

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 24.09.2024 23:08:23  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e945df4a4851fda56d089

## МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и средств связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 17 » 09

2024 г.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Методические указания к лабораторным занятиям

Курск – 2024

УДК 681.3

Составитель О. Г. Бондарь

Кандидат технических наук, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи *Е. О. Брежнева*

**Исследование электрических цепей** : методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О. Г. Бондарь. – Курск : ЮЗГУ, 2024. – 62 с.: ил. 33. табл.4: Библиогр.: с. 61.

Содержатся сведения о характеристиках элементов цепей, методике исследования в среде компьютерного моделирования Multisim, порядке выполнения лабораторных работ, варианты заданий и контрольные вопросы.

Методические указания соответствуют требованиям программы, утвержденной учебно-методическим объединением по специальностям автоматике и электроники (УМО АЭ).

Предназначены для обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 17.09.24. Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. 3,60. Уч.-изд. л. 3,26. Тираж 100 экз. Заказ 951.  
Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## Оглавление

Планируемые результаты обучения.....	5
Оборудование и программное обеспечение .....	5
Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ.....	6
Общие требования безопасности.....	6
Требования безопасности перед началом работ .....	6
Требования безопасности во время работы.....	7
Требования безопасности по окончании работы .....	7
<b>1 Исследование цепей постоянного тока .....</b>	<b>8</b>
1.1 Цель работы .....	8
1.2 Настройка программы и построение схемы .....	8
1.3 Измерение токов, напряжений и мощностей .....	12
1.4 Исследование характеристик схем .....	16
1.5 Подготовка к лабораторной работе .....	18
1.6 Вопросы для самоконтроля .....	19
1.7 Порядок выполнения работы .....	19
1.8 Содержание отчёта.....	20
1.9 Контрольные вопросы.....	20
1.10 Варианты заданий .....	21
<b>2 Исследование линейных цепей при гармоническом воздействии</b>	<b>22</b>
2.1 Цель работы.....	22
2.2 Основные теоретические сведения .....	22
2.3 Идеальные пассивные элементы при гармоническом воздействии.....	29
2.4 Пример расчёта последовательной RL-цепи.....	30
2.5 Исследование цепей переменного тока в режиме анализа переходных процессов.....	31
2.6 Исследуемые схемы .....	32
2.7 Подготовка к лабораторной работе .....	32
2.8 Вопросы для самоконтроля .....	33
2.9 Порядок выполнения лабораторной работы .....	34
2.10 Содержание отчета.....	34
2.11 Контрольные вопросы .....	35
2.12 Варианты заданий .....	35

3 Измерение полного комплексного сопротивления электрической цепи .....	36
3.1 Цель работы .....	36
3.2 Исследование электрических цепей в режиме частотной развёртки.....	36
3.3 Подготовка к выполнению лабораторной работы .....	39
3.4 Вопросы для самоконтроля .....	39
3.5 Порядок выполнения работы .....	39
3.6 Содержание отчёта.....	40
3.7 Контрольные вопросы.....	40
3.8 Варианты задания.....	41
4 Исследование вынужденных колебаний в замкнутом последовательном контуре .....	42
4.1 Цель работы .....	42
4.2 Основные теоретические сведения.....	42
4.3 Подготовка к выполнению лабораторной работы .....	46
4.4 Вопросы для самоконтроля .....	47
4.5 Порядок выполнения работы .....	47
4.6 Содержание отчета.....	48
4.7 Контрольные вопросы.....	49
4.8 Варианты задания.....	49
5 Исследование свободных колебаний в замкнутом контуре .....	50
5.1 Цель работы .....	50
5.2 Основные теоретические сведения.....	50
5.3 Подготовка к лабораторной работе .....	54
5.4 Вопросы для самоконтроля .....	54
5.5 Порядок выполнения работы .....	55
5.6 Содержание отчёта.....	60
5.7 Контрольные вопросы.....	61
5.8 Варианты задания.....	61
Рекомендуемая литература .....	61

## **Планируемые результаты обучения**

При выполнении лабораторного цикла формируются компетенции ОПК-1, ОПК-2.

Обучающийся должен

### **знать:**

- основные физические законы и основные математические положения, применяемые для анализа и расчета электрических цепей и устройств в области систем связи;
- основы построения и функционирования электрических цепей, применяемых при конструировании электронных средств, и основные методы их анализа и расчета.

### **уметь:**

- использовать основные физические законы и основные математические положения для анализа и расчета электрических цепей и устройств;
- осуществлять аргументированный выбор и применение методов анализа и расчета электрических цепей.

### **владеть:**

- основными методами анализа и расчета электрических цепей и иметь практический опыт их применения;
- знаниями основных физических законов и основных математических положений для анализа и расчета электрических цепей и устройств.

## **Оборудование и программное обеспечение**

- ПК (Processor i5-2500, RAM DDR3 4 GB, HDD 320 GB, DVD RW, TFT-монитор 24” 1920x1080);
- Microsoft Windows Professional 7 Russian (Upgrade Academic OPEN1 License No Level № 60803556 - 12 копий);
- LibreOffice (LGPL v3);
- Антивирус Касперского (*или ESETNOD*);
- Информационно-справочная система кафедры;
- Circuit Design Suite 12.0 (Academy license № M76X44651);

## **Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ**

### **Общие требования безопасности**

1. К работе с электроизмерительными приборами, электроустановками, ЭВМ под руководством преподавателя или ответственного за лабораторию допускаются лица, прошедшие инструктаж по охране труда, медицинский осмотр и не имеющие противопоказаний по состоянию здоровья.
2. При работе в лаборатории студенты должны соблюдать правила поведения, расписание учебных занятий, установленные режимы труда и отдыха.
3. При работе с электроизмерительными приборами возможно воздействие на работающих следующих опасных факторов:
  - а) поражение электрическим током при прикосновении к оголенным проводам и при работе с приборами, находящимися под напряжением;
  - б) травмирование рук при использовании неисправного инструмента.
4. При несчастном случае пострадавший или очевидец несчастного случая обязан немедленно поставить в известность преподавателя или зав. лабораторией, который сообщает об этом администрации университета. При неисправности электроизмерительных приборов, инструмента следует прекратить работу и сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией.
5. Студенты, допустившие невыполнение или нарушение инструкции по охране труда, привлекаются к дисциплинарной ответственности в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка университета и подвергаются внеочередной проверке знаний правил техники безопасности.

### **Требования безопасности перед началом работ**

1. Получив разрешение на проведение лабораторных работ, **ПРОВЕРЬТЕ** состояние и исправность приборов и кабелей, наличие и исправность защитного заземления.

2. Подготовьте необходимые для работы материалы, приспособления и разложите на свои места, уберите с рабочего стола все лишнее.

### **Требования безопасности во время работы**

1. ПОМНИТЕ! Электрический ток величиной 0,1 А и напряжением свыше 42 В опасен для жизни человека.
2. Лабораторные работы студенты проводят только в присутствии преподавателя или ответственного за лабораторию.
3. Включение ПК осуществлять кнопкой включения на системном блоке.
4. При сборке электрической схемы использовать провода без видимых повреждений изоляции, избегать пересечений и скручиваний проводов, питание схемы подключать в последнюю очередь.
5. Все изменения в схеме проводить при отключённом от компьютера USB-кабеле.
6. Не допускать попадания влаги на элементы схемы и компьютера.
7. Наличие напряжения в электрической цепи проверять только приборами.
8. Не допускать предельных нагрузок измерительных приборов.
9. Не оставлять без надзора невыключенные электрические устройства и приборы.

### **Требования безопасности по окончании работы**

1. Выключить ПК программно завершением работы.
2. Отключить электроизмерительные приборы и лабораторные установки от электросети / компьютера.
3. Привести в порядок рабочее место.
4. Сообщить преподавателю или ответственному за лабораторию об окончании работы и получить разрешение на уход из лаборатории.

# 1 Исследование цепей постоянного тока

## 1.1 Цель работы

1. Изучение процессов в схемах с резисторами на постоянном токе с помощью системы компьютерного моделирования и анализа схем «Multisim»:

- определение значений токов и напряжений в схеме с постоянными сигналами с использованием индикаторов;
- измерение рассеиваемой мощности с применением ваттметра;
- определение значений токов и напряжений в схеме с применением функции анализа рабочей точки.

2. Изучение процессов моделирования в схемах с резисторами на постоянном токе при изменяющихся параметрах компонентов схем.

3. Построение графиков зависимости напряжений и токов в схеме от напряжения источника.

## 1.2 Настройка программы и построение схемы

Непосредственно после первого запуска программы Multisim из меню «Пуск» следует проверить настройки схемы (обычно программа уже настроена при предыдущих запусках). Настройка осуществляется в приведенной далее последовательности.

- В меню «Options» (Опции) выбрать пункт «Sheet Properties» (Свойства страницы). Верхняя панель окна показывает, какая информация должна отображаться около каждого компонента схемы (рис. 1).
- Целесообразно отключить ненужные опции, оставив лишь название компонента и его значение. (Найти эти опции самостоятельно!)
- На вкладке Workspace (рис. 2) отметить опцию Show grid (Показать сетку), которая будет полезна при размещении компонентов.
- В пункте Global Options (Общие установки) на вкладке Component отметить опцию Place Single component (Поместить один компонент), благодаря которой можно размещать компоненты без опасения добавить по ошибке два одинаковых компонента.



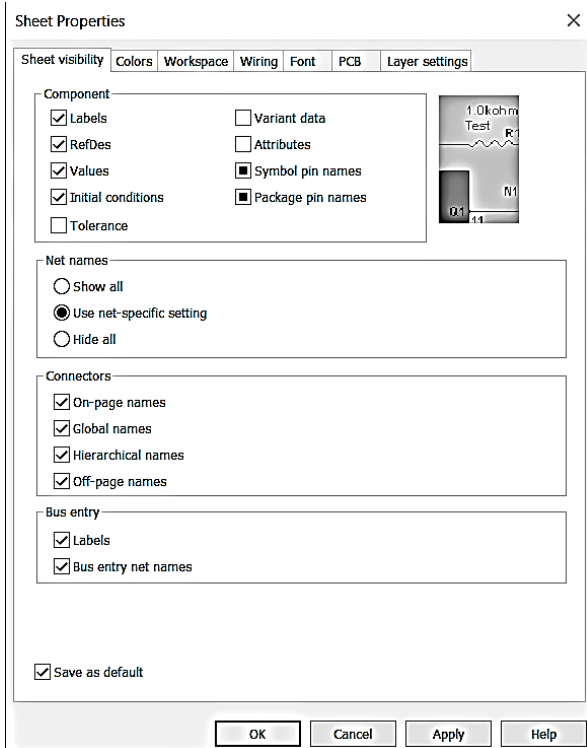


Рисунок 1 – Настройка  
видимости

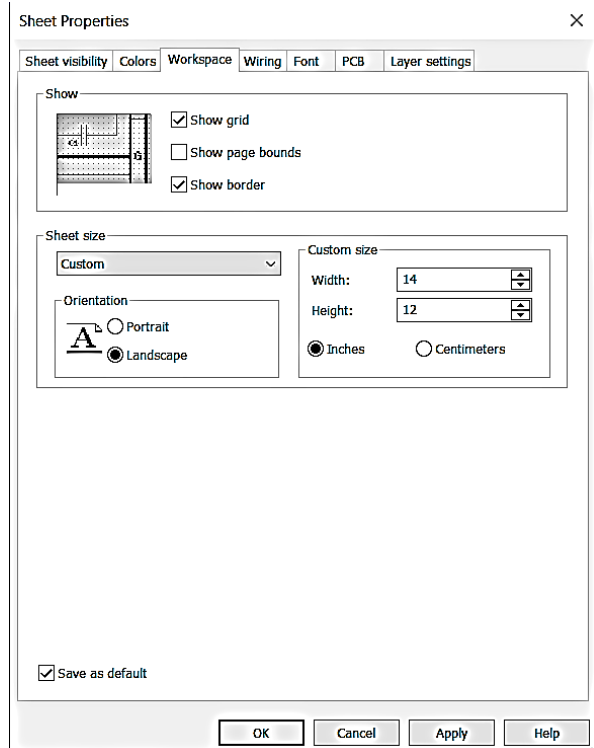


Рисунок 2 – Включение  
отображения сетки

- На этой же вкладке выбирается стандарт для изображения компонентов (IEC 60617), а на вкладке Save – интервалы времени для автосохранения созданных документов (рис. 3).

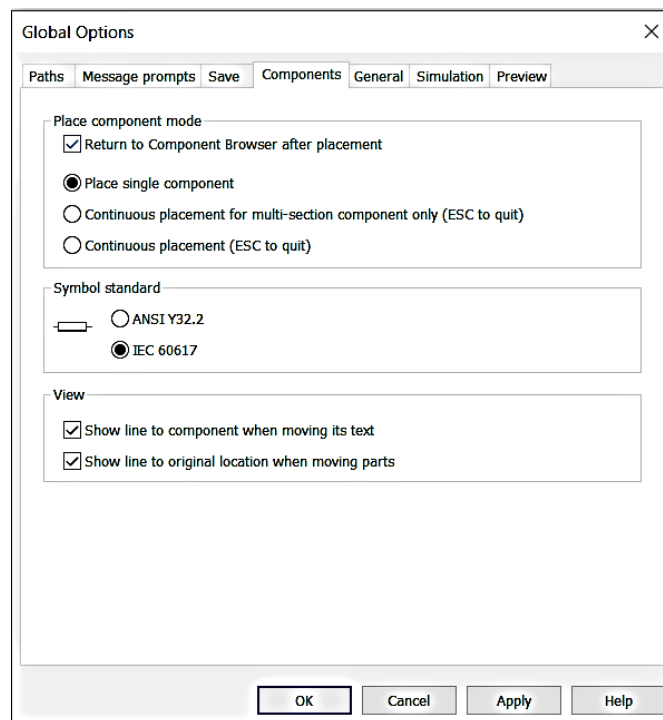


Рисунок 3 -Выбор стандарта

Собрать схему, пример которой представлена на рис. 4. Сначала в рабочей области размещаются компоненты схемы.

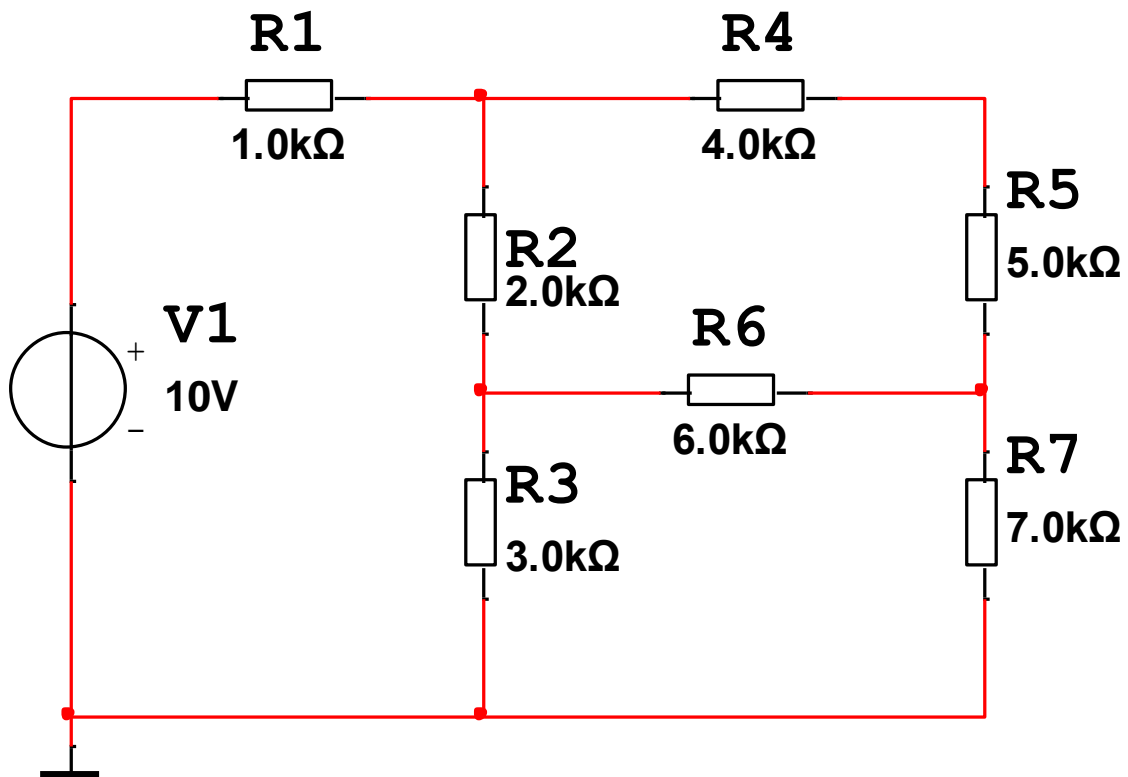


Рисунок 4 – Исследуемая схема

Их можно найти в окне выбора компонентов (Select a component), выпадающем при щелчке ЛКМ на соответствующей иконке панели выбора компонентов (рис. 5).

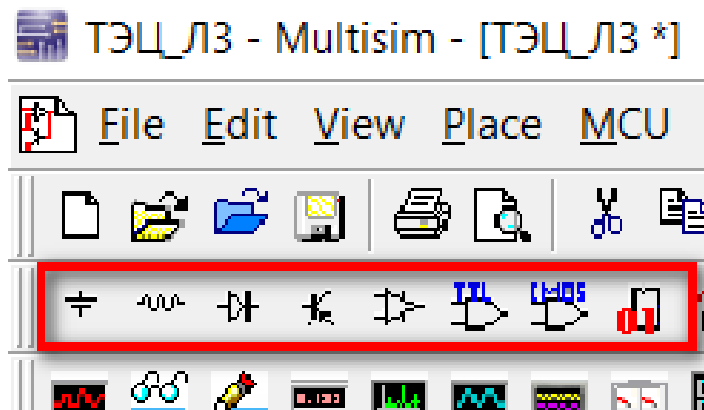


Рисунок 5 – Панель выбора компонентов

Для возможности применения виртуальных компонентов целесообразно использовать панель Virtual. Включить её отображение можно через View/ Toolbars/ Virtual.

