

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

И. Л. ГРОМЬКО

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию в области транспорта и транспортной деятельности для обучающихся по специальности 1-37 02 04 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» в качестве пособия по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

Гомель 2024

УДК 621.313(076.5)
ББК 31.261
Г1

Р е ц е н з е н т ы: кафедра «нефтегазоразработки и гидропневмоавтоматики (заведующий кафедрой – д-р. техн. наук, профессор *А. Б. Невзорова*) (ГГТУ им. П. О. Сухого); доцент кафедры физики и электротехники канд. техн. наук, доцент *Д. В. Комнатный* (ГГТУ им. П. О. Сухого)

Громько, И. Л.

Г1 Теоретические основы электротехники : пособие / И. Л. Громько ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2024. – 72 с.
ISBN 978-985-891-144-7

Рассматривается теоретический материал и дается описание лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники».

Предназначен для студентов электротехнических специальностей БелГУТа.

УДК 621.313(076.5)
ББК 31.26

ISBN 978-985-891-091-4

© Громько И. Л., 2024
© Оформление. БелГУТ, 2024

ВВЕДЕНИЕ

До начала работ на лабораторных стендах студенты обязаны ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности и строго выполнять их. После инструктажа по технике безопасности необходимо расписаться в соответствующем журнале.

При выполнении лабораторных работ студенческая группа делится на бригады, которые затем распределяются по лабораторным стендам.

К каждой лабораторной работе студенты должны заранее подготовиться, ознакомиться с описанием работы и рекомендованной литературой. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Перед сборкой электрической схемы студенты должны ознакомиться с электрическим оборудованием и измерительными приборами, используемыми в данной работе. Получив разрешение преподавателя, можно приступить к монтажу схемы. Собранная электрическая цепь предъявляется для проверки преподавателю.

Включение электрической цепи под напряжение производится только с разрешения и в присутствии преподавателя.

Разбирать электрическую цепь после выполнения отдельных этапов работы и собирать новую можно после предварительного ознакомления преподавателя с полученными экспериментальными данными.

После окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок.

По каждой выполненной работе на компьютере составляется отчет. В нем приводятся расчетные формулы, таблицы с рассчитанными и измеренными величинами, анализ полученных результатов, графики, диаграммы, выводы по работе. Графические зависимости должны быть представлены в прямоугольной системе координат в масштабе, с равномерными шкалами. На графиках должны быть указаны экспериментальные точки. Выполненная и оформленная лабораторная работа должна быть защищена. Только после этого студент может приступить к выполнению следующей лабораторной работы.

1 ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Краткие сведения из теории

Источниками электрической энергии (источниками питания) называются устройства, в которых химическая, механическая, тепловая и энергия других видов преобразуются в электрическую. В *приемниках* электрической энергии (нагрузке) происходит превращение электрической энергии в другие виды энергии (тепловую, световую, механическую и т.п.).

Совокупность источников энергии, нагрузки и измерительных приборов, соединенных между собой проводами, называется электрической цепью.

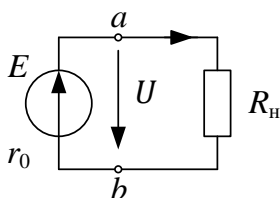


Рисунок 1.1 -
Простейшая цепь
постоянного тока

Источники относятся к активным элементам цепи, а приемники - к пассивным.

Источник характеризуется двумя параметрами: ЭДС E и внутренним сопротивлением r_0 . Если к источнику подключена нагрузка с сопротивлением R_n (рисунок 1.1), то под действием ЭДС E в цепи протекает ток, определяемый законом Ома,

$$I = \frac{E}{R_n + r_0}. \quad (1.1)$$

Зависимость тока I , проходящего по резистору с сопротивлением R_n , от напряжения U на его зажимах называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Для резистора с неизменным значением R_n

$$U = R_n I \quad (1.2)$$

Графически ВАХ резистора R_n соответствует прямая, проходящая через начало координат.

Элементы электрической цепи, ВАХ которых являются прямыми линиями, называются *линейными*.

Зависимость напряжения U на зажимах источника от протекающего через него тока I называется *внешней характеристикой* источника.

Зависимость напряжения U на зажимах источника от протекающего через него тока I называется внешней характеристикой источника. ЭДС \square численно равна разности потенциалов или напряжению U между положительной

и отрицательной клеммами источника при отсутствии в нем тока (в режиме холостого хода).

При анализе электрических цепей пользуются понятиями идеальных источников электрической энергии: источником напряжения (ЭДС) и источником тока.

Идеальный источник напряжения (ЭДС) представляет собой активный элемент, напряжение на зажимах которого не зависит от проходящего через него тока. У такого источника внутреннее сопротивление $r_0 = 0$, а внешняя характеристика изображается прямой, параллельной оси I (рисунок 1.2, а).

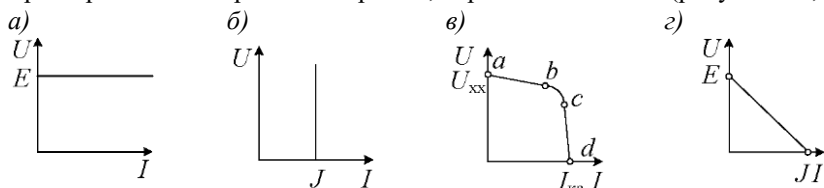


Рисунок 1.2 - Внешние характеристики источников электрической энергии: а - идеального источника ЭДС; б - идеального источника тока; в - реального источника с нелинейной ВАХ внутреннего сопротивления; г - реального источника с линейной ВАХ внутреннего сопротивления

Идеальный источник тока - это активный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его выводах. Предполагается, что внутреннее сопротивление такого источника бесконечно велико, и поэтому сопротивление нагрузки, от которого зависит напряжение на выводах источника, не влияет на ток источника. ВАХ такого источника представлена на рисунке 1.2, б.

Идеальные источники теоретически рассматриваются как источники бесконечной мощности. Реальный источник обладает конечной мощностью из-за внутреннего сопротивления, которое ограничивает отдаваемую им во внешнюю цепь мощность. Внешняя характеристика такого источника является нелинейной (рисунок 1.2, в). В зависимости от режима работы источника, соответствующего определенному участку его внешней характеристики, он может приближаться к идеальному источнику напряжения (участок ab) или тока (участок cd).

Реальные источники с линейной ВАХ (рисунок 1.2, г) могут быть представлены расчетными эквивалентными схемами замещения:

а) источником ЭДС E с последовательно включенным внутренним сопротивлением r_0 (рисунок 1.3, а); б) источником тока $J = E/r_0$ и параллельно с ним включенным сопротивлением r_0 (рисунок 1.3, б).

Эти схемы взаимозаменяемы.

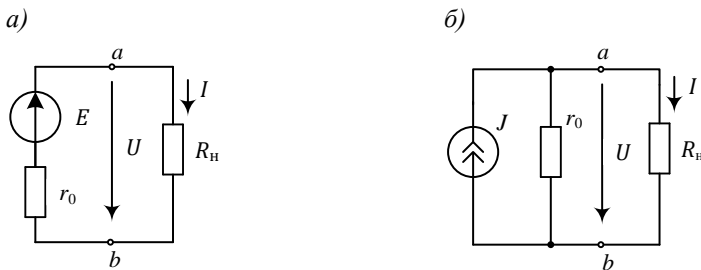


Рисунок 1.3 - Эквивалентные схемы замещения источников электрической энергии: а – с источником ЭДС; б – с источником тока

Внешнюю характеристику источника с постоянным внутренним сопротивлением r_0 , представленного эквивалентными схемами замещения на рисунке 1.3, можно описать уравнениями:

а) с источником ЭДС

$$U = E - r_0 I; \quad (1.3)$$

б) с источником тока

$$I = J - U/r_0. \quad (1.4)$$

Графически внешняя характеристика такого источника представляет собой прямую (см. рисунок 1.2, 2), проходящую через точки с координатами $(E, 0)$ и $(0, J)$.

Требуется: ознакомиться с измерительными приборами; исследовать внешнюю характеристику источника энергии постоянного тока; определить параметры эквивалентных схем замещения источника и выполнить моделирование электрической цепи в Multisim.

Оборудование и приборы

Источник питания, резистор, проволочный реостат, миллиамперметр, вольтметр, ваттметр.

Схема электрической цепи

Для выполнения работы используется электрическая цепь (рисунок 1.4), содержащая источник питания, нагрузку (реостат) и измерительные приборы (амперметр, вольтметр и ваттметр).

Для измерения тока в цепи амперметр A включают последовательно с нагрузкой или источником. Для того чтобы включение амперметра не влияло на значение измеряемого тока, его внутренне сопротивление очень мало, и им практически можно пренебречь ($R_A = 0$).

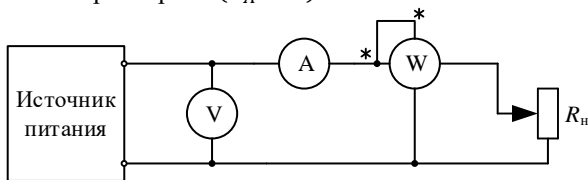


Рисунок 1.4 - Схема исследуемой электрической цепи

Напряжение на каком-либо участке цепи измеряют с помощью вольтметра V . Чтобы вольтметр не влиял на токораспределение в цепи и через него протекал незначительный ток, его собственное сопротивление не должно быть очень большим, а практически его можно считать бесконечно большим ($R_V = \infty$).

Электрическую мощность P цепи измеряют ваттметром. Мощность в цепи постоянного тока может быть также определена в виде произведения измеренных амперметром и вольтметром значений тока I и напряжения U :

$$P = UI. \quad (1.5)$$

Ваттметр имеет две катушки: токовую, которая включается в цепь последовательно, и катушку напряжения, которая включается в цепь параллельно. При включении ваттметра необходимо соблюдать правильную полярность, поэтому его генераторные зажимы обозначают звездочками.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь, схема которой представлена на рисунке 1.4.
2. Измерить с помощью вольтметра ЭДС источника при отсутствии тока в цепи, т.е. в режиме холостого хода.
3. Изменяя ток в цепи от нуля ($R_H = \infty$) в режиме холостого хода до максимального в режиме короткого замыкания ($R_H = 0$), снять показания измерительных приборов. Результаты измерений внести в таблицу 1.1.
4. Рассчитать по показаниям измерительных приборов сопротивление нагрузки R_H и внутреннее сопротивление источника r_0 .
5. Рассчитать мощность нагрузки по показаниям амперметра и вольтметра и сравнить найденные значения P с измеренной с помощью ваттметра.

Таблица 1.1 - Результаты эксперимента, расчётов и моделирования

Номер опыта	Эксперимент			Расчет			Моделирование		
	U	I	P	$R_H = U/I$	$R_H = P/I^2$	$P = UI$	U	I	P
	В	А	Вт	Ом			В	А	Вт
1 (х.х)									
2									
...									
10 (к.з.)									

6. Ознакомиться с работой программы Multisim (Приложение А). В соответствии с принципиальной схемой, приведённой в описании лабораторной работы, собрать исследуемую электрическую цепь (рисунок 1.5).

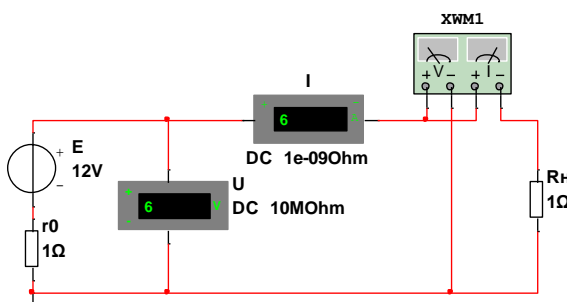


Рисунок 1.5 – Схема моделируемой электрической цепи

7. Задать значение источника ЭДС E равным напряжению холостого хода и сопротивление r_0 из п.4. Изменяя значения сопротивления R_H , взятого из таблицы 1.1 (используя расчёт через напряжение и силу тока), измерить напряжение, ток и мощность. Результаты моделирования внести в таблицу 1.1.

8. На одной координатной плоскости, построить графики внешней характеристики $U(I)$ по результатам эксперимента и моделирования. Также, на одной координатной плоскости построить зависимости $P(I)$.

Контрольные вопросы

1 Что называется внешней характеристикой источника? Приведите уравнение линейной внешней характеристики реального источника ЭДС.

2 Как практически измерить ЭДС реального источника?

3 Как с помощью линейной внешней характеристики реального источника разделить его ЭДС и внутреннее сопротивление?

4 Как изменится линейная внешняя характеристика реального источника, если:

а) его внутреннее сопротивление увеличится?

б) если его ЭДС увеличится в 2 раза, а внутреннее сопротивление уменьшится также в 2 раза?

5 Что такое согласованный режим работы источника? Чему равен КПД источника в таком режиме?

6 Выведите зависимость КПД источника с внутренним сопротивлением r_0 от сопротивления нагрузки.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Краткие сведения из теории

Сложной электрической цепью называют цепь, содержащую два и более источника энергии в различных ветвях. Основные соотношения между токами и напряжениями определяются законами Ома и Кирхгофа, Графическим выражением второго закона Кирхгофа является потенциальная диаграмма, отражающая распределение потенциала в замкнутом контуре в зависимости от сопротивлений ветвей $\varphi = f(R)$. Потенциальная диаграмма может быть построена расчетным путем по известным токам, ЭДС, сопротивлениям или по результатам экспериментальных измерений. Токи сложной цепи рассчитывают при помощи уравнений Кирхгофа, методом контурных токов, узловых потенциалов, наложения и др.

Ветвью электрической цепи (схемы) называется участок цепи (схемы), состоящий из последовательно включенных элементов, по которым течет один и тот же ток.

Узел электрической цепи - место или точка соединения трех и более ветвей.

Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, называется контуром. При этом каждый узел в рассматриваемом контуре встречается не более одного раза.

Первый закон Кирхгофа применяется к узлам и формулируется следующим образом:

«Алгебраическая сумма токов в узле равна нулю»:

$$\sum \pm I_k = 0. \quad (2.1)$$

В этом уравнении одинаковые знаки берутся для токов, имеющих одинаковое направление относительно узла.

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

«В любом контуре алгебраическая сумма напряжений на всех элементах и участках цепи, входящих в контур, равна алгебраической сумме действующих в этом контуре ЭДС»:

$$\sum \pm R_k I_k = \sum \pm E_k. \quad (2.2)$$

Направление обхода контура выбирается произвольно. Напряжения и ЭДС берутся положительными, если их направления совпадают с выбранным направлением обхода, в противном случае - отрицательными.

Расчет токов заданной разветвленной цепи производят в следующем порядке:

1. В каждой ветви схемы задают произвольное направление тока.
2. По первому закону Кирхгофа составляют $y-1$ независимых уравнений, где y - число узлов схемы.
3. По второму закону Кирхгофа составляют $v-(y-1)$ уравнений, где v - число ветвей схемы. При этом контуры выбирают так, чтобы они были простыми и содержали хотя бы одну новую ветвь, не входящую в другие контуры.
4. Полученную систему решают относительно неизвестных токов. Если в результате решения получается отрицательный ток, это означает, что его действительное направление противоположно выбранному.

Этот метод расчета универсален, применим к схемам любой конфигурации. Однако ему присущ определенный недостаток - при больших количествах уравнений решение системы оказывается затруднительным, поэтому метод применяется при небольшом числе ветвей схемы.

Метод наложения. Расчет токов по методу наложения основывается на принципе суперпозиции. Сущность его заключается в том, что в линейной электрической цепи при нескольких источниках питания токи в ветвях схемы определяются алгебраической суммой токов, до - рождаемых в них каждой ЭДС в отдельности. Расчет цепи по методу наложения выполняют в такой последовательности:

1. В цепи поочередно оставляют по одному источнику питания, причем остальные ЭДС закорачивают. Ветви, содержащие источники тока, исключают из цепи. Сопротивления источников питания выносят во внешнюю цепь. Таким образом получают расчетные схемы для каждого источника питания.
2. В полученных схемах определяют частичные токи ветвей.

3. Действительные токи ветвей определяют суммированием (наложением) соответствующих частичных токов расчетных схем с учетом их направлений.

Достоинство этого, метода в том, что он не требует решения системы уравнений. Метод рационален, когда в схеме не более двух-трех ЭДС.

Требуется: экспериментальная проверка законов Кирхгофа и метода наложения, для линейной цепи постоянного тока.

Оборудование и приборы

Источники постоянного напряжения с ЭДС E_1, E_2 , плата с резисторами и переключателями, амперметры и вольтметр.

Схема электрической цепи

Для выполнения работы используется электрическая цепь (рисунок 2.1). В качестве источников энергии применяются выпрямительные устройства с постоянным напряжением на выходе. Источники обладают внутренними сопротивлениями, весьма малыми по сравнению с сопротивлениями резисторов R_2, R_3, R_4 , и потенциометром, создающим сопротивления R_1 и R_5 , поэтому их можно рассматривать как идеальные источники ЭДС E_1 и E_2 . С помощью переключателей источники E_1 и E_2 могут подключаться к цепи или отключаться. Когда переключатель находится в положении 2, вместо отключенного источника в цепь вводится короткозамкнутый участок.

