

Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Факультет вычислительных систем
Кафедра Моделирования и системного анализа (МиСА)

В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Ю.В. Гусев,
Т.В. Ганджа, А.Н. Кураколов

Теоретические основы электротехники

Часть 1. Установившиеся режимы в линейных электрических цепях

Учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных
работ

Томск 2015

В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Ю.В. Гусев, Т.В. Ганджа,
А.Н. Кураколов

Теоретические основы электротехники. Часть 1. Установившиеся режимы в линейных электрических цепях: Методические указания для выполнения лабораторных работ. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Факультет вычислительных систем, кафедра моделирования и системного анализа, 2015. – 108 с.

Для студентов, пользователей персональных компьютеров, изучающих следующие дисциплины: теоретические основы электротехники, теорию электрических цепей, общую электротехнику и электронику, анализ динамических систем или теорию цепей и сигналов.

© Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Гусев Ю.В., Ганджа Т.В.,
Кураколов А.Н., 2015.

© Факультет вычислительных систем, кафедра моделирования и системного анализа, 2015.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Общие сведения о пакете Среда Моделирования МАРС	6
2. Функциональные возможности СМ МАРС	6
3. Начало работы с СМ МАРС	7
4. Редактор схем.....	8
4.1. Работа с файлами схем	8
4.2. Набор схемы	9
4.2.1. Нанесение компонентов на схему	9
4.2.2. Проводники	11
4.2.3. Узлы	11
4.2.4. Выделение компонентов	12
4.2.5. Удаление компонента.....	13
4.3. Параметризация компонентов	13
5. Меню Анализ	14
6. Работа с графиком	17
6.1. Видимость графиков	18
6.2. Тип, толщина и цвет линий графиков	18
6.3. Сканеры графиков.....	19
6.4. Масштабная сетка	21
6.5. Масштабирование графиков	22
Лабораторная работа № 1. Исследование электрических характеристик линейной цепи постоянного тока при изменении сопротивления.....	23
Лабораторная работа № 2. Методы расчета резистивных цепей, основанных на законах Кирхгофа.....	27
Лабораторная работа № 3. Исследование линейной электрической цепи при гармонических токах и напряжениях.....	33
Лабораторная работа № 4. Исследование резонанса напряжений	37
Лабораторная работа № 5. Исследование резонанса токов в параллельном колебательном контуре	45
Лабораторная работа № 6. Электрические цепи со взаимной индуктивностью.....	50
Лабораторная работа № 7. Исследование воздушного трансформатора	57
Лабораторная работа № 8. Исследование трехфазных цепей, соединенных звездой.....	62

Лабораторная работа № 9. Анализ цепей с периодическими сигналами негармонической формы.....	68
Лабораторная работа № 10. Переходные процессы в цепи с одним накопителем энергии.....	75
Лабораторная работа № 11. Исследование переходного процесса в цепи с двумя накопителями энергии	82
Литература	88
Приложение	89
Кратная справка по компонентам, используемым в виртуальной лаборатории по ТОЭ	89
Измерительные компоненты	92
Генераторы сигналов различных форм	97
Измерительные приборы	99

Введение

Основные задачи лабораторных занятий: опытная проверка теоретических положений; изучение элементов устройств, электрических схем, измерительных приборов и установок и их действия, приобретение навыков работы с ними.

Виртуальная лаборатория по курсу ТОО в качестве программно-инструментальной основы базируется на СМ MAPC, заменяет реальную лабораторию и позволяет студенту выполнять работы *полностью самостоятельно*. Аппарат моделирования предоставляет пользователю достаточно большие возможности компьютерного экспериментирования, которые изложены в первой главе лабораторного практикума.

Перед выполнением лабораторной работы студент изучает методические указания, план вычислительного эксперимента и аналитических расчетов, проходит предварительный контроль, отвечая на контрольные вопросы по изучаемой теме. Выходной контроль подразумевает оценку результатов вычислительного эксперимента после их обработки, оформленных в виде отчета по лабораторной работе. Для обработки результатов и оформления отчета можно воспользоваться системой Mathcad или Макрокалькулятором.

В состав виртуальной лаборатории включены работы, соответствующие основным тематическим разделам электронного учебника (*Курс ТОО, часть 1*). Начинается практикум с исследования законов Ома и Кирхгофа, далее исследуются цепи переменного тока во временной и в частотной области. Выделены классы трехфазных цепей и цепей несинусоидального переменного тока. Особое внимание обращается на изучение переходных процессов в RLC-цепях с одним и двумя накопителями энергии.

Учебно-методическое содержание виртуальной лаборатории выполнено в HTML - формате с удобной формой подключения среды моделирования MAPC для организации и проведения вычислительного эксперимента. Приведенные примеры позволяют студентам быстрее войти в программно-инструментальную среду виртуальной лаборатории.

1. Общие сведения о пакете Среда Моделирования МАРС

Среда моделирования МАРС (СМ МАРС) представляет собой программный продукт для моделирования и анализа технических систем различной физической природы. Она позволяет частично или полностью заменить физический эксперимент вычислительным, исследовать и оптимизировать характеристики создаваемых устройств или подсистем в поисках наилучшего варианта.

В основе работы среды моделирования МАРС лежит представление исследуемого объекта в виде компонентной цепи. Сложные технические устройства (электронные, электромеханические и т.д.) представляются набором компонентов, связанных между собой согласно принципиальной, кинематической, структурной схеме или другой формальной структуре. Таким образом, исследуемый объект перед началом моделирования должен быть представлен в виде компонентной цепи, состоящей из типовых компонентов, входящих в библиотеку моделей компонентов.

2. Функциональные возможности СМ МАРС

К возможностям среды можно отнести следующие:

- графический набор схемы;
- многооконный пользовательский интерфейс;
- просмотр и обработка результатов;
- моделирование в различных режимах:
 - режим анализа цепи по постоянному току;
 - режим анализа цепи во временной области;
 - режим анализа цепи в частотной области;
- моделирование как линейных, так и нелинейных цепей;
- печать схемы и выходной информации, такой как графики, таблицы и т.д.;
- возможность изменения параметров (номиналов) компонентов во время моделирования;
- обширный набор компонентов от аналоговой до цифровой электротехники и электроники.

Это далеко не все возможности среды моделирования, но они являются основными.

3. Начало работы с СМ МАРС

Для запуска программы необходимо нажать «ПУСК», «Программы», «Simulate Environment MARS», и в появившемся меню выбрать ярлык «Simulate Environment MARS» или выбрать этот же ярлык на рабочем столе MS Windows. После запуска программы на экране появится главное окно программы.

Главное окно программы содержит следующие части:

- главное меню, дает доступ к основным операциям программы SEMars;
- панели инструментов, предоставляют быстрый доступ к командам программы SEMars;
- панель структуры проекта, дает доступ к дереву компонентов, к атрибутам компонентов, а также представляет структуру проекта и документов в иерархическом виде;
- панель вывода дополнительной информации, выводит информацию о моделировании, возникающих ошибках и необходимых действиях по их исправлению;
- основная часть главного окна (темно серый фон), содержит в себе окна рабочих документов, таких как схемы, графики, таблицы и т.д. (рис. 1);

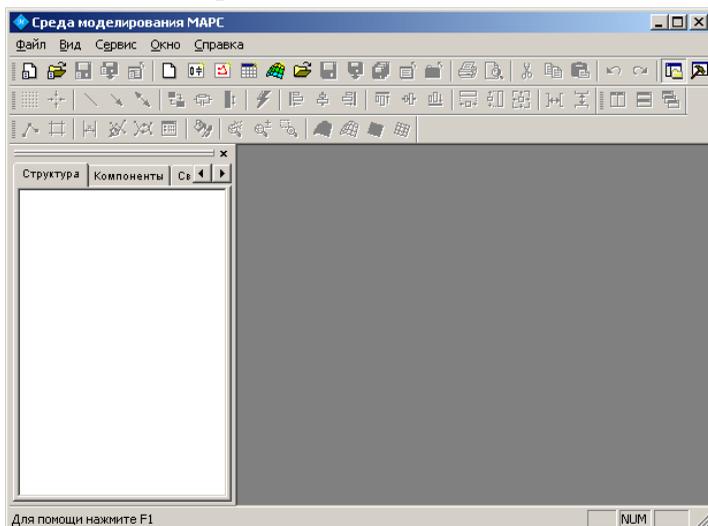


Рис. 1. Главное окно

- панель вывода дополнительной информации, выводит информацию о моделировании, возникающих ошибках и необходимых действиях по их исправлению;
- основная часть главного окна (темно серый фон), содержит в себе окна рабочих документов, таких как схемы, графики, таблицы и т.д.;
- строка состояния, выводит подсказки к командам меню, кнопкам панели инструментов, а также отображает текущий статус программы.

4. Редактор схем

4.1. Работа с файлами схем

Для создания схемы необходимо нажать кнопку  на панели инструментов или в главном меню в подменю “Файл/Создать” выбрать пункт “Создать схему”. В результате в рабочей области окна программы появится окно схемы, готовое для набора схемы (рис. 2).

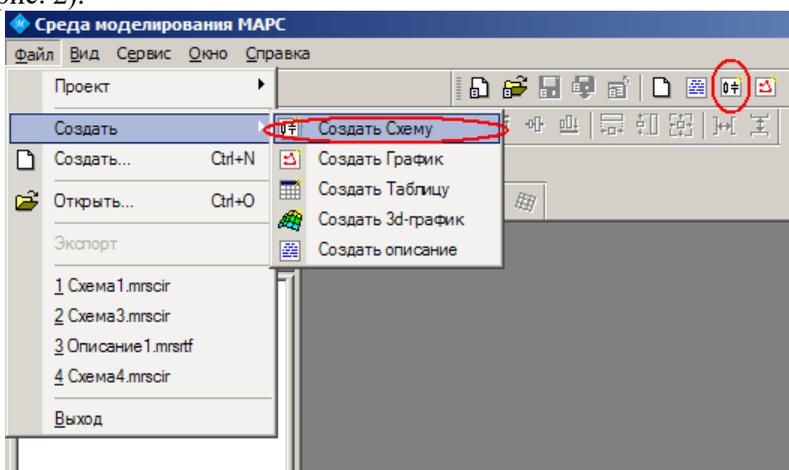


Рис. 2. Окно схемы

Для открытия существующего файла схемы необходимо нажать кнопку  или в главном меню в подменю “Файл” выбрать пункт “Открыть...”. В результате на экран будет выведено диалоговое окно “Открыть”. В нижней части этого окна расположен выпадающий список “Тип файлов”, в котором необходи-

мо выбрать строку “**Файлы схем (*.mrscir)**”. Затем в основной части этого диалога выбрать интересующую схему.

После того, как файл выбран, необходимо нажать кнопку “**Открыть**”. В результате в рабочей области окна программы появится окно открытой схемы.

Для закрытия схемы необходимо нажать кнопку  на панели инструментов, либо в меню «**Файл**» выбрать команду «**Закрыть**».

Работа с редактором состоит из следующих основных этапов:

- набор схемы;
- параметризация компонентов;

Набор схемы состоит из следующих операций:

- нанесение компонентов на схему;
- создание связей между компонентами (описано в разделе «Проводники»);
- создание узлов (описано в разделе «Узлы»).

Параметризация компонентов заключается в изменении или присвоении нового значения свойствам компонентов. Данная операция производится с помощью таблицы свойств.

4.2. Набор схемы

Базовые операции при работе с компонентами:

- выделение компонентов;
- выравнивание компонентов;
- удаление компонентов.

4.2.1. Нанесение компонентов на схему

В общем случае, процесс создания схемы начинается с размещения на рабочем поле компонентов программы в соответствии с подготовленным эскизом. Доступные компоненты располагаются в вертикальном окне обычно справа от рабочего поля (устанавливается в любое место перетаскиванием стандартным способом - за шапку заголовка). Для открытия нужной ветви необходимо подвести курсор мыши к соответствующей ветке и нажать на «+» один раз, после чего данная ветвь будет открыта, затем выбирается необходимый компонент и наносится на схему. Затем на схеме, в которую вставляется компонент, указывается мышью прямоугольник, задающий координаты будущего компонента (либо просто указывается координата верхнего угла и от-

пускается левая кнопка мыши). Чтобы указать прямоугольник, необходимо нажать левую кнопку мыши в первом углу прямоугольника, и, не отпуская, передвинуть курсор мыши до следующего угла прямоугольника, а затем отпустить левую кнопку мыши.

Поэтапно рассмотрим эту операцию на рисунках:

1. Выделяем нужный компонент (рис. 3).

2. Указываем мышью прямоугольник координат компонента и в итоге получаем компонент на схеме (рис. 4).

3. Если в схеме уже присутствует необходимый компонент, то для его копирования достаточно выделить его мышью (левой кнопкой), нажать сочетание клавиш Ctrl+C и Ctrl+V, в результате на схеме появится точная копия исходного компонента.

