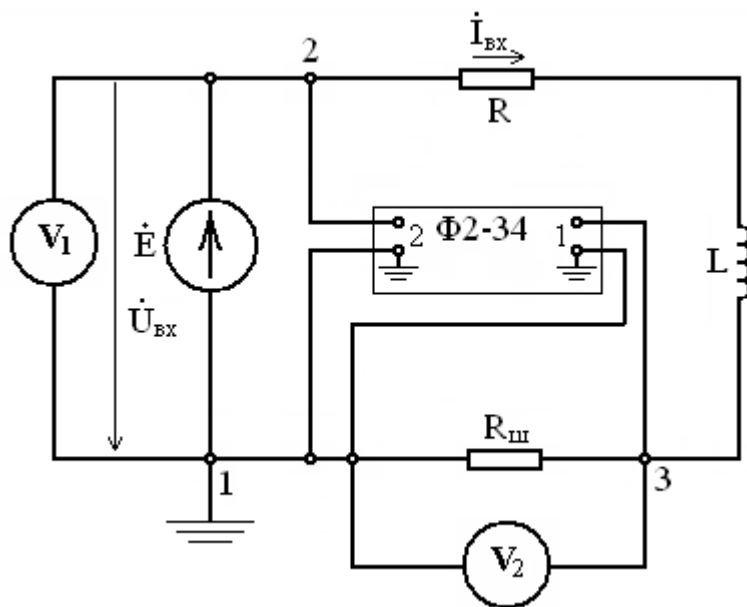


Рисунок 8 - Схема цепи RL при исследовании ее входного сопротивления

Результаты проведенных измерений заносятся в строки 1-3 таблицы 1:

Таблица 1 - Результаты определения входных характеристик экспериментально

№/№ п/п	$U_1 = 5 \text{ В}, \quad R = 100 \text{ Ом}, \quad R_{\text{ш}} = 100 \text{ Ом}, \quad L = 10 \text{ мГн}$								
1	$f, \text{ кГц}$	1	2	3	4	5	6	7	
2	$U_2, \text{ В}$	2.24	1.87	1.55	1.31	1.13	0.98	0.88	
3	$\varphi_I, \text{ град}$	21	36	47	54	60	64	67	
4	$I_{\text{вх}}, \text{ мА}$	22.4	18.7	15.5	13.1	11.3	9.8	8.8	
5	$Z_{\text{вх}}(\omega), \text{ Ом}$	223.2	267.4	322.6	381.7	442.5	510.2	568.2	
6	$Y_{\text{вх}}(\omega), \text{ мСм}$	4.48	3.74	3.1	2.6	2.26	1.96	1.76	
7	$\varphi_z, \text{ град}$	21	36	47	54	60	64	67	

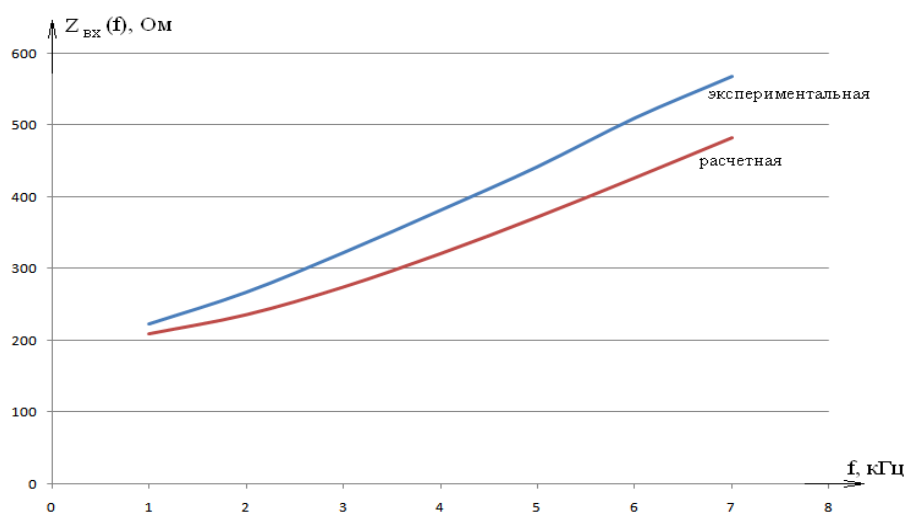
Остальные строки 4-7 таблицы 1 заполняются после проведения расчета модулей входного сопротивления и входной проводимости и определения аргумента входной проводимости для всех значений частоты f , при которых проводились измерения. Последний столбец заполняется исходя из теоретических соображений.

Все результаты исследования входного сопротивления и входной проводимости, полученные экспериментально, должны быть проверены путем теоретических расчетов по формулам (12) и (13) и занесены в таблицу 2:

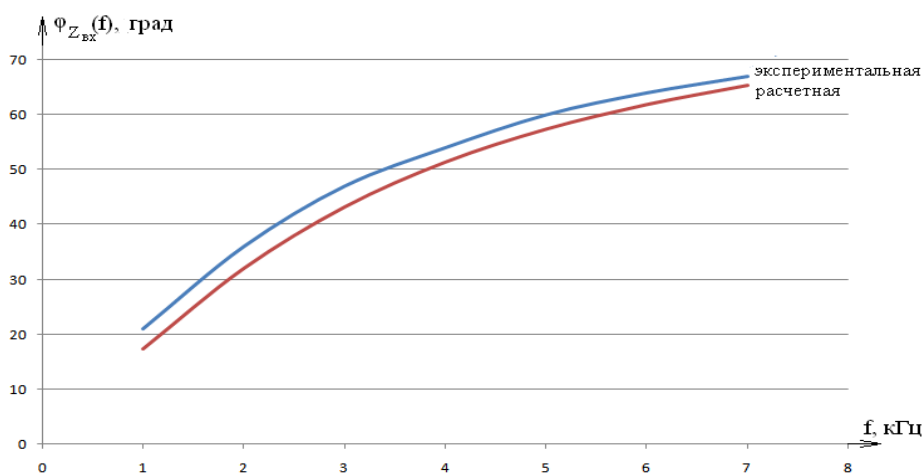
Таблица 2 – Результаты расчета входных характеристик теоретическим путем

№/№ п/п	R = 500 Ом, R _ш = 100 Ом, L = 10 мГн								
1	f, кГц	1	2	3	4	5	6	7	
2	Z _{вх} (ω), Ом	209.6	236.2	274.7	321.1	372.3	426.6	482.3	
3	φ _z , град	17.4	32.1	43.3	51.5	57.5	62.0	65.5	
4	Y _{вх} (ω), мСм	4.8	4.2	3.6	3.1	2.7	2.3	2.07	
5	φ _y , град	-17.4	-32.1	-43.3	-51.5	-57.5	-62.0	-65.5	

По результатам проведенных исследований и расчетов строят графики зависимостей $Z_{вх}(\omega)$ и $\varphi_{Z_{вх}}(\omega)$ в одном масштабе по частоте один под другим (рисунки 9а, 9б):



а)



б)

Рисунок 9 – Графики входных характеристик цепи R L, полученные по экспериментальным данным и теоретически

Несовпадение значений входных характеристик цепи, полученных экспериментальным путем и рассчитанными теоретически, объясняется неточностью номинальных значений параметров схемы R и L и неточностью измерений электрических величин приборами, имеющими определенный класс точности.