При наведении курсора на любую пиктограмму высвечивается название семейства компонентов, а при нажатии на стрелку, расположенную рядом с каждой пиктограммой, (рис. 6), открывается выпадающий список компонентов семейства.

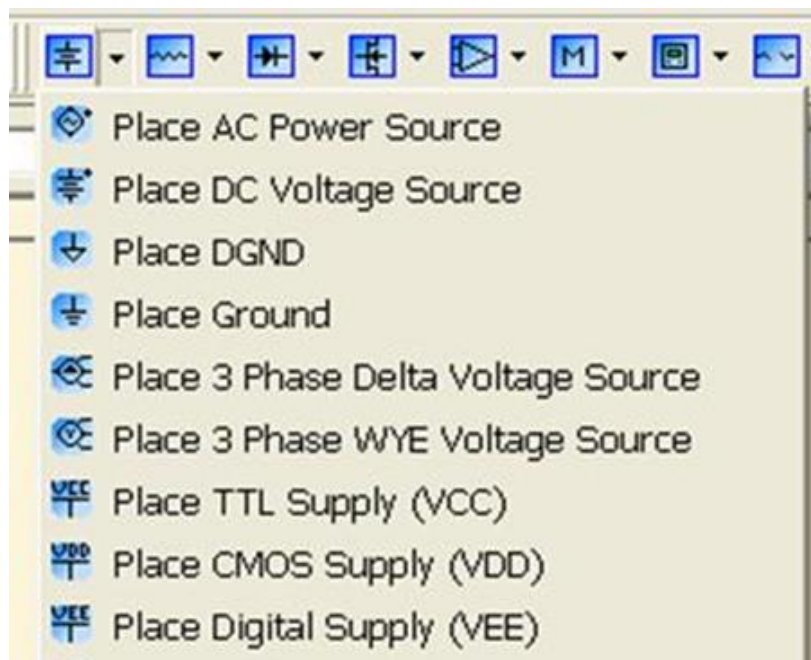


Рисунок 6 – Выпадающий список компонентов семейства

**Компонентам** можно присвоить произвольные названия и изменить значения параметров двойным щелчком ЛКМ по элементу открывая окно его свойств. Для изменения выбирается название (Label) или значение (Value). Отличие виртуальных компонентов от стандартных состоит в том, что для них не существует посадочных мест, позволяющих разместить их на печатной плате и выполнить последующую трассировку.

**Для соединения компонентов** курсор мыши размещается на нужном выводе компонента (при этом стрелка курсора заменяется на символ перекрестия) и после щелчка ЛКМ курсор перемещается к нужному контакту другого компонента. При необходимости соединения ломанной линией в точках излома выполняется щелчок

ЛКМ. Линия соединения прорисовывается вслед за курсором. По достижении конечной точки выполняется щелчок ЛКМ. При корректном соединении линия покраснеет.

Для моделирования схемы по крайней мере один из её узлов должен иметь нулевой потенциал (заземляется). Для этого выбирается крайняя левая пиктограмма на панели виртуальных компонентов и по щелчку на ней ЛКМ открывается окно выбора компонентов. В семействе компонентов Power Source выбирается обычное заземление Ground.

### 1.3 Измерение токов, напряжений и мощностей

Измерения напряжений, токов, мощностей могут осуществляться с помощью пробников, виртуальных измерительных приборов, или в режиме определения параметров постоянного тока в указанных точках схемы (DC Operating Point Analysis).

Пробники и виртуальные инструменты доступны на панелях инструментов представленных на рис. 7. Выбор пробника (амперметра, вольтметра ваттметра) осуществляется щелчком по нему ЛКМ. При перемещении курсора инструмент перемещается за ним. При контакте щупа пробника с нужной точкой схемы, его информационное поле становится жёлтым. Повторный щелчок ЛКМ обрывает связь инструмента с курсором.

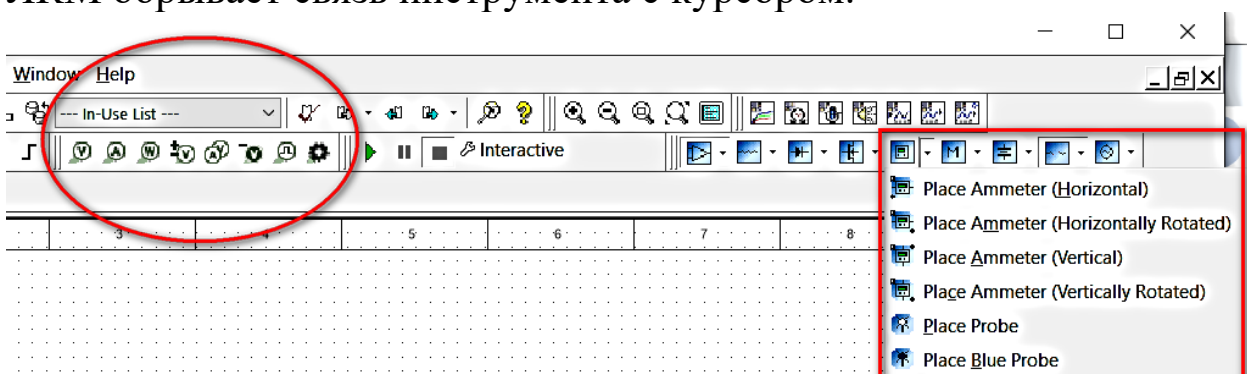


Рисунок 7 – Панели пробников (слева) и виртуальных инструментов (справа)

Щупы пробников амперметр и вольтметра могут касаться как выводов компонентов, так и проводников, а щуп ваттметра – вывода

или непосредственно компонента схемы на котором измеряется рассеиваемая мощность (рис. 8).

Условное положительное направление тока протекающего через цепь, к которой подключён щуп пробника амперметра указывается стрелкой на проводе. Это направление может быть изменено щелчком ПКМ на стрелке и выбором в выпадающем меню пункта реверс направления пробника (Reverse probe direction).

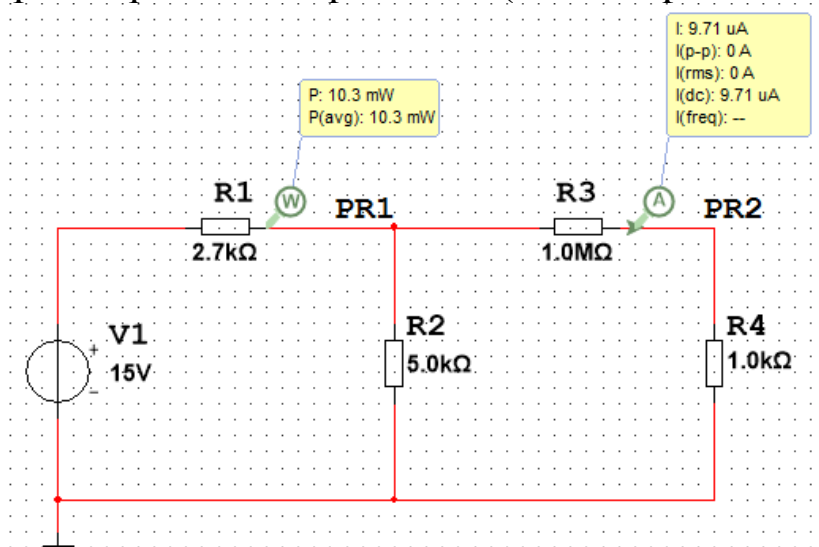


Рисунок 8 – Подключение щупов пробников

Альтернативный вариант измерений реализуется виртуальными приборами. Правила подключения этих приборов соответствуют правилам подключения реальных приборов (рис. 9). Внутреннее сопротивление измерительных приборов может быть изменено в пункте значение (Value) выпадающего меню при двойном щелчке ЛКМ по изображению прибора.

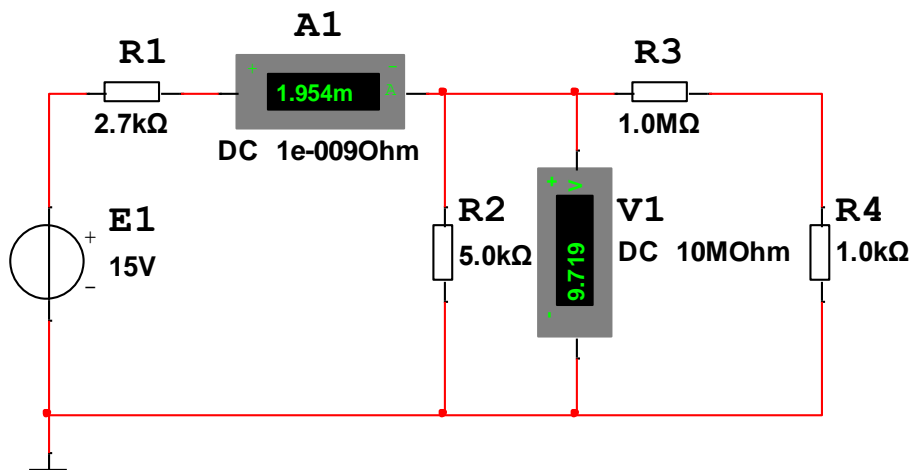


Рисунок 9 – Подключение виртуальных измерительных приборов

Для измерений токов и напряжений может быть использован также мультиметр (рис. 10), отображаемый на панели инструментов справа (название инструмента отображается при наведении на него курсора). Если панели инструментов нет, то отобразить её можно выбором в главном меню «View – Toolbars – Instruments».

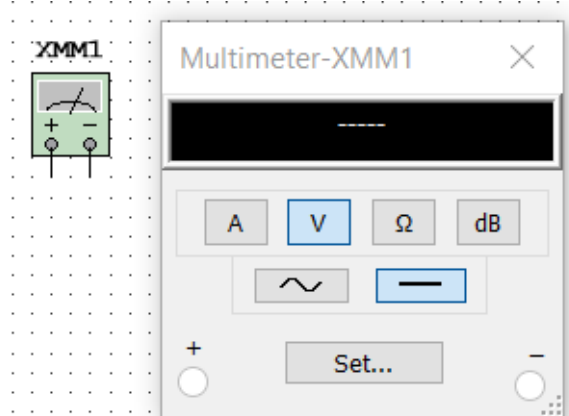


Рисунок 10 – Иконка (слева) и панель мультиметра (справа)

Для вызова панели мультиметра выполняется двойной щелчок ЛКМ по его иконке.

Виртуальный ваттметр находится, как и мультиметр, на панели виртуальных инструментов. Его зажимы напряжения включаются параллельно, а токовые – последовательно с компонентом, на котором измеряется мощность (рис. 11).

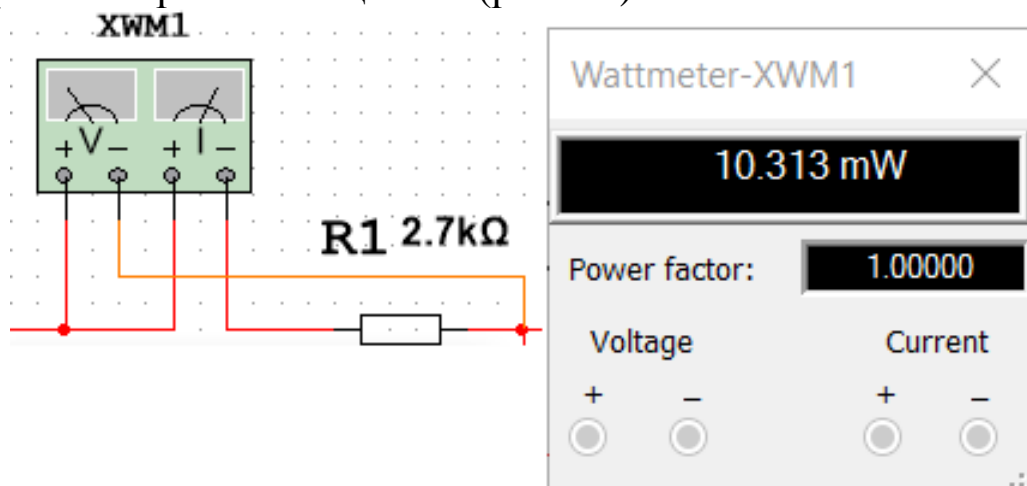


Рисунок 11 – Схема подключения ваттметра

Следует учитывать, что знак мощности, показываемый ваттметром, зависит от согласованности полярностей при подключении зажимов напряжения и тока (положительные зажимы напряжения и тока должны быть соединены).

**Измерение параметров постоянного тока в указанных точках схемы осуществляется выбором режима «Simulate / Analysis and simulation / DC Operating Point» (рис. 12).**

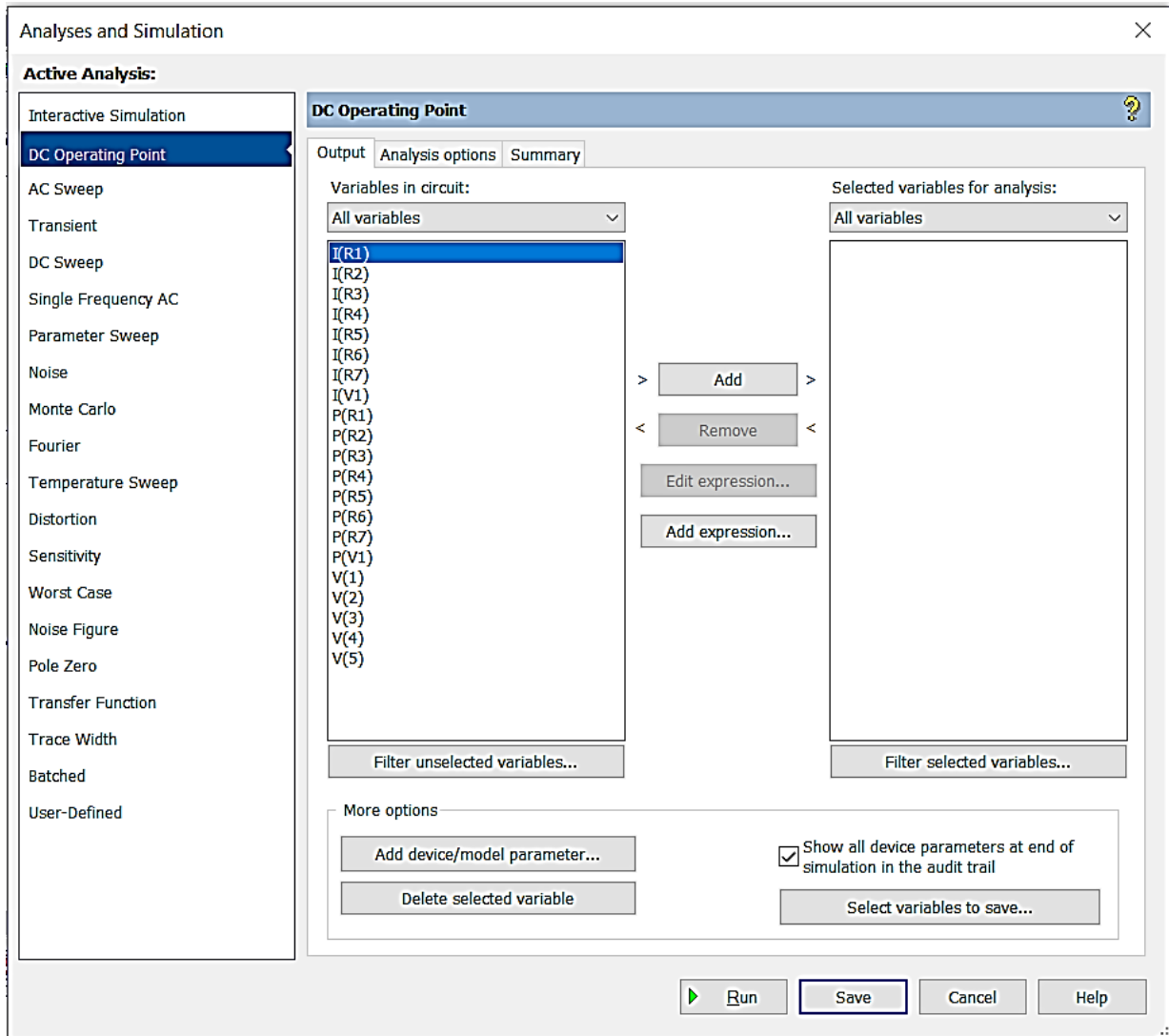


Рисунок 12 – Окно выбора измеряемых параметров

Выбор компонента, ток которого, или рассеиваемая на нём мощность подлежат измерению осуществляется двойным щелчком ЛКМ по контролируемому параметру в левой таблице. Аналогично выбирается узел, напряжение которого подлежит контролю. Номер контролируемого узла можно прочесть в окне свойств узла, вызываемого двойным щелчком ЛКМ по выбранному узлу схемы. Имя узла может быть изменено. Для этого в пункте меню «Net name» разделе «Preferred net name» следует впечатать новое имя (может содержать только символы латиницы и цифры). Результаты

симуляции после щелчка ЛКМ по кнопке запуска (Run) отображаются в табличной форме (рис. 13).

The screenshot shows a window titled 'Grapher View' with a menu bar (File, Edit, View, Graph, Trace, Cursor, Legend, Tools, Help) and a toolbar. Below the toolbar, a tab labeled 'DC Operating Point' is active. The main content area displays a table titled 'ТЭЦ\_ЛЗ DC Operating Point Analysis' with the following data:

	Variable	Operating point value
1	V(1)	7.90594
2	V(2)	6.13132
3	V(3)	3.91304
4	V(4)	4.60515
5	V(5)	10.00000
6	I(R1)	2.09406 m
7	P(R1)	4.38507 m
8	I(R2)	1.65040 m
9	P(R2)	5.44764 m
10	I(R3)	1.53505 m
11	P(R3)	7.06912 m
12	I(R4)	443.65573 u
13	P(R4)	787.32162 u
14	I(R5)	443.65572 u
15	P(R5)	984.15200 u
16	I(R6)	115.35049 u
17	P(R6)	79.83441 u
18	I(R7)	559.00621 u
19	P(R7)	2.18742 m
20	P(V1)	-20.94055 m
21	I(V1)	-2.09406 m

Рисунок 13 – Результаты измерения в выбранных точках схемы

#### 1.4 Исследование характеристик схем

Multisim предоставляет средства исследования параметрических, временных, частотных и других зависимостей. В данной работе исследуется зависимость напряжений в узлах схемы в режиме плавного изменения напряжения источника питания постоянного тока, т. н. режим свипирования (DC-Sweep).