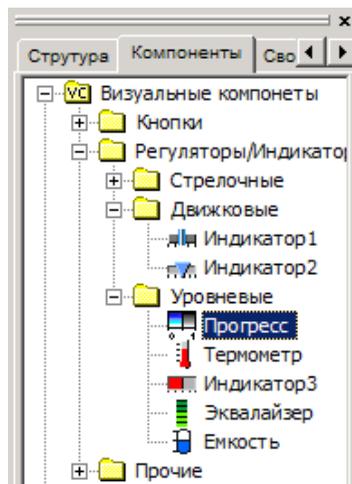


Рис. 3 Выделение компонента

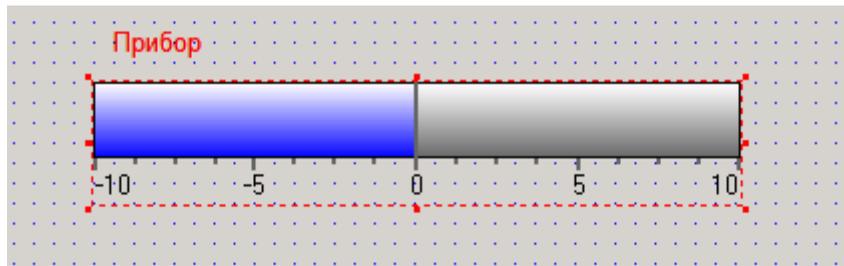


Рис. 4. Вставка компонента

Для нанесения электротехнических компонентов достаточно после выбора необходимого компонента просто нажать левую кнопку мыши на том месте схемы, в которое необходимо нанести данный компонент.

4.2.2. Проводники

Для создания связи необходимо:

1. Выбрать тип связи.
2. Подвести указатель мыши к узлу компонента до его подсвечивания красным цветом. В случае, если мы хотим начать связь не от вывода компонента, а от одиночного узла, на схеме необходимо нажать кнопку Ctrl и не отпускать ее до выполнения шага 3.
3. Нажать левую кнопку мыши.
4. Не отпуская левую кнопку мыши, передвинуть указатель мыши на другой узел (второй конец связи), до подсветки узла красным цветом. В случае, если необходимо присоединить данную связь к уже созданной связи, необходимо также подвести курсор мыши к месту планируемого подсоединения связи до окраски красным цветом.
5. Отпустить левую кнопку мыши.

Для удаления связи достаточно подвести курсор мыши к связи до ее подсветки красным цветом. Затем, нажав правую кнопку мыши, в выпавшем меню выбрать команду **Удалить связь**.

Для просмотра всего соединения, образованного проводниками (связями) и одиночными узлами, необходимо при наведении на связь удерживать клавишу Ctrl.

Для удаления всего соединения достаточно подвести курсор мыши к любой связи этого соединения до ее подсветки красным цветом. Затем нажать правую кнопку мыши и в выпавшем меню выбрать команду **“Удалить всю связь, включая узлы”**.

4.2.3. Узлы

Для создания узла необходимо:

1. Подвести указатель мыши к узлу компонента до его подсвечивания красным цветом. Нажать левую кнопку мыши.
2. Не отпуская левую кнопку мыши, передвинуть указатель мыши до связи, на которой необходимо создать узел (второй конец связи), до подсветки связи красным цветом.
3. Отпустить левую кнопку мыши..

Для удаления узла достаточно подвести курсор мыши к узлу до его подсветки красным цветом. Затем нажать правую кнопку мыши и в выпавшем меню выбрать команду “Удалить узел”.

4.2.4. Выделение компонентов

Для выделения одного компонента достаточно подвести курсор мыши к компоненту и нажать левую кнопку мыши. После выделения компонент обрамляется красной рамкой (рис. 5). На данной рамке по углам и серединам сторон присутствуют прямоугольни-

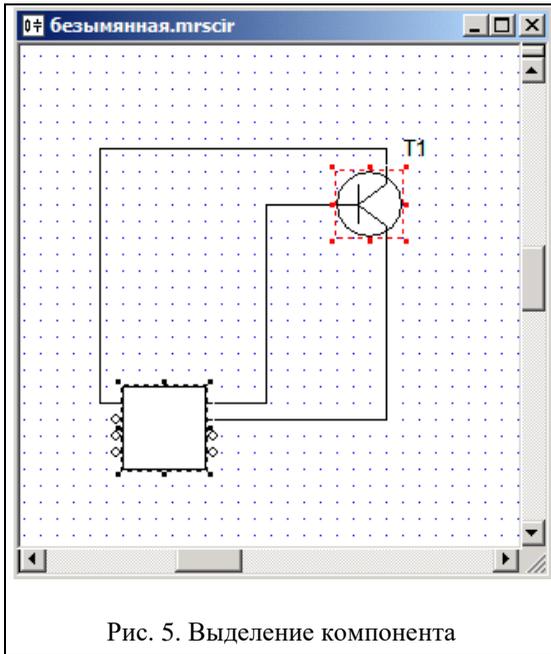


Рис. 5. Выделение компонента

ки, с помощью которых возможно изменение размера компонента. Для этого достаточно подвести курсор к одному из них, нажать левую кнопку мыши и, не отпуская, передвинуть на необходимое расстояние. Для выделения нескольких компонентов необходимо, удерживая кнопку Shift, по очереди левой кнопкой мыши указать

на каждый компонент, необходимый для выделения. Для выделения компонентов, расположенных в пределах определенного прямоугольника, необходимо подвести курсор к одному из углов этого прямоугольника, нажать левую кнопку мыши и, не отпуская, переместить курсор мыши в противоположный угол прямоугольника, после чего отпустить левую кнопку мыши.

При множественном выделении активный компонент выделяется красной рамкой, а остальные выделенные компоненты выделяются черной рамкой.

4.2.5. Удаление компонента

Для удаления компонента достаточно подвести курсор мыши к компоненту. Затем нажать правую кнопку мыши и в выпавшем меню выбрать команду «Удалить».

4.3. Параметризация компонентов

Для параметризации компонентов предназначена вкладка «Свойства» панели «Дерево проекта» (рис. 6).

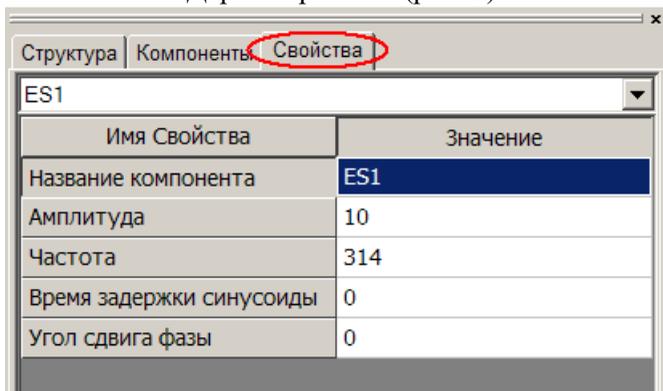


Рис. 6. Окно «Свойства» панели «Дерево проекта»

Ниже строки вкладок располагается выпадающий список, при нажатии на который возникает список компонентов на схеме для выбора. Выберите в этом списке нужный компонент. Также выбрать компонент можно непосредственно, указав его мышью на схеме.

После выбора компонента в нижней части окна располагается таблица свойств компонента. Таблица содержит два столбца и переменное количество строк. В первом столбце отображается имя свойства компонента, а в правом значении этого свойства. Для изменения значения достаточно дважды щелкнуть мышью по ячейке значения или нажать клавишу F2. В результате ячейка преобразуется в поле ввода, в котором вы можете внести изменение в значение свойства. После внесения изменений для их со-

хранения необходимо нажать клавишу Enter или щелкнуть мышью в любом другом месте.

5. Меню Анализ

Меню «Анализ» используется при запуске и остановке моделирования, а также для задания параметров моделирования.

1. «**Запуск**» – запуск моделирования. Остановка эксперимента происходит при повторном нажатии кнопки «**Запуск**».
2. «**Пауза**» – прерывание моделирования.
3. «**Параметры моделирования**» – выбор режимов моделирования с установкой необходимых для режима параметров. При нажатии на этот пункт меню, пользователю предоставляется окно, в котором все режимы анализа разделены на три группы:
 1. **Статика** – группа директив анализа компонентной цепи по постоянному току (рис. 7).

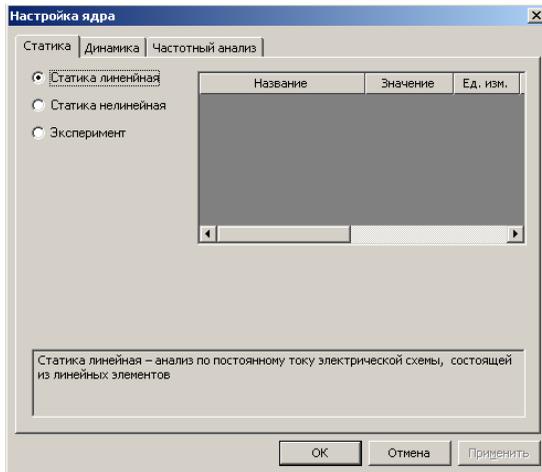


Рис. 7. Окно настройки статических директив анализа

С помощью режима «**Статика линейная**» производится анализ линейных цепей, помощью режима «**Статика нелинейная**» - анализ нелинейных цепей по постоянному току. Параметрами данной директивы являются:

- минимальное время моделирования;
- максимальное время моделирования;
- минимальный шаг моделирования;
- максимальный шаг моделирования;
- точность решения (абсолютная).

Режим анализа «*Эксперимент*» предназначен для проведения эксперимента при статическом режиме анализа. Для поведения данного вида анализа необходимо использовать компоненты и изменяемые параметрами, а также измерительные компоненты с цифровым табло.

2. *Динамика* – группа режимов для анализа цепей с инерционными элементами по переменному току. В зависимости от того, по какой схеме будут преобразовываться дифференциальные уравнения на этапе решения, введены следующие режимы анализа во временной области (рис. 8):

- явный метод Эйлера;
- неявный метод Эйлера;
- метод Гира;
- метод трапеций;
- эксперимент во временной области.

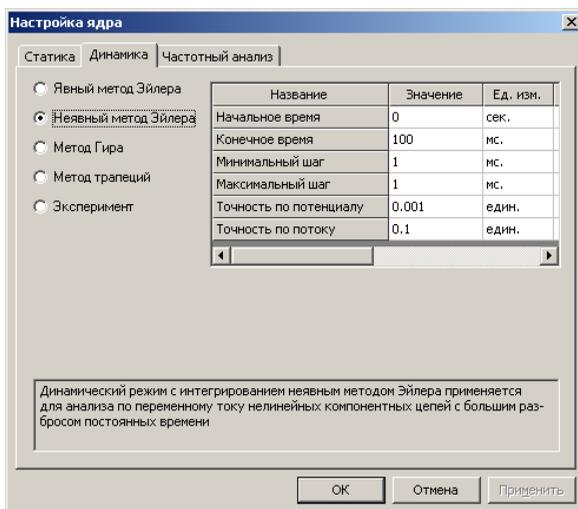


Рис. 8. Окно задания динамических режимов анализа

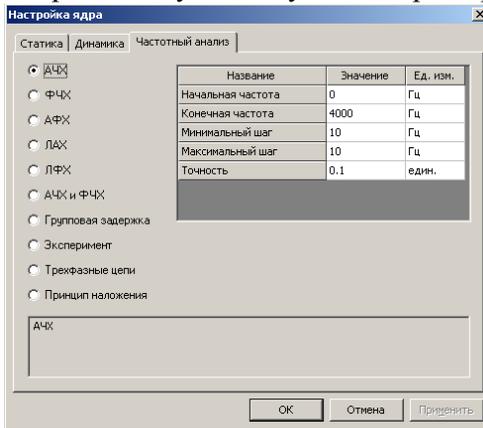
Параметрами этой группы режима анализа являются:

- начальное время моделирования;
- конечное время моделирования;
- минимальный шаг моделирования;
- максимальный шаг моделирования;
- точность моделирования.

Значения времени и шагов могут задаваться в секундах (с), миллисекундах (мс) или в микросекундах (мкс).

Примечание. Если минимальный и максимальный шаги моделирования равны, то интегрирование происходит с постоянным шагом, если же они различны, то интегрирование производится с переменным шагом,

3. **Анализ цепей в частотной области** производится с целью построения основных частотных характеристик. Для выходных параметров, снимаемых с измерительных приборов, можно построить одну из следующих характеристик (рис. 9):



- амплитудно-частотная характеристика;
- фазочастотная характеристика;
- амплитудно-фазовая характеристика;
- логарифмическая амплитудно-частотная характеристика;
- логарифмическая фазочастотная характеристика;
- амплитудно-частотная и фазочастотная характеристика вместе;

Рис. 9. Окно задания режимов анализа в частотной области

- групповая задержка;
- эксперимент в частотной области;
- расчет трехфазных цепей;
- принцип наложения.

Эта группа директив характеризуется следующим набором параметров:

- начальная и конечная частота моделирования;
- минимальный и максимальный шаги моделирования по частоте;
- точность моделирования.

Единицами измерения частоты в правой колонке могут быть (Гц, кГц, МГц, рад/с).

6. Работа с графиком

Выходная информация после моделирования схем чаще всего выводится на график. Данный раздел посвящен описанию основных принципов работы с графиком.

Для вывода информации на график необходимо на поле схемы нанести компонент «График» (рис. 10). В начальном положении график имеет один неподключенный выходной пин (вывод). По мере подключения к графику связей количество выходных пинов будет увеличиваться, а при удалении связи – уменьшаться (рис. 11).

Таким образом, компонент график является безразмерным по числу выдаваемых характеристик (различных графиков).