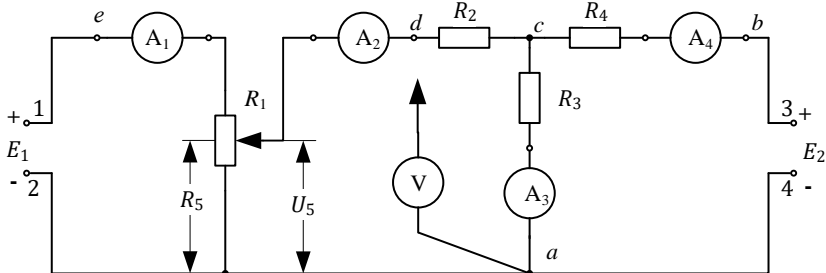


Рисунок 2.1 – Схема исследуемой электрической цепи

Напряжения на зажимах измеряются с помощью вольтметра V , а токи в ветвях амперметрами A_1, A_2, A_3 и A_4 . При подключении измерительных приборов необходимо учитывать полярность выводов источников и приборов.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рисунок 2.1).
2. После проверки схемы руководителем включить рубильники, произвести отсчеты токов и напряжения U_5 , а также напряжения между точками a и b, c, d, e . Результаты измерений занести в таблицу 2.1.
3. Отключить источник E_1 и замкнуть зажимы 1 и 2. Включить источник E_2 и произвести отсчет напряжения U_5 и токов.
4. Произвести измерения аналогично п. 3 при включенном E_1 и выключенном источнике E_2 . Измерить ЭДС E_1 и E_2 при отключенной схеме. Вычислить ток I_5 и сопротивление R_5 .
5. Определить токи методом наложения. Внутренним сопротивлением источников пренебречь. Расчетная схема приведена на рисунке 2.2.

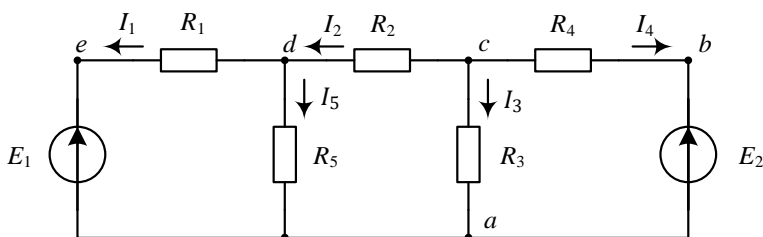


Рисунок 2.2 - Расчетная схема разветвленной цепи постоянного тока

6. Составить уравнения по I и II законам Кирхгофа и вычислить токи в ветвях.
7. Для одного из контуров (по заданию преподавателя) вычислить потенциалы точек и построить потенциальную диаграмму.

Таблица 2.1 - Результаты эксперимента и расчетов

ЭДС	Измерения								Расчёт									
	I_1	I_2	I_3	I_4	φ_b	φ_c	φ_d	φ_e	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	φ_b	φ_c	φ_d	φ_e	
	А				В				А				В					
E_1 и E_2																		
E_1																		
E_2																		

8. Собрать схему в программе Multisim (рисунок 2.3), Указать значения сопротивлений из лабораторного стенда и ЭДС, согласно п.4.

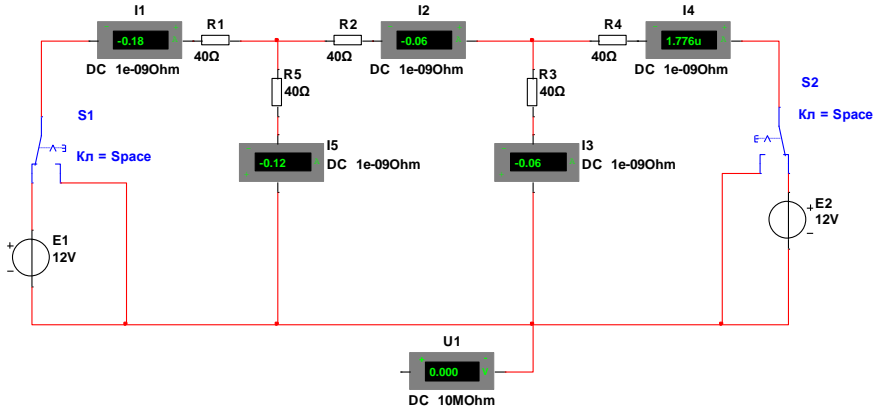


Рисунок 2.3 - Схема моделирования цепи постоянного тока

9. Выполнить моделирование в данной программе. Плюсовую клемму вольтметра U_1 поочерёдно подключить к точкам a, b, c, d и e , ориентируясь на рисунок 2.2. Результаты моделирования записать в таблицу 2.2 и сравнить с результатами измерений.

Таблица 2.1 - Результаты экспериментов и моделирования

ЭДС	Измерения								Моделирование								
	I_1	I_2	I_3	I_4	φ_d	φ_c	φ_d	φ_e	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	φ_b	φ_c	φ_d	φ_e
	A				B				A				B				
E_1 и E_2																	
E_1																	
E_2																	

Контрольные вопросы

1 Пояснить понятие «алгебраическая сумма токов в узле» для первого закона Кирхгофа.

2 Пояснить, как определяется необходимое число уравнений, составляемых при расчете цепи путем непосредственного применения законов Кирхгофа.

3 Пояснить понятие «алгебраическая сумма частичных токов» для метода наложения.

4 Равна ли мощность, выделяемая на сопротивлении R_3 при включенных источниках E_1 и E_2 (см. рисунок 2.2), сумме мощностей, выделяемых на сопротивлении R_3 частичными токами, вызываемыми источниками E_1 и E_2 в отдельности?

3 ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА

Краткие сведения из теории

Часть электрической цепи произвольной конфигурации с двумя выделенными выводами (полюсами) называется двухполюсником. Двухполюсники, содержащие источники электрической энергии, называются активными, двухполюсники, не содержащие источников, - пассивными. Пассивный двухполюсник может быть представлен на электрической схеме резистивным элементом, сопротивление которого равно эквивалентному сопротивлению двухполюсника. При заданной схеме соединений элементов пассивного двухполюсника его эквивалентное сопротивление может быть найдено путем выполнения последовательных операций по «сворачиванию» схемы относительно полюсов двухполюсника. Активные двухполюсники обозначаются прямоугольниками с буквой А (рисунок 3.1, а), а пассивные - прямоугольниками без буквенного обозначения (рисунок 3.1, б).



Рисунок 3.1 - Условные обозначения активного (а) и пассивного (б) двухполюсников

Теорема об активном двухполюснике (эквивалентном генераторе) или теорема Гельмгольца-Тевенена формулируется следующим образом:

«Ток в какой-либо ветви ab сложной электрической цепи не изменится, если активную электрическую цепь, к которой эта ветвь присоединена, заменить эквивалентным генератором с ЭДС E_G , равной напряжению U_{xx} на зажимах ab разомкнутой ветви (режим холостого хода), и внутренним сопротивлением r_G , равным входному сопротивлению активной цепи».

В другом варианте теорема об активном двухполюснике (теорема Нортон) формулируется так:

«Ток в какой-либо ветви ab сложной электрической цепи не изменится, если активную электрическую цепь, к которой эта ветвь присоединена, заменить источником тока J_G , равным току короткого замыкания ветви ab , и внутренним сопротивлением r_G , равным входному сопротивлению активной цепи».

Использование теоремы об активном двухполюснике (генераторе) позволяет достаточно легко находить ток в какой-либо одной ветви сложной электрической цепи. Для этого электрическая цепь, к зажимам которой присоединена рассматриваемая ветвь, заменяется активным двухполюсником (рисунок

3.2, а), параметры которого определяются расчетным путем или экспериментально. В соответствии с двумя вариантами теоремы активный двухполюсник может быть представлен двумя схемами замещения:

а) с источником ЭДС E_{Γ} (эквивалентным генератором напряжения ЭГН) на рисунке 3.2, б);

б) с источником тока J_{Γ} (эквивалентным генератором тока ЭГТ) - на рисунке 3.2, в).

Искомый ток в ветви ab для схем ЭГН и ЭГТ находится по следующим формулам:

$$I = \frac{E_{\Gamma}}{R + r_{\Gamma}} \quad \text{— формула Гельмгольца-Тевенена;} \quad (3.1)$$

$$I = \frac{r_{\Gamma}}{R + r_{\Gamma}} J_{\Gamma} \quad \text{— формула Нортона.} \quad (3.2)$$

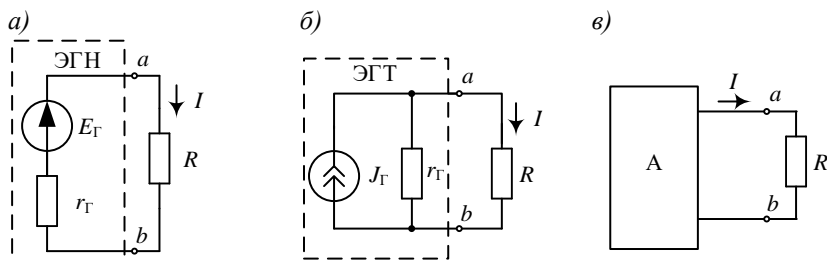


Рисунок 3.2 - Эквивалентные схемы замещения активного двухполюсника: а – схема подключения нагрузки к активному двухполюснику; б - эквивалентная схема замещения активного двухполюсника генератором напряжения; в - эквивалентная схема замещения активного двухполюсника генератором тока

Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора r_{Γ} рассчитывается по закону Ома:

$$r_{\Gamma} = \frac{U_{\text{хх}}}{I_{\text{кз}}} = \frac{E_{\Gamma}}{J_{\Gamma}} \quad (3.3)$$

Требуется: экспериментальная проверить теоремы об активном двухполюснике; применить метод эквивалентного генератора к определению токов в цепи.

Оборудование и приборы

Набор резисторов на плате, проволочный реостат, источник постоянного напряжения, вольтметр и амперметр.

Схемы электрических цепей

Для проведения исследований используется резистивная цепь заданной конфигурации с источником постоянного напряжения, включенным в одну из ветвей. Вариант цепи приведен на рисунке 3.3. Внутреннее сопротивление источника мало по сравнению с сопротивлениями ветвей, поэтому источник можно считать идеальным ($r_0 = 0$) с ЭДС E_5 , равной напряжению источника.

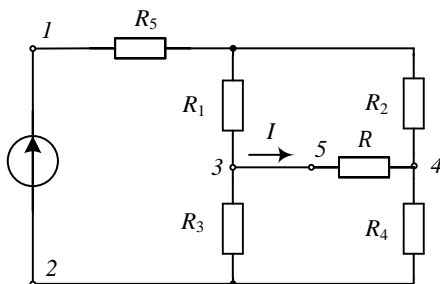


Рисунок 3.3 - Схема исследуемой цепи

Порядок выполнения работы

1. В табл. 1 записать данные всех сопротивлений исследуемой цепи.
2. На источнике постоянного тока, который не подключен к основной цепи, выставить ЭДС E_5 , указанное преподавателем. Результат записать в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные

E_5	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R
В	Ом					

3. В исследуемой цепи с заданными параметрами рассчитать ток I в одной из ветвей (по указанию преподавателя):

- а) методом эквивалентного генератора напряжения;
- б) методом эквивалентного генератора тока.

Для расчета внутреннего сопротивления эквивалентного генератора, использовать схему на рисунке 3.4

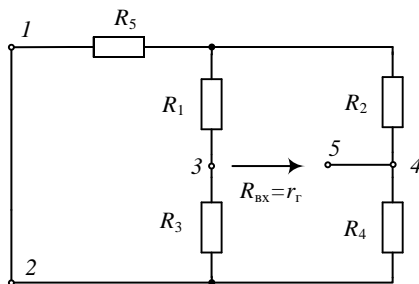


Рисунок 3.4 – Схема определения внутреннего сопротивления

Провести опыт холостого хода (рисунок 3.5). Для этого, отключив резистор R , включить источник постоянного тока в схему. Вольтметром измерить напряжение U_{xx} между зажимами 3 и 4 и результат записать в таблицу 3.2.

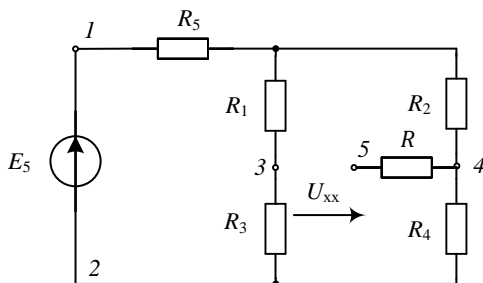


Рисунок 3.5 - Схема для определения параметров ЭГН

Таблица 3.2 – Результаты экспериментов и расчетов

Расчет						Опыт				Моделирование			
ЭГН		ЭГТ				U_{xx}	$I_{кз}$	I	$r_{г}$	U_{xx}	$I_{кз}$	I	$r_{г}$
U_{xx}	$r_{г}$	I	$I_{кз}$	$r_{г}$	I								
В	Ом	А	А	Ом	А	В	А	А	Ом	В	А	А	Ом

4. Провести опыт короткого замыкания (рисунок 3.6).

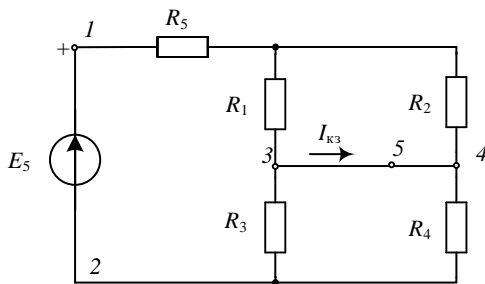


Рисунок 3.6 - Схема для определения параметров ЭГТ

Для этого при отключенном резисторе R включить между зажимами 3 и 4 амперметр, внутреннее сопротивление которого очень мало, и измерить ток короткого замыкания $I_{кз}$. Результат измерения занести в таблицу 4.2.

5. Измерить действительный ток I в резисторе R , включив амперметр между зажимами 3 и 5. Результат измерения записать в таблицу 3.2.

6. Подключить к зажимам 3 и 4 исследуемой цепи нагрузку, сопротивление R_H которой можно плавно менять, и снять внешнюю характеристику $U(I)$ активного двухполюсника. Значения тока в нагрузке изменять от $I = 0$ (режим холостого хода) до максимального значения $I = I_{кз}$ (режим короткого замыкания) для 8 - 10 промежуточных опытов. Для каждого из опытов определить значение сопротивления нагрузки R_H и выделяемой в ней мощности $P_H = UI$. Результаты измерений и расчетов внести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 - Результаты экспериментов и расчетов

Номер опыта	Эксперимент					Моделирование			
	U	I	$R_H = U/I$	$P_H = UI$	R_H/r_r	U	I	$P_H = UI$	R_H/r_r
	В	А	Ом	Вт		В	А	Вт	
1 (х.х.)									
2									
10 (к.з.)									

7. На основе опыта холостого хода и короткого замыкания из формулы (3.3) определить сопротивление r_r эквивалентного генератора напряжения. Результат записать в табл. 2.

8. Собрать схему в программе Multisim (рисунок 4.4), Указать значения сопротивлений из лабораторного стенда и ЭДС из п.2.

9. Разомкнуть ключ S1 и измерить напряжение $U_{хх}$. Результат измерения записать в таблицы 4.2 и 4.3.

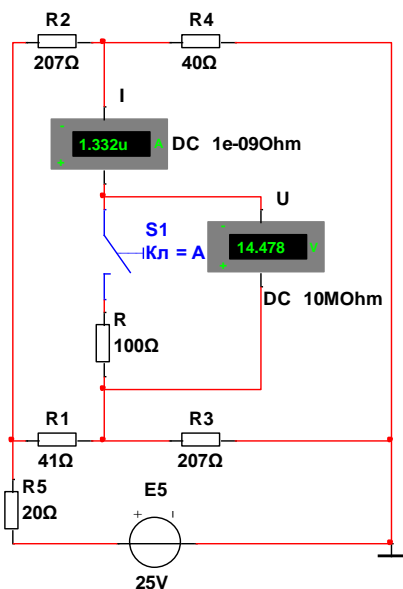


Рисунок 4.4 – Схема моделирования электрической цепи

10. Замкнуть ключ S1 и указав значение сопротивления резистора $R = 0$, измерить ток короткого замыкания $I_{кз}$. Результат измерения записать в таблицы 4.2 и 4.3.

11. По результатам моделирования рассчитать внутреннее сопротивление эквивалентного генератора $r_{г}$. Результат расчёта записать в таблицу 4.2.

12. Подставить в резистор R значение, указанное на стенде, измерить ток I . Результат измерения записать в таблицу 4.2.

13. Подставляя в резистор R значения сопротивлений из таблицы 4.3, измерить напряжение U и ток I . Рассчитать мощность нагрузки $P_{н}$. Результаты измерений и расчётов внести в таблицу 4.3.

14. На одной координатной плоскости, построить графики внешней характеристики $U(I)$ активного двухполюсника по результатам эксперимента и по результатам моделирования. Также, на одной координатной плоскости построить зависимости $P_{н} = f(R_{н}/r_{г})$.

Контрольные вопросы

- 1 Какой двухполюсник называется активным?
- 2 Как изменилась бы формула (3.1) при введении в ветвь с искомым током идеального источника ЭДС?
- 3 Как опытным путем определить ЭДС $E_{г}$ в формуле (3.1)?
- 4 Как опытным путем определить ток $I_{г}$ в формуле (3.2)?
- 5 В чем заключается определение сопротивления участка цепи методом амперметра и вольтметра?
- 6 При каком сопротивлении нагрузки, подключенной к активному двухполюснику, в ней будет выделяться максимальная мощность?

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА, СОДЕРЖАЩЕЙ КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ И РЕЗИСТОР

Краткие сведения из теории

Если через резистор сопротивлением r проходит синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ (рисунок 4.1, а), то в соответствии с законом Ома для мгновенных значений напряжение на резисторе

$$u = ri = rI_m \sin(\omega t + \psi_i) = U_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad (4.1)$$

совпадает по фазе с током (рисунок 5.1, б).

Комплексные амплитуды \underline{I}_m и \underline{U}_m и соответственно комплексы действующих значений \underline{I} и \underline{U} гармонических колебаний тока и напряжения в резистивном сопротивлении связаны законом Ома:

$$\underline{U}_m = r\underline{I}_m; \underline{U} = r\underline{I}, \quad (4.2)$$

где $U = U_m/\sqrt{2}$ и $I = I_m/\sqrt{2}$.