Для этого в меню **Simulate / Analyses and Simulation** (Моделирование / Анализ и моделирование) выбираем пункт **DC-Sweep**. Поскольку источник постоянного тока в схеме единственный, программа выбирает его по умолчанию (рис. 14).

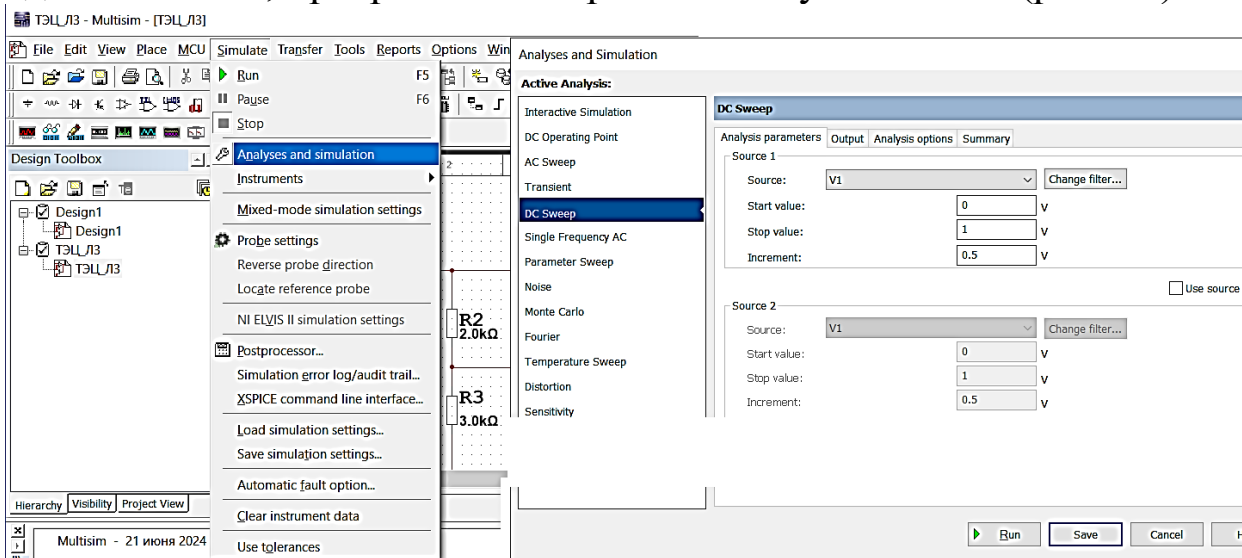


Рисунок 14 – Выбор режима построения функции связи напряжения узла с напряжением источника питания

Название источника автоматически установлено как V с номером. В окне DC Sweep источник V2 затемнён, т. к. он не существует. Следует установить параметры моделирования – начальное, конечное значения и шаг приращения напряжения питания. После этого в окне выходных переменных (Output) следует выбрать двойным щелчком ЛКМ, или отметить однократным щелчком ЛКМ и добавить (Add) хотя бы одну переменную (рис. 15.). Запустив моделирование нажатием ЛКМ на кнопку на пиктограмму кнопки RUN получим отображение выбранных передаточных характеристик (рис. 15). Следует помнить, что названия узлов определяются двойным щелчком ЛКМ по ним, а также, что названия узлов можно изменить в этом же выпадающем окне.

В меню редактирования свойств, вызываемого двойным щелчком в поле графика, можно изменить название графика и другие его свойства (рекомендуется поэкспериментировать самостоятельно). Альтернативно можно выбрать окно свойств однократным щелчком ПКМ по полю графика. При этом можно

выбрать пункт копировать (Copy graph). Скопировать график можно и через пункт меню редактирования (Edit) окна, отображающего график.

При необходимости можно выполнить корректировку осей, сетки и линий.

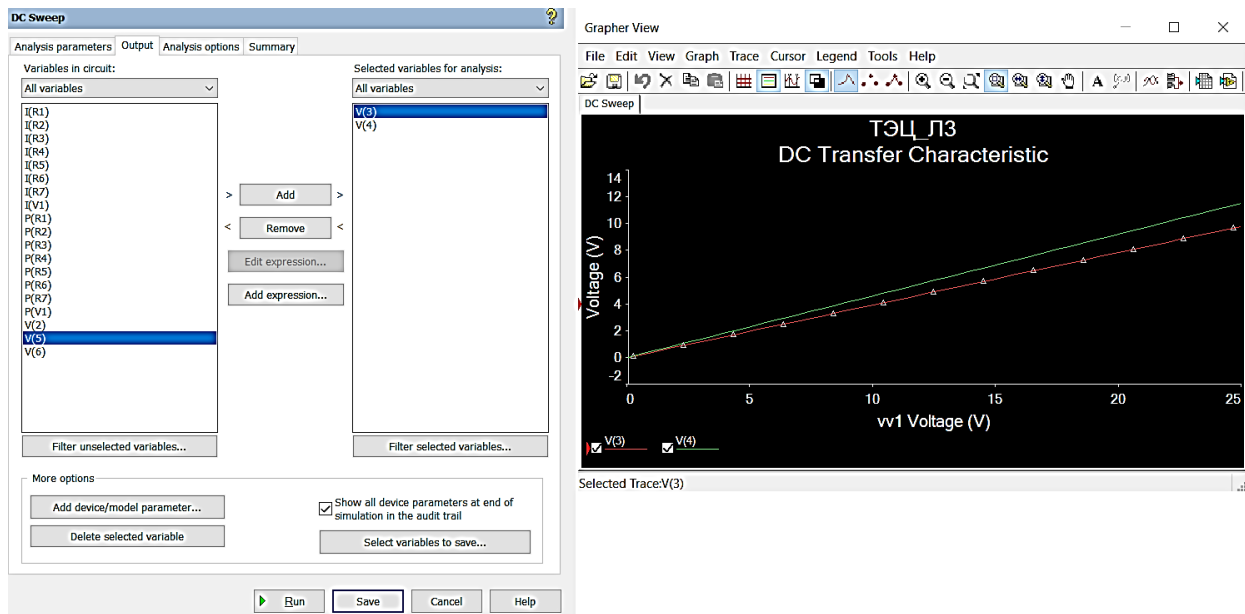


Рисунок 15 – Выбор переменных и передаточные характеристики

Свойства сетки (Grid), а также название графика редактируются на вкладке «Общие» (General); толщина и цвет линий графика – на вкладке «Линии» (Traces).

Установить необходимые диапазоны по осям (а также добавить новые оси, активизировав флажок Enable) можно на вкладках Left Axis, Bottom Axis, Right Axis, Top Axis (Левая ось, Нижняя ось, Правая ось, Верхняя ось, соответственно).

Также на этих вкладках можно задать названия осей (Label) и масштаб по осям (линейный – Linear, логарифмический – Logarithmic).

## 1.5 Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в соответствующих разделах конспекта лекций;

- ознакомиться с методикой построения схем и проведением измерений в среде «Multisim», содержанием и порядком выполнения лабораторной работы;
- выписать исходные данные для своего варианта задания;
- оформить заготовку отчёта по лабораторной работе в электронной форме, включив в неё полный вариант исследуемой схемы;
- дать письменные ответы на вопросы для самоконтроля.

### **1.6 Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое электрическая цепь?
2. Что понимают под элементами электрической цепи?
3. Что называется ветвью электрической цепи?
4. Что называется контуром электрической цепи?
5. Что называется узлом электрической цепи?
6. Какие узлы электрической цепи называют виртуальными?
7. Как узнать имя (номер) узла электрической схемы в Multisim?
8. Вольтметром измеряется напряжение на резисторе R1 схемы рис. 4. Номинальное сопротивление резистора соответствует варианту задания. Оцените требования к минимальной величине сопротивления вольтметра, если погрешность измерения напряжения не должна превышать 1%.
9. Сформулировать первый закон Кирхгофа.
10. Сформулировать второй закон Кирхгофа.
11. Оценить требование к максимальной величине сопротивления амперметра, включённого последовательно с резистором R1 схемы на рис. 4, гарантирующего погрешность измерения не более 2%.

### **1.7 Порядок выполнения работы**

1. В среде Multisim создать проект D:\USER\GR-XX\Surname\TEN\L1 (GR-XX – группа - номер, Surname – фамилия. Без символов кириллицы).
2. Построить исследуемую схему. Учитывать, что сопротивление с нулевым номинальным значением заменяется проводником, а с бесконечным номинальным значением исключается из схемы.

3. Определить токи и напряжения в указанных в задании участках схемы.
  - а) воспользовавшись индикаторами;
  - б) воспользовавшись мультиметром;
  - в) воспользовавшись анализом DC Operating Point
4. Покажите, что второй закон Кирхгофа выполняется для каких-либо двух контуров схемы.
5. Подтвердите первый закон Кирхгофа для двух самостоятельно выбранных узлов схемы.
6. Подтвердите полученные в п.4 и п.5 результаты расчетным путем.
7. Определите мощность, рассеиваемую всеми резисторами, и мощность источника питания, воспользовавшись ваттметрами.
8. Воспользовавшись анализом DC-Sweep, постройте графики изменения напряжения в заданных узлах схемы при плавном изменении напряжения источника.

### **1.8 Содержание отчёта**

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исходная схема в соответствии с рис.4.
4. Ответы на вопросы для самоконтроля.
5. Исследуемая схема, с топологией учитывающей номинальные значения сопротивлений.
6. Скриншоты результатов измерений по п. п. 3а, б, в - раздела 1.7.
7. Расчёты при проверке законов Кирхгофа по п.4 и п.5 раздела 1.7.
8. Расчёты по п.6 раздела 1.7.
9. Выводы по результатам сопоставления расчётов выполненных в предыдущих двух пунктах отчёта с оценкой относительного расхождения в %.
10. Результаты сравнения мощности источника и мощности, рассеиваемой всеми резисторами. Дать комментарии.
11. Ответы на контрольные вопросы.

### **1.9 Контрольные вопросы**

Дать определение понятия электрического потенциала.

Почему в практике измерений не используется измерение потенциала?

Сформулируйте условия существования электрического тока.

Определить количество узлов и контуров схемы, исследуемой в работе.

Что означает «количество независимых контуров/узлов электрической схемы»?

Как определить количество независимых контуров электрической схемы?

В чём заключается физический смысл первого закона Кирхгофа?

Сформулировать закон Ома для полной цепи.

В чём состоит различие законов Ома для участка цепи и полной цепи?

### 1.10 Варианты заданий

№ п/п	V1, В	R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм	R6, кОм	R7, кОм
1	11+n1	0	2+n1+n2	3+n1+n2	4+n1+n2	5+n1+n2	6+n1+n2	7+n1+n2
2	12+n1	1+n1+n2	0	3+n1+n2	4+n1+n2	5+n1+n2	6+n1+n2	7+n1+n2
3	13+n1	1+n1+n2	2+n1+n2	0	4+n1+n2	5+n1+n2	6+n1+n2	7+n1+n2
4	14+n1	1+n1+n2	2+n1+n2	3+n1+n2	0	5+n1+n2	6+n1+n2	7+n1+n2
5	15+n1	1+n1+n2	2+n1+n2	3+n1+n2	4+n1+n2	0	6+n1+n2	7+n1+n2
6	16+n1	1+n1+n2	2+n1+n2	3+n1+n2	4+n1+n2	5+n1+n2	0	7+n1+n2
7	17+n1	1+n1+n2	2+n1+n2	3+n1+n2	4+n1+n2	5+n1+n2	6+n1+n2	0
8	18+n1	1+n1+n2	2+n1+n2	3+n1+n2	4+n1+n2	5+n1+n2	$\infty$	7+n1+n2

Исследуемая схема представлена на рис. 4. Номинальные значения компонентов схемы следует выбрать из таблицы вариантов заданий. При номинальном значении сопротивления равном 0, резистор заменяется отрезком провода, а при значении  $\infty$ , ветвь отсутствует. В таблице: № п/п – порядковый номер студента в журнале группы (циклический), n1 и n2 – младшая и следующая за ней цифры зачётной книжки.

## 2 Исследование линейных цепей при гармоническом воздействии

### 2.1 Цель работы

1. Изучение символического метода комплексных амплитуд применительно к анализу линейных цепей при гармоническом воздействии:
  - построение комплексных схем замещения и векторных диаграмм для простейших линейных цепей;
  - расчет комплексных напряжений и токов в цепях.
2. Построение графиков токов и напряжений в линейных цепях в системе компьютерного моделирования Multisim с использованием функции Transient Analysis.

### 2.2 Основные теоретические сведения

**Понятие комплексного числа. Алгебраическая форма записи комплексных чисел.** Комплексное число в алгебраической записи – это выражение вида

$$A = a + jb, \quad (1)$$

где  $a = \text{Re}[A]$  - действительная составляющая,

$b = \text{Im}[A]$  - мнимая составляющая комплексного числа,

$j = \sqrt{-1}$  - мнимая единица.

**Геометрическое представление комплексных чисел.** Наряду с алгебраической формой записи комплексных чисел (1), используют их геометрическое представление на комплексной плоскости (см. рис. 1, а). При этом ось абсцисс называется вещественной осью, а ось ординат – мнимой.

В этом случае комплексное число изображается в виде вектора, проведенного из начала координат в точку  $A$  с абсциссой  $\text{Re}[A]$  и ординатой  $\text{Im}[A]$ .

Длину изображающего вектора называют модулем числа  $A$ , угол между этим вектором и положительным направлением вещественной оси – аргументом числа  $A$  (см. рис. 1, б).

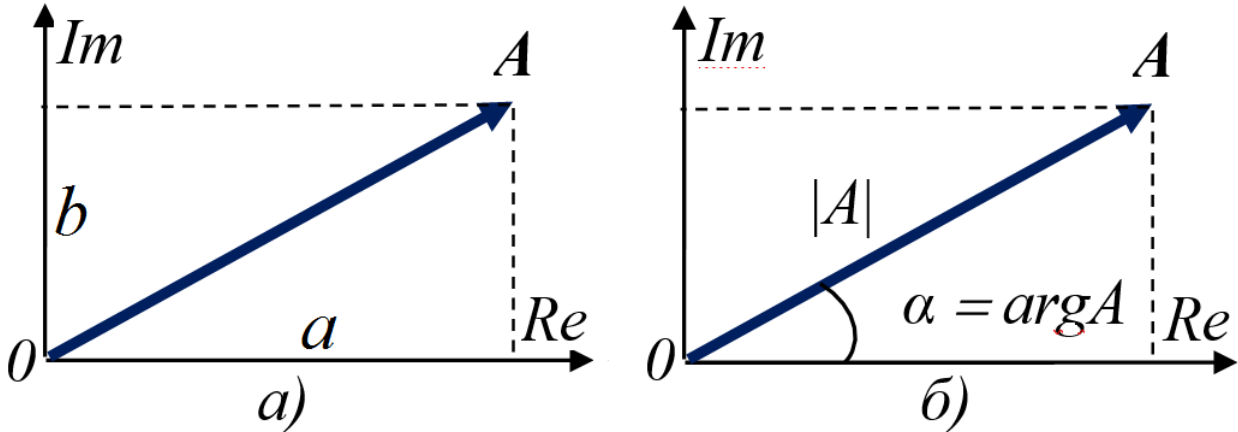


Рисунок 1 – Представление комплексного числа

Модуль и аргумент комплексного числа определяются по его действительной и мнимой составляющим следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} |A| &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ \alpha &= \arg A = \operatorname{arctg} \frac{b}{a} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

**Тригонометрическая форма записи комплексных чисел.** Выражение действительной и мнимой составляющих комплексных чисел через их модуль и аргумент также не представляет сложности:

$$a = \operatorname{Re}[A] = |A| \cos \alpha; \quad b = \operatorname{Im}[A] = |A| \sin \alpha. \quad (3)$$

Из (3) следует тригонометрическая форма записи комплексных чисел:

$$A = |A| \cos \alpha + j |A| \sin \alpha. \quad (4)$$

**Показательная форма записи комплексных чисел.** Опираясь на формулу Эйлера

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha, \quad (5)$$

легко от выражения (4) перейти к показательной форме записи комплексного числа:

$$A = |A| \cdot e^{j\alpha}. \quad (6)$$

**Понятие гармонической функции.** Функция времени называется гармонической, если её значения подчиняются синусоидальному или косинусоидальному закону:

$$a(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

$$a(t) = A_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

В *электротехнике* принята форма записи (7), в радиотехнике и теории цепей – (8). Обе они эквивалентны при условии

$$\varphi' = \varphi + \pi / 2.$$

В этих выражениях  $A_m$  – амплитуда,  $\omega t + \varphi$  – фаза,  $\omega$  – угловая (круговая) частота,  $\varphi$  – начальная фаза. Начальная и мгновенная фазы измеряются в радианах (рад). Угловая частота – в радианах в секунду (рад/с).

Графическое изображение гармонической функции во временной области. График гармонической функции (8) показан на рис. 2. По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат – значения функции  $a(t)$  в единицах изменяющейся величины.