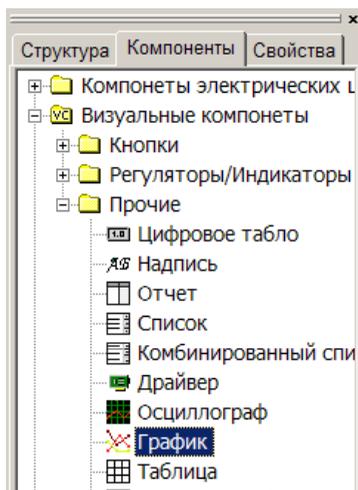


Рис. 10. Выбор компонента «График»

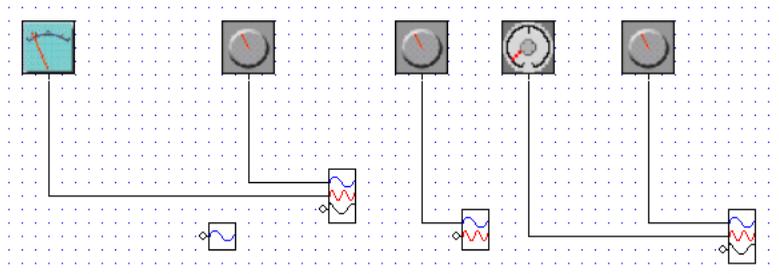


Рис. 11. Подключение компонента «График»

6.1. Видимость графиков

На График может выводиться несколько различных кривых. Иногда требуется отобразить только некоторые из них. Для управления типом и видимостью графиков предназначено окно «Обозначение». Для изменения отображения графиков предназначена вторая колонка элементов управления - флажки. Поставленный флажок соответствует отображению графика, а снятый скрывает (рис. 12).

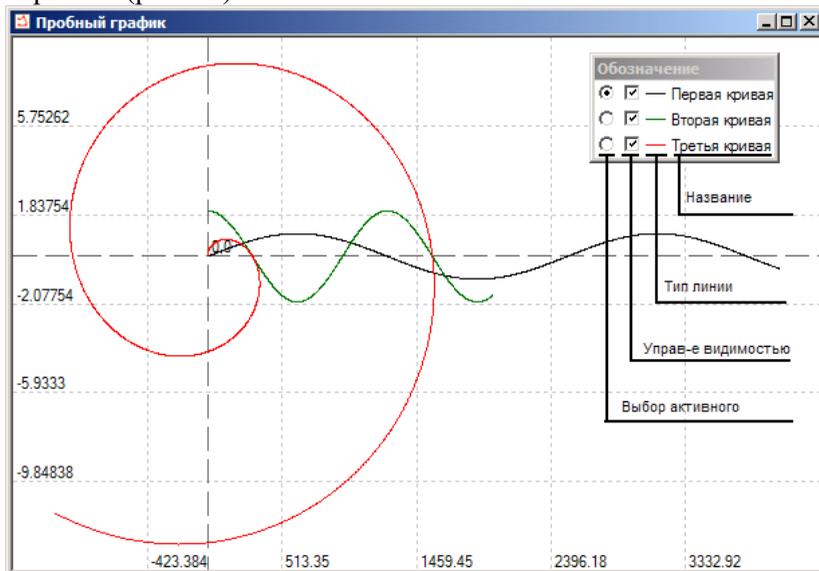


Рис. 12. Окно «Обозначение»

6.2. Тип, толщина и цвет линий графиков

Для изменения параметров линии графика необходимо на третьей колонке окна «Обозначения» дважды нажать левой кнопкой мыши, в результате чего будет вызвано диалоговое окно "Выбор характеристик линий" (рис. 13). Данное диалоговое окно предназначено для выбора типа линии, меток и цвета графика. В нем располагаются следующие элементы:

- кнопка выбора цвета линии;
- группа “**тип линии**”, которая позволяет указать тип линии и толщину линии (толщина используется только при сплошном типе линии);

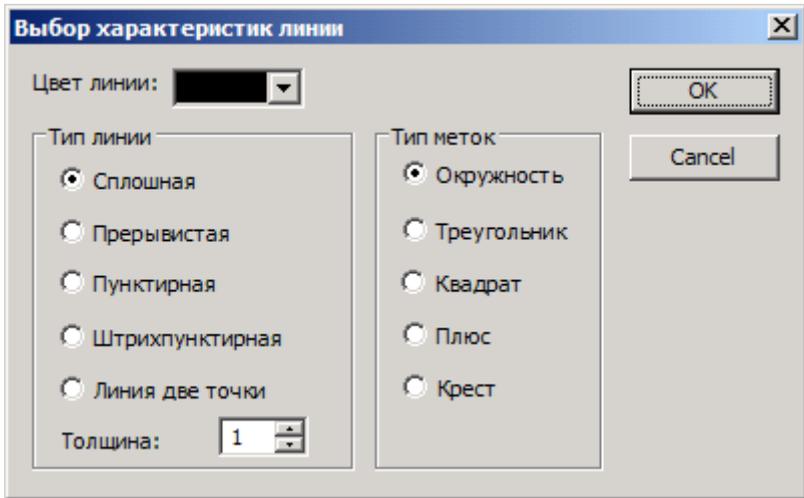


Рис. 13. Окно "Выбор характеристик линии"

- группа “**тип меток**”, которая позволяет выбрать различную форму меток графика.

После выбора необходимых параметров линии нужно нажать кнопку **ОК**.

Для отмены изменений - **Cancel**.

6.3. Сканеры графиков

Для точного определения значения графика в определенной точке необходимо подвести курсор мыши к графику и нажать левую кнопку мыши, результат на рис. 14.

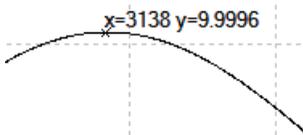


Рис. 14. Определения значения графика

На ближайшей точке графика отобразится крестик, а рядом значение (абсцисса и ордината) графика в этой точке. Если, не отпуская левую кнопку мыши, передвинуть указатель мыши в одну или другую сторону графика, то можно отследить изменение значения графика.

После того, как левая кнопка мыши будет отпущена, значение графика исчезнет.

Иногда график строится из малого числа точек, тогда для его сглаживания необходимо выбрать в меню «График» команду «Сглаживать сплайном» (рис. 15). В этом режиме производится кубическая интерполяция графика. При отключенном режиме точки просто соединяются по прямой линии, в этом случае график рисуется быстрее.

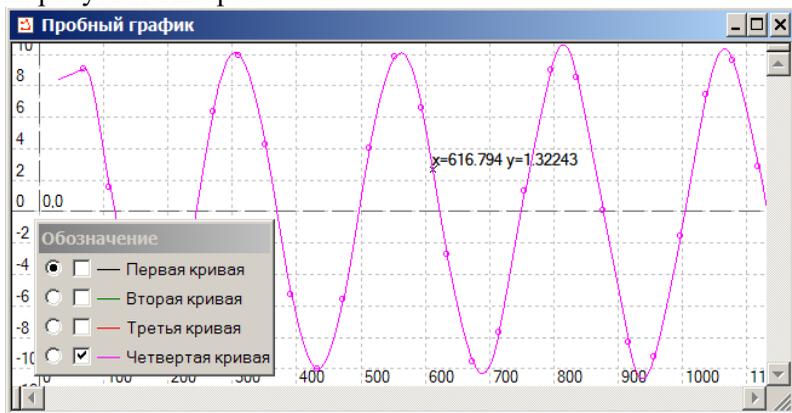


Рис. 15. Сглаживание сплайном

Для того, чтобы сканер отображал значения и по сглаженной поверхности, необходимо перед нажатием левой кнопки мыши нажать и не отпускать клавишу Shift. Если этого не сделать, то сканер будет проходить только через фиксированные точки (по которым строится сам график) и которые на рис. 15 обозначаются кругом.

В среде также присутствует возможность линейного сканирования. Для этого предназначены два вертикальных сканера. Для их отображения достаточно нажать и не отпускать клавишу Ctrl и после этого нажать левую (для первого сканера) или правую (для второго сканера) кнопку мыши. В результате на экране появятся вертикальные линии с крестиком на пересечении их с графиком. Для того, чтобы увидеть значения пересечений, необходимо растянуть за край окно «Обозначение». В первой колонке отображаются координаты пересечения первого сканера, во второй колонке – второго сканера. В третьей колонке располагается разность значений второго и первого сканера (рис. 16).

Также как и для точечного сканера, при необходимости определения пересечения не только с фиксированными точками, но и со сглаженными линиями нужно дополнительно нажать клавишу Shift.

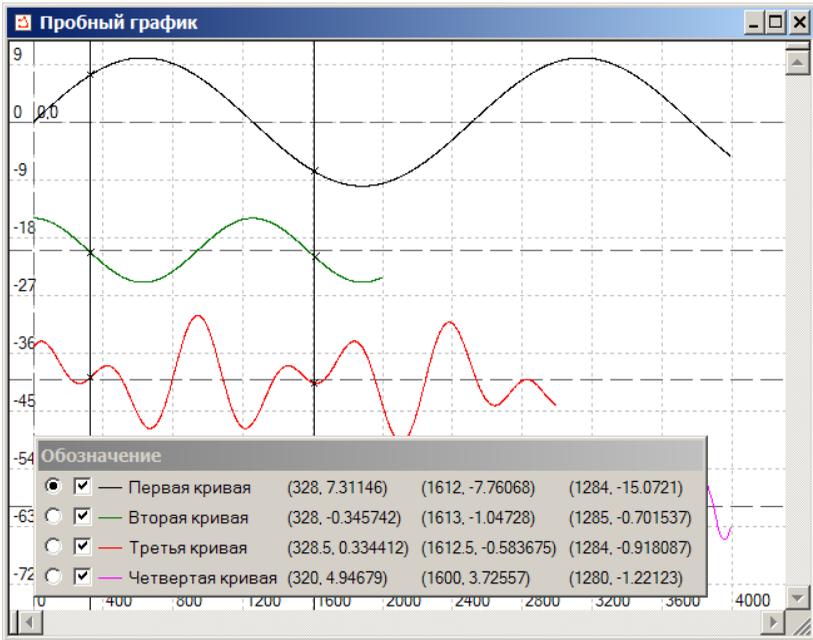


Рис. 16. Результат работы сканеров

6.4. Масштабная сетка

Команда "Сетка" меню «График» отображает/скрывает масштабную сетку. При отключенном данном режиме отображение графика производится без линий масштабной сетки, а также без масштабных меток. При включенном режиме отображается масштабная сетка и масштабные метки. Если не выбран активный график в окне "Обозначение", то масштабные метки выводятся только при включенном режиме единого масштаба; если активный график выбран, то отображаются масштабные метки, и они отображают значения в соответствии с активным графиком.

6.5. Масштабирование графиков

Для масштабирования графиков предназначены три команды меню «График»:

1. Команда **“Начальный размер”** устанавливает начальное значение масштаба. Это необходимо для возврата в исходное масштабирование, после того как дополнительное масштабирование больше не нужно.
2. Команда **“Режим точечного масштабирования”** управляет включением /отключением режима точечного масштабирования. При включенном данном режиме масштабирование изображения происходит с помощью нажатий левой и правой кнопок мыши. Для увеличения определенной части графика необходимо в точке этой части нажать правую кнопку мыши. Для уменьшения достаточно в любом месте графика нажать левую кнопку мыши. При увеличении или уменьшении точка, на которую указывает мышь, остается неподвижной, т.е. увеличение или уменьшение производится относительно точки, в которой нажата левая или правая кнопка мыши.
3. Команда **“Режим прямоугольного масштабирования”** управляет включением /отключением режима прямоугольного масштабирования. При включенном данном режиме масштабирование изображения происходит в соответствии с прямоугольником, указанным с помощью мыши. Для увеличения определенной прямоугольной части графика необходимо нажать левую кнопку мыши в верхнем углу прямоугольника, и не отпуская, перевести указатель мыши в противоположный угол. После этого график масштабируется таким образом, что будет видна только прямоугольная область графика, которую мы указали с помощью мыши.

Лабораторная работа № 1. Исследование электрических характеристик линейной цепи постоянного тока при изменении сопротивления

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить: [4, с. 5-14], [10, с. 29-30, с. 48-55].

2. Ознакомиться с основными соотношениями электрических величин в линейной цепи постоянного тока при изменении сопротивления R_H в цепи нагрузки.

3. Рассчитать и построить зависимости:

$$I_H = f(R_H), \quad U_H = f(R_H), \quad P_H = f(R_H), \quad \eta = f(R_H).$$

4. По полученным расчетным данным для одного из режимов проверить выполнение закона Ома, баланс мощностей в схеме и справедливость формул расчета токов в параллельных ветвях схемы.

Методические указания

На рис. 1 представлена линейная электрическая цепь постоянного тока, содержащая источник ЭДС с параметрами E и R_0 , и резисторы R_1 , R_2 , R_H , вольт-амперные характеристики которых есть зависимости $U = R \cdot I$.