4. Содержание отчета

В отчете по лабораторной работе должны быть приведены:

- наименование и цель лабораторной работы;
- схемы исследуемых цепей для лабораторного стенда;
 - номинальные значения элементов схем;
- таблицы результатов измерений измеряемых и рассчитываемых параметров;
 - графики АЧХ и ФЧХ входного сопротивления и передаточной функции цепи RL , полученные экспериментально и расчетным путем на лабораторном стенде;
 - сравнительный анализ графиков;
- выводы о результатах исследования.

5. Контрольные вопросы

34. Дайте определение АЧХ цепи.
35. Дайте определение ФЧХ цепи.
36. Приведите пример определения АЧХ и ФЧХ двухэлементной цепи.
37. Дайте определение операторного коэффициента передачи цепи по напряжению. Как он связан с комплексным коэффициентом передачи ?
38. Объясните ход кривой АЧХ входного сопротивления на графике для двухэлементной цепи.
39. Объясните ход кривой ФЧХ входного сопротивления на графике для двухэлементной цепи.
40. Объясните ход кривой АЧХ передаточной функции на графике для двухэлементной цепи.
41. Объясните ход кривой ФЧХ передаточной функции на графике для двухэлементной цепи.
42. Сформулируйте условия неискаженной передачи сигнала. Какой вид имеют АЧХ и ФЧХ идеальных фильтров ?

43. Построить векторную диаграмму напряжений для заданной двухэлементной линейной цепи и объяснить характер изменения ФЧХ.
44. Правила и порядок составления схемы электрической цепи на компьютере с помощью программы компьютерного моделирования EWB.
45. Как установить и изменить номинальное значение параметра элемента схемы цепи при компьютерном моделировании?
46. Какой прибор называется измерителем разности фаз (фазометром) ?
47. Разность каких фаз измеряет фазометр ?
48. Правила включения измерителя разности фаз в схему.
49. Начертите схему включения фазометра для измерения разности фаз между : входным напряжением и входным током, между входным и выходным напряжением.
50. Постройте входные характеристики простейших электрических цепей, предложенных преподавателем.
51. Запишите аналитические характеристики простейших электрических цепей, предложенных преподавателем.
52. Определить в предложенной схеме частоту, при которой аргумент входного сопротивления имеет максимальное значение.
53. Определить в предложенной схеме частоту, при которой у входного сопротивления активная и реактивная составляющие имеют одинаковое значение.
54. С помощью каких приборов измеряют АЧХ и ФЧХ в электрических цепях?
55. Чем отличается передаточная функция цепи от коэффициента передачи?
56. На предложенной схеме электрической цепи нарисуйте подключение приборов для определения АЧХ и ФЧХ цепи.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ВТОРОГО ПОРЯДКА

1. Основные положения

Переходные процессы возникают в цепях, содержащих реактивные элементы в момент коммутации (скачкообразного изменения схемы цепи, подключения или отключения источника энергии). Переходной процесс

связан с изменением энергии, накопленной или накапливаемой в реактивных элементах цепи, которая не может измениться мгновенно, а изменяется только плавно в течение определенного времени, соответствующего времени переходного процесса. По итогам переходного процесса в цепи устанавливается новый запас энергии в реактивных элементах и устанавливается новый установившийся режим (в случае устойчивых электрических цепей).

Цепями второго порядка называются цепи, содержащие два реактивных элемента L и C , которые могут быть включены последовательно или параллельно. Изменения тока или напряжения на элементах таких цепей описываются дифференциальными уравнениями второго порядка.

Примерами таких цепей являются последовательный и параллельный колебательные контуры.

При прохождении сигналов через электрические цепи, содержащие реактивные элементы, в них возникают переходные процессы, которые приводят к изменениям их формы.

На рисунке 1 показан переходный процесс в RLC - цепи (напряжение на одном из элементов цепи) при подаче на ее вход воздействия $u_1(t)$ в виде прямоугольного импульса.

В период времени от $t = 0$ до $t = t_1$ напряжение на выходе цепи $u_2(t)$ изменяется по определенному закону, отличающемуся от $u_1(t)$, вследствие протекания в ней переходного (неустановившегося) процесса. В момент времени $t = t_1$ переходный процесс заканчивается и в цепи наступает установившийся режим (напряжение на выходе цепи не изменяется). С момента $t = t_1$ до $t = t_2$ в цепи вновь протекает переходной процесс, после которого вновь наступает новый установившийся режим.

За время действия переходных процессов энергия, накопленная в реактивных элементах цепи, передается от одного элемента к другому и постепенно рассеивается в процессе передачи на активных сопротивлениях. После окончания переходного процесса в цепи устанавливается новое

значение энергии, соответствующее новым значениям токов и напряжений на элементах цепи.

Воздействие в виде прямоугольного импульса можно рассматривать как коммутацию (подключение и отключение) цепи к источнику напряжения в моменты

$t = 0$ и $t = t_{\text{и}}$. Следовательно, переходный процесс возникает в цепи в моменты коммутации, т.е. в моменты подключения или отключения от цепи источника энергии.

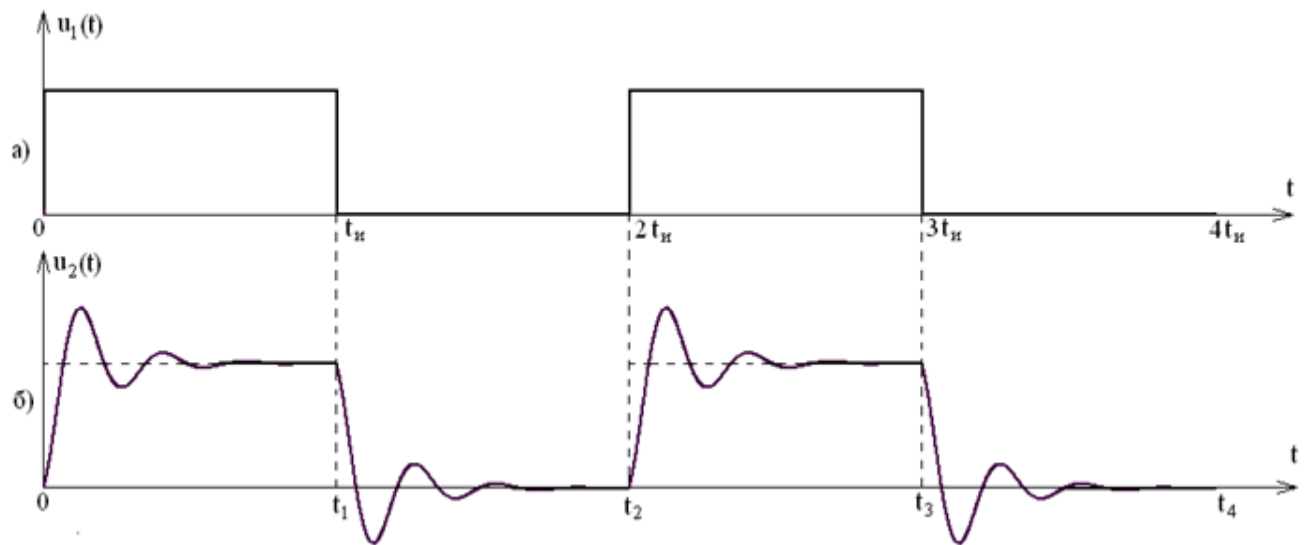


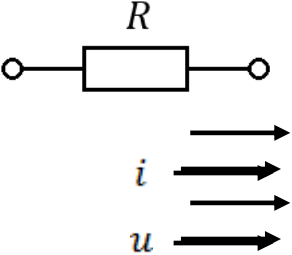
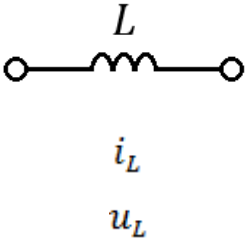
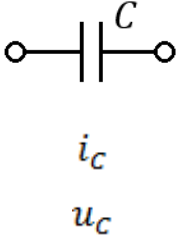
Рисунок 1 - Реакция RLC - цепи на воздействие последовательности прямоугольных импульсов

Кроме этого, возникновение переходных процессов может быть связано с изменением схемы самой цепи (переключением элементов внутри нее). Из-за этих переключений возможно скачкообразное изменение значений токов и напряжений на отдельных элементах цепи и возникновение переходного процесса.