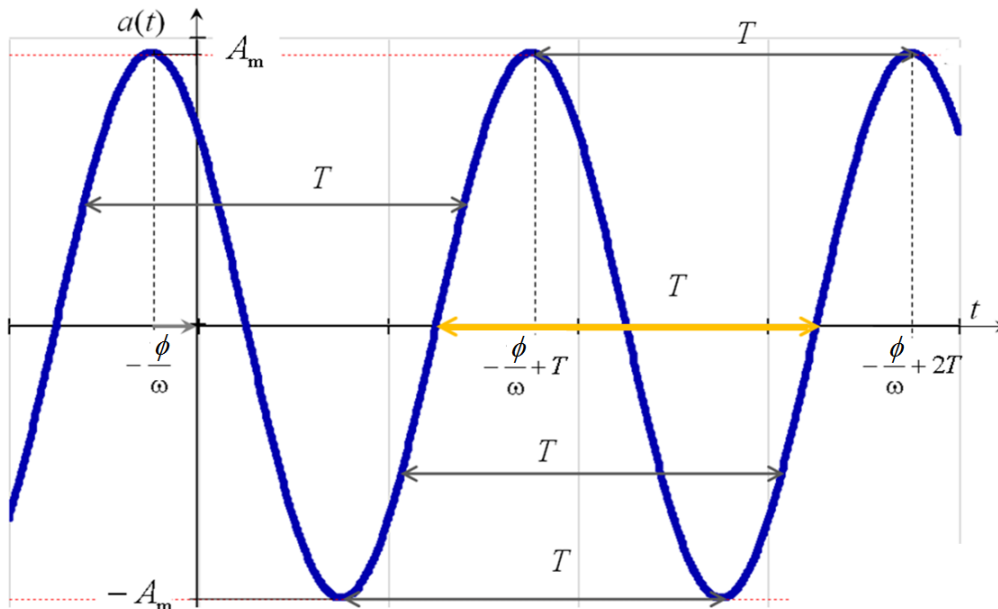


Рисунок 2 – График гармонической функции

Частота периодической функции обратна её периода  $f=1/T$  и связана с круговой частотой соотношением  $\omega = 2\pi f$ . Отсюда период равен  $T = 2\pi / \omega$ .

**Определение сдвига фаз двух гармонических функций одинаковой частоты.** Рассмотрим две гармонические функции  $a_1(t)$  и  $a_2(t)$ , имеющие одинаковые круговые частоты, но различные амплитуды  $A_{m1}$  и  $A_{m2}$ , и начальные фазы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  (рис. 3):



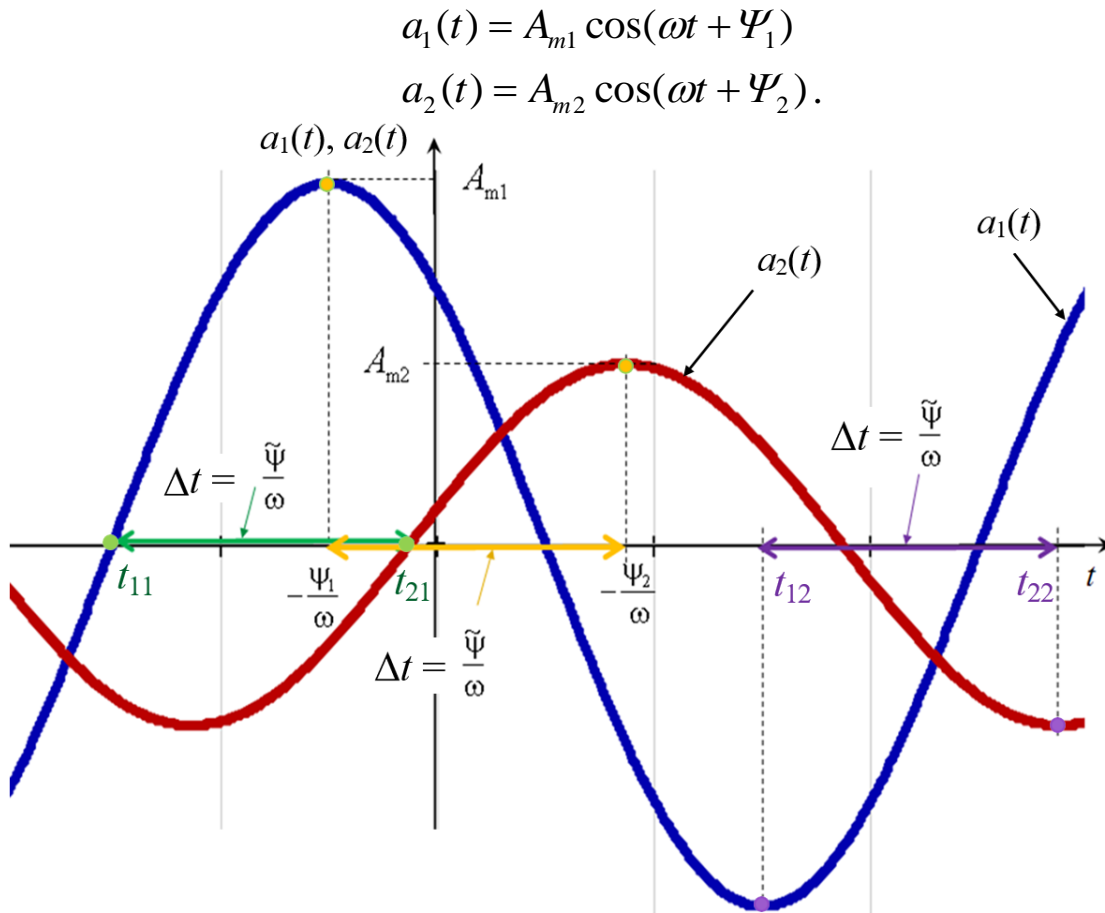


Рисунок 3 – Угол сдвига фаз между гармоническими функциями

Разность фаз определяется как:

$$\tilde{\Psi} = \omega t + \Psi_1 - (\omega t + \Psi_2) = \Psi_1 - \Psi_2.$$

Так как аргумент периодической функции равен

$$(\omega t + \Psi_1) = \omega(t + \Psi_1 / \omega) = \omega(t + t_1) = 2\pi(t / T + t_1 / T),$$

то отсюда следует, что начальная фаза – это доля периода, умноженная на нормирующий множитель  $2\pi$ . Если начальная фаза выражена в градусах, то тогда – это доля периода умноженная на  $360^\circ$ . Угол сдвига фаз может быть определён по результатам измерения временного интервала между одинаковыми фазами сигналов и периода на графике как:

$$\tilde{\Psi} = \Delta t \cdot \omega = 2\pi \cdot \Delta t / T.$$

Две гармонические функции одинаковой частоты совпадают по фазе (являются синфазными), если разность их начальных фаз

равна 0, и находятся в противофазе, если угол сдвига фаз равен  $\pm\pi$ .

**Мгновенный комплекс гармонической функции.** Любой функции, заданной в форме (8), можно поставить в соответствие комплексное число

$$\dot{a} = A_m \cdot e^{j(\omega t + \Psi)}. \quad (9)$$

Число  $\dot{a}$ , называемое мгновенным (текущим) комплексом гармонической функции  $a(t)$ , имеет модуль, равный её амплитуде, и аргумент, равный её фазе.

В соответствии с формулой Эйлера (5) мгновенный комплекс (9) можно представить в виде:

$$\dot{a} = A_m [\cos(\omega t + \Psi) + j \sin(\omega t + \Psi)]. \quad (10)$$

Отсюда следует, что в зависимости от выбранного варианта записи исходной функции она будет представлять собой действительную или мнимую часть мгновенного комплекса.

**Комплексная амплитуда гармонической функции.** По определению, комплексная амплитуда  $\dot{A}_m$  гармонической функции времени – это комплексное число, модуль которого равен амплитуде этой функции, а аргумент – её начальной фазе:

$$\dot{A}_m = \dot{a}_{t=0} = A_m e^{j\Psi}. \quad (11)$$

Геометрическая интерпретация комплексной амплитуды приведена на рис. 4, а.

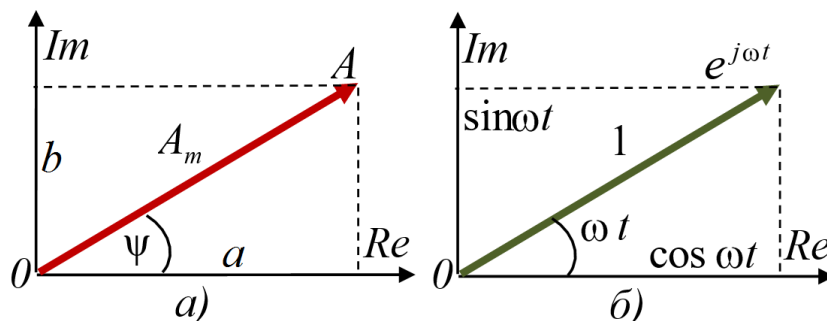


Рисунок 4 – Геометрическая интерпретация гармонических функций:

а) комплексная амплитуда, б) вращающийся единичный вектор

Выражение гармонической функции через её комплексную амплитуду. Мгновенный комплекс (9) можно представить в форме:

$$\dot{a} = A_m \cdot e^{j(\omega t + \Psi)} = A_m e^{j\Psi} e^{j\omega t} = \dot{A}_m e^{j\omega t}.$$

Отсюда функция времени:

$$a(t) = \text{Im} \left[ \dot{A}_m e^{j\omega t} \right].$$

Здесь сомножитель  $e^{j\omega t}$  – оператор вращения. Он имеет единичную длину и вращается в комплексной плоскости против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$  (рис. 4, б). Комплексную амплитуду рассматривают как изображение функции времени на комплексной плоскости. Сама функция при этом называется оригиналом. Поскольку все напряжения и токи линейной схемы являются функциями времени одной и той же частоты, то взаимное положение мгновенных комплексов остаётся неизменным, и соответствует взаимному положению соответствующих комплексных амплитуд.

### **Математическая модель процессов в электрической цепи.**

Режим работы, при котором все токи и напряжения электрической цепи являются периодическими функциями времени, называется установившимся (постоянный ток – частный случай функции с периодом равным бесконечности). Представление токов и напряжений периодическими процессами является лишь приближённой моделью реальных процессов.

Поскольку для комплексных изображений функции оператор вращения является общим, то вся специфическая информация определяется комплексными амплитудами, т. е. вещественными амплитудами токов и напряжений и начальными фазами. Законы Ома для постоянного тока справедливы для цепей переменного тока при замене токов и напряжений на комплексные амплитуды, или комплексные действующие значения (при этом амплитуды делят на  $\sqrt{2}$ ).

**Комплексная схема замещения цепи.** Пассивный двухполюсник – это участок цепи без источников энергии, имеющий два внешних зажима. Любому изолированному пассивному двухполюснику (рис. 5, а) (в том числе и любому

идеализированному пассивному элементу – сопротивлению, ёмкости и индуктивности) можно поставить в соответствие комплексную схему замещения.

В этой схеме участок цепи будет представлен комплексным сопротивлением или проводимостью, а токи и напряжения – комплексными амплитудами (рис. 5, б).

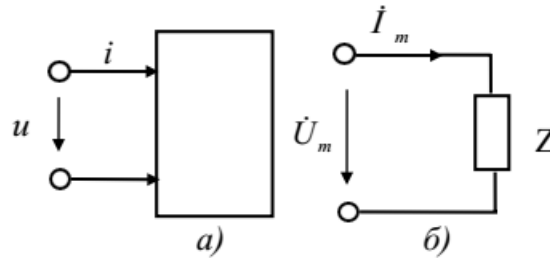


Рисунок 5 – Представление участка цепи двухполюсником

**Комплексное сопротивление цепи** определяется как отношение комплексных амплитуд напряжения и тока:

$$Z = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{U_m e^{j\psi_U}}{I_m e^{j\psi_I}} = \frac{U_m}{I_m} e^{j(\psi_U - \psi_I)}. \quad (12)$$

Сопротивление может быть представлено и в алгебраической форме:

$$Z = r + jx = |Z| \cos(\psi_U - \psi_I) + j|Z| \sin(\psi_U - \psi_I), \quad (13)$$

где

$$|Z| = \sqrt{r^2 + x^2}; \quad \psi_U - \psi_I = \arctg(x/r). \quad (14)$$

Комплексная проводимость цепи может быть представлена также в алгебраической  $Y = g + jb$ , или комплексной форме. Определим связь между алгебраическими формами представления проводимости и сопротивления:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{r + jx} = \frac{r - jx}{(r + jx)(r - jx)} = \frac{r - jx}{r^2 + x^2}.$$

При этом:

$$a = \frac{r}{r^2 + x^2}; \quad b = -\frac{x}{r^2 + x^2}.$$

Изображение сопротивления  $Z$  и проводимости  $Y$  на комплексной плоскости показано на рис. 6, а и б.

**Алгоритм анализа цепи методом комплексных амплитуд:**

- замена всех гармонических токов и напряжений (оригиналов) их комплексными изображениями;
- составление комплексной схемы замещения;
- составление и решение уравнений Ома и Кирхгофа в комплексной форме;
- обратный переход от комплексных изображений к оригиналам.

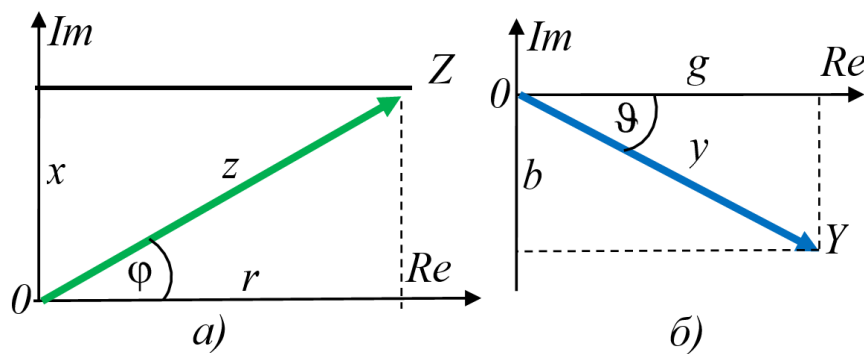


Рисунок 6 – Треугольники сопротивления (а) и проводимости (б)

### 2.3 Идеальные пассивные элементы при гармоническом воздействии

**Резистивный элемент.** При гармоническом воздействии ток, протекающий через идеализированный линейный резистор сопротивлением  $R$ , совпадает по фазе с напряжением. Комплексные амплитуды напряжения и тока резистивного элемента имеют одинаковые аргументы и отличающиеся в  $R$  раз модули. Комплексное сопротивление идеального резистора содержит только действительную составляющую  $R$ .

**Ёмкостный элемент.** Ток идеальной ёмкости опережает по фазе напряжение на  $90^\circ$ :

$$u_C = U_{mC} \sin(\omega t + \varphi); \quad i_C = \omega C U_{mC} \sin(\omega t + \varphi + \pi / 2).$$

Комплексное сопротивление и проводимость емкости определяются выражениями:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}, \quad Y_C = j\omega C.$$

**Индуктивный элемент.** При гармоническом воздействии ток идеальной катушки индуктивности отстает по фазе от напряжения на  $90^\circ$ . Поскольку ёмкость и индуктивность (также как и сопротивление и проводимость) являются попарно дуальными элементами, процессы, происходящие в них при гармонических воздействиях описываются подобными по структуре выражениями. Поэтому записать эти выражения самостоятельно не вызывает затруднений.

## 2.4 Пример расчёта последовательной RL-цепи

Рассмотрим последовательную цепь, содержащую сопротивление и индуктивность (рис. 7, а).

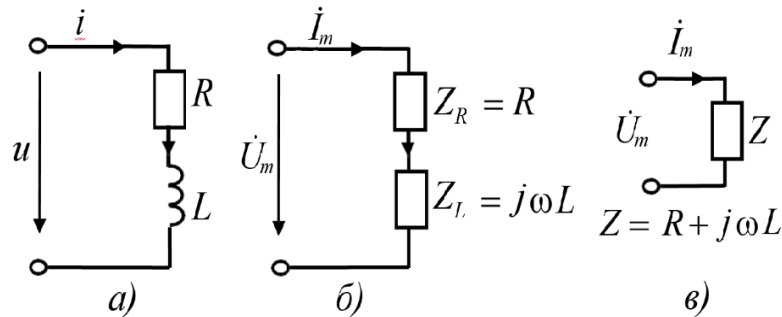


Рисунок 7 –  $RL$ -цепь и её схемы замещения

Перейдя от мгновенных значений тока и напряжения к их изображениям и представив сопротивление и индуктивность их комплексными схемами замещения, получаем схему, изображенную на рис. 7, б.

Дальнейшее упрощение (с учетом того, что для последовательной цепи комплексное сопротивление равно сумме комплексных сопротивлений элементов) приводит к рис. 7, в.

Комплексное сопротивление цепи находим с помощью представления вектора  $Z$  на комплексной плоскости как суммы векторов  $Z_R$  и  $Z_L$  (рис. 8, а).

Модуль комплексного сопротивления рассчитывается как гипотенуза прямоугольного треугольника сопротивлений с катетами  $R$  и  $\omega L$ :

$$z = |Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (15)$$

Аргумент определяется в соответствии с выражением:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}. \quad (16)$$

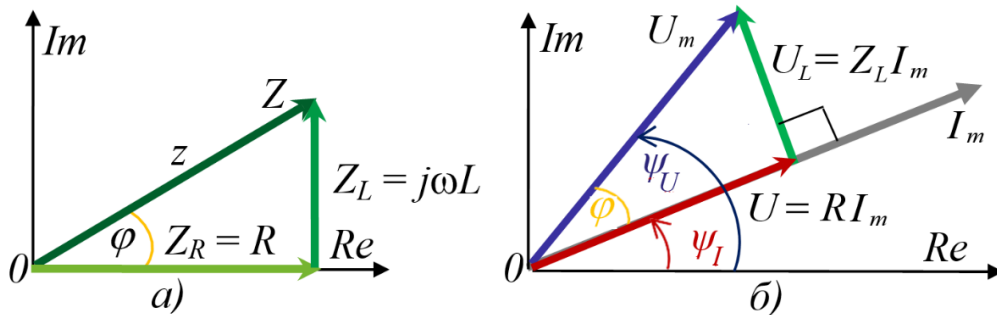


Рисунок 8 – Треугольник сопротивлений и векторная диаграмма последовательной  $RL$  цепи

Векторная диаграмма для комплексных амплитуд тока и напряжений на элементах цепи представлена рис. 8, б. Напряжение на резисторе совпадает по фазе с током в цепи, вектор напряжения на катушке индуктивности повернут относительно вектора тока на  $90^\circ$  против часовой стрелки. При этом ток определяется делением комплексной амплитуды напряжения на входе цепи на комплексное сопротивление. Модуль тока равен модулю напряжения, делённому на модуль сопротивления, определённый по выражению (15). Вектор тока отстаёт от вектора напряжения на угол  $\varphi$ , вычисленный по (16).