ЭДС подключена к точкам 1-0 схемы, поэтому определим эквивалентное сопротивление цепи относительно этих точек:

$$R_{10\varepsilon} = R_0 + R_{12} + R_H = R_0 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_H = R_{\varepsilon} + R_H. \quad (1)$$

Закон Ома для замкнутой цепи :

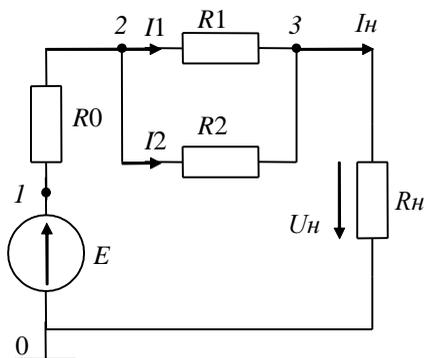


Рис. 1. Принципиальная схема

$$I' = \frac{\pm \sum_k E_k}{\sum_k R_k} = \frac{E}{R_{\Sigma} + R_H} \quad (2)$$

Токи в параллельных ветвях можно рассчитать по закону Ома для пассивной ветви:

$$I_1 = \frac{U_{23}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_{23}}{R_2}, \quad U_{23} = U_2 - U_3$$

или по формулам распределения токов в параллельных ветвях схемы:

$$I_1 = I_H \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad I_2 = I_H \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (3)$$

Зависимость $U_H(I_H)$ называется внешней характеристикой. Для цепи (рис. 1) по второму закону Кирхгофа уравнение внешней характеристики:

$$U_H(I_H) = E - I_H(R_0 + R_{12}) \quad (4)$$

При построении графика $U_H(I_H)$ используем режимы ХХ ($R_H = \infty, I_H = 0, U_H = E$) и КЗ ($R_H = 0, I_H = I_{K3} = E / (R_0 + R_{12}), U_H = 0$).

Идеальный источник ЭДС E развивает в цепи мощность $P_u = P_E = I_H \cdot E$, а пассивные элементы потребляют мощность

$$P_{потр} = P_0 + P_1 + P_2 + P_H, \quad (5)$$

где $P_0 = I_H^2 \cdot R_0, \quad P_1 = I_1^2 \cdot R_1, \quad P_2 = I_2^2 \cdot R_2, \quad P_H = I_H^2 \cdot R_H$.

Уравнение баланса мощностей для данной схемы:

$$P_u = P_{потр}. \quad (6)$$

Для исследования зависимости мощности нагрузки от сопротивления нагрузки вычислим производную P_H от R_H и приравняем ее к нулю, при этом

$$P_H = I_H^2 \cdot R_H = \frac{E^2}{(R_{\Sigma} + R_H)^2} \cdot R_H. \quad (7)$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_H}{P_E} = \frac{I_H^2 \cdot R_H}{E \cdot I_H} = \frac{R_H}{R_{\Sigma} + R_H}. \quad (8)$$

При $R_H = R_{\Sigma}$ КПД равен 0.5.

В схему (рис. 2) включены измерители мощности $W1$ и $W2$, тогда:

$$\eta = \frac{P_{W2}}{P_{W1} + I_H^2 \cdot R_0} \quad (9)$$

Контрольные вопросы

1. Какой вид имеет внешняя характеристика для данной цепи $I_H=f(U_H)$ и как ее построить по данным двух режимов: короткое замыкание ($R_H=0$) и холостой ход ($R_H=\infty$)?

2. Чему пропорционален тангенс угла наклона вольт-амперной характеристики?

3. Сформулировать правило расчета тока в параллельной ветви, если найден ток в неразветвленной части цепи.

4. При каких значениях сопротивления нагрузки на выход цепи передается максимальная мощность и чему при этом равен ток?

5. Какие директивы СМ МАРС используются для построения зависимостей, указанных в задании?

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

1. Схема компонентной цепи для расчета в СМ МАРС представлена на рис. 2.

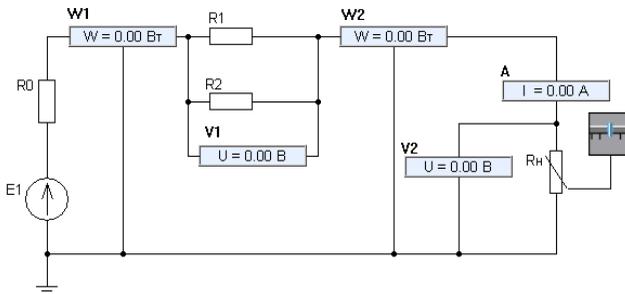


Рис. 2. Компонентная цепь для расчета в СМ МАРС

В состав цепи включены измерительные компоненты: $W1$, $W2$, A , $V1$, $V2$.

Величины параметров схемы E, R_0, R_1, R_2, R_H взять из табл. 2.

2. Составить выражения для расчета электрических величин: $RЭ, I_H, U_H, P_H, P_0, P_H$ для схемы рис. 1.

3. Изменяя сопротивление R_H от 0 до 5000 Ом с шагом $R=1000$ Ом с помощью регулировочного прибора - индикатора со шкалой и прямоугольным бегунком, рассчитать следующие зависимости от R_H :

$$I_H = I_A, \quad U_H = U_{V2}, \quad P_H = P_{W1}, \quad P_H = P_{W2},$$

где $A, V2, W1, W2$ - индексы, указывающие на показания соответствующего измерительного прибора на рис. 2.

Для работы с регулировочным прибором необходимо открыть два слоя данной схемы: схемный и измерительный. На измерительном слое находится шкала с бегунком, с помощью которого производится управление сопротивлением R_H .

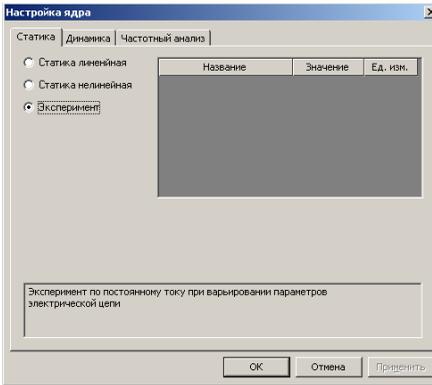


Рис 3. Выбор режима «Статика, эксперимент»

Установка режима анализа, необходимого для данной схемы, производится с помощью окна «Настройки ядра». Для его вызова в меню «Анализ» необходимо выбрать пункт «Параметры моделирования». В появившемся окне (рис. 3) необходимо перейти на вкладку «Статика» и выбрать пункт «Эксперимент». Данный режим анализа не предполагает задания параметров.

Полученные данные расчета занести в табл. 1.

Таблица 1

R_0	R_1	I_H	U_H	P_H	P_{W1}	P_0	P_E	η	Примечание
Ом	Ом	мА	В	Вт	Вт	Вт	Вт		
									$P_0 = I_H^2 \cdot R_0$ $P_E = P_{W1} + P_0$ $\eta = P_H / P_E$

4. По данным табл. 1 построить графики зависимостей величин $I_n(R_n)$, $U_n(R_n)$, $P_n(R_n)$ и внешние характеристики $U_n=f(I_n)$, $P_n=f(I_n)$, $\eta=f(I_n)$.

Отчет по работе

Отчет по работе должен содержать:

- 1) исследуемую схему, расчетные формулы основных величин;
- 2) таблицу рассчитанных величин;
- 3) графики электрических характеристик, указанных в работе;
- 4) график внешней характеристики $U_n = f(I_n)$;
- 5) ответы на контрольные вопросы.

Варианты задания параметров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер варианта	Параметры элементов				
	E	R_0	R_1	R_2	R_n
	В	Ом	Ом	Ом	кОм
1	100.	200.	2400.	1200.	0.-5.
2	130.	300.	2100.	1050.	0.-5.
3	150.	500.	1500.	750.	0.-5.
4	140.	360.	1920.	960.	0.-5.
5	120.	400.	1800.	900.	0.-5.

Лабораторная работа № 2. Методы расчета резистивных цепей, основанных на законах Кирхгофа

Задание на работу

Для схемы, представленной на рис. 1, выполнить следующие действия.

1. При подготовке к работе изучить: [4, с. 10 - 15], [5, с. 141-147], [10, с. 29-30].

2. Путем проведения расчетного эксперимента убедиться в справедливости методов непосредственного применения законов Кирхгофа (МЗК).

3. Научиться составлять контурные уравнения по методу контурных токов (МКТ) и рассчитывать токи в ветвях схемы.

4. Ознакомиться с методикой составления узловых

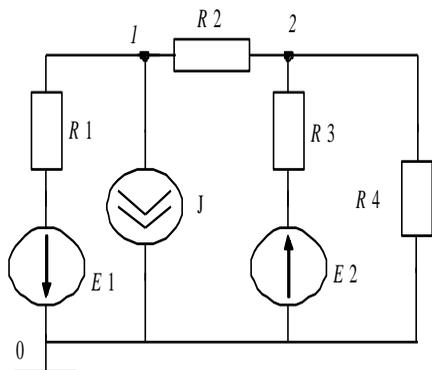


Рис. 1. Принципиальная схема

уравнений по методу узловых потенциалов (МУП) и рассчитать токи ветвей с использованием закона Ома.

5. Научиться рассчитывать мощности в резистивной цепи постоянного тока и составлять уравнения баланса мощностей.

Методические указания

Для любой электрической цепи уравнения электрического равновесия определяются по законам Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа - алгебраическая сумма токов в узле цепи равна нулю:

$$\pm \sum_j i_j = 0. \quad (1)$$

Для цепи постоянного тока это уравнение баланса токов узла цепи запишется:

$$\pm \sum_j I_j = 0. \quad (2)$$

Второй закон Кирхгофа - алгебраическая сумма мгновенных значений напряжений в замкнутом контуре электрической цепи равна алгебраической сумме ЭДС источников напряжения, действующих в этом контуре:

$$\sum_j u_j = e_k. \quad (3)$$

Для цепи постоянного тока:

$$\sum_j U_j = E_k. \quad (4)$$

Для электрической цепи, имеющей n узлов и p ветвей (не включая ветви с источниками тока), число уравнений по первому закону Кирхгофа будет равно $(n-1)$, а число уравнений по второму закону Кирхгофа - $p-(n-1)$.

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа за положительное направление принимают выбранное произвольно направление обхода по контуру.

Метод контурных токов (МКТ) основан на законах Кирхгофа и требует составления k контурных уравнений (по числу независимых контуров). При этом ветви с источником тока в независимые контуры не включаются.

Метод узловых потенциалов (МУП) основан на первом законе Кирхгофа и законе Ома. Он требует составления $(n-1)$ узлового уравнения. При этом потенциал базисного узла полагают равным нулю.

Правильность расчета токов в ветвях схемы любым из трех выше перечисленных методов проверяется путем составления уравнения баланса мощностей:

$$\sum P_{\text{и}} = \sum P_{\text{потр}}. \quad (5)$$

При этом мощность идеального источника ЭДС $P_E = E \cdot I$ и берется со знаком "плюс", если направление векторов ЭДС и тока совпадают.

Мощность идеального источника тока: $P = U \cdot J$. Она берется со знаком "плюс", если направление векторов U и J противоположно.

Потребляемая мощность рассчитывается по формуле:

$$\sum P_{\text{потр}} = I_k^2 \cdot R_k \quad (6)$$

Контрольные вопросы

1. Как учитывается наличие источника тока в схеме в методах МЗК и МКТ?

2. Пояснить, как составляются расчетные выражения для токов ветвей схемы в методах МКТ и МУП?

3. Как рассчитать в схеме напряжение на зажимах источника тока J ?

4. Какие директивы анализа следует использовать для определения токов и напряжений цепи на ПЭВМ?

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

Программа работ включает следующие пункты.

1. Задание информации о цепи.

В работе предлагается исследовать резистивную цепь, схема которой представлена на рис. 1. Компонентная цепь для графического редактора СМ МАРС, соответствующая схеме (рис. 1), приведена на рис. 2.

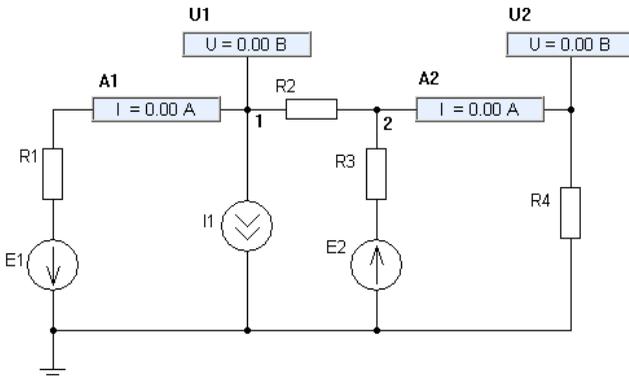


Рис. 2. Компонентная цепь для расчета в СМ МАРС

Параметры элементов этой схемы выбрать из табл. 3 в зависимости от номера варианта и занести в качестве атрибутов с помощью команд редактора. Включение измерительных приборов в схему позволяет измерить токи I_1 , I_4 в первой и четвертой ветвях схемы и потенциалы узлов 1 и 2 схемы.

2. Рассчитать количество уравнений, необходимое для составления системы уравнений по первому и второму законам Кирхгофа при расчете цепи (рис. 1) по методу законов Кирхгофа (МЗК). Выбрав произвольно направления токов в ветвях схемы, составить систему уравнений МЗК.

3. Составить систему контурных уравнений МКТ (для выбранных на схеме направлений контурных токов). Решить ее,

определив токи контуров и токи в ветвях схемы. Результаты расчета записать в табл. 1 (* помечены величины, которые необходимо получить в том или ином режиме).