Поскольку энергия электромагнитного поля мгновенно измениться не может, то это на основании этого формулируются два закона коммутации и определяются начальные условия режима цепи, т.е. значения напряжений и токов на элементах цепи в первый момент времени после коммутации (при $t = 0+$). При этом предполагается, что коммутация происходит мгновенно.

В таблице 1 приведены формулы, связывающие мгновенные значения токов и напряжений на различных элементах цепи.

Таблица 1. Формулы, связывающие между собой мгновенные значения токов и напряжений на различных элементах электрической цепи

		
$i = \frac{1}{R}u$ $u = Ri$	$i_L = I_0 + \frac{1}{L} \int u_L dt$ $u_L = L \frac{di_L}{dt}$	$i_C = C \frac{du_C}{dt}$ $u_C = u_0 + \frac{1}{C} \int i_C dt$

В активном сопротивлении не происходит накопление энергии. Энергия электрического поля в нем полностью преобразуется в тепловую энергию. Мгновенные значения тока и напряжения совпадают с точностью до масштабного множителя R . При скачкообразном изменении напряжения скачкообразно изменяется и ток.

Поэтому в цепях, состоящих из активных сопротивлений, переходные процессы не возникают.

В индуктивности ток и напряжение связаны через интеграл. Это означает, что при скачкообразном изменении напряжения ток изменяется по интегральному закону, т.е. плавно. Из этого следует, что в первый момент времени после коммутации ток в индуктивности $i_L(t = 0)$ будет равен току I_0 , протекающему через нее до коммутации. Следовательно, ток в индуктивности не может измениться скачком, а в первый момент после коммутации сохраняет то значение, которое он имел до коммутации (это сущность первого закона коммутации).

Напряжение на емкости связано с протекающим через нее током тоже через интеграл. Из этого следует, что напряжение на емкости также не может измениться скачком и в первый момент после

коммутации сохраняет то значение, которое было на ней до коммутации (это сущность второго закона коммутации).

Следует отметить, что при коммутации в момент времени $t = 0+$ напряжение на индуктивности $u_L(t)$ и ток в емкости $i_C(t)$ могут измениться скачкообразно, так как определяются через дифференциал.

В настоящей лабораторной работе исследуются переходные процессы в последовательном колебательном контуре, схема которого показана на рисунке 2.

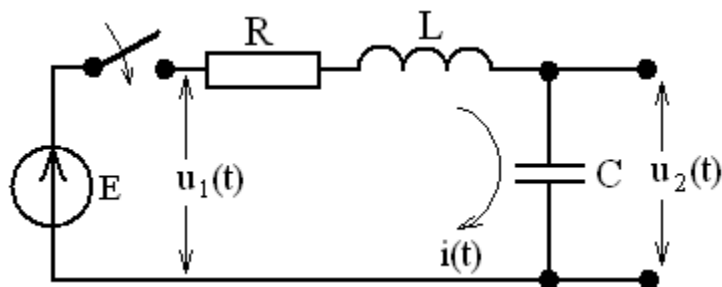


Рисунок 2 - Схема последовательного колебательного контура

К цепи в момент $t = 0$, при нулевых начальных условиях ($U_0 = 0, I_0 = 0$), подключается источник ЭДС.

В результате на входе цепи действует сигнал в виде ступенчатой функции

$u_1(t) = E \cdot 1(t)$, где $1(t)$ - единичная ступенчатая функция,

$$1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

С учетом выбранного направления тока цепь, показанная на рисунке 2, описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = E \quad (1.2)$$

Переходный процесс можно анализировать различными методами: классическим, операторным и другими. Наиболее простым и мощным является операторный метод расчета переходных

процессов. При его использовании мгновенные значения токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$ заменяются их операторными изображениями по Лапласу $I(p)$, $U(p)$. Комплексные сопротивления цепи $Z(j\omega)$ и комплексная передаточная функция $H(j\omega)$ заменяются их операторными выражениями $Z(p)$ и $H(p)$. Уравнения электрического равновесия цепи записываются в данном случае в алгебраической форме, а не в дифференциальной. Решать такие уравнения значительно проще, чем дифференциальные. Удобство операторного метода заключается также в том, что для всех возможных воздействий составлены таблицы оригиналов и изображений. На рисунке 3 показана операторная схема замещения последовательного колебательного контура.

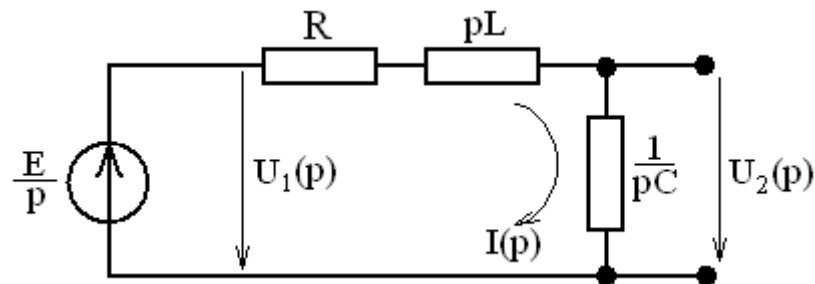


Рисунок 3 - Операторная схема замещения последовательного колебательного контура

Решение уравнения (1.2) в операторной форме имеет вид:

- напряжение на емкости в операторной форме:

$$U_C(p) = \frac{1}{pC} I(p) = \frac{E}{LC} \cdot \frac{1}{p(p-p_1)(p-p_2)} \quad (1.3)$$

- оригинал $u_C(t)$ изображения $U_C(p)$:

$$u_C(t) = L \frac{di(t)}{dt} = E \frac{1}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}), \quad (1.4)$$

где $p^2 + 2\delta p + \omega_0^2 = 0$ - характеристическое уравнение цепи,

$$\begin{cases} p_1 = -\delta + \omega_c \\ p_2 = -\delta - \omega_c \end{cases} \text{ - корни характеристического уравнения,} \quad (1.5)$$

δ – собственное затухание контура, $\delta = R/2L$;

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ - резонансная частота колебательного контура,

$\omega_c = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ - частота собственных затухающих колебаний в контуре.

Из (1.5) видно, что характер переходных процессов определяется значениями корней p_1 и p_2 , которые зависят от соотношения между параметрами δ^2 и ω_0^2 . Поскольку $\delta^2 = R^2/4L^2$, а $\omega_0^2 = 1/LC$, то характер корней и соответственно характер переходных процессов определяется соотношением между R и характеристическим сопротивлением колебательного контура $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Все возможные случаи соотношений между параметрами δ и ω_0 приведены в таблице 2.