## 2.5 Исследование цепей переменного тока в режиме анализа переходных процессов

Выберем в меню Simulate (Моделирование) вкладки Analyses and simulation Transient (Анализ переходных процессов). В открывшемся окне устанавливаются:

- начальное время (Start Time TSTART) – 50 с;
- конечное время (End Time TSTOP) – 51 с;
- максимальный шаг моделирования (maximum time step TMAX) – 0,0001 с.

Моделирование с большим значением начального времени позволит отсечь переходные процессы.

На вкладке выходных параметров следует выбрать:

- значение тока;
- напряжение источника;
- напряжение на катушке индуктивности;
- напряжение на резисторе.

Для внесения в список выходных переменных какого-либо выражения, необходимо воспользоваться кнопкой Add Expression (Добавить выражение).

## 2.6 Исследуемые схемы

На рис. 9 и 10 представлены исследуемые RL и RC схемы.

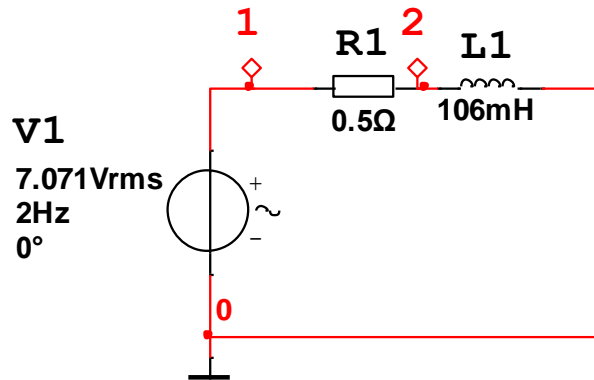


Рисунок 9 – Схема исследуемой RL-цепи

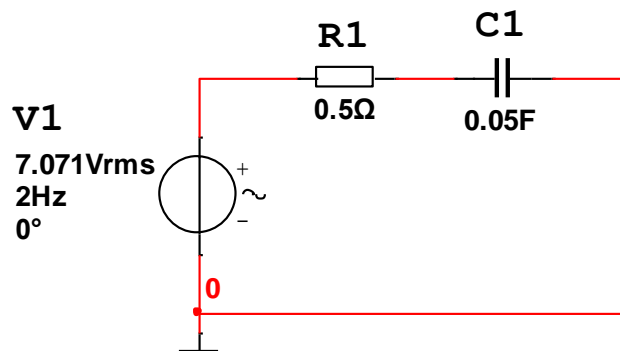


Рисунок 10 – Схема исследуемой RC-цепи

## 2.7 Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в



соответствующих разделах конспекта лекций;

- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы;
- выписать исходные данные для своего варианта задания и вычислить номинальные значения параметров элементов схемы;
- оформить заготовку отчёта по лабораторной работе в электронной форме, включив в неё исследуемые схемы;
- дать письменные ответы на вопросы для самоконтроля.

## **2.8 Вопросы для самоконтроля**

1. Почему математическая модель, опирающаяся на понятие периодических процессов, является приближительной?
2. Что такое начальная фаза периодического процесса?
3. Что такое фаза периодического процесса?
4. Что такое комплексные числа?
5. Как связаны алгебраическая и показательная формы записи комплексного числа?
6. Что такое комплексная амплитуда гармонической функции?
7. Что представляет собой мгновенный комплекс гармонической функции?
8. Как определить комплексное сопротивление пассивного двухполюсника?
9. Как связаны между собой комплексное сопротивление и комплексная проводимость цепи?
10. Как определить комплексную проводимость цепи через её комплексное сопротивление, представленное в алгебраической форме?
11. Как определить комплексное сопротивление последовательной цепи через комплексные сопротивления её элементов, представленные в алгебраической форме?

## 2.9 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Соберите поочередно схемы (рис. 9 и 10), сохранив действующее значение напряжения  $U$ , частоту  $f$  и фазу  $\varphi$  источника питания:

$$U = 7,071 \text{ В}; \quad f = 2 \text{ Гц}; \quad \varphi = 0.$$

Замечание: система Multisim осуществляет моделирование гармонических процессов согласно выражению (7). Фаза источника при этом задается в градусах.

2. Параметры используемых компонентов указаны в табл. 1. Вариант задания для каждого студента соответствует его номеру в списке подгруппы в журнале преподавателя,  $n_1, n_2$  – младшая и следующая цифра в зачётной книжке.
3. Найдите расчётным путём комплексные изображения тока и напряжений на всех компонентах цепей и соответствующие им оригиналы.
4. Воспользовавшись результатами анализа переходных процессов (Transient), проверьте соответствие теоретических результатов экспериментальным. (Временные параметры моделирования выбирайте с учетом необходимости отсечения переходных процессов).

## 2.10 Содержание отчета

1. Титульный лист
2. Цель работы.
3. Основные формулы, используемые при расчетах.
4. Исследуемые схемы.
5. Подробная запись всех этапов проведенных расчетов и их результаты.
6. Скриншоты графиков, полученных в результате анализа переходных характеристик (напряжения и токи в функции времени), с открытыми окнами курсоров.
7. Сопоставление расчетных данных с результатами моделирования.
8. Векторные диаграммы в комплексной плоскости, соответствующие графикам токов и напряжений во временной области. Векторные диаграммы для сопротивлений.

9. Выводы.

10. Ответы на контрольные вопросы.

### 2.11 Контрольные вопросы

Проиллюстрируйте, как по временным диаграммам тока и напряжения в RL цепи определить угол сдвига фаз между ними.

Покажите теоретически, что напряжение на конденсаторе отстаёт от тока на  $90^\circ$  при синусоидальном токе.

Отметьте на временных диаграммах моменты времени, в которые энергия, запасённая в конденсаторе и катушке индуктивности – максимальна, минимальна.

Чему равно среднее значение за период мощности на каждом из элементов исследуемых цепей?

### 2.12 Варианты заданий

Таблица 1

№ варианта	Ёмкость $C_1$ , мФ	Индуктивность $L$ , мГн	Сопротивление $R$ , Ом
1	$100+5n_1+4n_2$	$20+n_1+2n_2$	$0.75+0.05n_1+0.04n_2$
2	$500+5n_1+10n_2$	$80+5n_1+2n_2$	$2+0.05n_1+0.04n_2$
3	$700+5n_1+10n_2$	$50+n_1+2n_2$	$3+0.05n_1+0.04n_2$
4	$350+5n_1+4n_2$	$150+n_1+2n_2$	$3+0.05n_1+0.04n_2$
5	$250+5n_1+4n_2$	$250+10n_1+5n_2$	$4+0.05n_1+0.04n_2$
6	$550+5n_1+10n_2$	$20+n_1+2n_2$	$0.5+0.05n_1+0.04n_2$
7	$150+5n_1+4n_2$	$250+4n_1+5n_2$	$4+0.05n_1+0.04n_2$
8	$850+5n_1+10n_2$	$50+n_1+2n_2$	$0.75+0.05n_1+0.04n_2$
9	$100+5n_1+4n_2$	$75+n_1+2n_2$	$1.5+0.05n_1+0.04n_2$
10	$750+5n_1+10n_2$	$60+10n_1+2n_2$	$2+0.05n_1+0.04n_2$
11	$200+5n_1+4n_2$	$25+n_1+2n_2$	$1.5+0.05n_1+0.04n_2$
12	$800+5n_1+10n_2$	$90+4n_1+5n_2$	$0.5+0.05n_1+0.04n_2$

\*№ варианта соответствует номеру студента в списке подгруппы,  $n_1$ ,  $n_2$  – младшая и следующая цифра в зачётной книжке.

### **3 Измерение полного комплексного сопротивления электрической цепи**

#### **3.1 Цель работы**

1. Измерение полного комплексного сопротивления в RLC-цепях на переменном токе.
2. Построение амплитудно- и фазочастотных характеристик комплексного сопротивления RLC-цепей.

#### **3.2 Исследование электрических цепей в режиме частотной развёртки**

При воздействии на линейную электрическую цепь гармоническим сигналом форма поведения цепи определяется её комплексным сопротивлением, т.е. для некоторой фиксированной частоты всего лишь парой чисел (модулем и фазой, или активной и реактивной составляющей комплексного сопротивления). Определение комплексного сопротивления в диапазоне частот позволяет рассчитать реакцию цепи на сигнал произвольной формы, прибегая к его Фурье-разложению и последующему восстановлению сигнала как функции времени.

Для определения сопротивления на постоянном токе широко используется метод вольтметра-амперметра. На переменном токе метод вольтметра-амперметра позволяют определить лишь модуль сопротивления. Для определения полного сопротивления требуется применение фазочувствительных вольтметров или амперметров, или приходится применять вольтметр и амперметр переменного тока, и фазометр.

Для исследований поведения устройств работающих в диапазоне частот применяют измерители амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

Программы моделирования электрических схем, в том числе Multisim имеют средства построения АЧХ и ФЧХ. В Multisim этот режим может быть выбран Simulate/Analyses and simulation/AC Sweep. При этом откроется окно с настройками режима (рис. 1).

В первой закладке можно задать границы частотной развёртки, масштаб отображения частоты логарифмический декадный, октавный, или линейный, количество точек, в которых

осуществляется измерение в пределах выбранного поддиапазона, масштаб по вертикальной оси.

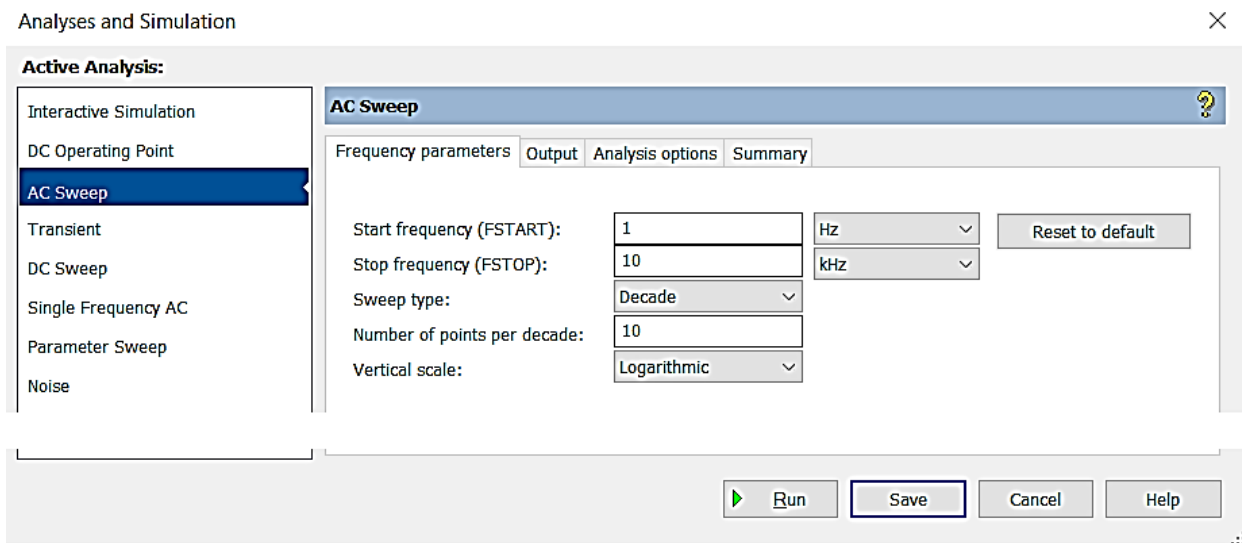


Рисунок 1 – Окно настройки режима частотной развёртки

В закладке Output выбираются переменные, зависимость от частоты которых желают исследовать. Если отображаемые величины представляют собой функции непосредственно измеряемых параметров, то следует выбрать пункт добавить выражение (Add Expression) (рис. 2).

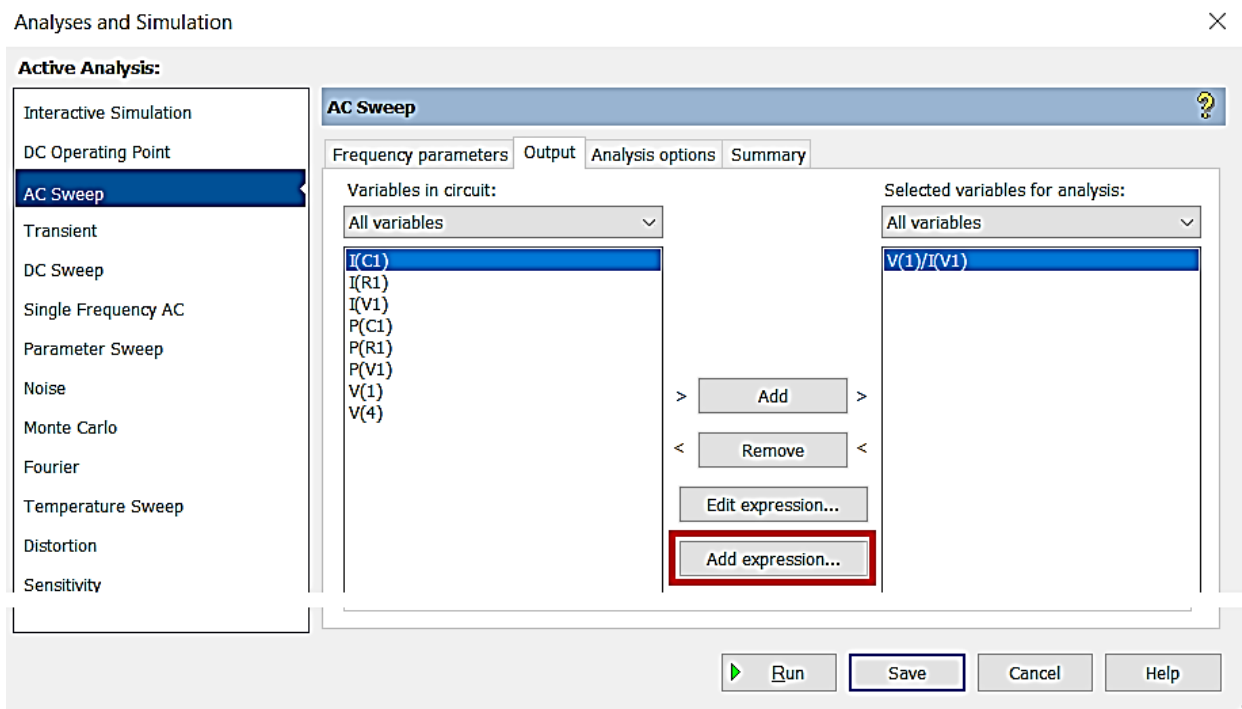


Рисунок 2 – Выбор режима ввода выражений

Затем следует последовательно выделять вводимые переменные и функции и копировать их в поле для выражения (рис. 3).

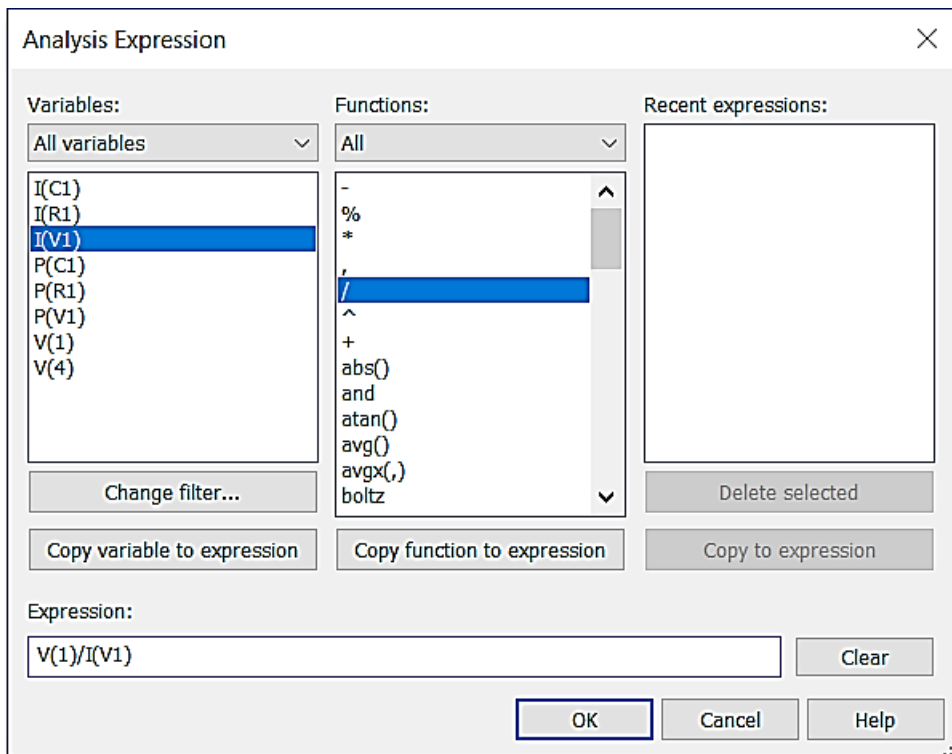


Рисунок 3 – Ввод символьных выражений

После запуска моделирования щелчком ЛКМ на иконке Run (рис. 1 или 2) будет построена частотная зависимость запрашиваемых параметров или функций способ отображения которых можно настроить по своему желанию (рис. 4).