Таблица 1

I_1	I_2	I_3	I_4	J	U_1	U_2	U_1 U_2	Примечание
мА	мА	мА	мА	мА	В	В	В	
*			*		*	*		Результаты вычислительного эксперимента
*	*	*	*					МКТ
					*	*	*	МУП

4. Составить систему уравнений по МУП, определив напряжения в узлах 1 и 2 и напряжение ветви между этими узлами.

Рассчитанные данные записать в табл. 1.

5. Произвести анализ в СМ МАРС схемы (рис. 2). В качестве результатов выдать токи I_1 и I_4 и потенциалы узлов 1 и 2, результаты занести в табл. 1. Сравнить их с результатами расчета схемы МКТ и МУП.

У к а з а н и е. В качестве рабочего необходимо выбрать режим анализа «Статика линейная». Для этого необходимо вызвать окно «Настройка ядра» с помощью пункта «Параметры моделирования» в меню «Анализ». В появившемся окне должна быть активная вкладка «Статика» и выбран пункт «Статика линейная» (рис. 3).

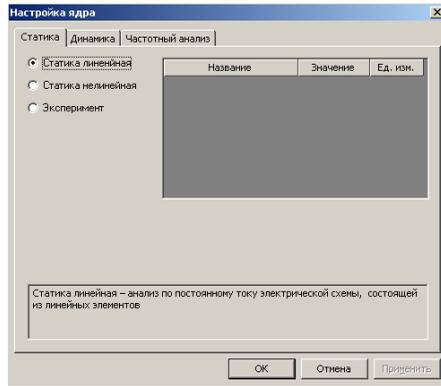


Рис. 3. Выбор режима «Статика линейная»

6. Полученные значения токов подставить в уравнения законов Кирхгофа, составленных в п. 2, и убедиться, что они справедливы.

7. Составить уравнение баланса мощностей. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

U	$PE1$	$PE2$	PJ	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$P_{ист}$	$P_{номр}$
В	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт

Отчет по работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) схему исследуемой цепи;
- 2) систему уравнений по методу МЗК;
- 3) систему контурных уравнений по методу МКТ и формулы для определения токов в ветвях схемы;
- 4) систему узловых уравнений по методу МУП и формулы законов Ома для расчета токов в ветвях схемы;
- 5) таблицы расчетных величин (табл. 1, 2);
- 6) уравнение баланса мощностей;
- 7) ответы на вопросы.

Варианты задания параметров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер варианта	$E1$	$E2$	J	$R1=R2$	$R3=R4$
	В	В	мА	кОм	кОм
1	20.	90.	200.	1.	2.
2	10.	40.	500.	4.	0.5
3	15.	50.	400.	5.	10.
4	40.	20.	900.	1.2	0.6
5	50.	10.	600.	0.8	1.

Лабораторная работа № 3. Исследование линейной электрической цепи при гармонических токах и напряжениях

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить: [4, с. 67 - 81], [6, с. 9 - 21], [10, с. 33-48].
2. Изучение цепи при последовательном соединении R, L, C - элементов. Определение действующих и мгновенных значений токов и напряжений.
3. Определение начальной фазы и угла сдвига фаз токов и напряжений на элементах схемы.
4. Определение мгновенной мощности на нагрузке.
5. Построение топографических векторных диаграмм.

Методические указания

Величина действующего тока при последовательном соединении R, L, C - элементов (рис. 1) определяется по закону Ома как

$$I = U / Z_{\Sigma}$$

Здесь U - действующее напряжение входного сигнала, Z_{Σ} - величина общего сопротивления двухполюсника и определяется как

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2},$$

где R_{Σ} - эквивалентное резистивное сопротивление цепи, а X_{Σ} - эквивалентное реактивное сопротивление цепи при некотором значении угловой частоты $\omega = 2 \cdot \pi f$, равное при последовательном соединении элементов алгебраической сумме реактивных сопротивлений:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k R_i, \quad X_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n X_{Li} - \sum_{i=1}^m X_{Ci},$$

где $X_L = \omega \cdot L$, $X_C = 1 / (\omega \cdot C)$.

Мгновенные значения тока и напряжения записываются как

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i), \quad u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_u),$$

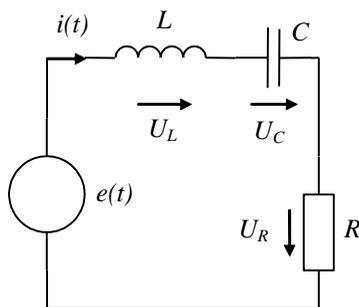


Рис. 1. Принципиальная схема

где $I_m = I \cdot \sqrt{2}$, $U_m = U \cdot \sqrt{2}$,

φ_i , φ_u - начальные фазы тока и напряжения соответственно.

Угол сдвига фаз $\varphi_{\text{вх}} = \varphi_u - \varphi_i$ или $\varphi_{\text{вх}} = \arctg(X\dot{\varepsilon}/R\dot{\varepsilon})$.

Контрольные вопросы

1. Что характеризует начальная фаза синусоидальной величины ?
2. Что такое действующее значение тока?
3. На каком элементе напряжение
а) опережает ток на $\pi/2$;
б) отстает от тока на $\pi/2$.
4. Какой режим анализа на ПЭВМ требуется выбрать для расчета мгновенных значений токов и напряжений в цепи.

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

1. Схема электрической цепи для анализа в СМ МАРС приведена на рис. 2. В состав цепи включены вольтметры $V1$, $V2$, $V3$ для измерения напряжений на катушке индуктивности, конденсаторе и нагрузочном резисторе, а также амперметр $A1$ для измерения тока в цепи. Информация, снимаемая с измерительных приборов, визуализируется с помощью компонента-графика.

На основе этой схемы могут быть определены:

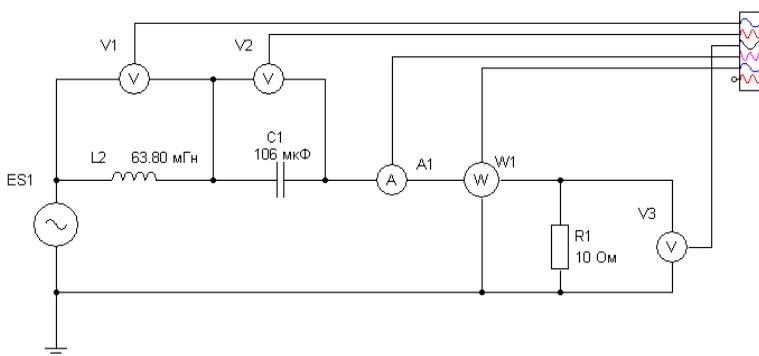


Рис. 2. Компонентная цепь для расчета в СМ МАРС

- а) напряжения и токи на каждом из элементов (U_R , U_C , U_L и i) как функции от времени;
- б) значения мгновенной мощности на нагрузочном сопротивлении R_n ;
- в) фазовый сдвиг входного напряжения и тока.
- г) фазовые сдвиги напряжений на катушке индуктивности и конденсаторе по отношению к напряжению на нагрузочном резисторе.

2. Выбрать значения параметров элементов схемы из табл. 3 в соответствии с заданным вариантом.

3. Рассчитать в СМ МАРС мгновенные значения тока и напряжений на элементах цепи в зависимости от времени. Для данной задачи рекомендуем режимом анализа являться динамический

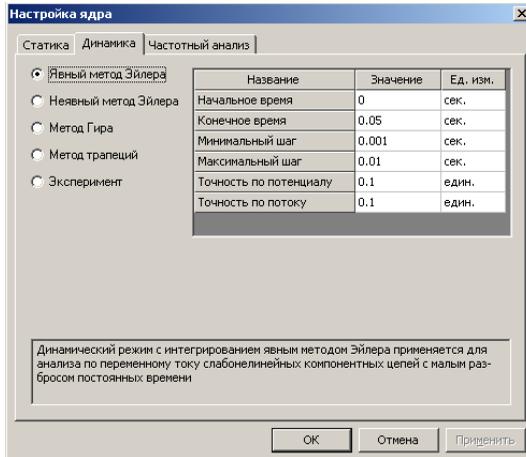


Рис. 3. Выбор динамического режима анализа по явной схеме Эйлера

анализ с линеаризацией по явной схеме Эйлера. Чтобы выбрать его необходимо с помощью пункта «Параметры моделирования» меню «Анализ» вызвать окно «Настройка окна» (рис. 3). В нем на вкладке «Динамика» необходимо активизировать пункт «Явный метод Эйлера». Выбранный режим анализа требует задания параметров моделирования. Необходимо, чтобы начальное время $t_{min}=0$, конечное время моделирования t_{max} равнялось 5-6 периодам сигнала источника, минимальный и максимальный шаг принять равными 0.01 и 0.1 от периода соответственно. Точность по потенциалу и по току должна равняться 0.1

Результаты анализа представить в виде графиков. Используя их, определить максимальные, а на их основе и действующие значения переменных и занести в табл. 1. Прочерк в таблице означает, что данная графа не заполняется.

4. Рассчитать аналитически значения переменных из предыдущего пункта и занести в табл. 1.

Таблица 1

Тип исследования	Переменные цепи					
	I	U_R	U_L	U_C	$\varphi_{вх}$	$Z=U/I$
	А	В	В	В	°	Ом
Эксперимент					—	
Расчет						

5. Определить начальные фазы тока и напряжений, а также угол сдвига фаз между входным напряжением и током $\varphi_{вх}$ и внести в табл. 2. Значения углов измерить в градусах.

Таблица 2

φ_e	φ_i	φ_{UR}	φ_{UL}	φ_{UC}	$\varphi_{вх}$

6. Используя схему, приведенную на рисунке 4, получить с помощью двухканального осциллографа амплитуды и фазы напряжений и тока в данной цепи для ситуаций, когда $\frac{U_L}{U_C} = 2$, $\frac{U_L}{U_C} = 1$, $\frac{U_L}{U_C} = 0.5$. Данных отношений необходимо добиться, изменяя значение емкости или индуктивности. По полученным данным построить векторные диаграммы напряжений для всех трех случаев.

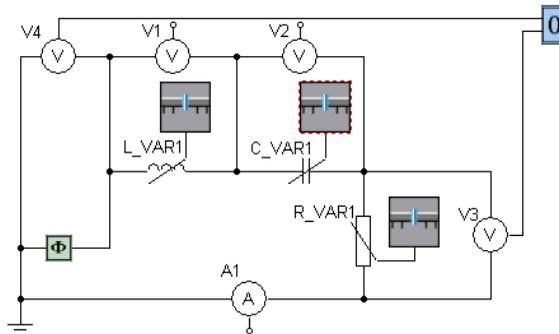


Рис. 4. Схема эксперимента в СИМАРС

Отчет по работе

Отчет по работе должен содержать:

- 1) схему цепи с параметрами и задание на работу;
- 2) формулы для расчета мгновенных значений токов и напряжений, а также угла сдвига фаз между входным током и напряжением;
- 3) таблицы данных вычислительного эксперимента и результатов расчета (табл. 1 и 2);
- 4) уравнения Кирхгофа для схемы;
- 6) топографические диаграммы напряжений.
- 7) ответы на контрольные вопросы.

Варианты задания параметров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер варианта	R_n	L	C	f	E_m
	Ом	мГн	мкФ	Гц	В
1	10.	63.8	106.	50.	60.
2	25.	21.2	132.	60.	70.
3	90.	34.7	80.3	55.	80.
4	70.	109.	32.5	70.	90.
5	60.	132.	50.	50.	80.

Лабораторная работа № 4. Исследование резонанса напряжений

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить: [5, с. 262-263], [6, с. 105-110], [10, с. 62-71].

2. Изучение физического смысла и условий наступления резонанса в последовательном RLC - контуре.

3. Исследование в СМ МАРС поведения электрических переменных в резонансной и околорезонансной зоне при изменении параметров контура.

4. Анализ поведения этих же переменных в зависимости от частоты в зоне резонанса.

Методические указания

Резонансом называется такой режим в пассивной цепи, содержащей L и C , при котором входное напряжение и входной ток совпадают по фазе, а цепь в целом ведет себя как чисто активное сопротивление, т.е.

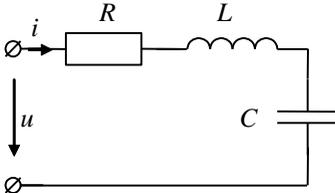


Рис. 1. Принципиальная схема

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 0.$$

Такой резонанс называют энергетическим или фазовым. С энергетической точки зрения это значит, что на вход пассивного двухполюсника не поступает реактивная мощность. На рис. 1

представлен двухполюсник с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости. Такую цепь называют последовательным контуром.

Угол сдвига фаз между напряжением и током на входе цепи, как известно, определяется как

$$\varphi = \arctg \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right), \quad \text{где } X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}.$$

Очевидно, что угол $\varphi = 0$ только при равенстве

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \tag{1}$$

Это соотношение называют условием резонанса в последовательном контуре. Из условия электрического резонанса следует, что резонанс может быть получен либо изменением частоты напряжения источника, либо изменением параметров цепи - индуктивности и емкости. Значение угловой частоты, при которой наступает резонанс, называют резонансной частотой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Полное сопротивление цепи при резонансе:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R,$$

т.к. $X_L = X_C$.