Таблица 2. Все возможные случаи соотношений между δ и ω_0

Соотношение между R и ρ	Значения корней характеристического уравнения
Апериодический режим $R > 2\rho$	Поскольку $\delta > \omega_0$, имеем простые разные корни $p_1 = -\delta + \omega_c$, $p_2 = -\delta - \omega_c$; в виде отрицательных действительных чисел
Критический режим $R = 2\rho$	Поскольку $\delta = \omega_0$, имеем кратный корень $p_1 = p_2 = -\delta$, в виде отрицательного действительного числа
Квазипериодический режим $R < 2\rho$	Поскольку $\delta < \omega_0$, имеем простые корни $p_1 = -\delta + j\omega_c$, $p_2 = -\delta - j\omega_c$; в виде комплексно-сопряженных чисел

Рассмотрим возможные виды переходных процессов в последовательном колебательном контуре, соответствующие различным значениям корней характеристического уравнения.

Апериодический переходный режим

Подставляя значения p_1 и p_2 для апериодического режима в (1.4), получаем после преобразований:

$$u_c(t) = E + \frac{E}{2\omega_c} (p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}) \quad (1.6)$$

Из выражения (1.6) следует, что в апериодическом режиме напряжение на емкости представляет собой разность двух экспонент относительно уровня, определяемого значением E . Расположение корней на комплексной плоскости показано на рисунке 4, а график $u_c(t)$ приведен на рисунке 5.

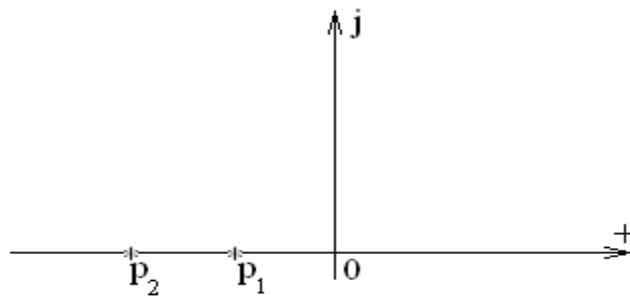


Рисунок 4 - Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости при апериодическом переходном процессе

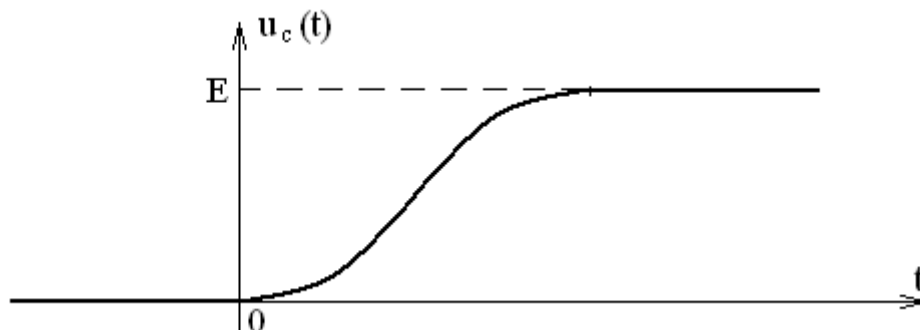


Рисунок 5 - График апериодического переходного процесса в последовательном колебательном контуре

Критический переходный режим

В случае, если $\delta = \omega_0$, то частота собственных затухающих колебаний $\omega_c = 0$.

В этом случае при кратных корнях изображение напряжения имеет вид:

$$u_c(p) = \frac{E}{LC} \frac{1}{p(p+\delta)^2} \quad (1.7)$$

Оригинал от изображения (1.7) записывается в вид

$$u_c(t) = \frac{E}{LC\delta^2} (1 - e^{-\delta t} - \delta t e^{-\delta t}) \quad (1.8)$$

Расположение полюсов для данного случая показано на рисунке 6, а график переходного процесса $u_c(t)$ приведен на рисунке 7.

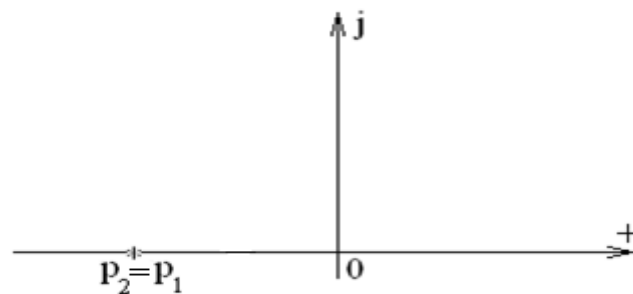


Рисунок 6 - Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости при критическом переходном процессе

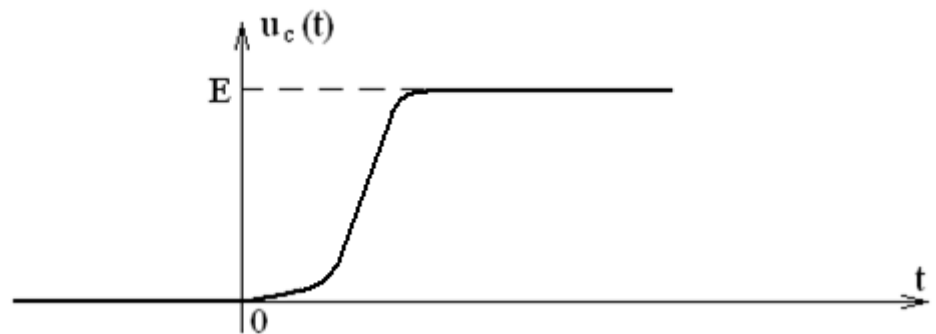


Рисунок 7 – График критического переходного процесса в последовательном колебательном контуре

При критическом режиме зависимость, представленная на рисунке 7, имеет более крутой подъем. Критический переходный процесс находится на границе между апериодическим и колебательным процессами.

Квазипериодический (колебательный) переходный режим

Для этого случая корни характеристического уравнения будут комплексно-сопряженными: $p_1 = -\delta + j\omega_c$, $p_2 = -\delta - j\omega_c$,

где $\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ - частота собственных затухающих колебаний контура.

Подставляя p_1 и p_2 в (1.3), получаем после преобразований:

$$u_c(t) = E - E e^{-\delta t} \left(\cos \omega_c t + \frac{\delta}{\omega_1} \sin \omega_c t \right) \quad (1.9)$$

Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости представлено на рисунке 8, а график зависимости $u_c(t)$ от времени в контуре приведен на

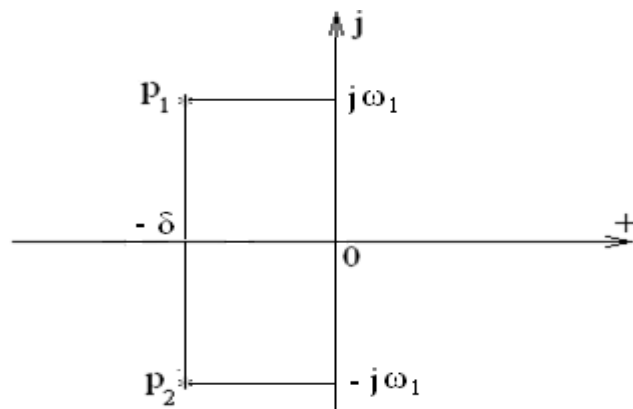


Рисунок 8 – Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости при колебательном переходном процессе