Векторная диаграмма напряжения \underline{U} и тока \underline{I} приведена на рисунке 5.1, а

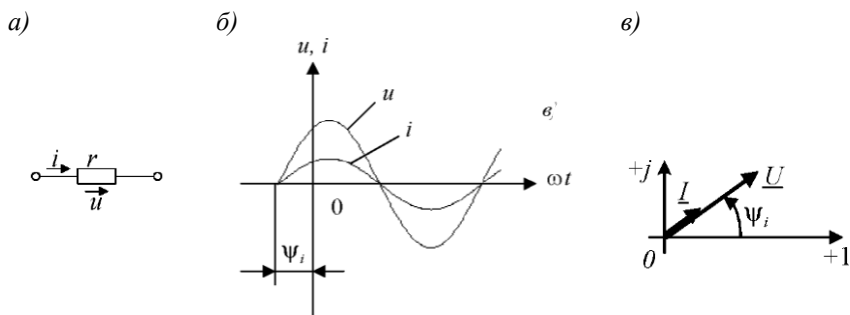


Рисунок 4.1 - Синусоидальный ток в резисторе: а - схема замещения; б - волновая диаграмма; в - векторная диаграмма

Мгновенная мощность, потребляемая резистором,

$$p = ui = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_i), \quad (4.3)$$

а ее среднее за период значение

$$P = UI = U^2/r = I^2 r, \quad (4.4)$$

при этом всегда $P > 0$.

При прохождении тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ через идеальную катушку индуктивности L (рисунок 5.2, а) напряжение на ее зажимах

$$u = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \phi) = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (4.5)$$

где $U_m = \omega L I_m$ – амплитуда напряжения на зажимах катушки индуктивности; $\phi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$ – разность начальных фаз напряжения и тока катушки.

Следовательно, напряжение на катушке L опережает по фазе ток на угол $\pi/2$ (рисунок 4.2, б).

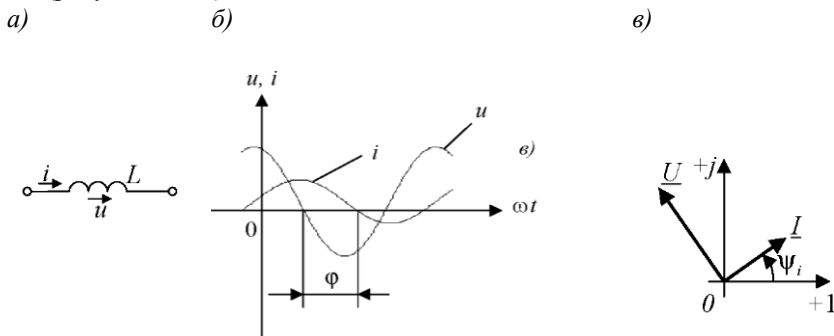


Рисунок 4.2 - Синусоидальный ток в идеальной катушке индуктивности: а - схема замещения; б - волновая диаграмма; в - векторная диаграмма

Уравнению (5.5) соответствует выражение в комплексной форме для действующих значений напряжения и тока

$$\underline{U} = j\omega L \underline{I}, \quad (4.6)$$

где $\underline{U} = U e^{j\psi_u}$ и $\underline{I} = I e^{j\psi_i}$.

Величина $x_L = \omega L$, имеющая размерность сопротивления, называется индуктивным сопротивлением. Обратная величина $b_L = 1/x_L$ называется индуктивной проводимостью.

Реальная катушка имеет активное сопротивление и при низких частотах может быть представлена последовательной схемой замещения (рисунок 4.3,а): индуктивностью L_k и сопротивлением r_k .

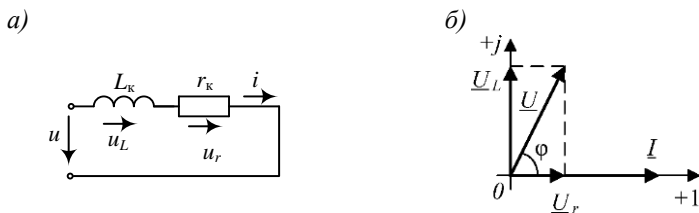


Рисунок 4.3 - Синусоидальный ток в реальной катушке индуктивности: *a* - схема замещения; *б* - векторная диаграмма

При прохождении по катушке синусоидального тока $i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i)$ напряжение на ее зажимах в соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$\begin{aligned} u &= u_r + u_L = r_k i + L_k \frac{di}{dt} = r_k I_m \sin(\omega t + \psi_i) + \omega L_k I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \\ &= U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Напряжение u опережает по фазе ток i на угол φ .

Для комплексных действующих значений \underline{U} и \underline{I} уравнение (5.7) можно записать в следующей форме:

$$\underline{U} = \underline{U}_r + \underline{U}_L = r_k \underline{I} + j\omega L_k \underline{I} = (r_k + jx_k) \underline{I} = \underline{Z}_k \underline{I}, \quad (4.8)$$

где $\underline{Z}_k = r_k + jx_k = Ze^{j\varphi}$ - комплексное сопротивление катушки, модуль которого $Z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$, а аргумент $\varphi = \arctg(x_k / r_k)$.

Z_k называют полным сопротивлением.

Треугольник, образованный векторами \underline{U}_r , \underline{U}_L и \underline{U} , называется треугольником напряжений. Векторная диаграмма схемы замещения катушки при нулевой начальной фазе тока ($\psi_i = 0$) представлена на рисунке 5.3, б.

Величина, обратная комплексному сопротивлению \underline{Z}_k , называется комплексной проводимостью катушки:

$$\underline{Y}_k = \frac{1}{\underline{Z}_k} = Y e^{-j\varphi} = \frac{1}{r_k + jx_k} = \frac{r_k}{r_k^2 + x_k^2} - j \frac{x_k}{r_k^2 + x_k^2} = g_k - jb_k, \quad (4.9)$$

где $g_k = \frac{r_k}{r_k^2 + x_k^2}$ - активная проводимость катушки;

$b_k = \frac{x_k}{r_k^2 + x_k^2}$ - реактивная проводимость катушки.

Векторная интерпретация комплексного сопротивления \underline{Z}_k и комплексной проводимости \underline{Y}_k представляет собой треугольник сопротивлений (рисунок 5.4, *a*) и треугольник проводимостей (рисунок 4.4, б).

Пусть катушка подключена к источнику с напряжением $u = U_m \sin \omega t$, что соответствует комплексному напряжению $\underline{U} = U$. Комплекс действующего значения тока в катушке

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_k} = U \underline{Y}_k = U g_k - j U b_k = I_a - j I_p, \quad (4.10)$$

где $I_a = U g_k$ - активная составляющая тока \underline{I} ;

$I_p = U b_k$ - реактивная составляющая тока \underline{I} .



Рисунок 4.4 - Треугольник сопротивлений (а) и треугольник проводимостей (б)

Выражению (4.10) соответствует параллельная схема замещения катушки (рисунок 4.5, а), для которой на рисунке 4.5, б построена векторная диаграмма напряжения и токов.

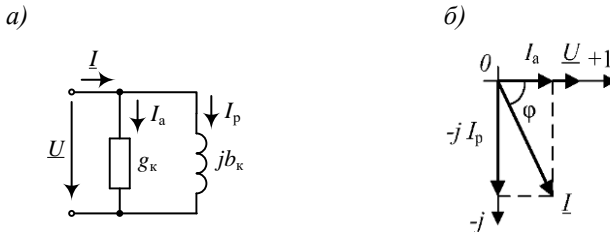


Рисунок 4.5 - Параллельная схема замещения катушки индуктивности (а) и векторная диаграмма (б)

Векторы токов \underline{I} , \underline{I}_a и \underline{I}_p образуют треугольник токов.

Произведение мгновенных значений приложенного к цепи напряжения $u(t)$ и входного тока $i(t)$ называется мѐновенной мощностью:

$$p(t) = u(t)i(t). \tag{4.11}$$

Среднее значение мгновенной мощности за период называется активной мощностью и измеряется в ваттах (Вт):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = UI \cos \varphi. \tag{4.12}$$

Величина, равная произведению действующих значений тока I и напряжения U , называется полной мощностью цепи и измеряется в вольтамперах (В·А):

$$S = UI \tag{4.13}$$

При расчетах электрических цепей находит применение так называемая реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi \tag{4.14}$$

Единицей измерения реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (вар).

Активная, реактивная и полная мощности связаны между собой соотношениями прямоугольного треугольника (треугольника мощностей):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad (4.15)$$

$$P = S \cos \varphi; \quad (4.16)$$

$$Q = S \sin \varphi; \quad (4.17)$$

Произведение комплексного напряжения \underline{U} и комплекса тока \underline{I}^* , сопряженного с комплексным током \underline{I} , называют комплексной мощностью:

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = UIe^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ. \quad (4.18)$$

Требуется: экспериментально определить параметры катушки индуктивности; проверить законы Ома и Кирхгофа; приобрести навыки анализа цепей переменного тока и построить векторные диаграммы.

Оборудование и приборы

Катушка, реостат, амперметры, вольтметры, ваттметр, ЛАТР.

Схемы электрических цепей

В работе исследуется катушка с индуктивностью L_k и сопротивлением r_k .

Для определения параметров катушки индуктивности, используется схема на рисунке 4.6.

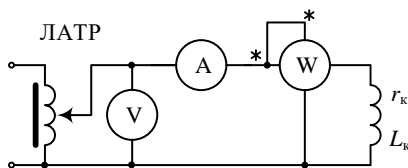
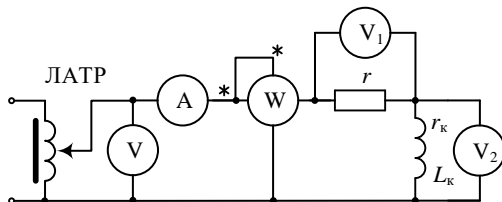


Рисунок 4.6 - Схема для определения параметров катушки

При исследовании цепи с последовательным соединением катушки и резистора, а также для определения параметров L_k и r_k катушки используется схема на рисунке 5.7, а. Параллельное соединение катушки и резистора исследуется по схеме рисунка 5.7, б.

a)



б)

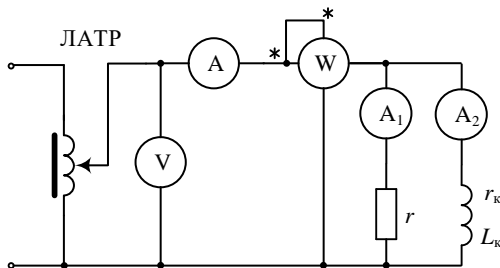


Рисунок 5.7 - Схемы исследуемых электрических цепей:
 а- для определения параметров катушки
 б- с последовательным соединением катушки и резистора;
 в- с параллельным соединением катушки и резистора

Электрические цепи подключаются к источнику синусоидального напряжения через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) со встроенным вольтметром V . Частота переменного тока $f = 50$ Гц.

3. Порядок выполнения работы

1. Установить с помощью ЛАТРа ток $I = 1$ А и измерить активную мощность цепи и напряжение на катушке. Вычислить значения $Z_{\text{к}}, r_{\text{к}}, x_{\text{к}}, L_{\text{к}}, \cos\varphi_{\text{к}}, S, Q, \varphi_{\text{к}}$, а также параметры $g_{\text{к}}$ и $b_{\text{к}}$ параллельной схемы замещения катушки.

Расчетные формулы:

$$\begin{aligned}
 P &= I^2 r_{\text{к}}; Z_{\text{к}} = U/I = \sqrt{r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2}; x_{\text{к}} = \omega L_{\text{к}} = 2\pi f L_{\text{к}}; \\
 S &= UI; \cos\varphi_{\text{к}} = P/S; Q = UI \sin\varphi_{\text{к}}; \\
 g_{\text{к}} &= \frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2}; b_{\text{к}} = \frac{x_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2}.
 \end{aligned}
 \tag{5.19}$$

Данные измерений и расчетов внести в таблицу 4.1.

Построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений для последовательной и параллельной схем замещения катушки, а также треугольники сопротивлений, проводимостей и мощностей.

Таблица 4.1 - Экспериментальные и расчетные данные для определения параметров схемы замещения катушки

Измерено			Рассчитано									
I	U	P	Z_K	r_K	x_K	L_K	$\cos\varphi_K$	φ_K	S	Q	g_K	b_K
А	В	Вт	Ом			Гн	—	град	ВА	вар	См	

2. Для заданных значений сопротивления r резистора и входного напряжения U рассчитать показания приборов при последовательном (см. рисунок 5.7, а) и параллельном (см. рисунок 4.7, б) соединениях катушки и резистора.

3. Выполнить моделирование схемы при последовательном соединении (рисунок 4.8), указав параметры схемы замещения катушки индуктивности, сопротивления r и входного напряжения U .

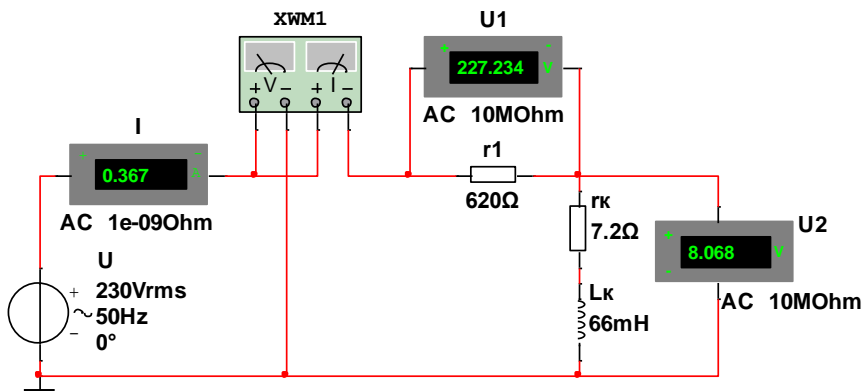


Рисунок 4.8 – Схема моделирования электрической цепей с последовательным соединением;

4. Выполнить моделирование схемы при параллельном соединении (рисунок 4.9).

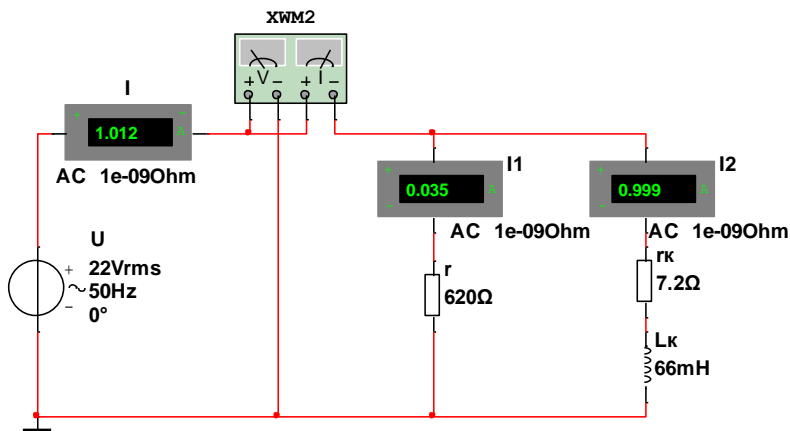


Рисунок 4.9 – Схема моделирования электрической цепи с параллельным соединением катушки и резистора

5. Данные расчета п.2 измерений и моделирования занести в таблицу 4.2 (для последовательного соединения элементов) и таблицу 4.3 (для параллельного соединения).

Таблица 4.2 - Экспериментальные, расчётные и смоделированные для последовательного соединения резистора и катушки индуктивности

Расчет					Эксперимент					Моделирование				
U	U_1	U_2	I	P	U	U_1	U_2	I	P	U	U_1	U_2	I	P
В			А	Вт	В			А	Вт	В			А	Вт

Таблица 4.3 – Экспериментальные, расчётные и смоделированные данные для параллельного соединения резистора и катушки индуктивности

Расчет					Эксперимент					Моделирование				
U	I	I_1	I_2	P	U	I	I_1	I_2	P	U	I	I_1	I_2	P
В	А			Вт	В	А			Вт	В	А			Вт

Контрольные вопросы

1 Как произвести расчет параметров последовательной схемы замещения катушки, если известны параметры параллельной схемы?

2 Пояснить, как изменится активная мощность, потребляемая в цепи, состоящей из включенных последовательно катушки и резистора, при увеличении частоты питающего синусоидального напряжения.

3 Пояснить, как изменится реактивная мощность, потребляемая цепью, состоящей из включенных последовательно катушки и резистора и подключенной к источнику синусоидального напряжения, при уменьшении сопротивления резистора.

4 Пояснить, является ли монотонной зависимость реактивной мощности, потребляемой в цепи, состоящей из включенных последовательно катушки и резистора, от частоты синусоидального питающего напряжения.

5 Пояснить, как изменится коэффициент мощности цепи, состоящей из включенных последовательно катушки и резистора, при уменьшении частоты питающего синусоидального напряжения.

6 Пояснить характер зависимости показаний вольтметра V_2 (см. рисунок 4.6, а) от частоты питающего напряжения.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА, СОДЕРЖАЩЕЙ РЕЗИСТОР И КОНДЕНСАТОР

Краткие сведения из теории

Если конденсатор емкостью C подключить к источнику синусоидального напряжения $u(t) = U_m \sin \omega t$ (рисунок 5.1, а), то в цепи будет протекать ток

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \pi/2). \quad (5.1)$$

Из полученного выражения следует, что ток i опережает по фазе приложенное к конденсатору напряжение u на угол $\pi/2$ (рисунок 5.1, б).

Величина $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$, имеющая размерность сопротивления, называется емкостным сопротивлением. Обратная ей величина $b_C = 1/x_C = \omega C$ называется емкостной проводимостью.

Амплитуды тока и напряжения, а также их действующие значения, связаны соотношениями закона Ома в комплексной форме:

$$I_m = \frac{U_m}{-jx_C}; \underline{I} = \frac{\underline{U}}{-jx_C}. \quad (5.2)$$

Векторная диаграмма действующих значений напряжения \underline{U} и тока \underline{I} приведена на рисунке 5.1, в.

При прохождении синусоидального тока $i = I_m \sin \omega t$ по цепи с последовательно соединенными резистором r и конденсатором C (рисунок 5.2, а) на зажимах цепи будет напряжение $u = u_r + u_C$ или в комплексной форме для действующих значений напряжений

$$\underline{U} = \underline{U}_r + \underline{U}_C, \quad (5.3)$$

где $\underline{U}_r = r\underline{I}$, $\underline{U}_C = -jx_C\underline{I}$.