Для заданного напряжения ток при резонансе получает наибольшее значение $I_0 = U/R$ и не зависит от величин реактивных сопротивлений X_L и X_C . Напряжение на активном сопротивлении при резонансе $U_{R_0} = RI_0 = U$, т.е. равно полному входному напряжению цепи. Это происходит потому, что напряжения $U_L(t)$ и $U_C(t)$, находящиеся при последовательном соединении всегда в противофазе, при резонансе равны между собой по величине и компенсируют друг друга. Значения этих напряжений могут превосходить напряжения на зажимах цепи при $X_{L_0} = X_{C_0} \gg R$.

Тогда:

$$U_{L_0} = U_{C_0} = I_0 \omega_0 L = I_0 \frac{1}{\omega_0 C} = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} = I_0 \rho \quad (2)$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - характеристическое волновое сопротивление.

Важный параметр резонансного контура носит название добротность контура - Q :

$$Q = \omega_0 \frac{L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\rho}{R}.$$

Затуханием контура называется отношение приложенного напряжения к напряжению на индуктивности (или емкости) при резонансе:

$$d = U/U_{L_0} = U/U_{C_0}.$$

Очевидно, что добротность – величина обратная затуханию, т.е.

$$d = R\omega_0 C = R/\omega_0 L.$$

Q и d зависят от параметров цепи. На практике, как правило, затухание контура $d \ll 1$, а следовательно, $Q \gg 1$. Особенно высоких значений (порядка тысячи единиц) достигает добротность в технике сверхвысоких частот.

Из (2) следует, что настроить последовательный контур в резонанс можно несколькими способами:

а) $\omega = var, L=const, C=const$ – частотная настройка,

б) $L = var, \omega=const, C=const$

$C = var, \omega=const, L=const$ – параметрическая настройка.

Зависимости параметров цепи U_L, U_C, I, φ от частоты называются частотными характеристиками или резонансными кривыми. На рис. 2 построена зависимость I от частоты ω в относительных единицах.

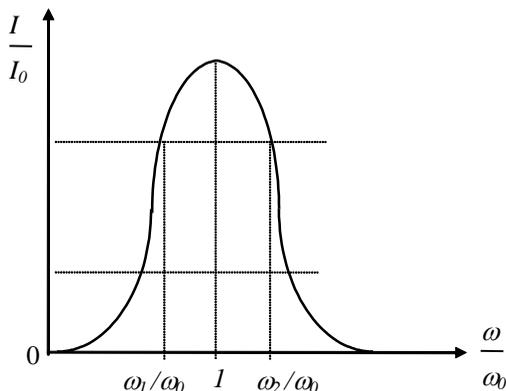


Рис. 2. Зависимость тока I от частоты ω

По этой резонансной кривой может быть найдена величина затухания d графически. С этой целью необходимо провести горизонтальную линию на высоте $1/\sqrt{2}$. Отрезок этой линии между точками пересечения ее резонансной кривой равен d , т.е. $(\omega_2 - \omega_1)/\omega_0$. Чем меньше затухание контура d , тем резонансная кривая становится более заостренной.

Контрольные вопросы

1. В чем причина наступления резонанса напряжений, и каковы характеризующие его соотношения?
2. Как можно управлять резонансом?
3. Какие режимы анализа необходимо использовать для получения временных и частотных характеристик?

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

1. Для схемы, приведенной на рис. 3, установить значения сопротивления резистора, емкости конденсатора и индуктивности катушки индуктивности в соответствии с вариантом (табл. 6). Изменяя частоту функционального генератора, измерить ток в цепи и напряжения на элементах с помощью измерительных приборов, приведенных на схеме. По результатам измерений заполнить табл. 1.

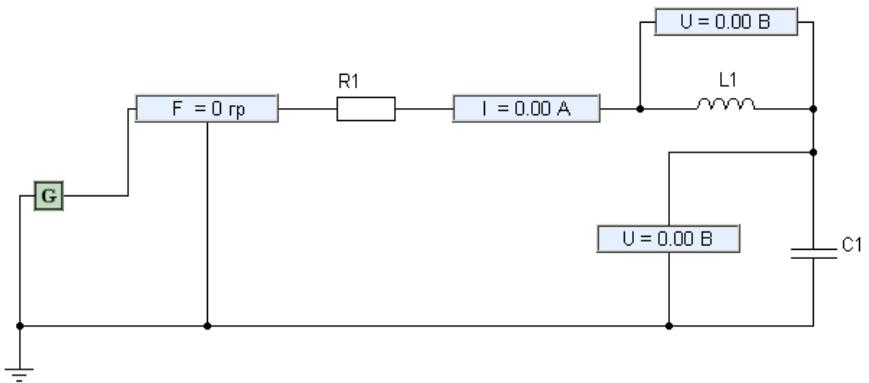


Рис. 3. Компонентная цепь для проведения расчета в СИМАРС

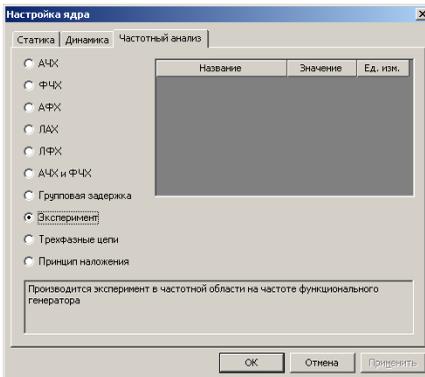


Рис 4. Выбор режима «Частотный анализ, эксперимент»

В качестве режима анализа необходимо выбрать экспериментальный режим в частотной области. Для этого необходимо вызвать окно настройки режима работы вычислительного ядра с помощью пункта «Параметры моделирования» в меню «Анализ» (рис. 4). В данном окне сделать активной вкладку «Частотный анализ», на которой должен быть активирован пункт

«Эксперимент».

Изменяя частоту функционального генератора, занести результаты эксперимента в табл. 1.

Таблица 1

ω	U_L	U_C	U_R	φ	I
рад/с	В	В	В	°	А
100.					
200.					
500.					
1000.					
1500.					
2000.					
2500.					
3000.					
4000.					

По построенным характеристикам определить резонансную частоту данного колебательного контура.

2. На схеме, приведенной на рис. 5, установить параметры катушки индуктивности и конденсатора, соответствующие заданному варианту. Изменяя сопротивление резистора по значениям, приведенным в табл. 2, измерить значение тока при резонансе, полосу пропускания данного контура и его добротность. Результаты измерений занести в табл. 2.

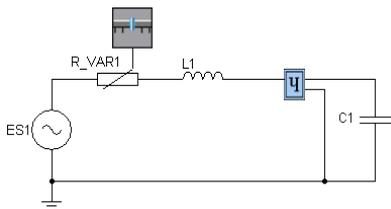


Таблица 2.

R	I_0	П	Q
$0.5R_0$			
R_0			
$2R_0$			

Рис. 5. Схема для измерения полосы пропускания и добротности колебательного контура

3. Исследование резонансной цепи при изменении емкости. По выбранному варианту параметров из табл. 6 рассчитать емкость C для трех режимов: $C < C_{рез}$, $C = C_{рез}$, $C > C_{рез}$. Провести анализ RLC -цепи на ПЭВМ для трех рассчитанных режимов емкости. Данные занести в табл. 3.

Таблица 3

Данные анализа на ПЭВМ					Параметр C	
U	I	φ	U_L	U_C	Режим	Значение
					$C1 < C_{рез}$	$C1 =$
					$C2 = C_{рез}$	$C2 =$
					$C3 > C_{рез}$	$C3 =$

4. Рассчитать ток в цепи и напряжения на ее элементах для трех значений емкости конденсатора

- $C_1 = C_{рез}$
- $C_2 = 0.5C_{рез}$
- $C_3 = 2C_{рез}$

для режимов табл. 3. Для экспериментальной проверки использовать схему, приведенную на рис 6. Результаты расчетов внести в табл. 4 и сравнить с данными вычислительного эксперимента по табл. 1.

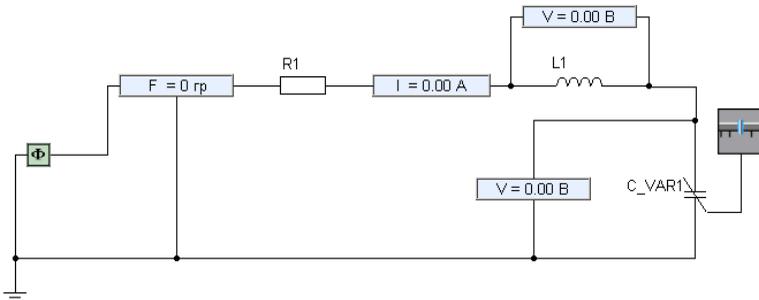


Рис. 6. Схема для вычислительного эксперимента

Таблица 4

Ре- жим	U	I	C	X_C	X_L	Z	U_L	U_R	P	$\varphi = \text{atg}(X/R)$
	В	А	мкФ	Ом	Ом	Ом	В	В	Вт	°
С1										
С2										
С3										

5. Построить топографическую диаграмму напряжений в цепи по результатам расчетов, полученных в п. 4.

5. Рассчитать резонансную частоту для выбранного варианта. Для ω_0 рассчитать X_{L_0} , X_{C_0} , Z_0 , I_0 , U_{L_0} , U_{C_0} . Данные занести в табл. 5.

Таблица 5

U	ω_0	R	X_{L_0}	X_{C_0}	Z_0	I_0	U_{L_0}	U_{C_0}	Q
В	рад/с	Ом	Ом	Ом	Ом	А	В	В	

Отчет по работе

Отчет по работе должен содержать:

- 1) схему цепи с заданными на ней параметрами и задание на работу;
- 2) таблицы с результатами эксперимента в СМ МАРС;
- 3) таблицы с результатами анализа в СМ МАРС значений переменных цепи в функции изменения параметра емкости C , а также с результатами аналитических расчетов;
- 4) графики, характеризующие зависимости переменных цепи в функции частоты в области резонанса.

Варианты задания параметров приведены в табл. 6.

Таблица 6

Номер варианта	ω	C	L	R	W_n	W_x
	рад/с	Ф	Гн	Ом	рад/с	рад/с
1	1000.	0.0001	0.01	5.	100.	4000.
2	1000.	0.0002	0.03	3.	100.	4000.

3	1000.	0.0003	0.05	6.	100.	4000.
4	1000.	0.0005	0.04	4.	100.	4000.
5	1000.	0.0004	0.03	5.	100.	4000.

Лабораторная работа № 5. Исследование резонанса токов в параллельном колебательном контуре

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить: [5, с. 268-272], [6, с. 110-114], [10, с. 62-71].

2. Изучение физического смысла и характеризующих соотношений резонанса при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора.

3. Анализ резонансных характеристик при варьировании параметров цепи.

4. Анализ резонансных характеристик параллельного контура при варьировании частоты.

Методические указания

Явление совпадения по фазе тока и напряжения на входе цепи, содержащей индуктивности и емкости, называют резонансом.

Если он происходит за счет взаимной компенсации реактивных составляющих токов в параллельно включенных ветвях с реактивными элементами разного характера, говорят о резонансе токов.

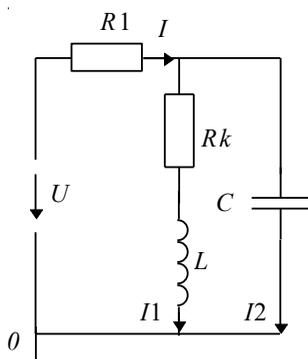


Рис. 1. Принципиальная схема

Простейший случай такой цепи приведен на рис. 1. В схеме катушка с потерями (Rk, L) соединена параллельно с конденсатором C . Если к этой цепи приложено синусоидальное напряжение $u=U\sqrt{2}\sin(\omega t)$, то ток равен $i=I\sqrt{2}\sin(\omega t-\varphi)$,

$$\text{где} \quad I=YU; \quad Y=\sqrt{g^2+b^2}; \quad g=\frac{Rk}{Z_{eX}^2};$$

$$b=b_L-b_C=\frac{1}{\omega L}-\omega C$$

Отсюда находится угловая резонансная частота ω_p :

$$\frac{\omega_p L}{(Rk)^2+(\omega_p L)^2}=\omega_p C; \quad \omega_p=\sqrt{\frac{L-(Rk)^2 C}{L^2 C}}=\omega_0\sqrt{1-\left(\frac{Rk}{\rho}\right)^2},$$

где ω_0 - резонансная частота последовательного контура.

Резонансная частота параллельного контура в отличие от последовательного зависит от потерь в катушке индуктивности (Rk), однако для $\frac{\rho}{\rho_k} \geq 5$ имеем $\omega_p=\omega_0$.

Комплексное сопротивление параллельного контура (без учета сопротивления источника) равно:

$$\begin{aligned} Z_{eX}(j\omega) &= \frac{(Rk + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{Rk + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \\ &= \sqrt{\frac{(Rk)^2 + (\omega L)^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega Rk C)^2}} \times e^{j\left(\arctan g \frac{\omega L}{Rk} - \arctan g \frac{\omega Rk C}{1 - \omega^2 LC}\right)}, \end{aligned}$$

$$\text{а входной ток данного контура } I(j\omega) = \frac{U}{Z_{eX}(j\omega)}.$$

На рис. 2 приведены частотные характеристики параллельного контура.