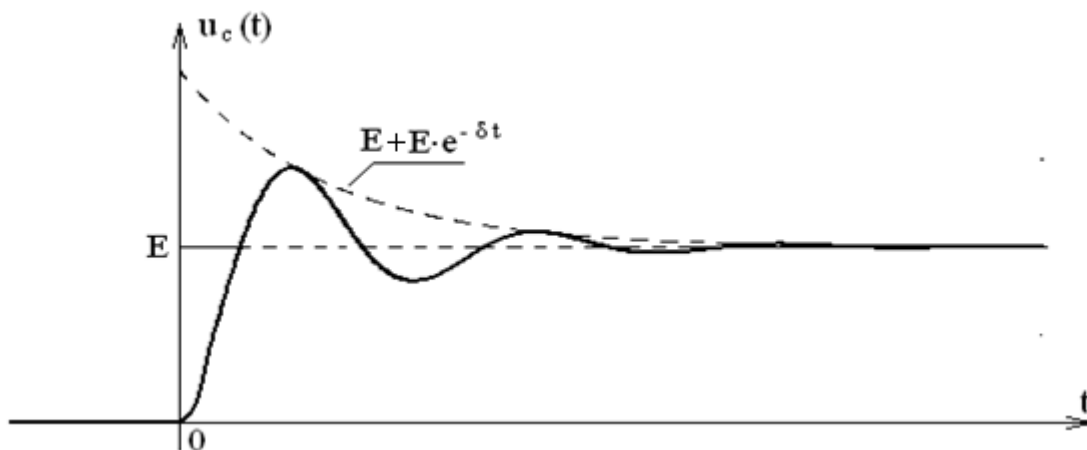


Рисунок 9 – График колебательного переходного процесса в последовательном колебательном контуре

Из рисунка 9 видно, что если корни характеристического уравнения являются комплексно-сопряженными числами и расположены в левой полуплоскости, то их действительные части будут отрицательными, а в цепи будут наблюдаться затухающие колебания. При этом коэффициент затухания и частота собственных затухающих колебаний связаны с добротностью колебательного контура следующим образом:

$$\delta = \omega_c / 2Q \quad (1.10)$$

$$\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \omega_0 \sqrt{1 - 1/4Q^2} \quad (1.11)$$

где: $Q = \rho / R$.

Частоте ω_c соответствует период собственных затухающих колебаний

$$T_c = 2\pi / \omega_c = \frac{2\pi}{\omega_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 1/4Q^2}} \quad (1.12)$$

Формула (1.12) справедлива для $Q > 0,5$. При $Q = 0,5$ имеем $R = 2\rho$, т.е. в цепи будет критический переходный режим.

С увеличением добротности величина периода T_c уменьшается. При $Q \gg 1$, $T_c \approx 2\pi / \omega_0$, т.е. период собственных затухающих колебаний становится равным периоду колебаний резонансной частоты.

Из рисунка 9 видно, что амплитуда колебаний убывает по экспоненте в соответствии со значением множителя $e^{-\delta t}$. Поскольку экспонента практически затухает при значении времени $T_n = 5/\delta$, то время T_n фактически определяет время переходного процесса. Взяв отношение $n = T_n / T_c$, определяем число периодов затухающего колебания за время T_n .

Для характеристики скорости уменьшения колебаний вводится понятие логарифмического декремента затухания, определяемого выражением:

$$\Delta = \ln \frac{u(t)}{u(t+T_c)} = \frac{\pi R}{2L\omega_c} = \frac{\pi R}{2L\sqrt{1/LC - R^2/4L^2}} \quad (1.13)$$

Из (1.13) следует, что активное сопротивление R не только влияет на скорость уменьшения амплитуды колебаний, но и на частоту ω_c . Чем больше R , тем меньше частота ω_c и тем больше период собственных колебаний T_c .

При $R = 2\rho$, $\omega_c = 0$, т.е. переходный процесс в контуре превращается в аperiodический ($T_c = \infty$).

При уменьшении величины R частота ω_c увеличивается, а период T_c уменьшается. В частном случае, когда $R = 0$, $\omega_c = \omega_0$, $\Delta = 0$, и колебания становятся незатухающими.

2. Задание на лабораторную работу

Целью данной лабораторной работы является исследование переходных процессов в электрических цепях второго порядка при воздействии на них последовательности прямоугольных импульсов.

В качестве исследуемой цепи будем использовать последовательный колебательный контур. При подаче на его вход последовательности прямоугольных импульсов в нем возникают переходные процессы, которые можно наблюдать с помощью осциллографа. При возникновении переходного процесса ток и напряжения на элементах контура будут меняться по законам, которые были рассмотрены выше.

Регистрируя переходные процессы на осциллографе, можно определить момент возникновения этого процесса, проверить соблюдение законов коммутации, оценить характер и параметры переходного процесса, определить визуально влияние активного сопротивления контура R на характер переходного процесса. По осциллограмме можно также рассчитать постоянную времени исследуемой цепи и продолжительность переходного процесса.

Для исследования переходных процессов используется двухлучевой осциллограф, который позволяет видеть на экране два сигнала: подаваемый на вход цепи и получаемый на ее выходе. Так как они располагаются на экране друг под другом, то наглядно видно как цепь реагирует на подачу импульса и на его отключение, по какому закону изменяется напряжение на выходе цепи в первый момент времени после коммутации (в момент поступления прямоугольного импульса).

Исследоваться должны все предложенные схемы включения последовательного колебательного контура, приведенные на рисунке 10.

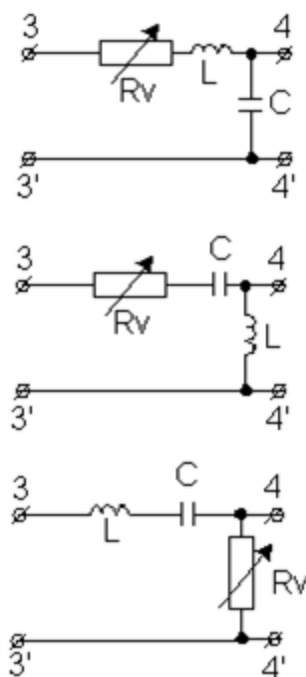


Рисунок 10 – Схемы исследуемых цепей второго порядка

В каждой из приведенных на рисунке 10 схем должны исследоваться все возможные виды переходных процессов: апериодический, критический и колебательный. Осциллограммы изменения напряжения на конкретном элементе переносятся с экрана осциллографа на лист кальки или бумаги с соблюдением расположения друг относительно друга, как это наблюдается на экране осциллографа (рисунок 11). При расположении на рисунке нескольких осциллограмм

исследуемого напряжения осциллограмма входного сигнала всегда располагается в самом верху.

По результатам проведенных исследований:

- проверяется соблюдение законов коммутации в индуктивности и емкости,
- определяется закон изменения выходного сигнала,
- рассчитывается постоянная времени и длительность переходного процесса в цепи,
- визуально определяется момент окончания переходного режима и начала нового установившегося режима.