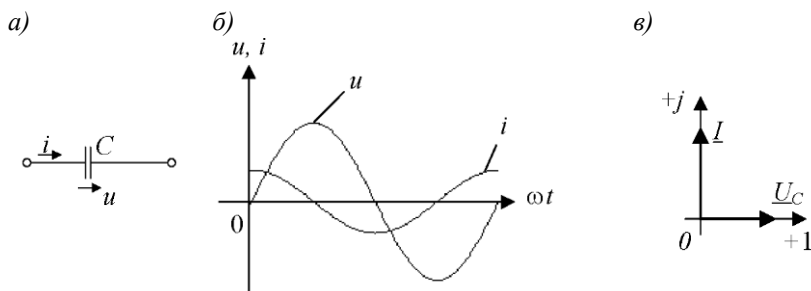


Рисунок 5.1 - Синусоидальный ток в конденсаторе:

а - условное обозначение; б - волновая диаграмма; в - векторная диаграмма

Соответствующая соотношению (5.3) векторная диаграмма изображена на рисунке 5.2, б. Из нее следует, что ток i в последовательной r, C -цепи опережает по фазе приложенное напряжение u на угол φ :

$$\underline{U} = (r - jx_C)\underline{I} = \underline{Z}\underline{I}, \quad (5.4)$$

где $\underline{Z} = r + jx_C = Ze^{-j\varphi}$ - комплексное сопротивление цепи;

$Z = \sqrt{r^2 + x_C^2}$, - полное сопротивление цепи;

$\varphi = \arctg(x_C / r)$, $\varphi < 0$.

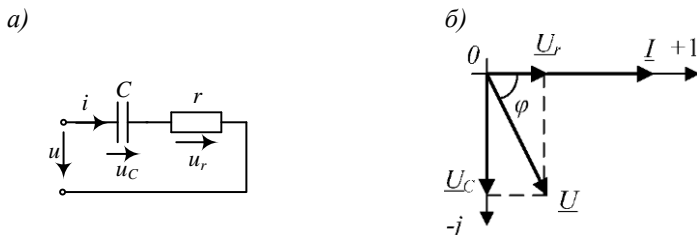


Рисунок 5.2 - Последовательное соединение резистора и конденсатора: а - последовательная r, C - цепь; б - векторная диаграмма

Комплексная проводимость цепи

$$\underline{Y} = 1/\underline{Z} = Y e^{j\varphi} = \frac{1}{r - jx_C} = \frac{r}{r^2 + x_C^2} + j \frac{x_C}{r^2 + x_C^2} = g + jb, \quad (5.5)$$

где g - активная проводимость r, C -цепи;

b - реактивная проводимость r, C -цепи.

Комплексному сопротивлению $\underline{Z} = r - jx_C$ и комплексной проводимости $\underline{Y} = g + jb$ соответствуют треугольники сопротивлений (рисунок 5.3, а) и проводимостей (рисунок 5.3, б).

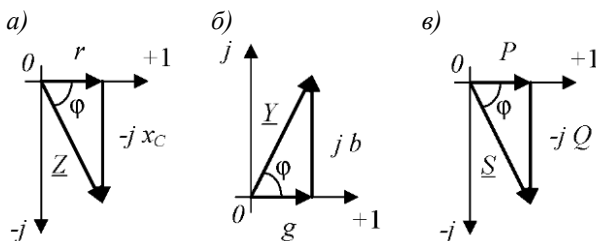


Рисунок 5.3 - Треугольник сопротивлений (а), треугольник проводимостей (б) и треугольник мощностей (в)

Полная мощность r, C -цепи

$$\underline{S} = I^2 \underline{Z} = I^2 r - jI^2 x_C = P - jQ = \underline{UI}^* \quad (5.6)$$

Соотношению $\underline{S} = P - jQ$ соответствует треугольник мощностей (рисунок 6.3, в).

Активная мощность

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi. \quad (5.7)$$

Реактивная мощность

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi. \quad (5.8)$$

Если элементы r и C соединены параллельно (рисунок 5.4, *a*) и подключены к источнику синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$, то ток в неразветвленной части цепи определяется по первому закону Кирхгофа в комплексной форме:

$$\underline{I} = \underline{I}_r + \underline{I}_C = \frac{\underline{U}}{r} + \frac{\underline{U}}{-jx_C} = \underline{U}(g + jb_C) = \underline{U} \underline{Y}. \quad (5.9)$$

Векторная диаграмма токов и напряжения для этого случая приведена на рисунке 6.4,б.

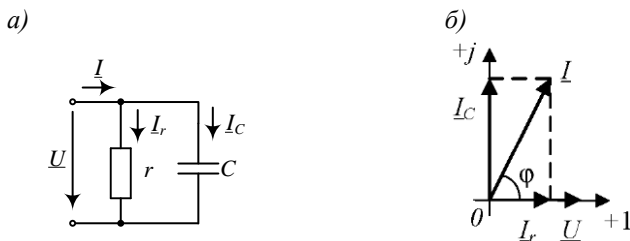


Рисунок 5.4 - Параллельное соединение резистора и конденсатора:
a - схема замещения; *б* - векторная диаграмма

Требуется: экспериментально проверить законы Ома и Кирхгофа для цепи, содержащей элементы r и C ; построить векторные диаграммы.

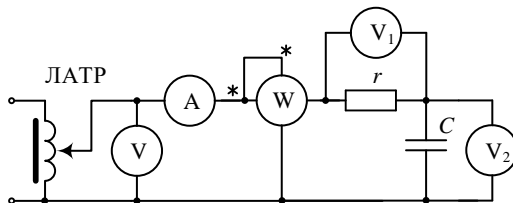
Оборудование и приборы

Конденсатор, резисторы (реостаты), амперметры, вольтметры, ваттметр, ЛАТР.

Схемы электрических цепей

В работе исследуется электрическая цепь с последовательным соединением конденсатора C и резистора r (рисунок 5.5, *a*), а также цепь с параллельными ветвями r_1 и r_2 - C (рисунок 5.5, *б*)

а)



б)

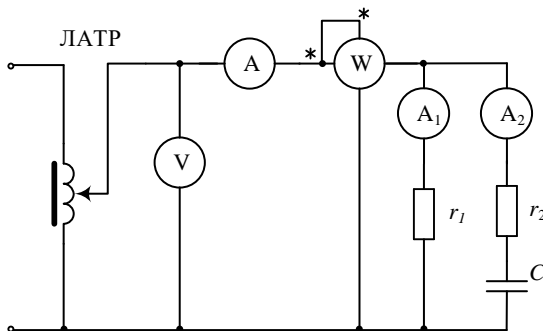


Рисунок 5.5 - Схемы исследуемых электрических цепей:

а – с последовательным соединением резистора и конденсатора;

б - с параллельным соединением резистивной и резистивно-емкостной ветвей

Порядок выполнения работы

1. Для заданных преподавателем значений входного напряжения U , сопротивления r резисторов и емкости C конденсатора рассчитать показания измерительных приборов в схеме с последовательно соединенными r и C (см. рисунок 5.5, а). Данные расчета внести в таблицу 5.1 .

Таблица 5.1 - Экспериментальные, расчётные и смоделированные данные для схемы с последовательным соединением

Задано		Расчет				Эксперимент				Моделирование			
r	C	I	P	U_1	U_2	I	P	U_1	U_2	I	P	U_1	U_2
Ом	мкФ	А	Вт	В		А	Вт	В		А	Вт	В	

Найти значения S , Q , x_C , Z , Y , g и b и внести их в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 - Расчётные данные для схемы с последовательным соединением

S	Q	x_c	Z	Y	g	b
ВА	вар	Ом		См		

Построить векторную диаграмму тока и напряжений, а также треугольники сопротивлений, проводимостей и мощностей.

Расчетные формулы:

$$\begin{aligned}
 x_c &= 1/2\pi fC; & Z &= \sqrt{R^2 + x_c^2}; & S &= UI; \\
 P &= I^2r = UI\cos\varphi; & Q &= I^2x_c = UI\sin\varphi; \\
 \varphi &= \arctg(-x_c/r); & g &= r/(r^2 + x_c^2); & b &= x_c/(r^2 + x_c^2).
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

2. Собрать электрическую цепь (см. рисунок 6.5, а), установить с помощью ЛАТРа заданное в п.1 напряжение U цепи, снять показания приборов и внести их в таблицу 6.1.

3. Для заданных значений входного напряжения U , сопротивлений r_1, r_2 резисторов и емкости C конденсатора рассчитать показания измерительных приборов в схеме с параллельным соединением ветвей $r_1, r_2 - C$ (см. рисунок 5.5, б).

4. Собрать электрическую цепь (см. рисунок 5.5, б), установить с помощью ЛАТРа заданное в п. 3 напряжение цепи и снять показания приборов. Расчетные (п. 3) и экспериментальные (п. 4) данные внести в таблицу 6.3.

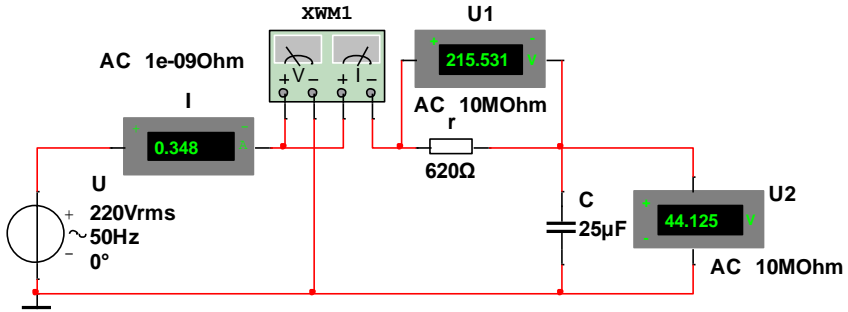
Таблица 5.3 - Экспериментальные, расчётные и смоделированные данные для схемы с параллельным соединением

Задано				Расчет				Эксперимент				Моделирование			
U	r_1	r_2	C	I	I_1	I_2	P	I	I_1	I_2	P	I	I_1	I_2	P
В	Ом		мкФ	А			Вт	А			Вт				

5. Построить в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений для параллельной схемы (рисунок 5.5, б).

6. Выполнить моделирование схемы при последовательном соединении (рисунок 5.6, а) и при параллельном (рисунок 5.6, б). Данные моделирования занести в таблицу 5.1 (для последовательного соединения элементов) и таблицу 5.3 (для параллельного соединения).

a)



б)

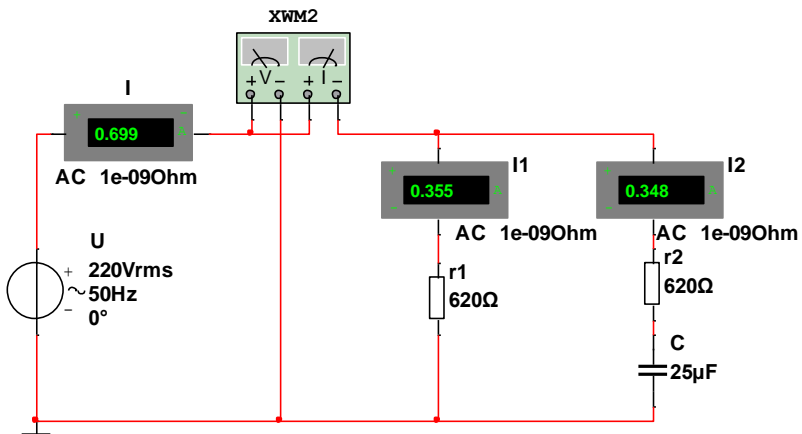


Рисунок 5.6 - Схемы исследуемых электрических цепей:

a — с последовательным соединением резистора и конденсатора;

б - с параллельным соединением резистивной и резистивно-емкостной ветвей

Контрольные вопросы

1 Пояснить, как изменится активная мощность, потребляемая в цепи, состоящей из включенных последовательно резистора и конденсатора, при уменьшении частоты питающего синусоидального напряжения.

2 Пояснить, как изменится коэффициент мощности цепи, состоящей из включенных последовательно резистора и конденсатора, при уменьшении емкости конденсатора.

3 Пояснить, является ли монотонной зависимость реактивной мощности, потребляемой в цепи, состоящей из включенных последовательно резистора и конденсатора, от емкости конденсатора.

4 Пояснить, как зависит реактивная мощность, потребляемая в цепи, состоящей из включенных параллельно резистора и конденсатора, от частоты питающего синусоидального напряжения.

5 Как определить показания вольтметра V (см. рисунок 5.5, a), зная показания вольтметров V_1 и V_2 ?

6 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Краткие сведения из теории

Рассмотрим две индуктивные катушки, расположенные на достаточно близком расстоянии друг от друга (рисунок 6.1).

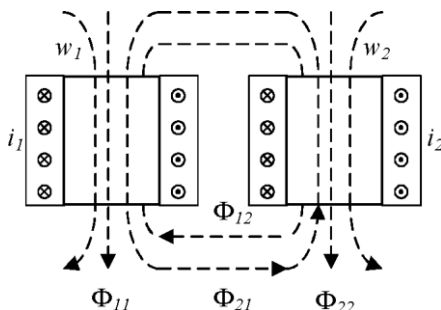


Рисунок 6.1 - Схема магнитного взаимодействия двух катушек

Пусть по первой катушке, имеющей w_1 витков, протекает ток i_1 , а по второй с числом витков w_2 — ток i_2 . Если изменение тока в одной из катушек приводит к появлению ЭДС в другой, то говорят, что эти две катушки индуктивно связаны, а возникающую при этом ЭДС называют ЭДС взаимной индукции.

Обозначим Φ_{11} и Φ_{22} магнитные потоки самоиндукции, положительные направления которых связаны с направлениями токов i_1 и i_2 в соответствующих катушках прави лом правого винта. Часть магнитного потока, созданного первой катушкой, охватывает вторую катушку (Φ_{21}), а часть магнитного потока, созданного второй катушкой, сцепляется с витками первой катушки (Φ_{12}). Магнитные потоки Φ_{12} и Φ_{21} называются потоками взаимоиндукции.

По определению собственные (L_1 и L_2) и взаимные (M_{12} и M_{21}) индуктивности выражаются из соотношений:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= \frac{w_1 \Phi_{11}}{i_1} = \frac{\Psi_{11}}{i_1}; L_2 = \frac{w_2 \Phi_{22}}{i_2} = \frac{\Psi_{22}}{i_2}, \\
 M_{12} &= \frac{w_1 \Phi_{12}}{i_2} = \frac{\Psi_{12}}{i_2}; M_{21} = \frac{w_2 \Phi_{21}}{i_1} = \frac{\Psi_{21}}{i_1},
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

где Ψ_{11} и Ψ_{22} - собственные потокосцепления;

Ψ_{12} и Ψ_{21} - взаимные потокосцепления.

Для линейной цепи $M_{12} = M_{21} = M$.

Единицей измерения взаимной индуктивности M , как и собственной индуктивности L , является генри (Гн).

Степень индуктивной связи двух катушек характеризуется коэффициентом связи k , который находят из соотношения

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.
 \tag{6.2}$$

При изменении тока только в первой катушке во второй наводится ЭДС

$$e_{21} = -w_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M \frac{di_1}{dt}.
 \tag{6.3}$$

Точно так же при изменении тока только во второй катушке в первой наводится ЭДС

$$e_{12} = -w_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M \frac{di_2}{dt}.
 \tag{6.4}$$

В том случае, когда по обеим катушкам протекают токи i_1 и i_2 , полное потокосцепление каждой катушки представляет собой алгебраическую сумму потокосцеплений, обусловленных собственной и взаимной индуктивностями:

$$\begin{aligned}
 \Psi_1 &= \Psi_{11} \pm \Psi_{12} = L_1 i_1 \pm M i_2, \\
 \Psi_2 &= \Psi_{22} \pm \Psi_{21} = L_2 i_2 \pm M i_1.
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

Знак «плюс» соответствует согласному включению катушек, а знак «минус» - встречному включению.

Если катушки обладают активными сопротивлениями (r_1 и r_2), то мгновенные напряжения на их зажимах находят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
 u_1 &= r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt} = u_{1r} + u_{1L} \pm u_{1M}; \\
 u_2 &= r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt} = u_{2r} + u_{2L} \pm u_{2M}
 \end{aligned} \right\}
 \tag{6.6}$$

Комплексная форма этих уравнений

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= (r_1 + j\omega L_1)I_1 \pm j\omega M I_2 = \underline{Z}_1 I_1 \pm \underline{Z}_M I_2; \\ \underline{U}_2 &= (r_2 + j\omega L_2)I_2 \pm j\omega M I_1 = \underline{Z}_2 I_2 \pm \underline{Z}_M I_1, \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

где $\underline{Z}_1 = r_1 + j\omega L_1 = r_1 + jx_1$ – комплексное сопротивление первой катушки;

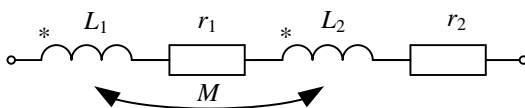
$\underline{Z}_2 = r_2 + j\omega L_2 = r_2 + jx_2$ – комплексное сопротивление второй катушки;

$\underline{Z}_M = j\omega M = jx_M$ – сопротивление индуктивной связи.

Зажимы двух индуктивно связанных катушек называют одноименными, если при одинаковом направлении токов относительно этих зажимов потоки самоиндукции и взаимной индукции суммируются. На электрических схемах одноименные зажимы обозначаются точками (\cdot), звездочками ($*$) или другим образом.

Последовательное соединение катушек. Как отмечалось выше, возможны два вида включения катушек – согласное (рисунок 6.2, а) и встречное (рисунок 6.2, б).