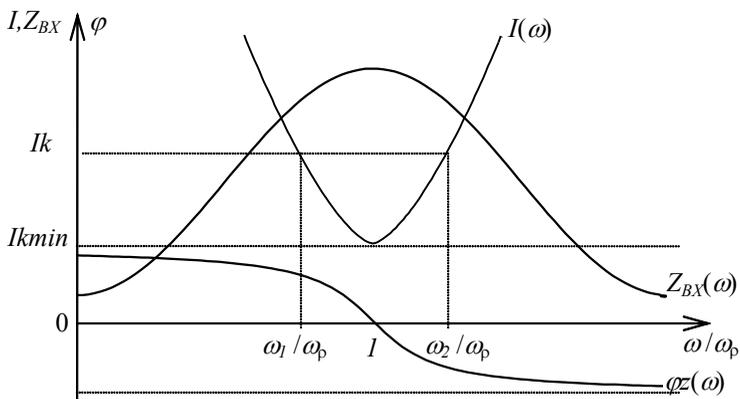


Рис. 2. Частотные характеристики параллельного контура

Важными параметрами параллельного контура являются:

- добротность $Q = \frac{\rho}{Rk}$;
- обобщенная расстройка $\xi = \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$;
- полоса пропускания $\Pi = \frac{\omega_p}{Q}$.

Токи в параллельных ветвях контура могут быть во много раз больше входного тока:

$$I_L(j\omega) = I(j\omega) \frac{Zk(j\omega)}{Rk + j\omega L} = I(j\omega) \frac{-jQ}{1 + j\xi} ;$$

$$I_C(j\omega) = I(j\omega) \frac{Zk(j\omega)}{1/j\omega C} = I(j\omega) \frac{jQ}{1 + j\xi} .$$

Отношение токов (коэффициент передачи по току):

$$\frac{I_L(j\omega)}{I(j\omega)} = \frac{-I_C(j\omega)}{I(j\omega)} = \frac{-jQ}{1 + j\xi} .$$

В режиме резонанса ($\xi = 0$) имеем $\frac{I_L}{I_p} = \frac{I_C}{I_p} = Q$.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение резонанса токов.
2. Как можно управлять резонансом?
3. Как определяются ω_p , Q и ρ в идеальном параллельном колебательном контуре?
4. Какие режимы анализа и с какими параметрами используются для получения частотных характеристик?

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

1. Настроить компонентную цепь (рис. 3) на проведение вычислительного эксперимента. Для этого следует задать параметры компонентов и источника согласно варианту задания (табл. 4).

2. Рассчитать для цепи, представленной на рис. 3, резонансную частоту ω_p , полосу пропускания Π , входной ток I_p , добротность Q , характеристическое сопротивление ρ для выбранных параметров цепи. Результаты внести в табл. 1.

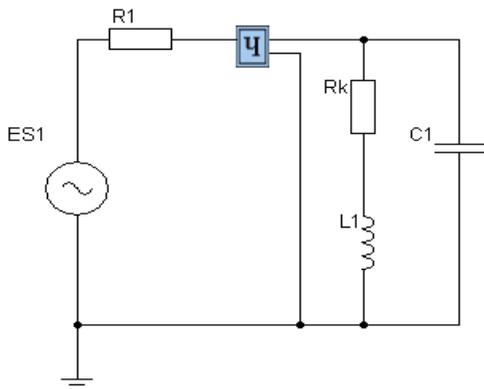


Рис. 3. Компонентная цепь для расчета в СМ МАРС

У к а з а н и е.
Данная схема не предусматривает задания режима анализа, так как он автоматически задается включением в компонентную цепь построителя частотных характеристик

3. С помощью построителя частотных характеристик определить резонансную частоту в точке минимума тока, границы

полосы пропускания по уровню $I_k = \sqrt{2} \cdot I_{k \min}$. По данным опы-

та рассчитать $Q = \frac{\omega_p}{\Pi}$, $\rho = \sqrt{(Q^2 + 1)} \cdot Rk$. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

$U = 20$	ω_p	f_p	U_C	I_p	Π	ρ	Q
В	Рад/с	кГц	В	А	рад/с	Ом	
Предварительный расчет							
Вычислительный эксперимент							

Таблица 2

ω	Z_{BX}	I	φ
рад/с	Ом	А	°

4. Рассчитать и построить частотные характеристики $Z_{BX}(\omega)$ в пределах $\omega = \omega_p \pm \Pi$ (7-9 точек, равноотстоящих от ω_p). Данные занести в табл. 2. В эту же таблицу занести значения входного тока и фазовой характеристики на этих же частотах. Сравнить точку перегиба фазовой характеристики с точкой максимума Z_{BX} .

5. Выбрать последовательно два значения емкости:

$$C < C_{рез}; \quad C > C_{рез}.$$

Оставляя прочие параметры цепи неизменными, провести частотный анализ цепи с помощью СМ МАРС (рис 4) в том же частотном диапазоне. Определить значения резонансных частот для обоих случаев и сравнить с расчетными данными. Резонансную частоту фиксировать по максимуму напряжения на контуре (U_C). Данные расчетов и эксперимента занести в табл. 3.

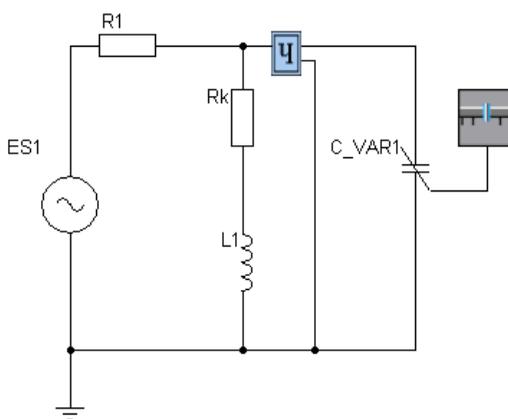


Рис. 4. Схема для вычислительного эксперимента

У к а з а н и е. Данная схема не предусматривает задания режима анализа, так как он автоматически задается включением в компонентную цепь построителя частотных характеристик

Отчет по работе

Таблица 3

Отчет по работе должен содержать:

- 1) схему цепи и задание на работу;
- 2) формулы для токов в ветвях, а также формулы для угла сдвига фаз и резонансной частоты;

3) графики Z_{BX} , I и φ , полученные на ПЭВМ в заданном диапазоне частот (табл. 2);

4) значения резонансных частот и напряжений на контуре для различных значений емкости C (табл. 3);

5) топологическую векторную диаграмму токов для случаев $C < C_{рез}$ и $C > C_{рез}$.

Режим	ω_p	U_C	C
	рад/с	В	мкФ
Эксперимент			$C=0.5 C_{рез}$
Расчет			
Эксперимент			$C= 3 C_{рез}$
Расчет			

Таблица 4

Номер Варианта	R	L	C
	Ом	мГн	мкФ
1	250.	45.	30.
2	150.	40.	20.
3	200.	25.	35.
4	300.	30.	25.
5	350.	40.	45.

Варианты задания параметров приведены в табл. 4.

У к а з а н и е. Сопротивление катушки R_k принять равным 1 Ом, а напряжение питания равным 1-2 В.

Лабораторная работа № 6. Электрические цепи со взаимной индуктивностью

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить: [5, с. 242-248], [6, с. 114-129], [10, с. 55-59].

2. Исследование цепей с индуктивно связанными катушками при их последовательном и параллельном соединении.

3. Определение опытным путем параметров взаимосвязанных катушек индуктивностей, величины взаимной индуктивности.

4. Научиться определению одноименных зажимов экспериментально, построению топографической диаграммы для электрических цепей со взаимной индуктивностью.

Методические указания

Пусть имеется, например, кольцевой сердечник с двумя катушками, имеющими соответственно число витков w_1 и w_2 .

Токи каждой катушки создают в сердечнике магнитные потоки, соответственно Φ_{11} и Φ_{22} , направление которых определяется по правилу буравчика. Магнитный поток Φ_{11} , созданный током I_1 , частично охватывает катушку 2 (Φ_{21}), а поток Φ_{22} , созданный током I_2 , частично охватывает катушку 1 (Φ_{12}). Эти частичные потоки называют потоками взаимной индукции, определяющими взаимную индуктивность

$$M_{12} = \frac{W_1 \cdot \Phi_{12}}{I_1}, \quad M_{21} = \frac{W_2 \cdot \Phi_{21}}{I_1}.$$

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

Потоко сцепления Φ_1 и Φ_2 каждой катушки представляют собой функции двух токов. Если материал сердечника можно считать линейным ($M = const$), то потоко сцепления Φ_1 и Φ_2 будут линейными функциями токов:

$$\Phi_1 = L_1 \cdot I_1 + M_{12} \cdot I_2, \quad \Phi_2 = M_{21} \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2. \quad (1)$$

Слагаемое $L_1 \cdot I_1$ характеризует потоко сцепление катушки 1, вызванное током I_1 , слагаемое $M_{21} \cdot I_1$ - потоко сцепление катушки 2, созданное также током I_1 .

Параметры $L_1 = \Phi_1 / I_1$ (при $I_2 = 0$); $L_2 = \Phi_2 / I_2$ (при $I_1 = 0$) называют собственными индуктивностями катушек.

Параметры $M_{12} = \Phi_1 / I_2$ (при $I_1 = 0$); $M_{21} = \Phi_2 / I_1$ (при $I_2 = 0$) называются взаимными индуктивностями катушек при условии, что магнитный поток замыкается только по сердечнику.

Для рассматриваемой цепи

$$M_{12} = M_{21} = M = \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad \text{или} \quad M / \sqrt{L_1 \cdot L_2} = K,$$

где K - коэффициент связи катушек. В реальных условиях $K < 1$, так как часть магнитного потока замыкается помимо сердечника.

Схема замещения цепи с параллельно соединенными и индуктивно связанными катушками дана на рис. 1.

Зажимы 1 и 2 отмечены звездочками и называются одноименными. Это означает, что при одинаковых направлениях токов I_1 и I_2 относительно одноименных зажимов магнитные потоки, созданные токами, складываются - включение катушек согласное. Если же направления токов I_1 и I_2 относительно одноименных зажимов разные, то магнитные потоки вычитаются - включение катушек встречное.

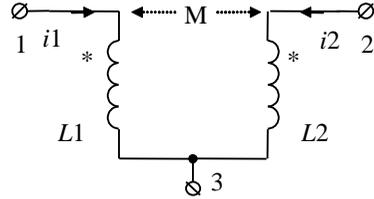


Рис. 1. Схема замещения цепи с катушками, параллельное соединение

Напряжения на зажимах связанных индуктивных катушек:

$$U_1 = \frac{d\Phi_1}{dt} = L \cdot \frac{di_1}{dt} \pm M \cdot \frac{di_2}{dt}, \quad U_2 = \frac{d\Phi_2}{dt} = L \cdot \frac{di_2}{dt} \pm M \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (2)$$

Здесь верхний знак (+) соответствует согласному включению, нижний (-) - встречному, или в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot L_1 \pm \underline{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot M, \\ \underline{U}_2 &= \underline{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot L_2 \pm \underline{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot M. \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 2 даны схемы замещения двух индуктивно связанных катушек при последовательном соединении индуктивностей (а - согласное включение; б - встречное включение).

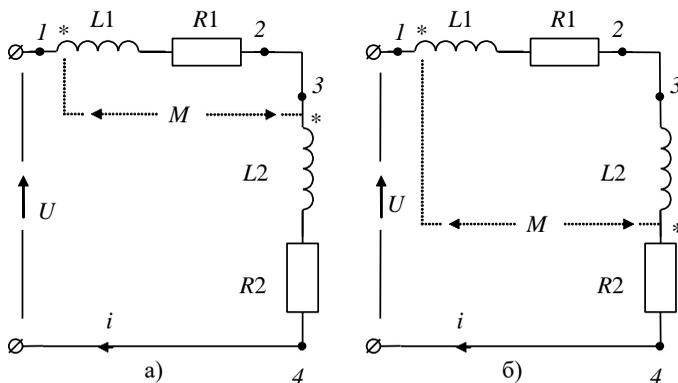


Рис. 2. Схема замещения цепи с катушками, последовательное соединение
 Эквивалентное реактивное сопротивление при согласном
 включении:

$$X_{\text{согл}} = \omega(L1 + L2 + 2M) = X1 + X2 + 2 \cdot X_M,$$

при встречном:

$$X_{\text{встр}} = \omega(L1 + L2 - 2M).$$

Очевидно $X_{\text{согл}} > X_{\text{встр}}$. Зная их, можно найти сопротивление взаимной индуктивности:

$$\omega \cdot M = X_M = (X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}) / 4, \quad M = X_M / \omega. \quad (4)$$

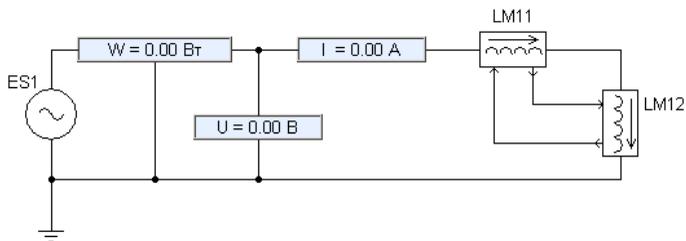
Контрольные вопросы

1. Как на электрической схеме определить согласное или встречное включение катушек?
2. Как определить одноименные зажимы катушек?
3. Записать систему уравнений по методу законов Кирхгофа в комплексной форме с учетом взаимной индукции для встречного включения катушек (схема рис. 2б).