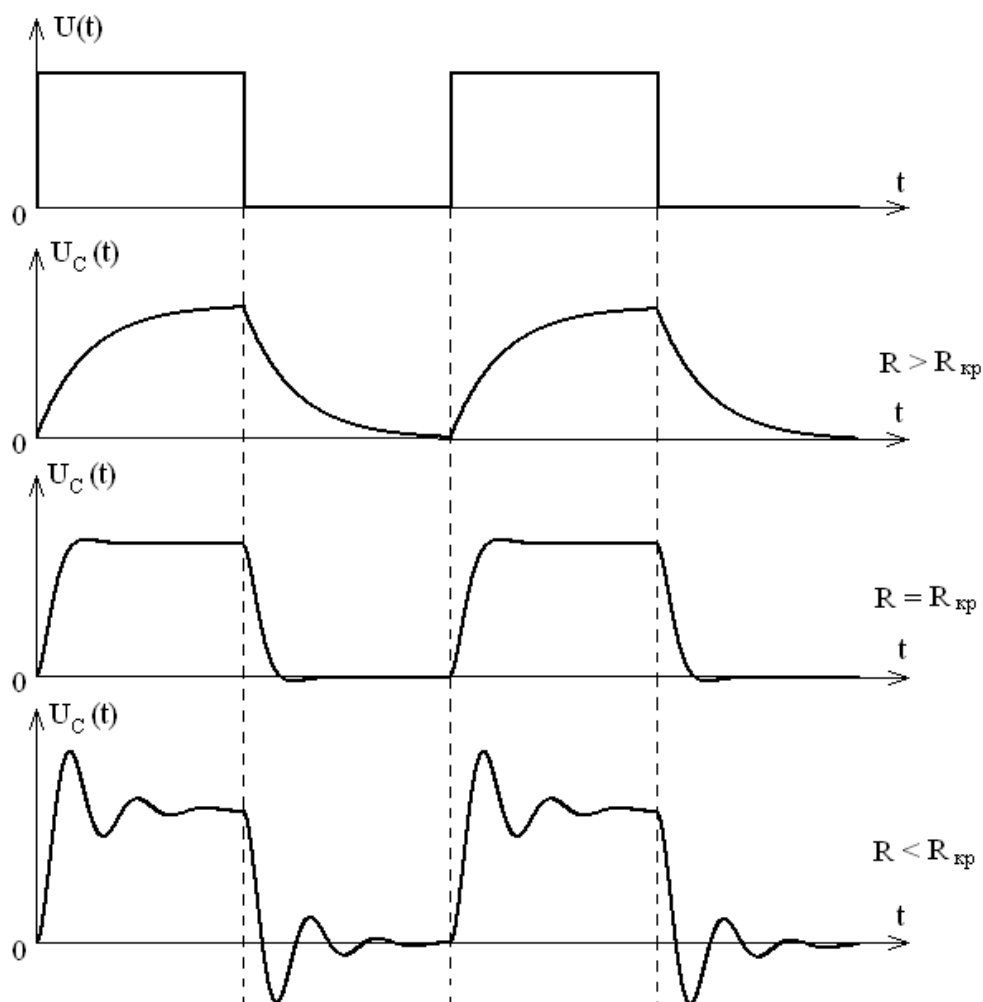


Рисунок 11 – Возможные виды переходных процессов в последовательном колебательном контуре

3. Экспериментальное исследование переходных процессов в цепи второго порядка с помощью лабораторного стенда

3.1. Подготовка к исследованию переходных процессов

Для экспериментального исследования переходных процессов с помощью универсального лабораторного стенда необходимо собрать на нем поочередно каждую из рекомендованных схем последовательного колебательного контура. Для примера выберем схему колебательного контура, в которой исследуется изменение напряжения на конденсаторе при подаче на вход контура последовательности прямоугольных импульсов. Данная схема цепи с подключенными к ней измерительными приборами приведена на рисунке 12.

В качестве источника ЭДС при исследовании переходных процессов используется генератор низкочастотных сигналов ГЗ-112, а в качестве реактивных элементов цепи - элементы, размещенные в лабораторном стенде. Для измерения действующих значений входного и выходного напряжений используются милливольтметры ВЗ-38, а для снятия осциллограмм – универсальный двухлучевой осциллограф.

В качестве активного сопротивления используется набор сопротивлений стенда, либо магазин сопротивлений.

Осциллограф при проведении предыдущих лабораторных работ не применялся, поэтому рассмотрим подробно порядок его использования.

3.2. Порядок использования осциллографа

Универсальный осциллограф предназначен для наблюдения и исследования формы электрических сигналов путем визуального наблюдения и измерения их временных и амплитудных значений.

Осциллограф обеспечивает:

- наблюдение формы сигналов обеих полярностей длительностью от 1мкс до 16с при максимальном значении от 1 мВ до 300В;
- наблюдение периодических сигналов в диапазоне частот от 0.1 Гц до 1 МГц;
- измерение значений мгновенных и амплитудных значений сигналов от 2 мВ до 300В;
- измерение временных интервалов в пределах от 2мкс до 16с.

На лицевой панели осциллографа расположены следующие органы управления:

- тумблер «Сеть» для включения и выключения осциллографа;
- ручка «Фокус» для фокусировки луча электроннолучевой трубки (ЭЛТ);
- ручка «Яркость» для изменения яркости луча ЭЛТ;
- ручка «Шкала» для регулировки освещенности шкалы осциллографа.

На лицевой панели осциллографа располагаются два блока усилителей, блоки развертки и синхронизации.

На вход каждого блока усиления подается один из исследуемых сигналов. С помощью ручек управления, находящихся на панели блока, производится:

- усиление только переменной или переменной и постоянной составляющей входного сигнала вместе;
- регулируется в значительных пределах чувствительность самого усилителя;
- осуществляется перемещение по вертикали и горизонтали на экране ЭЛТ подаваемого на вход усилителя сигнала;
- производится балансировка самого усилителя.

Блок развертки регулирует длительность развертки сигнала на экране ЭЛТ, т.е. изменяет масштаб изображения по оси абсцисс.

Блок синхронизации с помощью ручек «Стабильность» и «Уровень» позволяет установить неподвижное изображение входного сигнала на экране осциллографа.

Переключатель вида синхронизации при проведении лабораторных работ устанавливается в положение - «Внутренняя».

Для получения изображения сигнала на экране осциллографа перед его включением необходимо установить ручки управления в следующие положения:

- «Яркость», «Фокус», «Балансировка» и регулировка положения луча по горизонтали и вертикали в средние положения;
- переключатель подачи на вход входного сигнала в положение совместного пропуска на вход постоянной и переменной составляющей сигнала;
- «Стабильность» в крайнее правое;
- «Уровень» в среднее.

Далее необходимо включить тумблер «Сеть», при этом загорается сигнальная лампочка. Через 3-5 минут на экране осциллографа появляется линия развертки – горизонтальная линия на экране осциллографа. Необходимо отрегулировать ее яркость, фокусировку и положение на экране с помощью соответствующих ручек. После этого на вход соответствующего усилителя подается исследуемый сигнал. Амплитуда сигнала на экране осциллографа регулируется с помощью ручек, находящихся на панели усилителя. Изображение сигнала должно занимать $\frac{3}{4}$ экрана.

Далее с помощью ручек управления блока «Развертка» нужно добиться такой длительности развертки, чтобы на экране наблюдалось 2 – 4 периода исследуемого сигнала.

Неподвижность изображения сигнала на экране нужно добиться с помощью ручек блока «Синхронизация»: «Стабильность» и «Уровень». Для достижения устойчивого изображения необходимо повернуть ручку «Стабильность» влево до момента исчезновения изображения на экране осциллографа. Затем нужно повернуть ручку «Уровень» до положения, при котором изображение сигнала становится устойчивым.

Измерение временных интервалов и значений величины сигнала осуществляется с помощью ручек, находящихся на панели усилителей, и шкалы, нанесенной на экран осциллографа.

3.3. Экспериментальное исследование переходных процессов

Значения параметров элементов схемы задаются преподавателем.

В качестве примера выберем следующие значения элементов цепи:

- величина индуктивности $L = 19 \text{ мГн}$,
- величина ёмкости $C = 57,4 \text{ нФ}$.