а)



б)

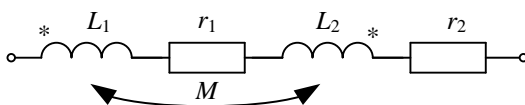


Рисунок 6.2 - Схемы последовательного соединения индуктивно связанных катушек: а - согласное включение; б - встречное включение

В зависимости от способа включения эквивалентное сопротивление последовательно соединенных катушек

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{\text{согл}} &= (r_1 + r_2) + j\omega(L_1 + L_2) + j2\omega M = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + 2\underline{Z}_M, \\ \underline{Z}_{\text{встр}} &= (r_1 + r_2) + j\omega(L_1 + L_2) - j2\omega M = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M. \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

Из этих соотношений видно, что $|\underline{Z}_{\text{согл}}| > |\underline{Z}_{\text{встр}}|$, $|\underline{Z}_{\text{согл}} - \underline{Z}_{\text{встр}}| = 4Z_M = 4x_M = 4\omega M$.

Этим обстоятельством можно воспользоваться для определения опытным путем одноименных зажимов индуктивно связанных катушек и численного значения M :

$$M = \frac{|Z_{\text{согл}} - Z_{\text{встр}}|}{4\omega} = \frac{L_{\text{согл}} - L_{\text{встр}}}{4}, \quad (6.9)$$

где $L_{\text{согл}} = L_1 + L_2 + 2M$ эквивалентная индуктивность при согласном включении катушек;
 $L_{\text{встр}} = L_1 + L_2 - 2M$ эквивалентная индуктивность при встречном включении катушек.

Параллельное соединение катушек [1]. При согласном включении катушек (рисунок 7.3, а) эквивалентное комплексное соединение цепи

$$\underline{Z}_{\text{согл}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M}. \quad (6.10)$$

Если катушки включены встречно (рисунок 6.3, б), то эквивалентное сопротивление параллельных ветвей

$$\underline{Z}_{\text{встр}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + 2\underline{Z}_M}. \quad (6.11)$$

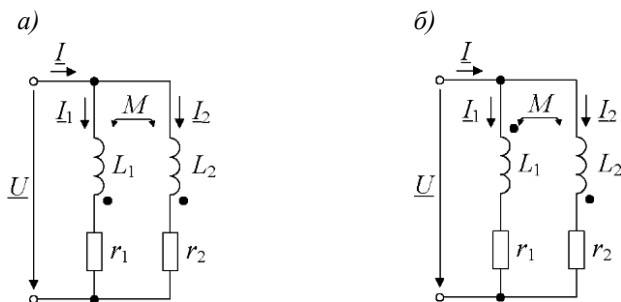


Рисунок 6.3 - Схемы параллельного соединения индуктивно связанных катушек:
 а - согласное включение; б - встречное включение

Требуется: исследовать цепи при последовательном и параллельном соединениях индуктивно связанных катушек, построить топографические и векторные диаграммы.

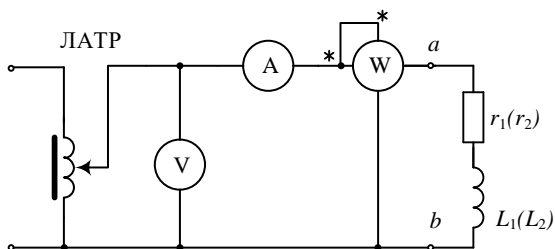
Оборудование и приборы

Индуктивные катушки на общем каркасе, ваттметр, амперметры, ЛАТР.

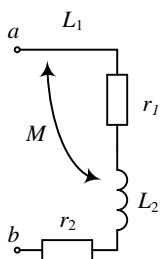
Схема электрической цепи

Исследования, предусмотренные в данной лабораторной работе, проводятся с использованием электрической схемы (рисунок 6.4), в которой по мере выполнения отдельных этапов меняется ее правая часть (относительно точек a и b).

а)



б)



в)

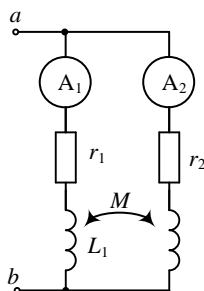


Рисунок 6.4 - Схемы исследуемых электрических цепей:

a – схема для измерения параметров катушки;

$б$ - схема последовательного соединения катушек;

$в$ - схема параллельного соединения катушек

Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь (см. рисунок 6.4, a), подключая к зажимам a и b поочередно катушки, и определить их параметры (r_1, L_1, r_2, L_2) по показаниям измерительных приборов. Все измерения удобно проводить при токе $I = 1$ А. Результаты измерений и расчета внести в таблицу 6.1.

Расчетные формулы:

$$Z = \frac{U}{I}; r = \frac{P}{I^2}; x = \sqrt{Z^2 - r^2}; L = \frac{x}{2\pi f} \quad (6.12)$$

Таблица 6.1 - Экспериментальные и расчетные данные для определения параметров катушки

Катушки	Данные опыта			Данные расчета			
	U	I	P	Z	r	x	L
	В	А	Вт	Ом			Гн
Первая							
Вторая							

2. Собрать цепь с последовательным соединением катушек (см. рисунок 6.4, б), определить одноименные зажимы и обозначить их. Провести исследование цепи при согласном и встречном включениях катушек. Результаты измерений и расчета внести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 - Экспериментальные и расчетные данные при последовательном соединении индуктивно связанных катушек

Включение катушек	Эксперимент			Расчёт				Моделирование		
	U	I	P	Z	r	x	L	U	I	P
	В	А	Вт	Ом			Гн	В	А	Вт
Согласное										
Встречное										

По данным таблицы 6.2 определить взаимную индуктивность M , коэффициент связи и построить топографические и векторные диаграммы для согласного и встречного включений катушек.

3. Собрать в Multisim схему с последовательным соединением катушек (рисунок 6.5). Параметры катушек взять из таблицы 7.1. Катушки L_2 и L_3 моделируют состояние реальной катушки L_2 при различных способах её включения с катушкой L_1 . Для создания взаимной индуктивности, в рабочее поле программы необходимо добавить компонент `INDUCTOR_COUPLING` (связанная индуктивность). Находится данный компонент в группе «Пассивные компоненты», раздел «Трансформаторы». В свойствах данного компонента необходимо указать, какие катушки индуктивности должны быть индуктивно связаны и коэффициент связи. Выполнить моделирование при разных положениях ключа $S1$ и определить, при каком положении ключа будет согласное

включение, а при каком встречное. Результаты записать в таблицу 6.2 и сравнить с результатами измерений.

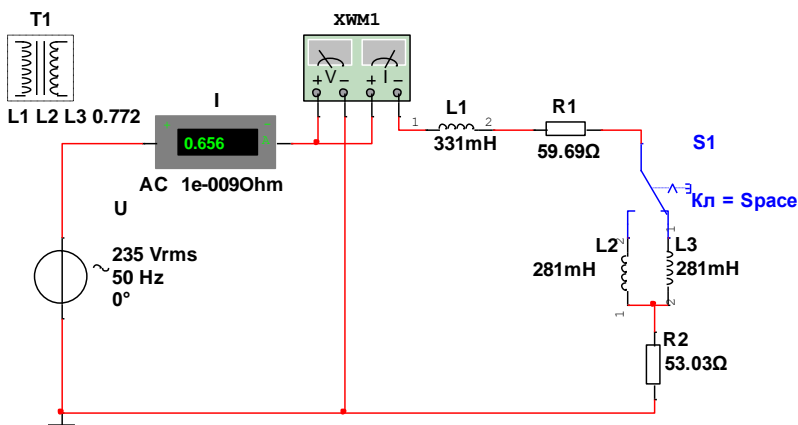


Рисунок 7.5 - Схема моделирования последовательного соединения катушек

4. Используя данные п. 1 и п. 2, для заданного напряжения U рассчитать токи I_1, I_2, I в цепи при параллельном соединении катушек (для случаев согласного и встречного включений), а также активные мощности P_1 и P_2 каждой ветви. Результаты расчета внести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 - Расчетные данные при параллельном соединении индуктивно связанных катушек

Включение катушек	Расчёт					
	U	I_1	I_2	I	P_1	P_2
	В	А			Вт	
Согласное						
Встречное						

5. Собрать цепь с параллельным соединением катушек (см. рисунок 6.4, в) и при том же напряжении, что и в п. 3, провести исследование цепи для согласного и встречного включений катушек. Результаты измерений внести в таблицу 6.4.

6. Собрать в Multisim схему с параллельным соединением катушек (рисунок 6.6). Выполнить моделирование при разных положениях ключа S1 и определить, при каком положении ключа будет согласное включение, а при каком встречное.

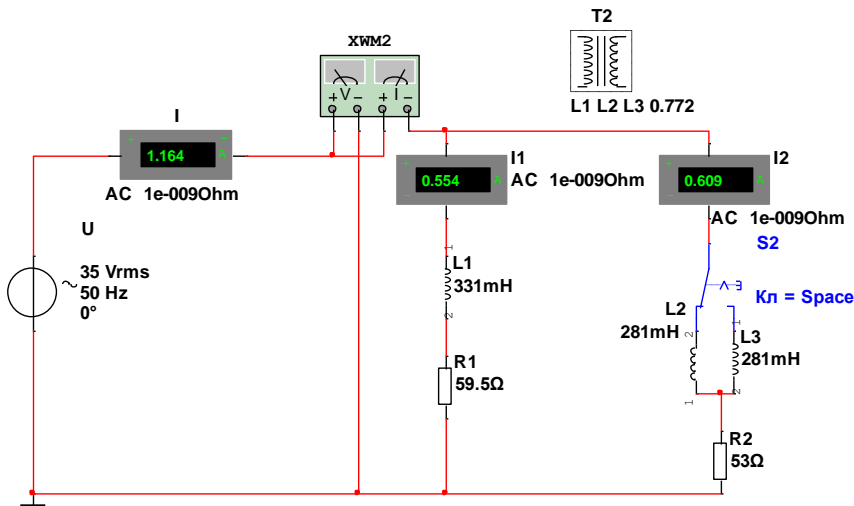


Рисунок 6.6 - Схема моделирования последовательного соединения катушек
 Результаты записать в таблицу 6.4 и сравнить с результатами измерений.

Таблица 6.4 - Экспериментальные данные при параллельном соединении индуктивно связанных катушек

Включение катушек	Эксперимент					Моделирование				
	U	I_1	I_2	I	P	U	I_1	I_2	I	P
	В	А		ВТ	В	А		ВТ		
Согласное										
Встречное										

7. По данным п. 3 построить топографические диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов, при согласном и встречном включениях катушек.

Контрольные вопросы

- 1 Какие катушки называют индуктивно связанными?
- 2 Как опытным путем определить одноименные зажимы двух индуктивно связанных катушек?
- 3 Пояснить, влияют ли выбранные положительные направления токов в индуктивно связанных катушках на характер их включения - встречное или согласное?
- 4 Какова связь между направлениями токов и напряжений взаимной индукции в индуктивно связанных катушках?
- 5 Как опытным путем определить коэффициент магнитной связи двух индуктивно связанных катушек?

6 Пояснить, как изменится активная мощность, потребляемая цепью, состоящей из двух последовательно соединенных индуктивно связанных катушек, при увеличении коэффициента магнитной связи между катушками (для случаев согласного и встречного включений катушек) при неизменном входном напряжении.

7 При каком соединении индуктивно связанных катушек в цепи проявляется емкостной эффект?

7 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Краткие сведения из теории

Трансформатор - статическое устройство, действие которого основано на явлении взаимной индукции. Он предназначен для преобразования токов и напряжений, развязки и согласования отдельных участков цепи. В простейшем случае трансформатор состоит из двух электрически не соединенных и неподвижных друг относительно друга катушек, называемых обмотками трансформатора.

Электромагнитные процессы в трансформаторе без ферромагнитного сердечника описываются линейными уравнениями, так как он обладает линейными характеристиками. Такие трансформаторы условно называются воздушными и применяются в широком диапазоне частот в устройствах автоматики, измерительной техники, связи.

Обмотка трансформатора, присоединяемая к источнику питания, называется первичной, а обмотка, к которой подключается нагрузка, - вторичной. Соответственно, напряжения и токи на выводах этих обмоток называются первичными и вторичными. Схема замещения трансформатора представлена на рисунке 7.1. Обмотки однофазного трансформатора всегда включены встречно, т.е. их собственные и взаимные потоки направлены навстречу друг другу.

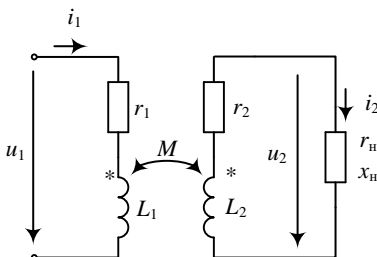


Рисунок 7.1 - Схема замещения воздушного трансформатора

При выбранных положительных направлениях токов уравнения электрического равновесия воздушного трансформатора имеют вид

$$\begin{aligned} r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} &= u_1; \\ r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + u_2 &= 0, \end{aligned} \quad (7.1)$$

где r_1 и r_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток;

L_1 и L_2 – индуктивности первичной и вторичной обмоток;

M – взаимная индуктивность катушек;

u_2 – напряжение на нагрузке.

При синусоидальной форме напряжений и токов трансформатора уравнения (8.1) можно записать в комплексной форме:

$$\begin{aligned} (r_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega M I_2 &= \underline{U}_1; \\ (r_2 + j\omega L_2)I_2 - j\omega M I_1 + \underline{U}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (7.2)$$

При известных значениях параметров трансформатора (r_1, r_2, L_1, L_2 и M), заданной нагрузке ($Z_H = Z_H e^{j\varphi_H}$) и найденных расчетным или экспериментальным путем действующих значений токов I_1 и I_2 можно построить векторную диаграмму токов и напряжений для цепей первичной и вторичной обмоток.

На рисунке 7.2 приведена векторная диаграмма для активно-индуктивной нагрузки ($\varphi_H > 0$) трансформатора.

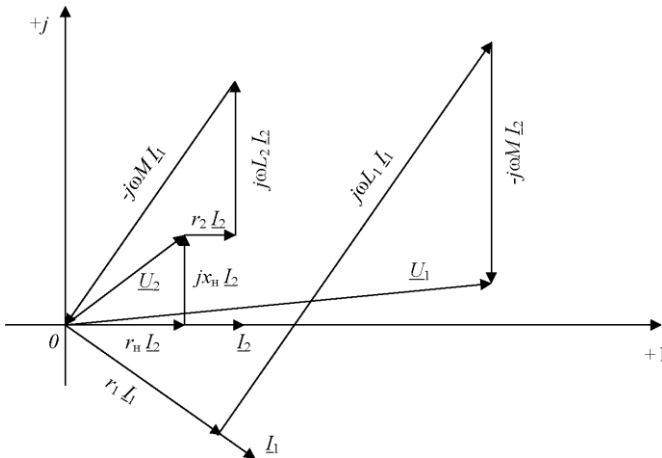


Рисунок 7.2 - Векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений для воздушного трансформатора

Диаграмму строят следующим образом. Для выбранных масштабов векторов токов (m_i) и напряжений (m_u) откладываем по оси +1 вектор тока \underline{I}_2 , а затем векторы $r_1 \underline{I}_2$, $jx_n \underline{I}_2$, $r_2 \underline{I}_2$ и $j\omega L_2 \underline{I}_2$. Соединив конец вектора $j\omega L_2 \underline{I}_2$ с началом вектора $r_1 \underline{I}_2$, получим вектор $(-j\omega M \underline{I}_1)$. Разделив напряжение $\omega M \underline{I}_1$ на ωM , определим значение тока \underline{I}_1 . Вектор \underline{I}_1 отложим под углом 90° (в сторону опережения) к вектору $(-j\omega M \underline{I}_1)$. Затем строим векторы $r_1 \underline{I}_1$, $j\omega L_1 \underline{I}_1$ и $(-j\omega M \underline{I}_2)$. Их сумма равна вектору напряжения \underline{U}_1 .

Оборудование и приборы

Трансформатор без ферромагнитного сердечника; амперметры; вольтметры; ваттметр; резисторы, конденсатор, катушка индуктивности, используемые в качестве нагрузки; ЛАТР.

Схема электрической цепи

В работе исследуется электрическая цепь, схема которой представлена на рисунке 7.3.

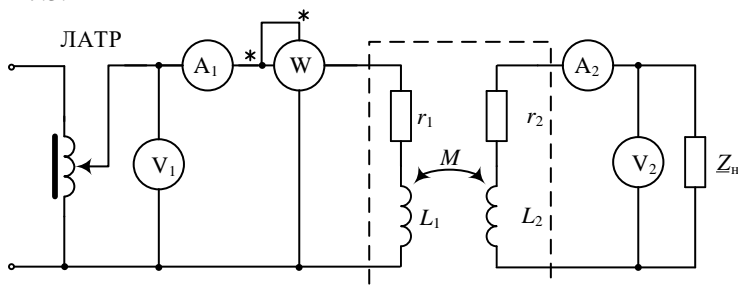


Рисунок 7.3 - Схема исследуемой цепи

Воздушный трансформатор (на схеме выделен пунктиром) образован из двух катушек, намотанных на общий каркас из немагнитного материала. В работе следует использовать катушки, параметры которых (r_1, L_1, r_2, L_2 и M) были определены в лабораторной работе № 6. Одну из катушек можно рассматривать в качестве первичной обмотки трансформатора, а другую - как вторичную. Цепь питается от сети переменного тока через ЛАТР.

Требуется: экспериментально определить параметры трансформатора с линейными характеристиками и построить топографические и векторные диаграммы для различных режимов его работы.

Порядок выполнения работы

1. По заданным значениям первичного напряжения U_1 и нагрузки (r_n, x_n) рассчитать показания измерительных приборов в схеме на рисунке 7.3.