### AC Sweep

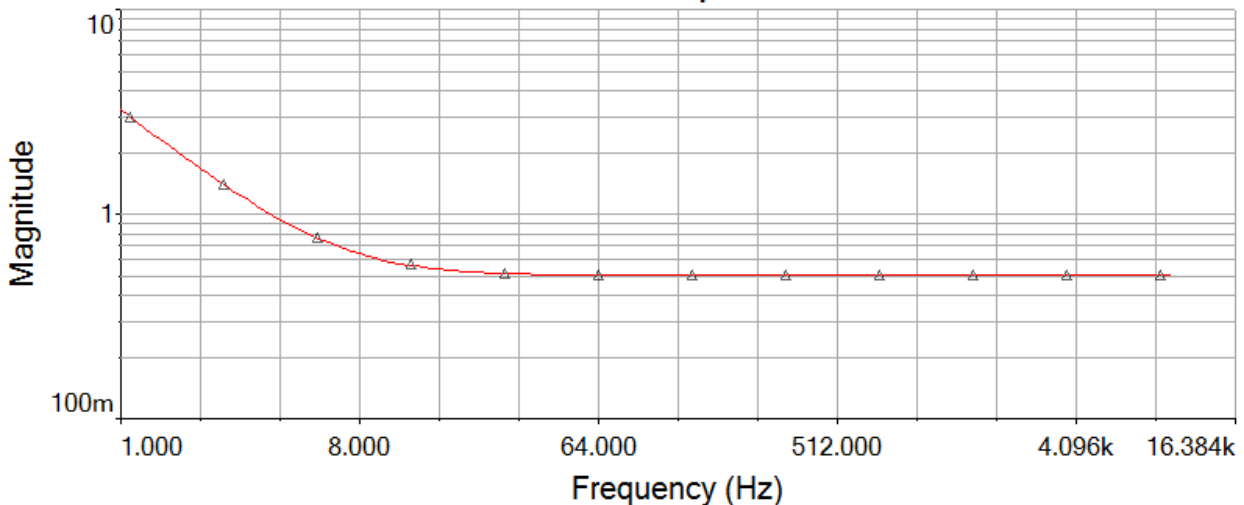


Рисунок 4 – Зависимость модуля полного сопротивления от частоты

### 3.3 Подготовка к выполнению лабораторной работы

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы;
- выписать исходные данные для своего варианта задания и вычислить номинальные значения параметров элементов схемы;
- оформить заготовку отчёта по лабораторной работе в электронной форме, включив в неё исследуемые схемы (рис. 5);
- дать письменные ответы на вопросы для самоконтроля.

### 3.4 Вопросы для самоконтроля

1. Как зависит сопротивление катушки индуктивности от частоты?
2. Как зависит сопротивление конденсатора от частоты?
3. Как зависит сопротивление параллельного соединения резистора и конденсатора от частоты?
4. В каких пределах изменяется угол сдвига фаз между напряжением и током при последовательном соединении катушки индуктивности и резистора с увеличением частоты?
5. В каких пределах изменяется угол сдвига фаз между напряжением и током при параллельном соединении катушки индуктивности и резистора с увеличением частоты?

### 3.5 Порядок выполнения работы

1. Запустите программу Multisim, создайте и сохраните проект в папке созданной при выполнении работы №1. В этой же папке сохраните заготовку отчёта, созданную при домашней подготовке.
2. В режиме частотной развёртки постройте амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) комплексного сопротивления для схем 1-9 (рис. 5).

\*Масштаб по оси частот рекомендуется логарифмический, а по вертикальной оси линейный.

3. Для схем, в которых наблюдается явление резонанса, рассчитайте частоту резонанса и проверьте соответствие расчетов результатам моделирования.
4. Изобразите для каждой схемы её векторную диаграмму.
5. Выведите выражения для зависимости полного сопротивления от частоты в показательной форме.
6. Постройте теоретические зависимости, используя Excel или привычную вам программу математических расчётов (Mathcad, MATLAB).
7. Сравните теоретические и экспериментальные данные. Сделайте выводы.

### **3.6 Содержание отчёта**

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Скриншоты схем.
4. Скриншоты графиков АЧХ и ФЧХ.
5. Результаты всех расчётов.
6. Векторные диаграммы для каждой из схем.
7. Анализ соответствия теоретических зависимостей экспериментальным результатам.
8. Выводы.
9. Ответы на контрольные вопросы.

### **3.7 Контрольные вопросы**

1. Чему равно полное сопротивление цепи №9 на частоте резонанса? Пояснить ответ на основе анализа схемы.
2. Как ориентированы токи ёмкости и индуктивности цепи №8 на частоте резонанса?
3. Чему равно полное сопротивление цепи №7 на частоте резонанса? Пояснить ответ на основе анализа схемы.
4. Чем определяется отношение напряжения на реактивных элементах цепи №6 к входному напряжению на частоте резонанса?



## 3.8 Варианты задания

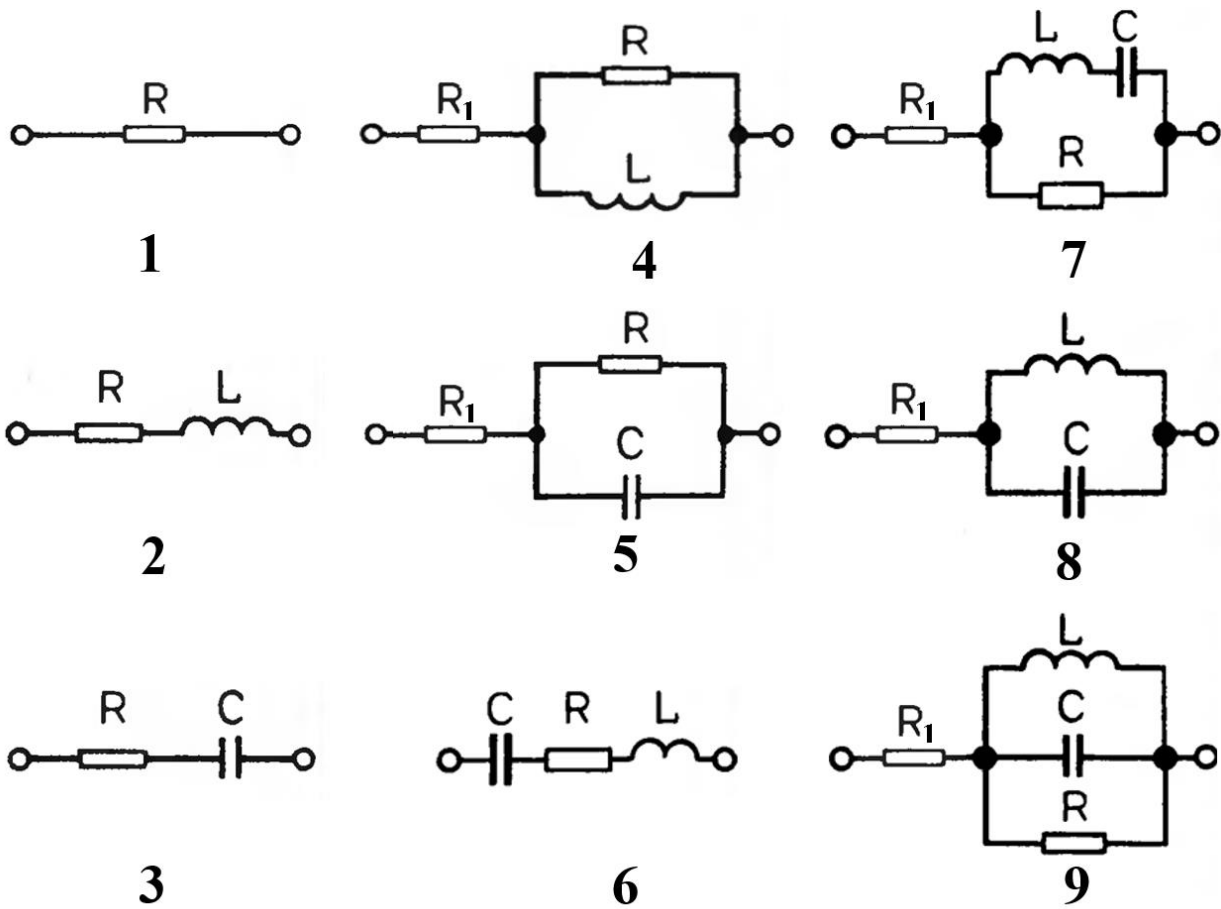


Рисунок 5 – Исследуемые схемы

Номинальные значения элементов исследуемых схем:

$$R_1 = 0.1 \text{ Ом,}$$

$$R = 2 + n_1 + 0.5n_2 \text{ Ом,}$$

$$L = 5 + n_1 + 0.5n_2 \text{ мГн,}$$

$$C = 40 + 2n_1 + n_2 \text{ мФ.}$$

$n_1, n_2$  – младшая и следующая цифры зачётной книжки.

## 4 Исследование вынужденных колебаний в замкнутом последовательном контуре

### 4.1 Цель работы

1. Изучение вынужденных колебаний в последовательном колебательном контуре.
2. Построение и анализ графиков токов и напряжений в контуре в системе компьютерного моделирования Multisim с использованием функции анализа переходных процессов.
3. Построение и анализ АЧХ и ФЧХ контура в системе компьютерного моделирования Multisim с использованием метода частотной развёртки.

### 4.2 Основные теоретические сведения

**Вынужденные колебания в колебательном контуре.** Свободные колебания в любом реальном колебательном контуре являются затухающими: наличие активного сопротивления ведет к тому, что энергия контура необратимо расходуется на тепловыделение.

В радиотехнике используются в основном незатухающие колебания, при которых запас энергии контура непрерывно пополняется. Для пополнения энергии контур подключают к источнику переменного напряжения.

**Вынужденными колебаниями** называют незатухающие колебания в контуре, частота которых определяется частотой генератора, питающего контур.

При включении генератора в разрыв контура колебательный контур называется последовательным (рис. 1, а), при подключении генератора извне контура – параллельным (рис. 1, б).



Рисунок 1 – Колебательные контуры

**Условия резонанса в последовательном колебательном контуре.** Резонансом напряжений называется режим вынужденных колебаний, возникающий в последовательном контуре при равенстве ёмкостного и индуктивного сопротивлений.

Таким образом, при резонансе напряжений должно выполняться соотношение:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  – круговая частота резонанса, связанная с линейной частотой резонанса  $f_0$  зависимостью

$$\omega_0 = 2\pi f_0, \quad (2)$$

$L$  – индуктивность катушки контура,  $C$  – ёмкость конденсатора контура.

Поскольку из (1) и (2) следует, что

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

очевидно, что резонансная частота вынужденных колебаний контура совпадает с частотой его свободных колебаний.

Потому условие резонанса в последовательном контуре часто представляют как условие совпадения частоты питающего генератора с собственной частотой контура.

**Зависимость характера сопротивления контура от частоты генератора.** Полное входное сопротивление контура  $Z_K$  представляется в виде геометрической суммы активной ( $R$ ) и реактивной ( $X$ ) составляющих

$$Z_K = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (4)$$

где реактивная составляющая  $X$  равна разности индуктивного  $X_L$  и ёмкостного  $X_C$  сопротивлений

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}, \quad (5)$$

$\omega$  - круговая частота генератора.

Полное сопротивление контура может быть как чисто активным (резистивным), так и резистивно-индуктивным или резистивно-ёмкостным.

Зависимость характера сопротивления контура от частоты (сплошная линия) показана на рис. 2. Пунктирными линиями на отмечены частотно-зависимые сопротивления катушки индуктивности и конденсатора, и постоянное активное сопротивление.

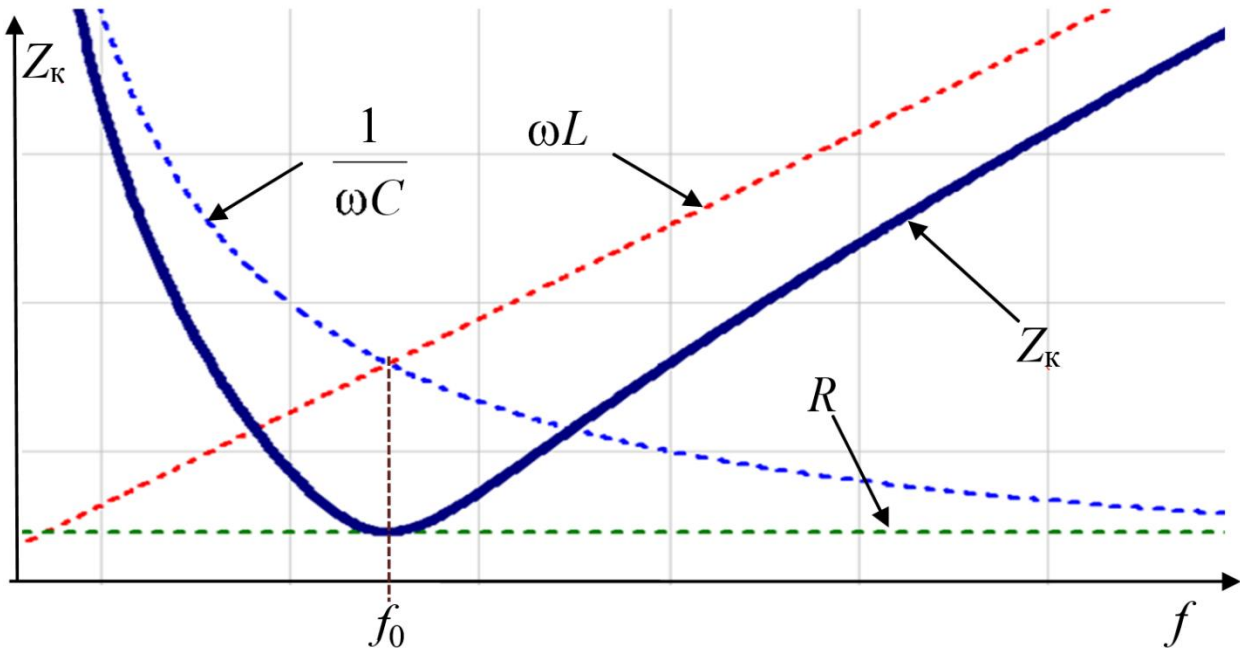


Рисунок 2 – Частотные характеристики

Собственная частота контура (частота резонанса)  $f_0$  соответствует минимуму его полного сопротивления. На малых частотах (меньших  $f_0$ ) сопротивление ёмкости больше сопротивления индуктивности, а потому сопротивление контура резистивно-ёмкостное. На больших (больших  $f_0$ ), напротив, «доминирует» сопротивление индуктивности, а потому сопротивление контура становится резистивно-индуктивным.

На частоте резонанса полное сопротивление контура не содержит реактивной составляющей и является чисто активным. При этом ток в контуре

$$I_k = \frac{U_{\text{ГЕН}}}{Z_k} \quad (6)$$

при фиксированных напряжении генератора  $U_{\text{ГЕН}}$  и параметрах контура достигает своего максимального значения (рис. 3).

Резонансной кривой называется зависимость тока в контуре от частоты генератора в окрестности частоты резонанса (рис. 3).

Формы резонансных кривых контура зависят от его параметров. Чем больше активное сопротивление контура, тем более пологой является вершина резонансной кривой.

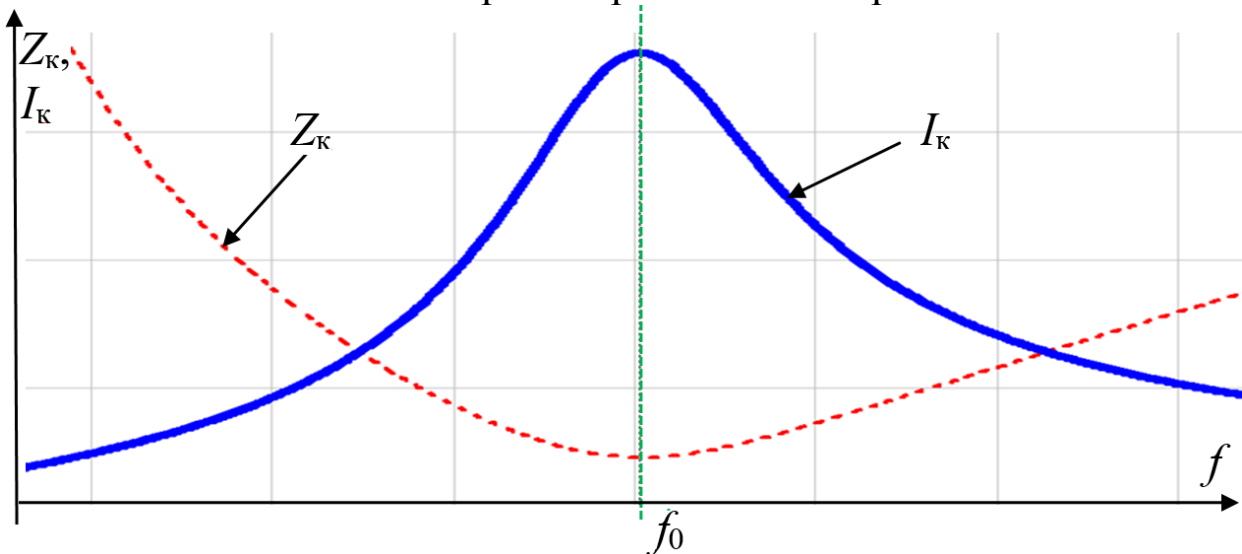


Рисунок 3 – Резонансные кривые

Чем больше волновое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (7)$$

тем более острый максимум.

Если обратиться к интегральной характеристике контура – добротности, учитывающей соотношение между волновым и активным сопротивлением контура:

$$Q = \frac{\rho}{R}, \quad (8)$$

то можно сделать тот же вывод, что чем выше добротность контура, тем острее резонансная кривая, и, следовательно, тем точнее настройка контура на частоту резонанса.

Свойства контура можно оценить по форме резонансной кривой или по значению его добротности. Еще одной характеристикой контура является его полоса пропускания.

**Полосой пропускания контура** называется полоса частот, в пределах которой ток в контуре уменьшается не более, чем в  $\sqrt{2}$  раз. Т. е. в диапазоне частот от  $f_n$  до  $f_k$ , составляющих полосу пропускания, ток контура составляет 70,71 % и более от тока при резонансе (рис. 4).