По заданным параметрам цепи необходимо рассчитать характеристическое сопротивление контура ρ , критическое сопротивление $R_{кр}$ и добротность контура по формулам:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad R_{кр} = 2\rho, \quad Q = \frac{\rho}{R}.$$

Для колебательного режима (при $R = 0,1R_{кр}$) вычислить с помощью выражений:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad - \text{ частота собственных затухающих колебаний}$$

исследуемого контура,

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad - \text{ период собственных затухающих колебаний исследуемого}$$

контура,

$$\Delta = \frac{\pi R}{2L\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad - \text{ логарифмический декремент затухания,}$$

$$\delta = \frac{\Delta}{T_c} \quad - \text{ коэффициент затухания собственных колебаний контура.}$$

Расчеты параметров переходного процесса приведены ниже:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{19 \cdot 10^{-3}}{57,4 \cdot 10^{-9}}} = 10^3 \cdot \sqrt{\frac{19}{57,4}} = 0,575 \cdot 10^3 = 575 \text{ Ом.}$$

$$R_{кр} = 2 \cdot \rho = 2 \cdot 575 = 1150 \text{ Ом.}$$

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{575}{115} = 5.$$

$$\text{Для колебательного режима } R = 0,1 \cdot R_{кр} = 0,1 \cdot 1150 = 115 \text{ Ом.}$$

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \sqrt{\frac{1}{19 \cdot 10^{-3} \cdot 57,4 \cdot 10^{-9}} - \frac{115^2}{4 \cdot (19 \cdot 10^{-3})^2}} =$$

$$\sqrt{917 \cdot 10^6 - 9,16 \cdot 10^6} = 30 \cdot 10^3 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = \frac{6,28}{30 \cdot 10^3} = 209,4 \text{ мкс},$$

$$\Delta = \frac{\pi R}{2L\omega_c} = \frac{3,14 \cdot 115}{2 \cdot 19 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^3} = 0,315,$$

$$\delta = \frac{\Delta}{T_c} = \frac{0,315}{209,4 \cdot 10^{-6}} = 1,5 \cdot 10^3.$$

Результаты расчетов занести в таблицу 3.

Для проведения исследования переходных процессов в последовательном колебательном контуре с помощью универсального лабораторного стенда необходимо собрать схему исследования, показывающую порядок подключения к колебательному контуру генератора прямоугольных импульсов, осциллографа и милливольтметра (рисунок 12):

При сборке схемы исследования сигнал с выхода генератора подается на вход колебательного контура и параллельно на вход первого канала осциллографа, с помощью которого на экране осциллографа будет разворачиваться входной сигнал. При соединении элементов схемы нужно строго соблюдать правильность соединения потенциальных и заземленных узлов.

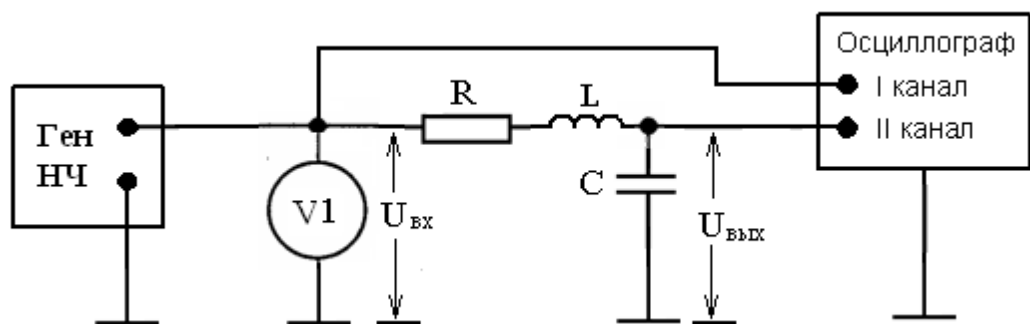


Рисунок 12 - Схема исследования переходных процессов в последовательном колебательном контуре

Выход колебательного контура соединяется с входом второго канала осциллографа, с помощью которого на экране осциллографа будет разворачиваться выходной сигнал.

Правильность соединения элементов исследуемой схемы должен проверить преподаватель, ведущий лабораторное занятие. Если схема собрана правильно, то необходимо включить питание всех приборов: генератора, милливольтметра и осциллографа. На выходе генератора нужно установить с помощью находящегося на панели генератора тумблера, изменяющего форму генерируемого сигнала, режим генерации прямоугольных импульсов. Далее с помощью соответствующих ручек, находящихся на панели генератора, на выходе генератора устанавливается напряжение, равное 5В, и частота напряжения, равная 500 Гц.

После подачи напряжения на вход схемы и подключения выхода контура к усилителю УС2 нужно с помощью ручек осциллографа: «Вольт/дел», «Время/дел», «Стабильность» и «Уровень» добиться устойчивого изображения на экране осциллографа последовательности прямоугольных импульсов на первом канале осциллографа и получить устойчивое изображение напряжения с выхода исследуемой цепи (напряжения на конденсаторе) на втором канале осциллографа.

Устанавливая поочередно значения активного сопротивления R , равные: $2R_{кр}$, $R_{кр}$, $0.1R_{кр}$, получить на выходе цепи для каждого значения сопротивления R осциллограммы напряжения на конденсаторе при подаче на вход последовательности прямоугольных импульсов. Перенести в отчет с экрана осциллографа совместно графики изменений входного и выходного напряжений исследуемой RLC - цепи для каждого из трех значений сопротивления R . Для рассматриваемого примера графики приведены на рисунке 13.