2. Собрать электрическую цепь (см. рисунок 7.3), подав на вход трансформатора напряжение U_1 и подключив нагрузку (r_H, x_H), указанные в п. 1. Снять показания приборов. Результаты расчета (п. 1) и измерений (п. 2) внести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 - Результаты эксперимента, расчёта и моделирования

Задано											
U_1	r_H	x_H	r_1	x_1	r_2	x_2	x_M				
В	Ом										
Расчёт			Измерения				Моделирование				
I_1	I_2	U_2	P	I_1	I_2	U_2	P	I_1	I_2	U_2	P
А		В	Вт	А		В	Вт	А		В	Вт

3. Построить в масштабе по данным п. 2 векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений трансформатора.

4. Собрать схему в программе Multisim (рисунок 7.4). Для моделирования работы воздушного трансформатора, в рабочее поле программы необходимо добавить компонент COUPLED_INDUCTORS. Находится данный компонент в группе «Пассивные компоненты», раздел «Трансформаторы». В свойствах данного компонента необходимо указать значения индуктивностей и коэффициент связи. Значения сопротивлений, индуктивностей и напряжения U_1 из таблицы 7.1 и лабораторной работы №6.

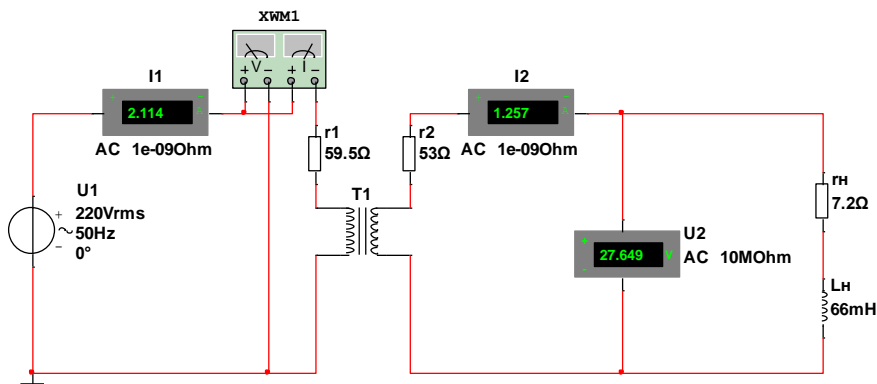


Рисунок 8.4 - Схема моделирования цепи с воздушным трансформатором

Контрольные вопросы

- 1 Почему исследуемый трансформатор называется воздушным?
- 2 Какому включению обмоток трансформатора (согласному или встречному) соответствует диаграмма на рисунке 8.2?
- 3 Запишите формулы для определения значения активной мощности, передаваемой из первичной обмотки трансформатора во вторичную.

8 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ КАТУШКОЙ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРОМ (РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ)

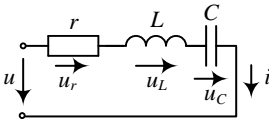
Краткие сведения из теории

Пусть в цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов r , L и C (рисунок 8.1, а), протекает ток $i = I_m \sin \omega t$.

На основании второго закона Кирхгофа найдем мгновенное напряжение u , приложенное к цепи:

$$u = u_r + u_L + u_C = ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt. \quad (8.1)$$

а)



б)

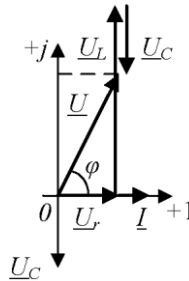


Рисунок 8.1 - Последовательная r, L, C -цепь: а - электрическая схема; б - векторная диаграмма

В комплексной форме для действующих значений тока и напряжения уравнение (8.1) примет вид

$$\underline{U} = r\underline{I} + j\omega L\underline{I} + \frac{1}{j\omega C}\underline{I} = [r + j(x_L - x_C)]\underline{I} = (r + jx)\underline{I} = \underline{Z}\underline{I}, \quad (8.2)$$

где $\underline{Z} = r + jx = Ze^{j\varphi}$ - комплексное сопротивление цепи;

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} \text{ - полное сопротивление цепи;}$$

$$\varphi = \arctg[(x_L - x_C)/r];$$

$x = x_L - x_C$ - реактивное сопротивление цепи.

Если $x_L > x_C$, то $\varphi > 0$. На рисунке 8.1, б приведена векторная диаграмма напряжений, соответствующая этому случаю. Если $x_L < x_C$, то $\varphi < 0$, т. е. входное напряжение u отстает по фазе от тока i на угол φ . При равенстве индуктивного x_L и емкостного x_C сопротивлений ($x_L - x_C = 0$) в цепи возникает особый режим, называемый электрическим резонансом. В этом режиме значения противоположных по фазе напряжений u_L и u_C на индуктивности и емкости равны (рисунок 8.2), поэтому резонанс в рассматриваемой цепи называют резонансом напряжений. В радиотехнике неразветвленную электрическую цепь, состоящую из элементов r, L и C , называют последовательным колебательным контуром. Полное сопротивление цепи Z при $x = 0$ минимально: $Z = \sqrt{r^2 + x^2} = r$, а ток I при заданном напряжении U достигает наибольшего значения, равного U/r . Если $x_L = x_C \gg r$, то при резонансе напря. жения U_L и U_C значительно превосходят входное напряжение U .

Из условия $\omega L = 1/(\omega C)$ следует, что резонанс может быть достигнут изменением либо частоты напряжения питания, либо параметров цепи - L или C .

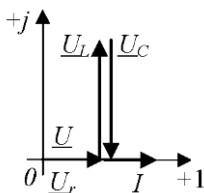


Рисунок 9.2 – Векторная диаграмма для режима резонанса

Угловая частота, при которой наступает резонанс, для режима резонанса называется резонансной угловой частотой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8.3)$$

Запишем условие резонанса с учетом (9.3)

$$\omega_0 L = 1/(\omega_0 C) = \sqrt{L/C} = \rho. \quad (8.4)$$

Величина ρ называется характеристическим сопротивлением колебательного контура.

Отношение напряжения на индуктивном или емкостном элементе к напряжению питания называют добротностью контура:

$$Q = U_L/U = U_C/U = \rho/r. \quad (8.5)$$

Величина, обратная добротности $d = 1/Q$, называется затуханием контура.

При резонансе реактивная мощность Q цепи равна нулю, а полная мощность S равна активной мощности:

$$P = S = UI. \quad (8.6)$$

Если резонанс достигается путем изменения C при неизменных значениях L и f , то значение C , соответствующее этому режиму, определяется соотношением

$$C_{\text{рез}} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}. \quad (8.7)$$

Требуется: экспериментально исследовать электрический резонанс в последовательном колебательном контуре.

Оборудование и приборы

Катушка индуктивности, конденсатор переменной емкости, амперметр, вольтметры, ваттметр, ЛАТР.

Схема электрической цепи

Питание исследуемой цепи (рисунок 8.3) осуществляется от сети переменного тока частотой $f = 50$ Гц через ЛАТР. Подводимое к цепи напряжение измеряется вольтметром V , напряжение на зажимах катушки вольтметром V_1 и напряжение на конденсаторе - вольтметром V_2 . Режим резонанса в цепи достигается путем изменения емкости C .

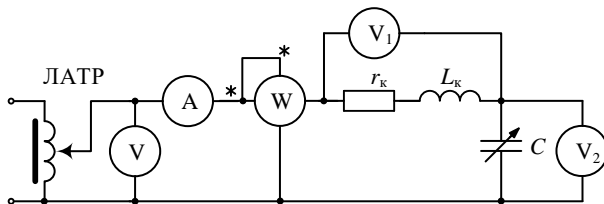


Рисунок 8.3 - Схема исследуемой цепи

Порядок выполнения работы

1. По известным значениям частоты f переменного тока и индуктивности L_k катушки найти значения емкости $C_{рез}$, при которой в цепи будет резонанс напряжений. Вычислить характеристическое сопротивление ρ , добротность Q и затухание d контура.

2. При известных параметрах r_k и x_k катушки и заданном значении входного напряжения U рассчитать значения сопротивлений x_C, x, Z , тока I ; напряжений U_r, U_L , показаний вольтметров U_1, U_2 ; мощностей S, P, Q , коэффициента мощности $\cos\varphi$ и угла сдвига фаз φ в зависимости от емкости C конденсатора.

Указание. При выполнении расчетов взять три значения $C < C_{рез}$, $C = C_{рез}$ и три значения $C > C_{рез}$. Расчетные формулы:

$$C_{рез} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_k}; x_C = \frac{1}{2\pi f C}; x = x_k - x_C; Z = \sqrt{r_k^2 + x^2};$$

$$I = U/Z; U_r = rI; U_L = x_k I; U_1 = \sqrt{U_r^2 + U_L^2}; U_2 = x_C I;$$

$$P = I^2 r_k = UI \cos\varphi; Q = UI \sin\varphi; S = UI; \varphi = \arctg[(x_k - x_C)/r_k]. \quad (9.8)$$

Результаты расчетов внести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 - Расчетные данные для исследуемой цепи

Номер опыта	C	x_C	x	Z	I	U_r	U_L	U_1	U_2	S	P	Q	$\cos\varphi$	φ
	мкФ	Ом			А	В			ВА	Вт	вар	-	град	
1														
2														

Построить в масштабе графики зависимостей $I(C), U_1(C), U_2(C), Z(C), \cos\varphi(C), \varphi(C)$.

3. Собрать электрическую цепь (см. рисунок 9.3) и, поддерживая неизменным входное напряжение, равное заданному в п. 2, снять показания измерительных приборов при различных режимах цепи: при $C < C_{рез}$ (для трех значений C), $C = C_{рез}$ и $C > C_{рез}$ (для трех значений C). Вычислить для всех режимов цепи значения величин $Z, r, x, S, Q, \cos\varphi$.

Результаты опытов и расчетов внести в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 - Экспериментальные данные для исследуемой цепи

Номер опыта	C	Измерено				Вычислено					Моделирование					
		I	U ₁	U ₂	P	Z	r	x	S	Q	cosφ	I	U ₁	U ₂	P	cosφ
	мкФ	А	В	Вт	Ом			ВА	вар	-	А	В	Вт			
1																
2																

Построить в масштабе графики полученных экспериментально зависимостей $I(C)$, $U_1(C)$, $U_2(C)$ и $\cos\varphi(C)$ в тех же осях координат, что и в п. 2.

4. Построить по данным п. 2 векторные диаграммы напряжений для трех случаев: $C < C_{рез}$, $C = C_{рез}$, $C > C_{рез}$.

5. Собрать схему в программе Multisim (рисунок 8.4). (рисунок 5.7). указать параметры элементов из исследуемой цепи и выполнить моделирование.

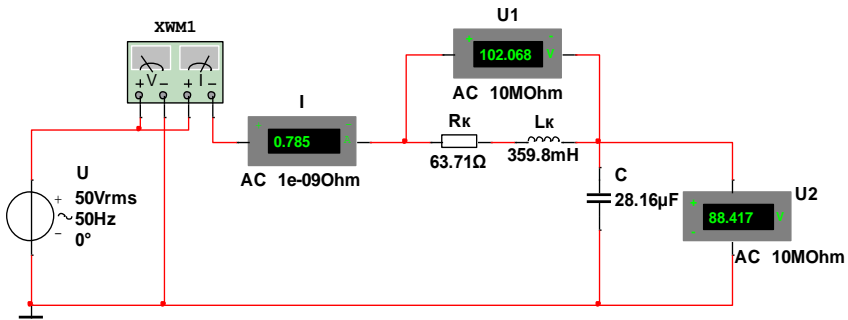


Рисунок 8.4 - Схема моделирования исследуемой цепи

Результаты записать в таблицу 8.2 и сравнить с результатами измерений.

Контрольные вопросы

1 Почему резонанс в последовательном колебательном контуре называется резонансом напряжений?

2 Объясните энергетические процессы в последовательном колебательном контуре при резонансе?

3 Как изменяется ток в последовательном колебательном контуре (см. рисунок 9.1) в случае увеличения емкости от $C = 0$ до $C \rightarrow \infty$?

4 Объясните, почему при проведении эксперимента в режиме резонанса показание вольтметра V_1 превышает показание вольтметра V_2 ?

5 Если в последовательном колебательном контуре (см. рисунок 9.1) действующее значение напряжения U_L на индуктивности превышает напряжение

U_C на емкости, то в какую сторону следует изменять емкость, чтобы поменять это соотношение на противоположное?

9 ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ВЕТВЕЙ (РЕЗОНАНС ТОКОВ)

Краткие сведения из теории

Рассмотрим электрическую цепь (рисунок 9.1), в которой две параллельные ветви с параметрами r_1, L и r_2, C подключены к источнику синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$. Такую цепь называют параллельным колебательным контуром. Токи в ветвях:

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{U_m}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \varphi_1); \\ i_2 &= \frac{U_m}{\sqrt{r_2^2 + (1/\omega C)^2}} \sin(\omega t + \varphi_2), \end{aligned} \quad (9.1)$$

где $\varphi_1 = \arctg(\omega L/r_1)$ - разность начальных фаз напряжения и тока в активно-индуктивной ветви;

$\varphi_2 = \arctg(1/\omega C r_2)$ - разность начальных фаз тока и напряжения в активно-емкостной ветви.

На входе цепи протекает ток i , равный сумме синусоидальных токов i_1 и i_2 [1]:

$$i = i_1 + i_2 = I_m \sin(\omega t - \varphi). \quad (9.2)$$

Запишем уравнения (9.1) и (9.2) в комплексной форме для действующих значений синусоидальных величин, приняв нулевую начальную фазу напряжения и ($\underline{U} = U$).

Комплексные сопротивления ветвей:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= r_1 + j\omega L = r_1 + jx_L = Z_1 e^{j\varphi_1}; \\ \underline{Z}_2 &= r_2 + 1/j\omega C = r_2 - jx_C = Z_2 e^{-j\varphi_2}. \end{aligned} \quad (9.3)$$

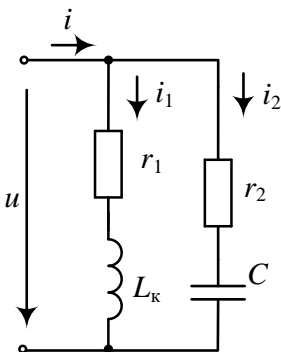


Рисунок 10.1 Параллельный резонансный контур

Комплексные проводимости ветвей:

$$\begin{aligned}\underline{Y}_1 &= \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{r_1}{r_1^2 + x_L^2} - j \frac{x_L}{r_1^2 + x_L^2} = g_1 - jb_1 = Y_1 e^{-j\varphi_1} \\ \underline{Y}_2 &= \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{r_2}{r_2^2 + x_C^2} + j \frac{x_C}{r_2^2 + x_C^2} = g_2 + jb_2 = Y_2 e^{j\varphi_2},\end{aligned}\quad (9.4)$$

где g_1 и g_2 – активные проводимости ветвей;

b_1 и b_2 – реактивные проводимости ветвей.

Токи в ветвях

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= U \underline{Y}_1 = U g_1 - j U b_1 = I_{1a} - j I_{1p}; \\ \underline{I}_2 &= U \underline{Y}_2 = U g_2 + j U b_2 = I_{2a} + j I_{2p},\end{aligned}\quad (9.5)$$

где I_{1a} и I_{2a} – активные составляющие токов ветвей;

I_{1p} и I_{2p} – реактивные составляющие токов ветвей.

Эквивалентная комплексная проводимость цепи равна сумме комплексных проводимостей параллельных ветвей:

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = (g_1 + g_2) - j(b_1 - b_2) = g - jb = Y e^{-j\varphi},\quad (9.6)$$

где $g = g_1 + g_2$ – активная проводимость цепи;

$b = b_1 - b_2$ – реактивная проводимость цепи;

$Y = \sqrt{g^2 + b^2}$ – полная проводимость цепи;

$\varphi = \arctg \frac{b_1 - b_2}{g}$ – разность начальных фаз напряжения и тока.

Ток на входе цепи

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = I_a - j I_p,\quad (9.7)$$

где $I_a = I_{1a} + I_{2a}$ – активная составляющая входного тока цепи;

$I_p = I_{1p} - I_{2p}$ – реактивная составляющая входного тока цепи.

На рисунке 9.2 представлена векторная диаграмма токов, построенная для случая, когда $I_{p1} > I_{p2}$. Входной ток \underline{I} отстает от напряжения \underline{U} на угол φ .

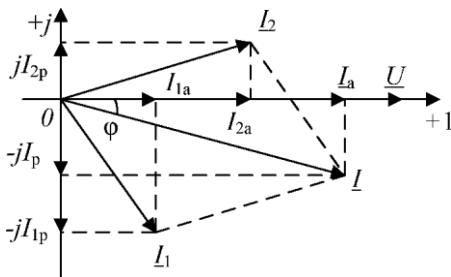


Рисунок 9.2 - Векторная диаграмма для параллельного резонансного контура

Если $I_{1p} = I_{2p}$, то реактивная составляющая тока $I_p = 0$ и ток I совпадает по фазе с напряжением $\underline{U}(\varphi = 0)$. В цепи возникает резонансный режим, который обусловлен взаимной компенсацией реактивных составляющих токов I_{1p} и I_{2p} параллельных ветвей. Поэтому такой режим параллельного контура называют резонансом токов.

Условие возникновения резонанса токов является равенство нулю реактивной проводимости цепи:

$$b = b_1 - b_2 = 0 \text{ или } b_1 = b_2. \quad (9.8)$$

Условие резонанса токов можно записать через соответствующие параметры электрической цепи:

$$\frac{\omega L}{r_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{1/\omega C}{r_2^2 + (1/\omega C)^2}. \quad (9.9)$$

Изменением одной из величин (ω, r_1, r_2, L, C) при постоянных значениях остальных четырех резонанс не всегда может быть достигнут. Он будет отсутствовать, если значение изменяемой величины при ее определении из уравнения (10.9) получится мнимым или комплексным.

Найдем значение резонансной угловой частоты

$$\omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 C - L}{r_2^2 C - L}} = \omega_0 \sqrt{\frac{r_1^2 - \rho^2}{r_2^2 - \rho^2}}, \quad (9.10)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансная частота L, C – контура без потерь ($r_1 = r_2 = 0$);

$\rho = \sqrt{L/C}$ – характеристическое сопротивление контура.