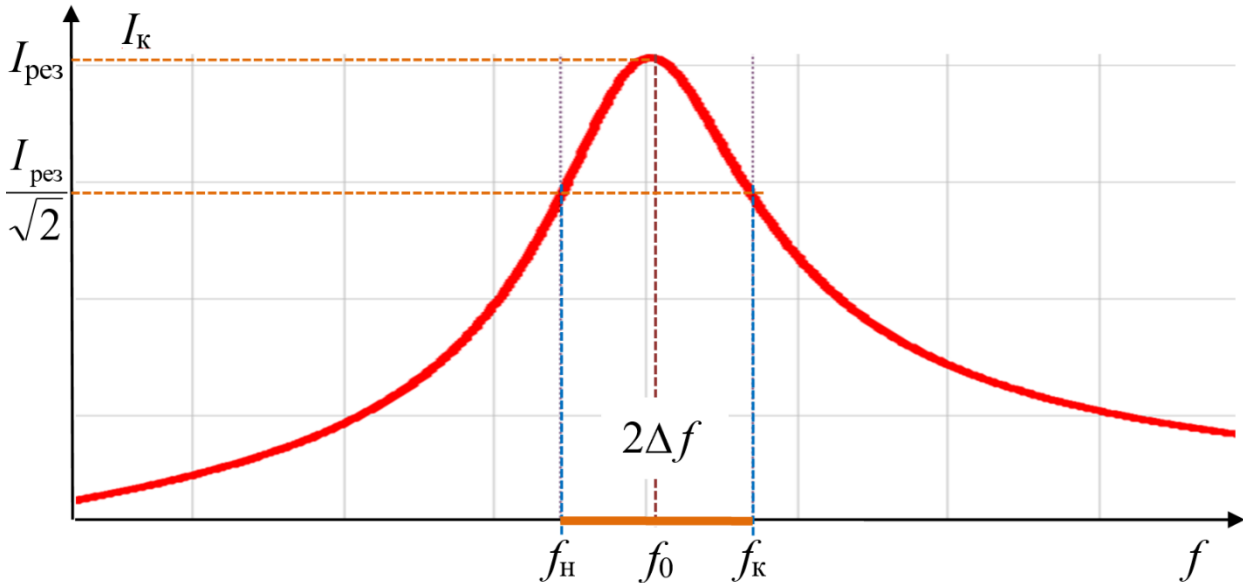


Рисунок 4 – Полоса пропускания колебательного контура

Говорят, что частоты от  $f_H$  до  $f_K$  контур пропускает, а частоты ниже  $f_H$  и выше  $f_K$  контур не пропускает.

Введем обозначение:

$$\Delta f = \frac{f_K - f_H}{2}. \quad (9)$$

Запишем без вывода приближенную формулу, связывающую ширину полосы пропускания контура с его добротностью:

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q}. \quad (10)$$

Очевидно, чем выше добротность контура, тем меньше его полоса пропускания.

### 4.3 Подготовка к выполнению лабораторной работы

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в МУ и соответствующих разделах конспекта лекций;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы;
- выписать исходные данные для своего варианта задания и вычислить номинальные значения параметров элементов схемы (см. п. 4.8);

- оформить заготовку отчёта по лабораторной работе в электронной форме;
- дать письменные ответы на вопросы для самоконтроля.

#### 4.4 Вопросы для самоконтроля

1. Что такое свободные колебания в  $LC$ -контуре?
2. На какой частоте происходят свободные колебания в  $LC$ -контуре?
3. Кратко опишите физические процессы при свободных колебаниях в  $LC$ -контуре.
4. Что такое вынужденные колебания в контуре?
5. На какой частоте происходят вынужденные колебания в  $LC$ -контуре?
6. Что является причиной затухания свободных колебаний в колебательном контуре?

#### 4.5 Порядок выполнения работы

1. Создать проект Multisim и собрать схему (рис. 5).

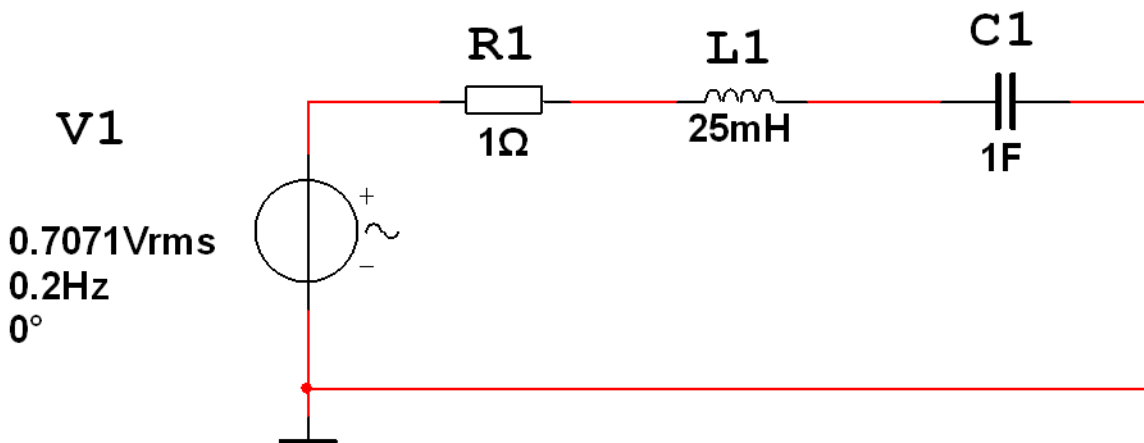


Рисунок 5 – Исследуемая схема

2. В режиме исследования переходных процессов снять временные диаграммы напряжений на всех элементах схемы при трёх различных значениях частот источника переменного тока  $f = 0.2, 1.0, 5.0$  Гц.
3. Рассчитать теоретически амплитуды напряжения на элементах схемы для указанных частот и сравнить с экспериментальными

данными (оценить относительные отклонения экспериментальных данных от теоретических).

4. Изменить номинальные значения элементов схемы (рис. 5) на соответствующие варианту.
5. Построить резонансную кривую контура. Определить полосу пропускания контура.
6. Построить резонансную кривую контура, уменьшив в два раза его активное сопротивление. Определить полосу пропускания контура.
7. Построить резонансную кривую контура, имеющего ту же частоту резонанса, но в два раза большее волновое сопротивление. Определить полосу пропускания контура.
8. Включив в число выходных переменных моделирования напряжение питающего генератора (в качестве опорного), снять временные диаграммы для резонансной частоты, в 5 раз меньшей и в 5 раз большей.
9. Сопоставьте фазовый сдвиг тока относительно напряжения для этих частот, полученный при исследовании цепи методом анализа переходных процессов и частотной развёртки.

#### **4.6 Содержание отчета**

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исследуемые схемы.
4. Основные формулы, используемые при расчетах требуемых характеристик колебательных контуров.
5. Подробная запись всех этапов проведенных расчетов и их результаты.
6. Скриншоты графиков, полученных в результате проведения Transient Analysis и AC-Sweep, с открытыми окнами курсоров.
7. Результаты оценки полосы пропускания по п. п. 5-7.
8. Сопоставление расчетных данных с результатами моделирования.
9. Выводы.
10. Ответы на контрольные вопросы.



### 4.7 Контрольные вопросы

1. Выведите выражение для определения частоты свободных колебаний принимая во внимание, что в отсутствие затухания максимальная энергия, запасаемая в катушке индуктивности равна максимальной энергии, запасаемой в конденсаторе.
2. Какова крутизна спада тока при понижении частоты на достаточном удалении от частоты резонанса?
3. Какова крутизна спада тока при повышении частоты на достаточном удалении от частоты резонанса?
4. Может ли крутизна изменения тока в последовательном колебательном контуре при изменении частоты превысить величину 20дБ/декаду?
5. Может ли напряжение на элементах колебательного контура превысить напряжение источника? Дать развёрнутый ответ.

### 4.8 Варианты задания

Номинальные значения элементов исследуемых схем:

$$R1 = 0.5 + 0.2 n_1 + 0.3 n_2 \text{ Ом,}$$

$$L1 = 20 + n_1 + 0.5 n_2 \text{ мГн,}$$

$$C1 = 0.5 + 0.5 n_1 + 0.5 n_2 \text{ Ф.}$$

$n_1, n_2$  – младшая и следующая цифры зачётной книжки.

## 5 Исследование свободных колебаний в замкнутом контуре

### 5.1 Цель работы

1. Изучение свободных процессов в колебательных контурах:
  - расчет основных параметров свободных колебаний в идеальном контуре;
  - расчет основных параметров свободных колебаний в контуре с потерями.
2. Изучение временных диаграмм свободных колебаний моделированием переходных процессов в Multisim.

### 5.2 Основные теоретические сведения

**Понятие колебательного контура.** Электромагнитными колебаниями называют процесс непрерывного превращения энергии из электрической в магнитную и из магнитной в электрическую.

**Идеальный** колебательный контур – это электрическая цепь, содержащая емкость  $C$  и индуктивность  $L$ .

Всякий **реальный** колебательный контур помимо реактивных элементов содержит также активное сопротивление  $R$ , обуславливающее потери энергии в схеме (рис. 1).

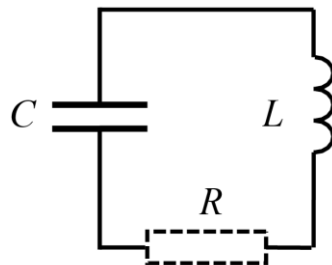


Рисунок 1 – Колебательный контур

Потери энергии складываются из потерь в проводе катушки индуктивности, в рабочем диэлектрике и электродах конденсатора, в соединительных проводах и переходных контактах контура. Колебания, происходящие только за счет первоначального сообщения контуру некоторого запаса энергии (зарядки конденсатора) без последующего её пополнения, называются свободными или собственными.

Колебательные контуры широко используются в генераторах, определяющих рабочие частоты электронных устройств на которых они функционируют, в фильтрах, обеспечивающих выделение нужных частот.

**Частота и период свободных колебаний в идеальном контуре.** Если активное сопротивление контура равно нулю, запасенная энергия в процессе функционирования схемы не расходуется (не превращается в тепло).

Поскольку энергия электрического поля полностью превращается в энергию магнитного поля и обратно, то максимальные значения энергии конденсатора  $W_C$  и катушки  $W_L$  равны:

$$W_C = W_L = \frac{CU_m^2}{2} = \frac{I_m^2 L}{2}, \quad (1)$$

где  $U_m$  и  $I_m$  – амплитудные значения напряжения на контуре (на катушке индуктивности) и тока в контуре соответственно.

С другой стороны,  $U_m = \omega_0 L \cdot I_m$ , где  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – круговая частота тока в контуре. Подставляя в (1), получим:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \quad T_0 = \frac{1}{f_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2)$$

Качественно объяснить формулу (6) можно достаточно просто.

Для создания между обкладками конденсатора с бóльшей ёмкостью той же разности потенциалов требуется бóльший заряд. Следовательно, увеличение ёмкости увеличивает время заряда и разряда конденсатора.

Увеличивая индуктивность контура, мы наращивает её противодействие изменениям тока, а потому ток в контуре с бóльшей индуктивностью будет нарастать и убывать медленнее.

**Волновое (характеристическое) сопротивление контура.** Волновое сопротивление контура определяется отношением амплитуды напряжения на контуре к амплитуде тока в контуре в режиме свободных колебаний. Для его нахождения выразим это отношение из равенства (1):

$$\rho = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3)$$

Для выяснения физического смысла волнового сопротивления рассмотрим два контура, первый из которых образован малой ёмкостью  $C_1$  и большой индуктивностью  $L_1$ , второй – большой ёмкостью  $C_2$  и малой индуктивностью  $L_2$ . При этом будем полагать:

$$L_1 C_1 = L_2 C_2, \quad (4)$$

а, следовательно, период и частоту собственных колебаний обоих контуров одинаковыми. При этом очевидно, что волновое сопротивление первого контура много больше волнового сопротивления второго контура:

$$\rho_1 \gg \rho_2. \quad (5)$$

Это означает, что при одинаковом напряжении ток в первом контуре будет много меньше тока во втором контуре. Аналогично количество энергии в первом контуре меньше, чем во втором. Также легко увидеть, что отношение амплитуды напряжения к току на частоте резонанса, равно сопротивлению катушки индуктивности и сопротивлению конденсатора:

$$\frac{U_m}{I_m} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \rho. \quad (6)$$

**Затухание колебаний в реальном контуре.** В реальных контурах всегда присутствует активное сопротивление, а потому количество «колеблющейся» энергии в контуре постоянно уменьшается, что приводит к затуханию колебаний. В случае малых затуханий амплитуда колебаний (амплитуда напряжения и амплитуда тока) убывает по экспоненциальному закону:

$$U_m(t) = U_m(0)e^{-\delta \frac{t}{T}}; \quad I_m(t) = I_m(0)e^{-\delta \frac{t}{T}}, \quad (7)$$

где  $\delta$  – безразмерная величина, являющаяся количественной характеристикой скорости затухания.

Величина  $\delta$  в теории колебательных систем носит название **декремент затухания**. Величина, обратная декременту затухания, равна количеству колебаний, за которые амплитуда колебаний уменьшится в  $e \approx 2,72$  раз.

Графически декремент затухания колебаний можно найти, взяв натуральный логарифм отношения любых двух последовательных

максимальных (или минимальных) отклонений колеблющейся величины. Кроме того, оказывается, именно декремент затухания позволяет определить, какая часть энергии расходуется в контуре на тепловыделение за половину периода

$$\delta = \frac{W_R}{W_L}, \quad (8)$$

где  $W_R$  – количество энергии, выделяющейся на активном сопротивлении;  $W_L$  – полное количество энергии контура. Количество энергии, запасаемое в катушке, определяется из (1), а выделяющейся на сопротивлении

$$W_R = \frac{I_m^2}{2} T. \quad (9)$$

Тогда декремент затухания

$$\delta = \frac{R}{2L} \cdot T = \frac{R}{2L} \cdot \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi R}{\rho}. \quad (10)$$

В реальных контурах значение декремента затухания не превышает нескольких сотых.

Замечание: затухающие колебания не являются периодическими. Однако, если декремент  $\delta$  мал, можно условно использовать понятие периода затухающих колебаний, как временного интервала между двумя последовательными максимумами колеблющейся величины.

Помимо декремента затухания используются понятия «затухание» и «добротность» контура. Затуханием контура  $d$  называют отношение активного и волнового сопротивлений контура, а добротностью  $Q$  – величину обратную затуханию:

$$d = \frac{R}{\rho}; \quad Q = \frac{1}{d} = \frac{\rho}{R}. \quad (11)$$

Чем больше волновое сопротивление контура по сравнению с активным, тем «лучше» контур, тем выше его добротность.

**Условие возникновения колебаний в реальном контуре.** Колебательный процесс в реальном контуре может возникнуть лишь тогда, когда есть условия для обмена энергией между реактивными элементами схемы: катушкой индуктивности и конденсатором.

Если активное сопротивление контура велико, то такие условия не возникают, и весь запас электрической энергии, накопленной конденсатором, превращается в тепло еще до начала колебательного процесса.

Расчеты показывают, что колебания в контуре с активным сопротивлением могут происходить только при выполнении соотношения:

$$R < 2\rho. \quad (12)$$

В том случае, когда удвоенное волновое сопротивление меньше активного, процесс носит **апериодический** (не колебательный) характер. Если имеет место равенство этих величин, процесс называется **критическим**.

### 5.3 Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в МУ и соответствующих разделах конспекта лекций;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы;
- выписать исходные данные для своего варианта задания и вычислить номинальные значения параметров элементов схемы (см. п. 5.8);
- вычислить частоту затухающих колебаний, волновое сопротивление контура, декремент затухания и добротность контура.
- дать письменные ответы на вопросы для самоконтроля.

### 5.4 Вопросы для самоконтроля

1. Что такое свободные колебания в  $LC$ -контуре?
2. Выполняются ли условия для возникновения колебаний в вашем варианте контура?
3. Что является причиной затухания свободных колебаний в колебательном контуре?
4. При каком условии может идти речь о периоде затухающих колебаний?

## 5.5 Порядок выполнения работы

1. Собрать схему колебательного контура (рис. 2) в соответствии с вариантом задания и превратить контур в идеальный, установив сопротивление резистора равным 0.

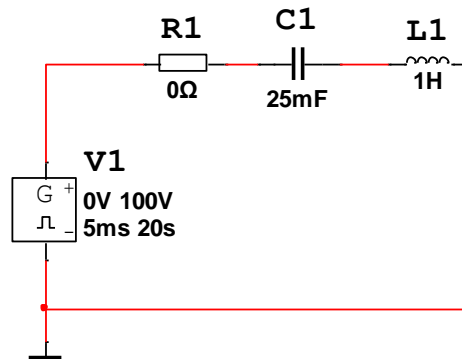


Рисунок 2 – Схема исследуемого колебательного контура

Используемый для начальной зарядки конденсатора импульсный источник Pulse Voltage расположен в библиотеке Sources (рис. 3). Его параметры можно скорректировать, вызвав окно свойств (рис. 4) двойным щелчком ЛКМ.

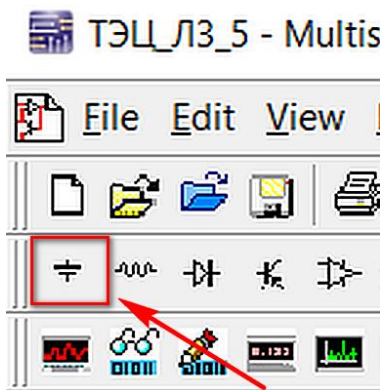


Рисунок 3 – Расположение иконки выбора библиотеки источников (Sources)

Параметры источника следует установить в соответствии с указанными.

начальное значение (Initial Value)	–	0 В;
амплитуда импульса (Pulsed Value)	–	100 В;
задержка импульсов (Delay Time)	–	1 мкс;
длительность фронта (Rise Time)	–	1 пс;
длительность среза (Fall Time)	–	1 пс;
длительность импульса (Pulse Widht)	–	5 мс;
период (Period)	–	20 с.