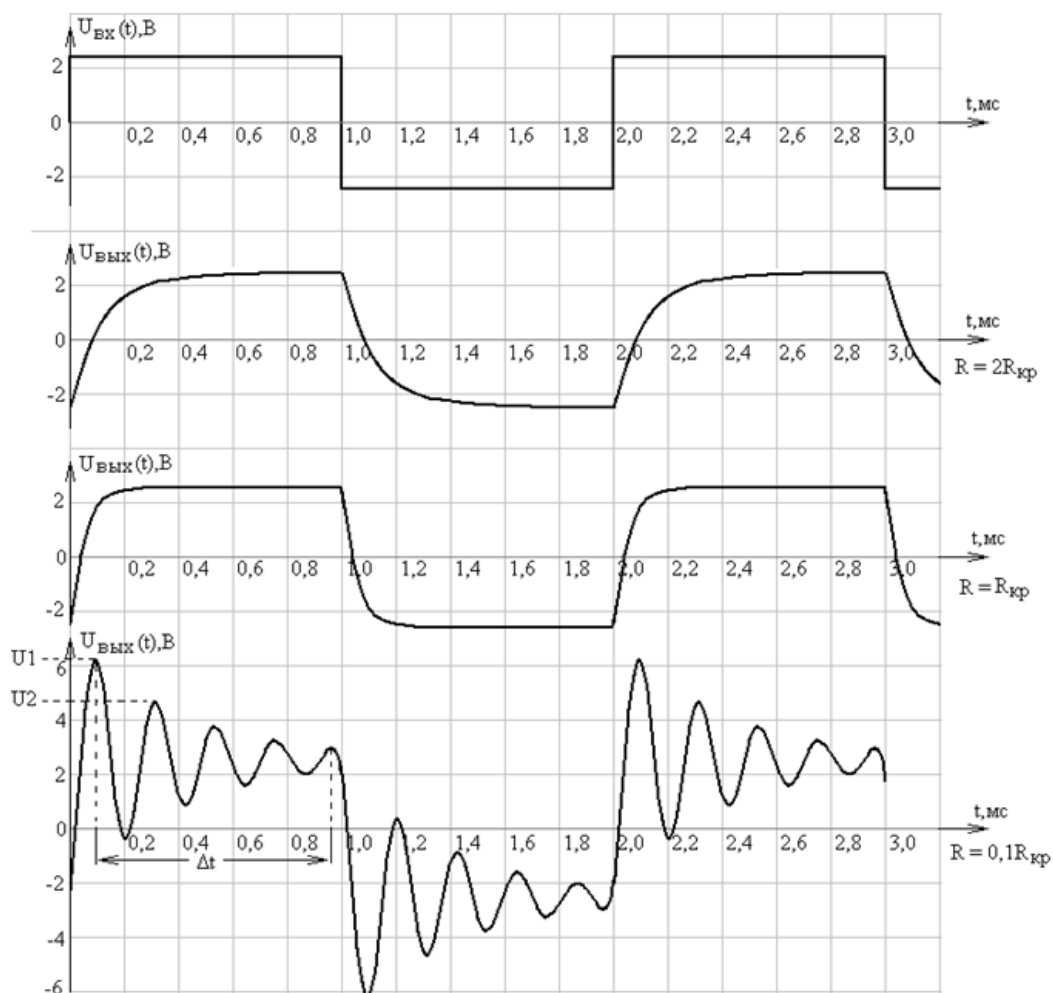


Рисунок 13 – Графики изменения напряжения на конденсаторе исследуемой цепи

Для колебательного режима (при $R = 0,1R_{кр}$) по осциллограмме выходного сигнала измерить и рассчитать те же параметры, которые рассчитаны теоретически.

Сначала измерим длительность нескольких периодов собственных затухающих колебаний Δt . Для повышения точности измерений берем максимальное число периодов. На графике (рисунок 13) длительность четырех периодов равна $\Delta t = 0,825$ мс. Вычислим период собственных колебаний

$$T_c = \frac{\Delta t}{N} = \frac{0,825 \cdot 10^{-3}}{4} = 0,206 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 206 \text{ мкс},$$

где N – число периодов.

По найденному периоду вычислим частоту собственных колебаний

$$\omega_c = \frac{2\pi}{T_c} = \frac{6,28}{0,206 \cdot 10^{-3}} = 30,5 \cdot 10^3 \text{ рад/с.}$$

Вычислим логарифмический декремент затухания, используя выражение (1.13). Для этого по осциллограмме выходного сигнала измерим соседние максимумы выходного сигнала $U1$ и $U2$. На графике (рисунок 13) $U1 = 6,2$ В, $U2 = 4,4$ В.

$$\Delta = \ln \frac{U1}{U2} = \ln \frac{6,2}{4,4} = \ln 1,409 = 0,343.$$

Вычислим коэффициент затухания собственных колебаний контура по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{T_c} = \frac{0,343}{0,206 \cdot 10^{-3}} = 1,665 \cdot 10^3.$$

Результаты параметров, полученные с помощью универсального лабораторного стенда, заносятся в таблицу 3 .

3.4 Оформление результатов исследования

Результаты исследования по данной части лабораторной работы, которые полностью войдут в отчет по лабораторной работе, должны содержать:

- принципиальную схему проведения эксперимента и измерения необходимых характеристик (рисунок 12),
- результаты расчета параметров контура: ρ , R_{kp} (таблица 3),
- результаты расчета и экспериментального определения параметров колебательного переходного процесса: ω_c , δ , Δ (таблица 3),
- совмещенные осциллограммы входного и выходного сигналов исследованных переходных процессов (рисунок 13),
- выводы о результатах проведенных исследований.

Таблица 3. Параметры контура и колебательного переходного процесса в нем

Параметры входного сигнала	Параметры контура	Параметры переходного колебательного процесса для $R = 0.1R_{kp} = 115 \text{ Ом}$	
		рассчитанные теоретически	рассчитанные экспериментально (с помощью лабораторного стенда)
U = 5В	L = 19 мГн C = 57.4 нФ $\rho = 575 \text{ Ом}$ $R_{kp} = 1150 \text{ Ом}$ Q = 5	$\omega_c = 30 \cdot 10^3 \text{ рад/с}$	$\omega_c = 30,5 \text{ рад/с}$
		$T_C = 209,4 \text{ мкс}$	$T_C = 206 \text{ мкс}$
f = 500Гц		$\delta = 1,5 \cdot 10^3$	$\delta = 1,665 \cdot 10^3$
		$\Delta = 0,315$	$\Delta = 0,343$

4. Оформление всех результатов отчета

Параметры входного сигнала	Параметры контура	Параметры переходного колебательного процесса для $R = 0.1R_{kp} = 115 \text{ Ом}$	
		рассчитанные теоретически	полученные экспериментально (с помощью лабораторного стенда)
U = 5В	L = 19 мГн C = 57.4 нФ $\rho = 575 \text{ Ом}$ $R_{kp} = 1150 \text{ Ом}$ Q = 5	$\omega_c = 30 \cdot 10^3 \text{ рад/с}$	$\omega_{св} = 30,28 \cdot 10^3 \text{ рад/с}$
		$T_C = 0.2 \text{ мкс}$	$T_C = 0,2075 \text{ мкс}$
f = 500Гц		$\delta = 1,5 \cdot 10^3$	$\delta = 1,665 \cdot 10^3$
		$\Delta = 0,315$	$\Delta = 0,343$

5. Контрольные вопросы

1. Какие процессы бывают в электрических цепях?
2. Объясните физический смысл переходных процессов.
3. В каких электрических цепях возникают переходные процессы?
4. Условия возникновения переходного процесса.
5. Что такое коммутация?
6. Законы коммутации.
7. Поясните понятия переходного, свободного, установившегося и принужденного режимов.
8. Почему в цепях, не содержащих реактивных элементов, не возникают переходные процессы?
9. Что такое начальные условия электрической цепи, используемые при расчете переходных процессов?
10. Чем отличаются зависимые начальные условия от независимых начальных условий?
11. Запишите и объясните формулы, связывающие мгновенные значения тока и напряжения для индуктивности, емкости, сопротивления.
12. Цепь называется колебательным контуром?
13. Какие бывают колебательные контуры?
14. Нарисуйте схемы колебательных контуров?
15. В чем заключается расчет переходного процесса?
16. Какие существуют методы расчета переходного процесса?
17. Что получается в результате расчета переходного процесса?
18. В чем отличие классического метода расчета переходного процесса от операторного?
19. В чем достоинства классического и операторного методов расчета переходных процессов?
20. Как составляется операторная схема замещения электрической цепи?
21. Что такое порядок электрической цепи?
22. Чем отличается цепь первого порядка от цепи второго порядка?

23. Как получить характеристическое уравнение электрической цепи?
24. Для чего используются корни характеристического сопротивления электрической цепи?
25. Какие виды переходных процессов бывают в электрических цепях?
26. Какие параметры электрической цепи влияют на характер переходного процесса в ней?
27. Дайте определение единичной ступенчатой функции.
28. Дайте определение последовательности прямоугольных импульсов.
29. Основные параметры, которые характеризуют последовательность прямоугольных импульсов?
30. Что такое режим свободных колебаний?
31. Что такое декремент затухания?
32. Как определяется частота свободных колебаний?
33. Как влияет активное сопротивление на период свободных колебаний?
34. Какой переходный процесс происходит в последовательном колебательном контуре при воздействии на него ступенчатой функции и прямоугольного импульса?
35. Объясните зависимость характера переходных колебаний от расположения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости.

Литература

1. Соболев В.Н. Теория электрических цепей. Учебное пособие. Москва: Горячая линия - Телеком, 2014.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. Учебное пособие. Москва: Горячая линия - Телеком, 2013.