Резонанс возможен, если r_1 и r_2 оба больше или оба меньше ρ . При невыполнении этого условия резонанс невозможен.

При $r_1 = r_2$ резонансная частота $\omega'_0 = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, т.е. такая же, как и при резонансе в последовательном колебательном контуре. Если $r_1 = r_2 = \rho$, резонанс наблюдается при любой частоте.

При резонансе токов полная проводимость Y контура минимальна ($Y = g$), т. е. входное сопротивление $Z_{вх} = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ достигает максимума, в силу чего входной ток будет минимален и равен $I_{рез} = Ug$. Так как при этом $\varphi = 0$, а значит, $\cos\varphi = 1$, то активная мощность равна полной мощности цепи $P = UI = S$. Реактивная мощность при резонансе токов равна нулю: $Q = UI\sin\varphi = 0$.

Требуется: экспериментально исследовать режимы цепи синусоидального тока при параллельном соединении ветвей с L и C ; установить условия возникновения резонанса токов; построить векторные диаграммы.

Оборудование и приборы

Катушка индуктивности, реостат, конденсатор переменной емкости, амперметры, ваттметр, ЛАТР.

Схема электрической цепи

В работе исследуется электрическая цепь, схема которой дана на рисунке 9.3. Она состоит из катушки с параметрами r_k и L_k , реостата с сопротивлением r_2 и конденсатора, изменяя емкость C которого в цепи осуществляют режим электрического резонанса. Его наступление определяется по наименьшему показанию амперметра A .

Цепь подключается к сети переменного тока частотой $f = 50$ Гц через ЛАТР.

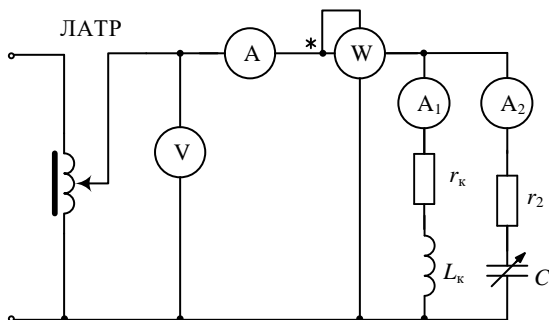


Рисунок 9.3 - Схема исследуемой цепи

Порядок выполнения работы

1. Для заданных значений параметров цепи r_2 , r_k и L_k найти значение емкости $C_{рез}$, при которой в цепи будет резонанс токов.

2. Рассчитать для заданного входного напряжения U показания измерительных приборов в схеме на рисунке 10.3 в зависимости от емкости конденсатора C . Найденные в результате расчета значения величин $Z, Y, g, b, I_1, I_2, I, P, \varphi$ внести в таблицу 10.1.

Указание. При выполнении расчетов взять 3 значения $C < C_{рез}, C = C_{рез}$ и 3 значения $C > C_{рез}$.

Расчетные формулы:

$$\begin{aligned}
 x_k &= 2\pi f L_k; x_C = 1/2\pi f C; Z_1 = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}; Z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_C^2}; \\
 Y_1 &= 1/Z_1; Y_2 = 1/Z_2; g_1 = r_k/Z_1^2; b_1 = x_k/Z_1^2; \\
 g_2 &= r_2/Z_2^2; b_2 = x_C/Z_2^2; g = g_1 + g_2; b = b_1 - b_2; \\
 Y &= \sqrt{g^2 + b^2}; Z = 1/Y; \varphi = \arctg[(b_1 - b_2)/g]; \\
 I_1 &= UY_1; I_2 = UY_2; I = UY; P = UI \cos \varphi.
 \end{aligned}
 \tag{9.11}$$

Таблица 9.1 - Расчетные данные для исследуемой цепи

$U =$; $r_k =$; $L_k =$; $r_2 =$

Номер опыта	C	Z	Y	g	b	I_1	I_2	I	P	φ	$\cos \varphi$
	мкФ	Ом	См			А			Вт	град	-
1											
2											

Построить в масштабе графики зависимостей $I(C), Z(C), Y(C), \varphi(C)$ и $\cos \varphi(C)$.

3. Собрать электрическую цепь (см. рисунок 9.3), установить заданное в п.2 входное напряжение U и, поддерживая его постоянным, снять показания измерительных приборов при различных значениях емкости C конденсатора: при $C < C_{рез}$ (для трех значений C), $C = C_{рез}$ и $C > C_{рез}$ (для трех значений C). Вычислить для всех режимов работы цепи значения Z, Y, φ и $\cos \varphi$.

Результаты опытов и расчетов внести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2 - Экспериментальные и расчетные данные для исследуемой цепи

Номер опыта	C	Измерено				Вычислено				Моделирование				
		I_1	I_2	I	P	Z	Y	φ	$\cos \varphi$	I_1	I_2	I	P	$\cos \varphi$
	мкФ	А			Вт	Ом	См	град	-	А			Вт	
1														
2														

Построить в масштабе графики зависимостей $I(C)$, $Z(C)$, $Y(C)$, $\varphi(C)$, $\cos\varphi(C)$ в тех же осях координат, что и в п. 2.

4. Построить векторные диаграммы для трех случаев: $C < C_{рез}$, $C = C_{рез}$ и $C > C_{рез}$.

5. Собрать схему в программе Multisim (рисунок 9.4). Указать параметры элементов из исследуемой цепи и выполнить моделирование.

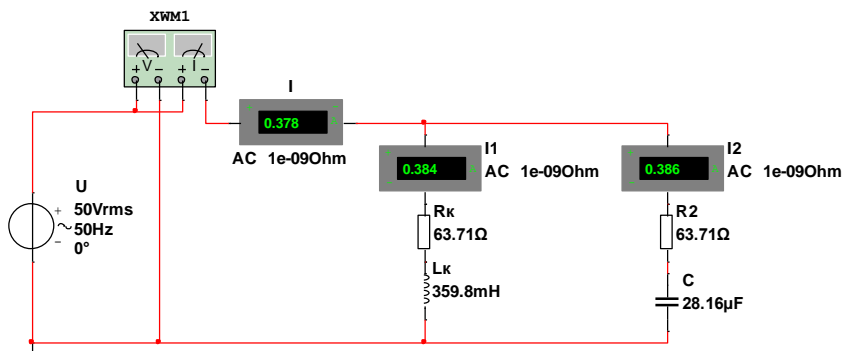


Рисунок 9.4 - Схема исследуемой цепи

Результаты записать в таблицу 9.2 и сравнить с результатами измерений.

Контрольные вопросы

1 Почему резонанс в параллельном колебательном контуре называется резонансом токов?

2 Каким образом при проведении эксперимента определяется наступление режима резонанса?

2 Запишите выражение для проводимости параллельного контура (см. рисунок 10.1) в режиме резонанса при условии $r_2 = 0$?

3 Как должен изменяться ток I в неразветвленной части цепи при параллельном соединении потребителя и батареи конденсаторов в случае увеличения емкости от $C = 0$ до $C \rightarrow \infty$, если потребитель представляет собой активно-индуктивную нагрузку?

4 Почему при проведении эксперимента остаются неизменными показания амперметра A_1 , а показания амперметров A и A_2 (см. рисунок 10.3) меняются?

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ MULTISIM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Программа Multisim – это инструмент, позволяющий собирать и исследовать электрические цепи. Для запуска программы перевести курсор на ярлык Multisim и дважды щелкнуть на его изображении левой кнопкой мыши. На экране монитора откроется рабочее окно программы (рис. П.1).

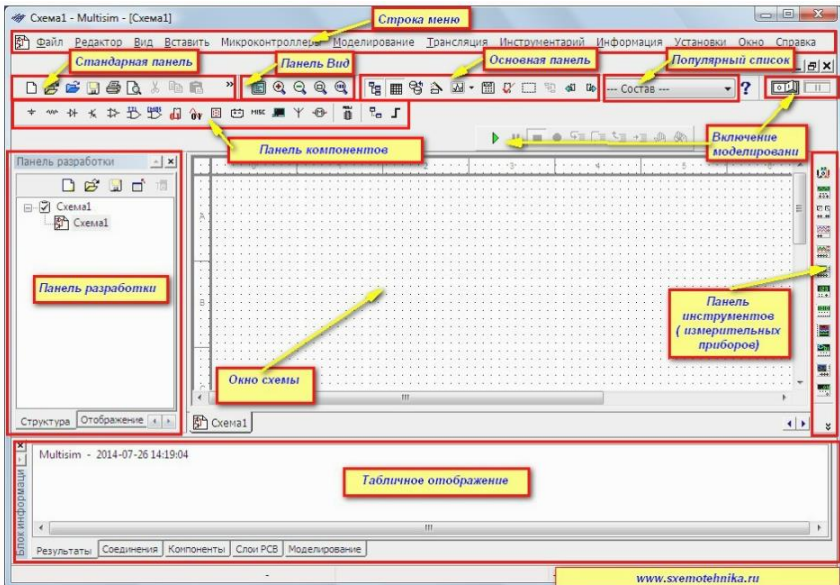


Рисунок П.1 – Рабочее окно программы *Multisim*

В верхней части экрана расположена строка выпадающих меню: «Файл», «Редактор», «Вид», «Вставить», «Микроконтроллеры», «Трансляция», «Инструментарий», «Отчеты», «Установки», «Окно», «Справка», которые содержат много пунктов. – их назначение стандартно для многих *Windows*-приложений. Пункты меню, которые необходимо использовать рассматриваются при описании порядка выполнения каждой лабораторной работы.

Ниже этой строки располагаются панели, на которых имеются группы кнопок, позволяющих вводить команды в программу. Важнейшими панелями являются:

- Стандартная панель;
- Панель «Вид»;

- Основная панель;
- Популярный список;
- Панель компонентов;
- Панель табличного отображения;
- Панель разработки;
- Панель инструментов (измерительных приборов).

Стандартная панель, содержит кнопки быстрого доступа к меню «Файл», такие как «Новый», «Открыть», «Сохранить» и т. д.; Основная панель, включающая кнопки: выбора режима работы, создание пользовательского компонента, запуска постпроцессора и т. д.

Панель моделирования, включает кнопки управления процессом моделирования («Пуск», «Пауза», «Стоп»). Их пиктограммы имеют вид «▶ || ■». Правее находится клавиша выключения моделирования.

Панель «Вид» содержит кнопки масштабирования и доступа к командам меню.

Панель компонентов позволяет выбрать элементы, необходимые для создания электрической цепи. Её вид приведён на рисунке П.2.



Рисунок П.2 – Панель компонентов

Здесь :

1. Источники. Данная группа содержит различные источники постоянного и переменного напряжения и тока;
2. Пассивные компоненты. Данная группа содержит важнейшие пассивные элементы электротехники (резисторы, катушки индуктивности, конденсатора, трансформаторы и т. д.);
3. Диоды. Здесь представлены различные типы выпрямительных и специальных диодов;
4. Транзисторы. В этой группе содержатся различные виды биполярных и полевых транзисторов;
5. Аналоговые компоненты. Группа содержит различные усилители постоянного и переменного тока;
6. Логические микросхемы ТТЛ. Содержатся элементы ТТЛ логики;
7. логические микросхемы CMOS. Элементы КМОП логики;
8. Цифровые микросхемы. Содержатся различные цифровые устройства;
9. Аналого-цифровые компоненты. В группу включены комбинированные элементы;
10. Индикаторы. Представлены измерительные приборы и индикаторы.

11. Компоненты питания;
12. Смешанные компоненты;
13. Переферийные устройства. Содержатся дисплеи, терминалы устройства ввода и вывода информации;
14. ВЧ компоненты;
15. Электромеханические компоненты;
16. Микроконтроллеры.

Центральную часть занимает окно схемы – рабочая зона, в которой собирается исследуемая электрическая цепь

Программа *Multisim* работает с двумя категориями компонентов: реальными (*real*) и виртуальными (*virtual*).

У реальных компонентов есть определенное, неизменяемое значение, соответствующее марке выбранного элемента. Виртуальные в отличие от реальных являются математическими моделями компонентов с любыми произвольными параметрами. Добавление компонентов в схему осуществляются из панели компонентов. Основные группы компонентов, которые будут использоваться в лабораторных работах: «Источники», «Пассивные компоненты» и «Индикаторы».

Панель инструментов содержит – мультиметр, функциональный генератор, ваттметр, осциллограф, 4-х канальный осциллограф, плоттер бode, частотомер, генератор слов, логический преобразователь, логический анализатор, характернограф, измеритель нелинейных искажений, анализатор спектра, панорамный анализатор, измерительный пробник, датчик тока.

Для выполнения лабораторных работ необходимо запустить программу *Multisim* и перенести в рабочую зону все необходимые источники питания, пассивные элементы цепи (резисторы, конденсаторы, трансформаторы и т. д.), измерительные приборы, полупроводниковые элементы.

Перенесение элементов в рабочую зону можно осуществлять в следующей последовательности. Курсором на панели компонентов найти пиктограмму «Источники». Однократным нажатием клавиши мыши открыть контекстное меню этой группы компонентов (рисунок П.3). В открывшемся окне «Компоненты» выбрать компонент «GROUND» и курсором нажать кнопку «OK».

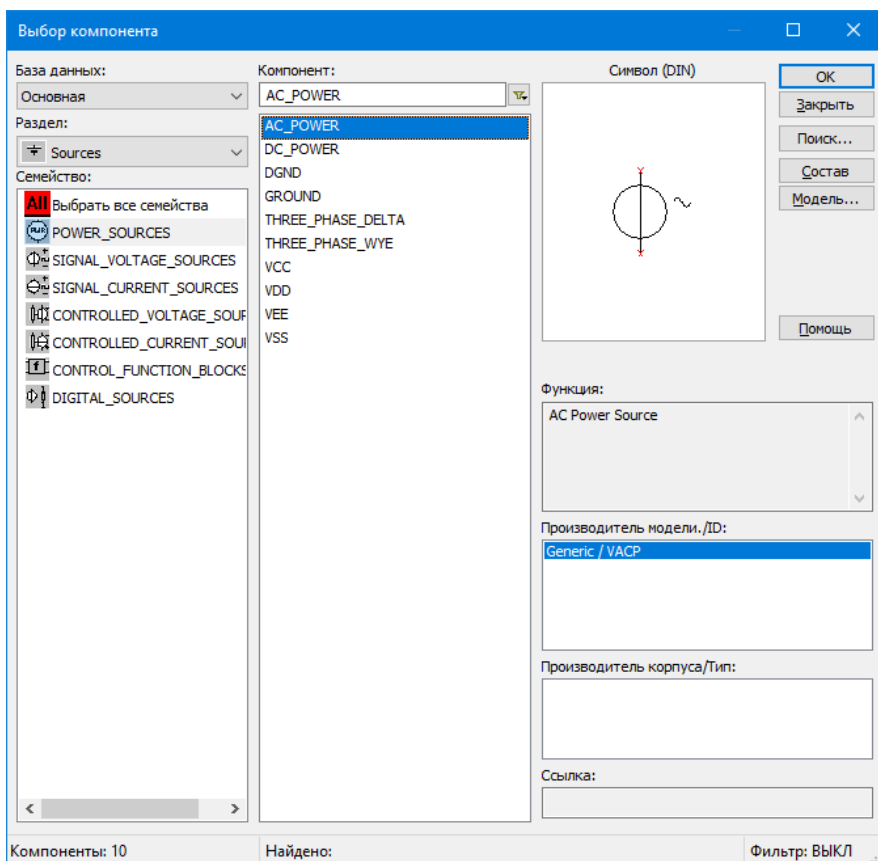


Рисунок П.3 - Контекстное меню группы «Источники»

Открывается рабочая зона, на которой находится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой заземления. Переместить мышью курсор в желаемую точку рабочей зоны и нажать однократно клавишу мыши. Произойдёт закрепление перемещаемой пиктограммы и одновременно открывается контекстное меню группы «Источники». В окне «КОМПОНЕНТЫ» выбрать требуемый для лабораторной работы источник питания (например, постоянной ЭДС (DC_POWER), переменной ЭДС (AC_POWER) и т. д.), а затем курсором мыши нажать кнопку «ОК». В рабочей зоне этим курсором разместить источник питания в желаемом месте рабочей зоны и сделать однократное нажатие клавиши мыши. Это нажатие закрепляет выбранный источник на поле рабочей зоны. Одновременно снова открывается контекстное меню группы «Источники». Если для исследуемой схемы необходим только один источник, то

в открывшемся меню нажать кнопку «Закрыть». Если для цепи требуется несколько источников питания, то операцию размещения источника питания с помощью кнопки «ОК» необходимо выполнить соответствующее число раз, а затем, после закрепления последнего источника в рабочей зоне, нажать кнопку «Закрыть».

Далее курсором необходимо на панели компонентов найти группу «Пассивные компоненты» и однократным нажатием клавиши мыши открыть контекстное меню этой группы (рисунок П.4).