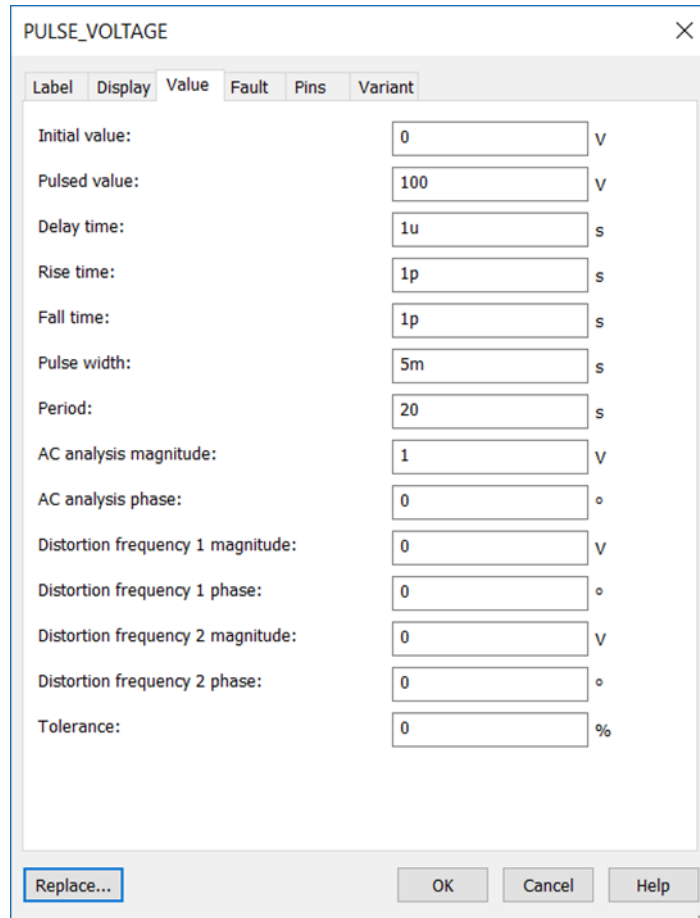


Рисунок 4 – Окно выбора параметров импульсного источника

2. Установить параметры анализа переходных процессов в колебательном контуре.

При этом следует задать следующие параметры исследования (на вкладке Transient):

- начальное время (start time TSTART) – 0 с;
- конечное время (end time TSTOP) – 5 с;
- максимальный шаг (maximum time step TMAX) – 0,0001 с.

На вкладке выходных параметров (Output) выбрать в качестве моделируемых параметров ток контура и напряжение на катушке индуктивности. Установка параметров режима исследования переходных процессов детально рассматривалась в МУ к лабораторной работе №2.

3. Запустить симуляцию.



4. Настроить представление результатов анализа в графической форме.

По завершении моделирования откроется окно графика (Grapher View), позволяющее настроить вид графика удобный для анализа.

Прежде всего следует включить сетку щелчком по её иконке. Далее следует выбрать отображаемую область по вертикальной оси графика. Для этого щелчком ЛКМ по пункту меню «Graph» открыть выпадающее окно и выбрать свойства графика (Properties). В закладке «Left axis» (рис. 5) выбрать нижнюю и верхнюю границу диапазона (Range) так, чтобы кривые переходного процесса (но не импульс напряжения на катушке индуктивности в начальный момент времени) имели максимальные размеры по вертикали. Рекомендуемые начальные установки -10; 10, с последующим их подбором.

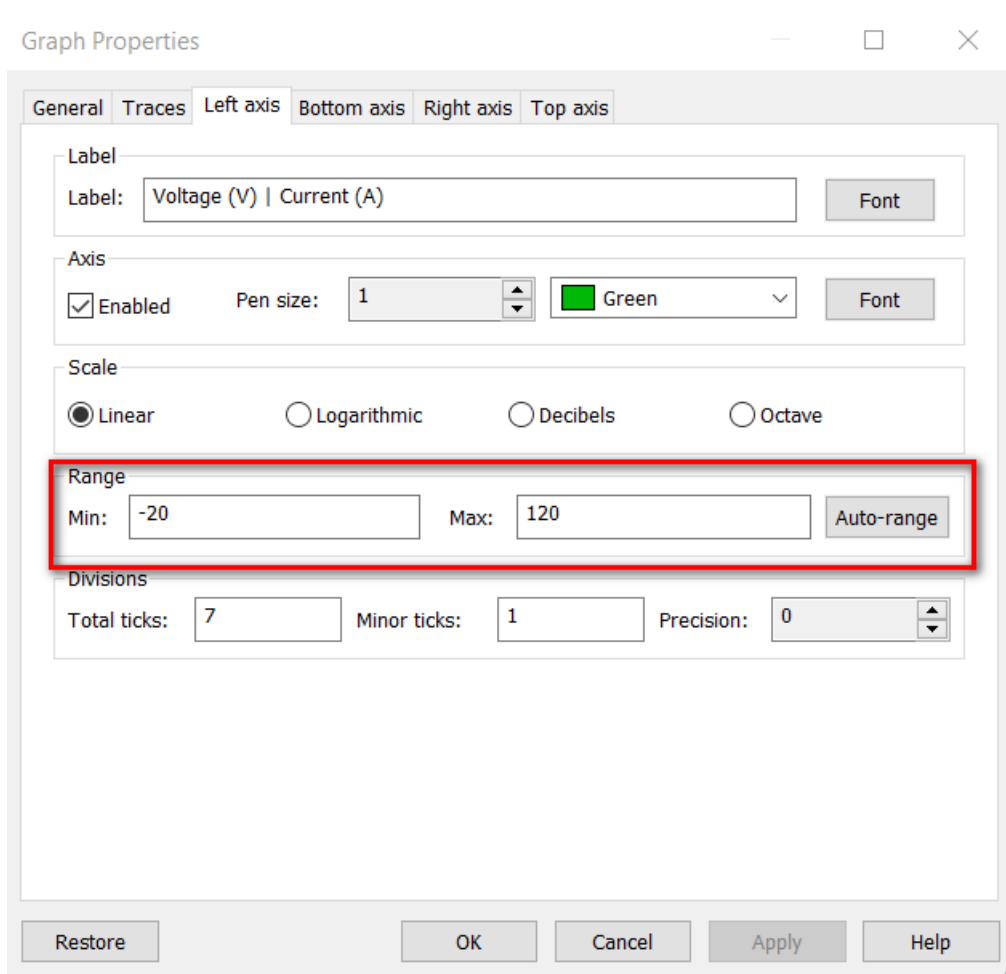


Рисунок 5 – Окно свойств графика переходного процесса

В закладке Traces можно установить цвет и толщину линий отображаемых графиков (независимо), так чтобы кривые отображались при печати в виде удобном для анализа.

5. Определить период свободных колебаний и волновое сопротивление контура опираясь на результаты курсорных измерений.

Для установки курсоров в положение, соответствующее амплитуде напряжения или тока следует щелчком ЛКМ по иконке курсора включить отображение курсоров и их окна (рис. 6). Выделить щелчком ЛКМ график, для которого ищется максимум.

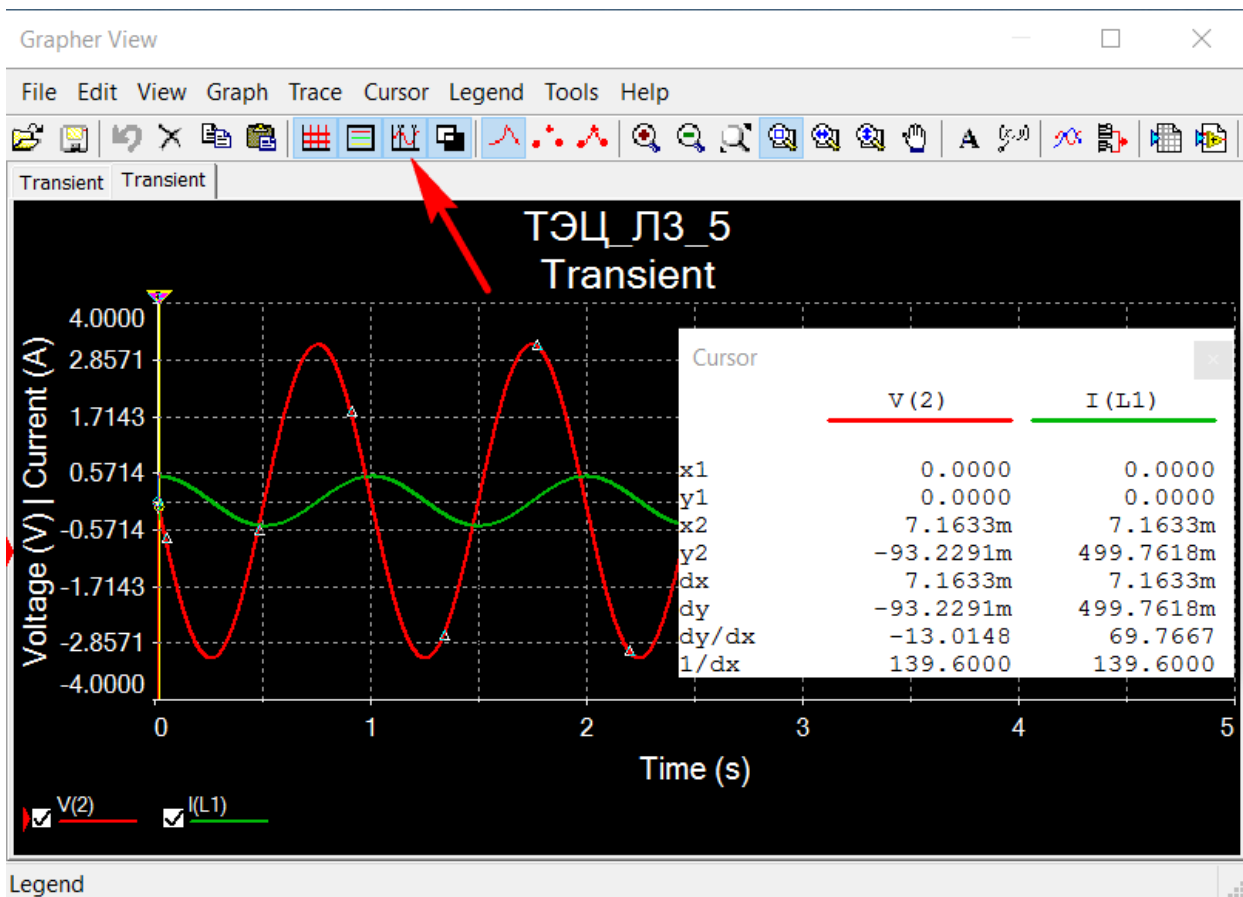


Рисунок 6 – Окно курсоров на графике переходного процесса

Перетянуть за треугольник курсоры, зажимая ЛКМ, в положение близкое к желаемому. Щелчком ПКМ по треугольнику соответствующего курсора вызывается окно управления, и выбирается поиск ближайшего максимума в указанном направлении (Go to next Y\_MAX => или <=). Это действие приводит к точному размещению курсора в положении максимума.

На рисунке 7 курсоры размещены на смежных максимальных значениях графика переходного процесса напряжения на катушке индуктивности. Значение периода считывается в окне курсоров в виде координаты  $dx$  в столбце напряжения  $V(2)$  узла 2. Для заданных параметров элементов колебательного контура период свободных колебаний равен 993,5 мс.

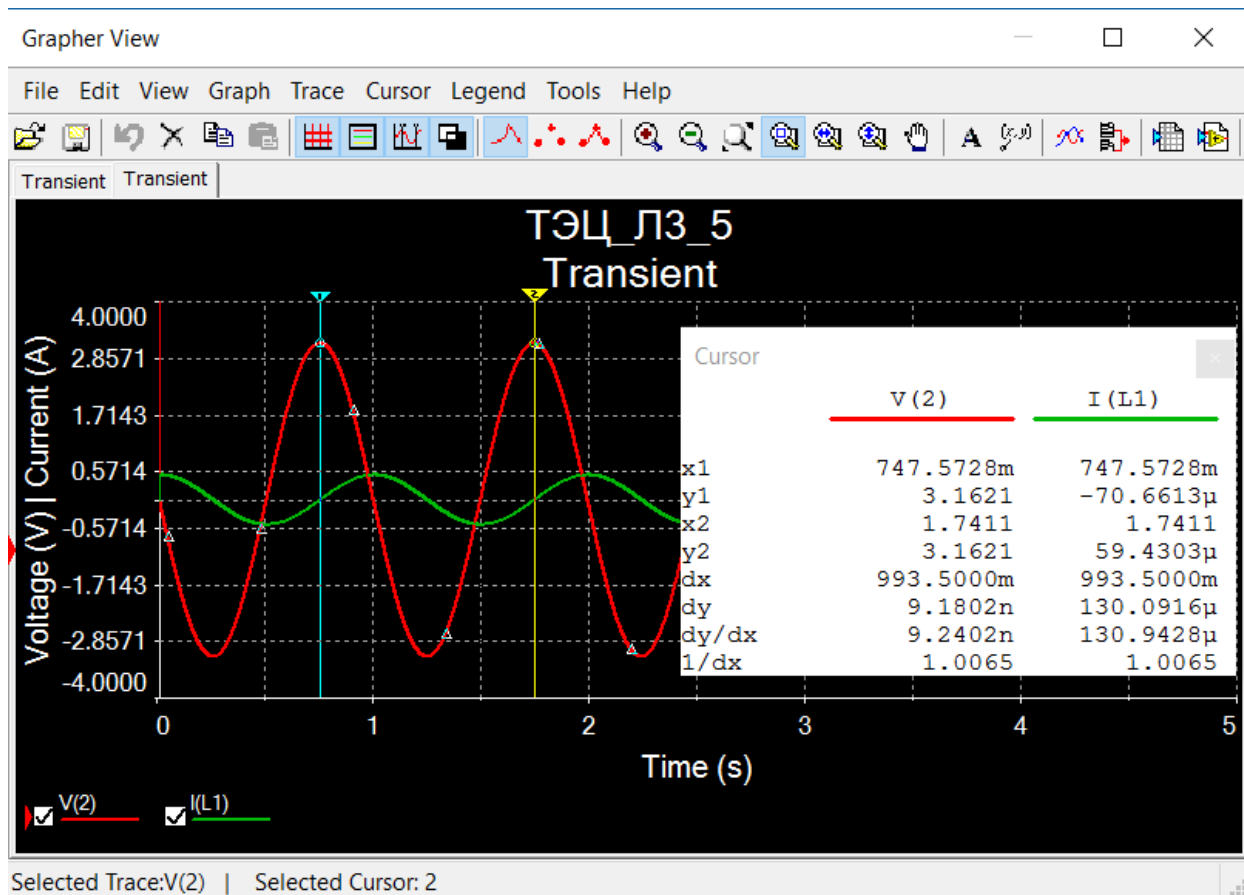


Рисунок 7 – Иллюстрация курсорного измерения периода свободных колебаний

Для расчёта волнового сопротивления определяются амплитудные значения напряжения и тока (считываемые в окне курсоров при их соответствующем размещении).

6. Увеличить вдвое длительность импульса в параметрах источника и определить период и волновое сопротивление для этого случая.

7. Сравнить параметры по п. 5 и 6 с теоретическими оценками. Выразить расхождение в процентах.

8. Установить сопротивление  $R_1$  в соответствии с вариантом задания и получить диаграммы переходного процесса.

Рассчитать:

условный период затухающих колебаний  $T$ ;

длину волны;

волновое сопротивление контура;

декремент затухания;

добротность контура;

проверить соответствие теоретических результатов экспериментальным.

Для оценки декремента затухания по результатам эксперимента определить отношение двух смежных максимумов

$$k = U_{m1}/U_{m2} = U_{m2}/U_{m3} = U_{m3}/U_{m4}$$

и рассчитать декремент затухания как  $\delta = \ln(k)$ .

9. Увеличив активное сопротивление контура в два раза, рассчитайте и определите по результатам моделирования декремент затухания.

## 5.6 Содержание отчёта

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Основные формулы, используемые при расчетах требуемых характеристик колебательных контуров.
4. Подробная запись всех этапов проведенных расчетов и их результаты.
5. Скриншоты графиков, полученных в результате проведения анализа переходных характеристик, с открытыми окнами курсоров.
6. Сопоставление расчетных данных с результатами моделирования.
7. Выводы.

## 5.7 Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл декремента затухания?
2. Возможно ли при двухкратном уменьшении периода затухающих колебаний сохранить неизменным декремент затухания?
3. С какой целью при исследовании затухающих колебаний используется импульс с очень большим напряжением?
4. При затухающих колебаниях существуют потери энергии. Каков механизм этих потерь? Где хранится эта энергия в момент начала затухающих колебаний?

## 5.8 Варианты задания

Ёмкость $C$ , мФ	$15+n_1+n_2$
Индуктивность $L$ , Гн	$0.5 + 0.02(3n_1+2n_2)$
Сопротивление $R$ , Ом	$0.5 + 0.1n_1$

## Рекомендуемая литература

1. Теоретические основы электротехники : линейные электрические цепи : учебное пособие / К. А. Клименко, Д. А. Поляков, И. Л. Захаров, О. П. Куракина ; Омский государственный технический университет. – Омск : Омский государственный технический университет (ОмГТУ), 2020. – 228 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=682276> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: по подписке. – Текст : электронный.
2. Клименко, К. А. Теоретические основы электротехники : переходные процессы, четырехполюсники, нелинейные элементы : учебное пособие : / К. А. Клименко, Д. А. Поляков, Е. В. Аношенкова ; Омский государственный технический университет. – Омск : Омский государственный технический университет (ОмГТУ), 2021. – 179 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=700796> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: по подписке. – Текст : электронный.

3. Пилипенко, А. М. Основы анализа переходных процессов в линейных цепях : учебное пособие : / А. М. Пилипенко ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Южный федеральный университет, 2020. – 123 с. : – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=598631> (дата обращения: 01.09.2023). – Режим доступа: по подписке. – Текст : электронный.