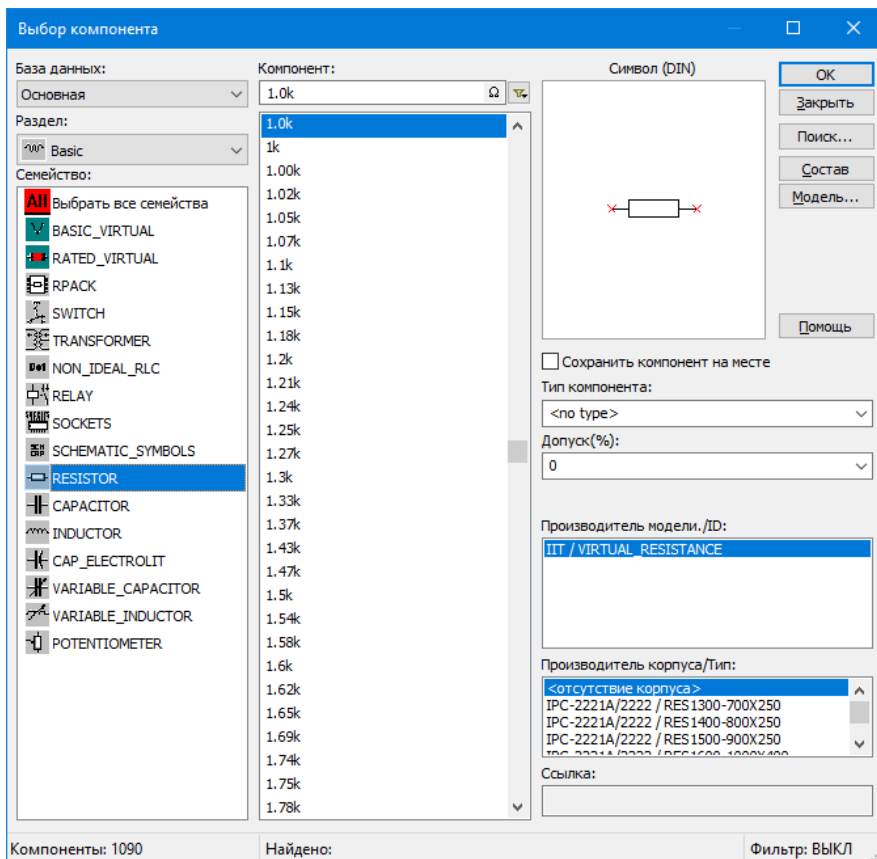


Рисунок П.4 -контекстное меню группы «Пассивные компоненты»

В окне «Семейство» выбрать элемент «RESISTOR» и нажать кнопку «ОК». Меню закроется и в открывшейся рабочей зоне можно найти курсор с «привязанным» к нему резистором. Переместить курсор с резистором в жела-

емое место в рабочей зоне и нажать однократно клавишу мыши. Резистор закрепится в выбранном месте. Одновременно откроется контекстное меню, в котором (если в цепи содержатся несколько резисторов) снова нажать кнопку «ОК». В рабочую зону поместится второй резистор и открывается контекстное меню. Если требуется большее количество резисторов, то отмеченные выше операции с кнопкой «ОК» и клавишей мыши повторяются. После закрепления последнего резистора в открывшемся меню нажать кнопку «Закрыть». На этом операция занесения резисторов в рабочую зону завершена. Аналогично заносятся в рабочую зону конденсаторы (CAPACTIOR) и катушки индуктивности (INDUCTOR).

Для занесения в рабочую зону измерительных приборов необходимо найти группу «ИНДИКАТОРЫ». В окне «Семейство» выбрать элемент «VOLTMETER» (вольтметр) или «AMMETER» (амперметр) и нажать кнопку. Следует обратить внимание на компоненты в данных семействах. VOLTMETER_H, VOLTMETER_HR, AMMETER_H и AMMETER_HR - это вольтметры и амперметры, выводы которых расположены горизонтально, а VOLTMETER_V, VOLTMETER_VR, AMMETER_V и AMMETER_VR - это вольтметры и амперметры с вертикально расположенными выводами. Буква «R» в конце названия компонентов говорит об противоположном расположении плюсовой и минусовой клеммы, по сравнению с компонентами, которые этой буквы не имеют. После выбора нужного компонента нажать кнопку «ОК». После закрепления последнего измерительного прибора в открывшемся меню нажать кнопку «Закрыть».

Для сборки электрической цепи элементы, находящиеся в рабочей зоне, сначала надо разместить так, чтобы удобно было выполнять межэлементные соединения. За основу можно взять размещение элементов, приведённое в методических указаниях на выполняемую работу. Для перемещения элемента в рабочей зоне надо курсор мыши совместить с пиктограммой перемещаемого элемента. Нажать клавишу мыши и, не отпуская эту клавишу, переместить мышью элемент в желаемое место. Для фиксации элемента на новом месте клавишу отпустить.

Если для удобства выполнения схемы надо повернуть пиктограмму элемента в рабочей зоне, то курсор наводится на пиктограмму этого элемента и кратковременно нажимается клавиша мыши. Нажатием клавиш «Ctrl + R» на клавиатуре компьютера осуществляется поворот пиктограммы по часовой стрелке на 90 градусов. Для поворота против часовой стрелки необходимо нажать клавиши «Ctrl + Shift+R».

При сборке электрической цепи выводы элементов соединяются в соответствии со схемой, приведенной в описании лабораторной работы. Для выполнения межэлементных соединений курсор подводится к выводу элемента до появления вместо стрелки крестообразного значка небольшого размера.

Однократным щелчком клавишей мыши зафиксировать начало соединительного проводника. Переместить крестообразный значок к выводу следующего элемента и еще раз щелкнуть клавишей мыши. Между выбранными выводами должен появиться соединительный проводник. Подключить вывод элемента можно и к межэлементному проводнику, соединяющему выводы двух других элементов. В этом случае крестообразный курсор, после закрепления мышью начального конца соединительного проводника на выводе элемента, подводится к межэлементному проводнику и клавишей мыши выполняется необходимое соединение. Перемычки между двумя, уже проложенными проводниками в рабочей зоне, ставить нельзя. Проводник должен начинаться с вывода элемента, а заканчиваться на другом выводе или на другом проводнике.

Для удаления проводника курсор наводится на проводник и кратковременным нажатием клавиши мыши он выделяется. Нажатием клавиши «Delete» на клавиатуре компьютера происходит удаление выделенного проводника. Удаление можно осуществить и мышью. Для такого удаления после выделения объекта нажимается правая клавиша мыши и в открывшемся меню находится команда «Удалить».левой клавишей мыши эта команда активируется и происходит удаление

Далее необходимо задать необходимые параметры элементов цепи (источников питания, резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, измерительных приборов и т. д.). Задавать или изменять параметры элементов или измерительных приборов можно только при выключенном программировании.

Выбор параметров источника переменной ЭДС начинается с открытия его контекстного меню. Для этого курсор мыши устанавливается на пиктограмму компонента на панели задач и дважды нажимается клавиша. В открывшемся окне (рисунок П.5), во вкладке «Параметры», в тестовых полях «Напряжение (RMS)» (действующее значение напряжения), «Частота (F)», «Фаза» и т. д. записываются требуемые значения.

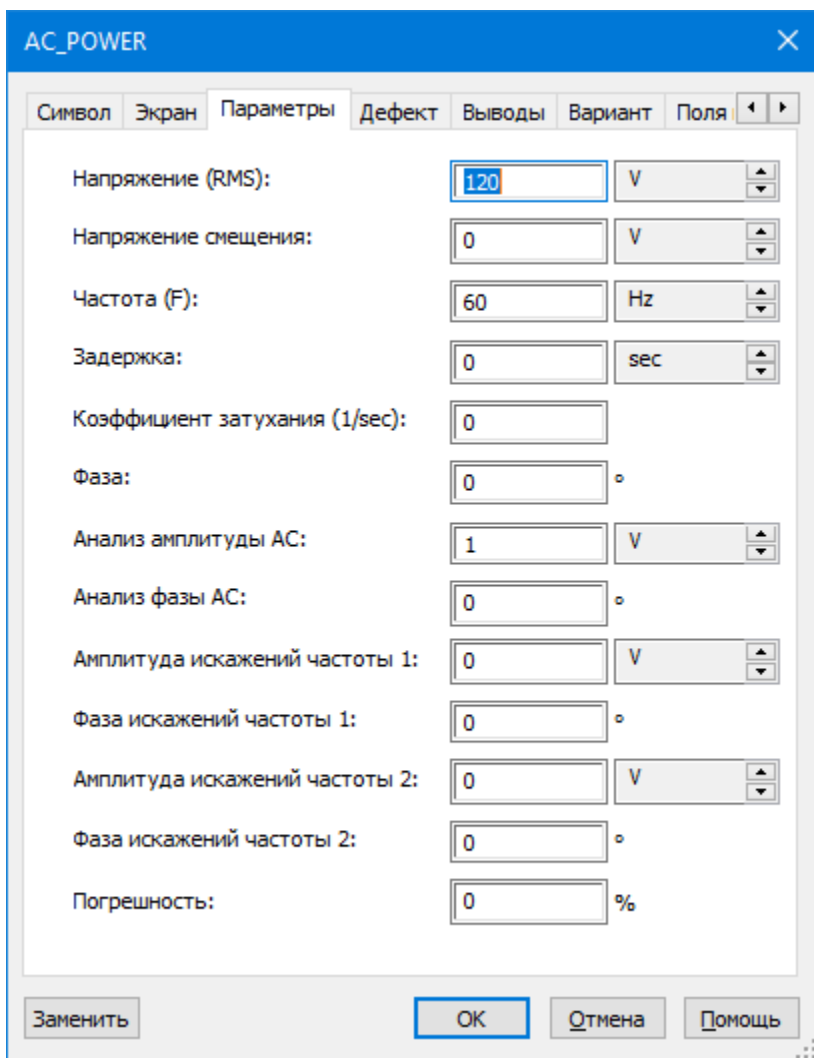


Рисунок П.5 – Параметры переменного источника ЭДС

Для изменения названия компонента, необходимо перейти во вкладку «Символ» и в текстовом поле «Обозначение» ввести новое название компонента (рисунок П.6).

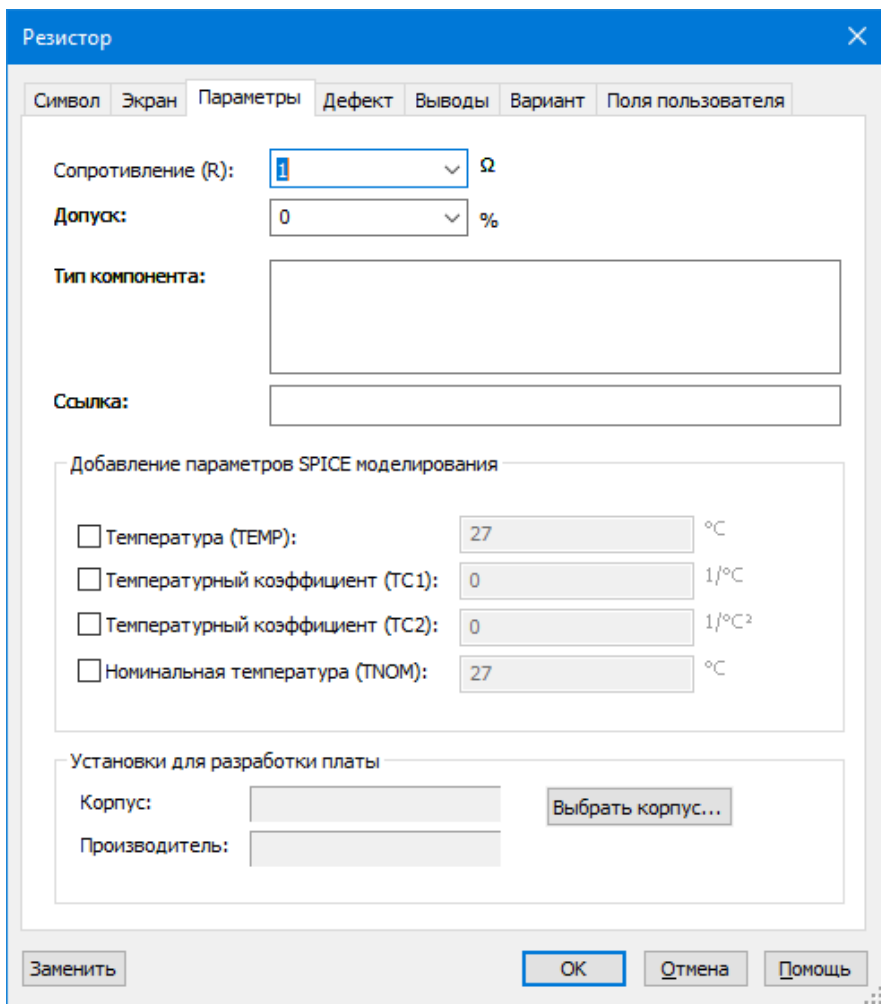


Рисунок П.7 – Изменение сопротивления резистора

При работе с амперметром и вольтметром из группы «ИНДИКАТОРЫ», необходимо указать род тока, который они измеряют. Для этого, во вкладке «Параметры» необходимо выбрать режим работы (АС или DC). Если необходимо измерить переменный ток, то нужно указать режим «АС», а если постоянный, то «DC» (рисунок П.8).

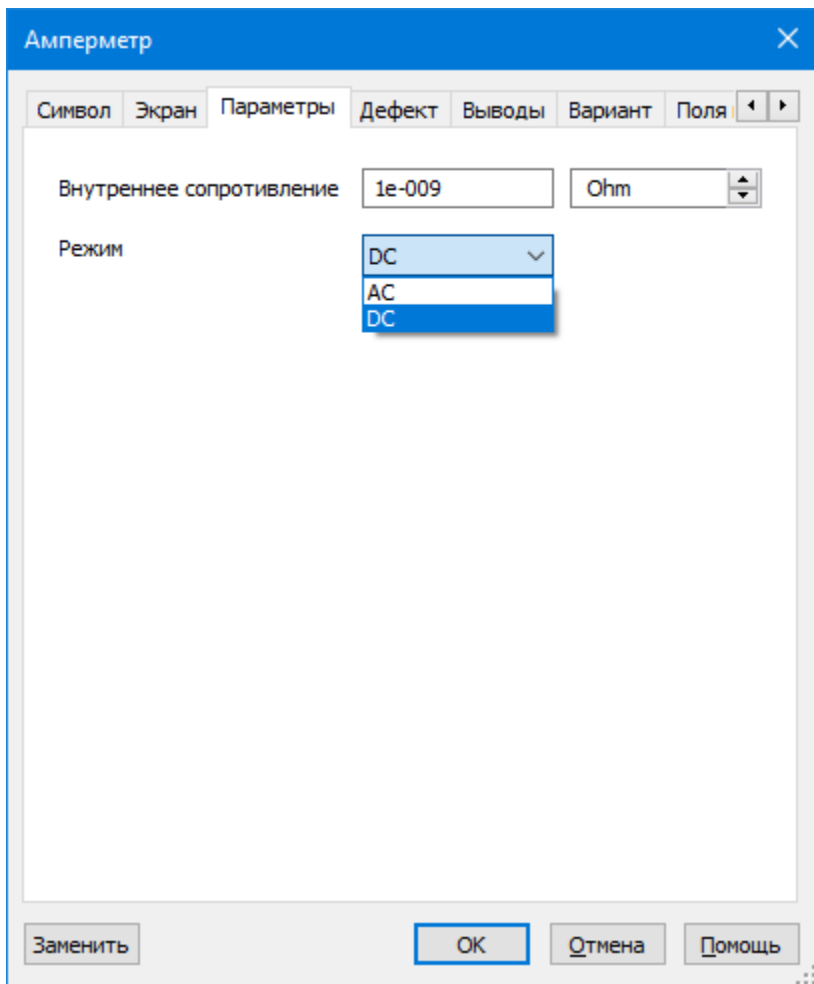


Рисунок П.8 – Выбор режима измерения

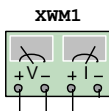


Рисунок П.9 – Внешний вид ваттметра

Для измерения активной мощности и коэффициента мощности в электрических цепях, используется ваттметр XWM (рисунок П.9). Данный компонент выбирается из панели измерительных на панели измерительных приборов. Клеммы с буквой V служат для измерения напряжения в измеряемой цепи и подключаются

как вольтметр. Клеммы с буквой I служат для измерения силы тока, и подключаются как амперметр. Для отображения результатов измерения, необходимо щёлкнуть по нему дважды левой кнопкой мыши. Диалоговое окно с результатами измерений представлено на рисунке П.10.

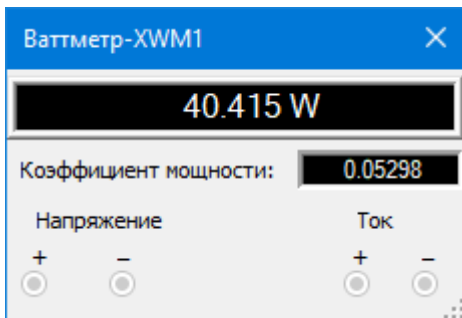


Рисунок П.10 – Результаты измерений ваттметром

После того, как схема будет собрана и установлены параметры компонентов, необходимо выполнить моделирование. Для этого, необходимо нажать «▶», находящейся над рабочей зоной и через некоторое время в окнах дисплеев появятся численные значения токов и напряжений в цепи.

После выполнения моделирования, схему необходимо перенести в отчёт. Делается это, с помощью комбинаций клавиш «Ctrl + C» и «Ctrl + V».

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Нейман, Л. Р.** Теоретические основы электротехники. Т. 1 / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. - 3-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергоиздат, 1981. - 536 с.
- 2 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. — 11-е изд., перераб. и доп. — М.: Гардарики, 2007. — 701 с. : ил.
- 3 **Галушко, В. Н.** Электротехника и основы электроники : учеб.-метод. пособие / В. Н. Галушко, И. Л. Громько ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 299 с.
- 4 **Марченко, А. Л.** Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim : учебное пособие / А. Л. Марченко, С. В. Освальд. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 448 с.
- 5 **Волков, Н. П.** Теоретические основы электротехники. Линейные цепи постоянного и синусоидального тока: учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов электротехнических специальностей. Н. П. Волков ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 76 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Исследование источника постоянного тока.....	4
2 Исследование разветвленной цепи постоянного тока	9
3 Исследование активного двухполюсника	14
4 Исследование цепи синусоидального тока, содержащей катушку индуктивности и резистор	20
5 Исследование цепи синусоидального тока, содержащей резистор и конденсатор	28
6 Исследование цепи с индуктивно связанными элементами.....	35
7 Исследование воздушного трансформатора	43
8 Исследование цепи синусоидального тока с последовательно соединенными катушкой индуктивности и конденсатором (резонанс напряжений).....	47
9 Исследование разветвленной цепи синусоидального тока с параллельным соединением ветвей (резонанс токов)	52
ПРИЛОЖЕНИЕ А Применение программы multisim для моделирования и анализа электрических цепей.....	58
Список рекомендуемой литературы	70