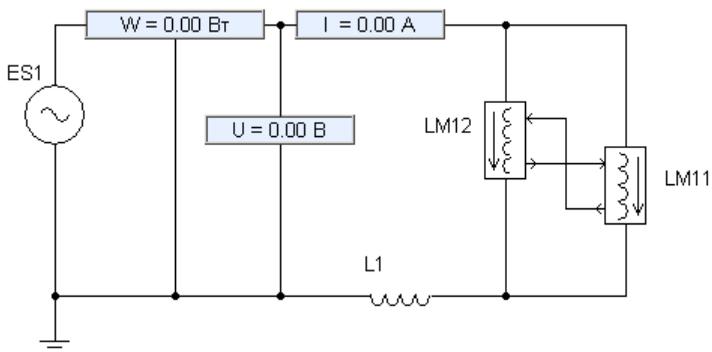
Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

1. Компонентная цепь для графического редактора приведена на рис. 3. Варианты параметров схем приведены в табл. 4.

По схемам рис. 3 при согласном и встречном включении последовательно соединенных катушек определяют их взаимную индуктивность. По схеме рис. 4 проводится исследование цепи при параллельном соединении катушек, построение топографической диаграммы токов для двух рассматриваемых случаев.



а) согласное соединение



б) встречное соединение

Рис. 3. Компонентная цепь, последовательное соединение

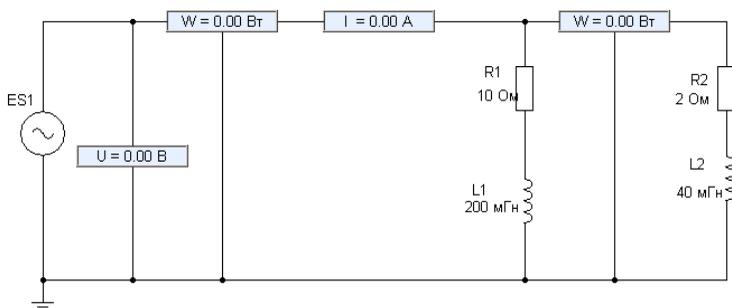


Рис.4. Компонентная цепь, параллельное соединение

2. Проанализировать схемы рис. 3 при согласном и встречном последовательном включении ($I_{встр} > I_{согл}$) при вы-

бранной частоте f и напряжении U на входе двухполюсника. Расчитанные на ПЭВМ показания приборов занести в табл. 1.

Таблица 1

Характер включения	Опытные данные				Расчетные данные				
	U	f	I	P	$Z=U/I$	X	X_m	M	K
	В	Гц	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	
Согласное									
Встречное									

3. В табл. 1 для обоих случаев включения катушек рассчитать $X_{сogl}$ и $X_{встр}$, затем X_m , M и коэффициент связи K .

Таблица 2

Характер включения	Опытные данные					
	U	I	I_1	I_2	P_1	P_2
	В	А	А	А	Вт	Вт
Согласно-						
Встречное						

4. Проанализировать схему рис. 3 в СМ MAPS в экспериментальном режиме для согласного и встречного параллельного включения ($I_{встр} > I_{сogl}$) при выбранной частоте f и выбранном напряжении U на входе двухполюсника. Рассчи-

танные на компьютере показания приборов занести в табл. 2.

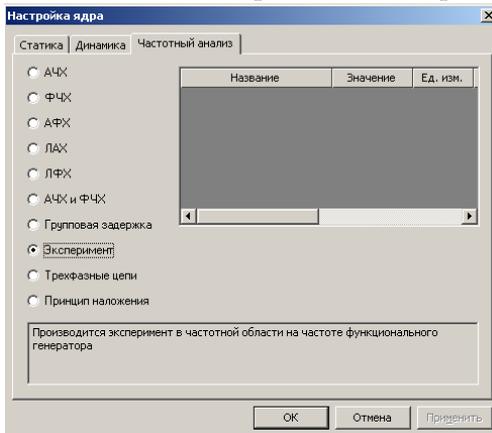


Рис. 5. Выбор режима «Частотный анализ, эксперимент»

У к а з а н и е
Для проведения анализа выбрать режим «Эксперимент в частотной области». Для этого необходимо вызвать окно настройки режима анализа, воспользовавшись пунктом «Параметры моделирования» в меню «Анализ». В данном окне должна быть активной

вкладка «Частотный анализ», в которой необходимо выделить пункт «Эксперимент» (рис. 5).

5. Используя опытные данные табл. 1 и табл. 2, построить топографическую диаграмму для согласного и встречного включения. Для этого следует рассчитать напряжения на участках цепи и углы сдвига фаз φ_1 и φ_2 между токами I_1 и I_2 и входным напряжением.

Данные расчета внести в табл. 3.

Таблица 6.3

Характер включения	Данные расчета							
	$I_1 \cdot R_1$	$I_1 \cdot X_L$	$I_2 \cdot I_M$	$I_2 \cdot R_2$	$I_2 \cdot X_C$	$I_1 \cdot X_M$	φ_1	φ_2
	В	В	В	В	В	В	°	°
Согласное								
Встречное								

У к а з а н и е. Построение диаграммы нужно начать с лучевой диаграммы токов, приняв начальную фазу напряжения $\varphi_i = 0$ с точки низшего потенциала.

Отчет по работе

Отчет по работе должен содержать следующее:

1) схему цепи и задание на работу;

2) схемы замещения исходной цепи для случаев согласного и встречного включения;

3) формулы для расчета основных параметров схем замещения;

4) данные вычислительного эксперимента для разных типов включения катушек;

5) топологические диаграммы для согласного и встречного включения.

Варианты задания параметров приведены в таблице 4.

Таблица 4

Номер варианта	R1	L1	R2	L2
	Ом	Гн	Ом	Гн
1	10.	0. 2	2.	0.0 4
2	20.	0. 4	3.	0.0 6
3	30.	0. 6	4.	0.0 8
4	40.	0. 8	5.	0.1 0
5	50.	1. 0	6.	0.1 2

Лабораторная работа № 7. Исследование воздушного трансформатора

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить: [5, с. 248-252], [6, с. 127-129], [10, с. 59-61].
2. Построение схемы замещения воздушного трансформатора.
3. Определение параметров схемы воздушного трансформатора по данным вычислительного эксперимента.
4. Построение топографических векторных диаграмм напряжений трансформатора, совмещенных с лучевой диаграммой токов, для различных режимов нагрузки.

Методические указания

В простейшем случае воздушный трансформатор представляет собой две индуктивно связанные катушки, которые называются обмотками и расположены на общем сердечнике из неферромагнитного материала ($\mu = 1$). Например: картон, текстолит, дерево. На рис. 1 представлена электрическая схема воздушного трансформатора.

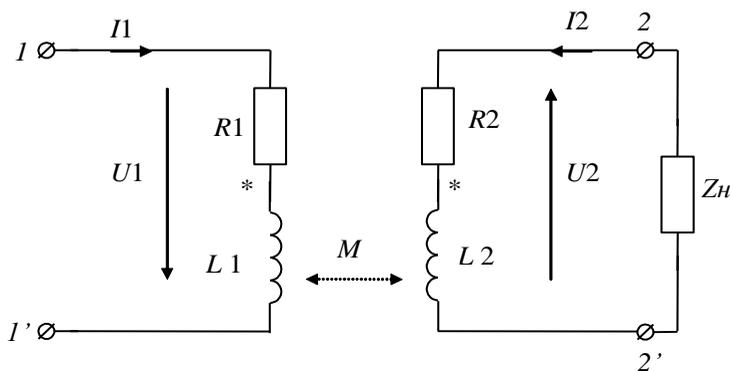


Рис. 1. Принципиальная схема

В комплексной форме уравнения трансформатора для схемы на рис. 1 имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{Z}_1 \dot{I}_1 + \underline{Z}_M \dot{I}_2; \\ -\dot{U}_2 &= \underline{Z}_M \dot{I}_1 + \underline{Z}_2 \dot{I}_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = R_1 + jX_1$, $\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2 = R_2 + jX_2$ - сопротивления первичной и вторичной обмоток;

$\underline{Z}_M = j\omega M = jX_M$ - сопротивление взаимной индукции;

$K = \sqrt{\frac{M}{L_1 L_2}}$ - коэффициент индуктивной связи;

M - взаимоиנדуктивность.

Если $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$ - сопротивление нагрузки, то к уравнениям (1) добавляется величина $+\underline{Z}_H I_2$. В режиме холостого хода обмотка 2-2' разомкнута:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1x}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{1x}, \quad \underline{Z}_H = \infty, \quad I_{2x} = 0.$$

Система уравнений (1) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1x} &= \dot{I}_{1x} (R_1 + j\omega L_1); \\ \dot{U}_{2x} &= \dot{I}_{1x} j\omega M. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Отсюда можно определить сопротивление взаимной индукции:

$$\underline{Z}_M = j\omega M = jX_M = \frac{\dot{U}_{2x}}{\dot{I}_{1x}}.$$

Рассмотрим идеальный трансформатор. Предположим, что $R_1 = R_2 = 0$ и $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 1$. При этом уравнения трансформатора

(1) с учетом \underline{Z}_H запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2; \\ -\underline{Z}_H \dot{I}_2 &= j\omega M \dot{I}_1 + j\omega L_2 \dot{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Перепишем их как:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2, \\ -j\omega M \dot{I}_1 &= \underline{Z}_H \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 = \dot{U}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2. \end{aligned}$$

Выразим \dot{U}_1 и \dot{I}_1 через \dot{U}_2 и \dot{I}_2 , и после некоторых преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \left(-\frac{L_1}{M}\right)\dot{U}_2 + j\omega\left(M - \frac{L_1 L_2}{M}\right)\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 &= -\frac{\dot{U}_2}{j\omega M} - \frac{L_2}{M}\dot{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При $K=1$ $M = \sqrt{L_1 L_2}$ или $M - \frac{L_1 L_2}{M} = 0$.

Если обозначим $L_1/M=A$, то уравнения (4) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= AU_2; \\ I_1 &= \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1} - \frac{\dot{I}_2}{A}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Трансформатор, для которого выполняется условие $U_1/U_2=A$ при любой нагрузке, называется совершенным трансформатором.

Если принять $L_1=\infty$, то получим соотношения:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= AU_2; \\ I_1 &= -\frac{\dot{I}_2}{A}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

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

$$U_1/I_1 = Z_{BX} = -AU_2/(-I_2/A) = A^2 Z_H. \quad (7)$$

Из этого уравнения видно, что при помощи идеального трансформатора можно произвести также и изменение сопротивления в определенное число раз, не зависящее от характера этого сопротивления. Это обстоятельство важно для рационального конструирования отдельных элементов электрических цепей, например, для согласования отдельных участков цепей по их сопротивлениям.

Контрольные вопросы

1. Как опытным путем определить взаимную индуктивность воздушного трансформатора, активное сопротивление, индуктивность?

2. Для воздушного трансформатора сделать эквивалентную замену индуктивных связей, начертить эквивалентную схему и доказать, что она соответствует уравнениям воздушного трансформатора.

3. Ввести понятие идеального трансформатора и пояснить прямо по схеме, как перейти от реального к идеальному трансформатору (условия идеальности).

4. Какими режимами следует воспользоваться для анализа в СМ МАРС эквивалентных схем трансформатора?

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

1. Схема электрической цепи для анализа в СМ МАРС представлена на рис. 2 и содержит в своем составе измерители: мощности (W), входного и выходного напряжения (V), а также токов первичной и вторичной обмоток (A). Установить заданный вариант параметров трансформатора в качестве параметра трансформатора:

$L1=0.$, $L2=0.$, $R1=0.$, $R2=0.$, $V_m=N_{BAP}$,
 где $N_{BAP}=(0., 1., 2., 3., 4., 5.)$ - номер варианта.

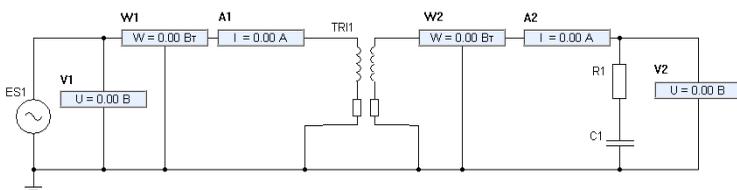


Рис. 2. Компонентная цепь для расчета в СМ МАРС

2. При выбранном неизменном напряжении на зажимах первичной обмотки $U1=1В$ и частоте $\omega=1000 \text{ рад/с}$ установить режим холостого хода - зажимы 2-2' разомкнуты ($Z_H=10^9$). Результаты анализа занести в табл. 1. Рассчитать X_M , M , L .

Таблица 1.

Опыт холостого хода					Расчет			
ω	$U1$	P	$I1$	$I2$	$U2$	X_M	M	L
рад/с	В	Вт	А	А	В	Ом	Гн	Гн

У к а з а н и е: В качестве режима анализа рекомендуется использовать экспериментальный режим в частотной области. Для его установки необходимо использовать окно

настройки режима анализа. Для вызова воспользуйтесь пунктом «Параметры моделирования» в меню «Анализ». В появившемся окне (рис. 3) в качестве активной должна быть выбрана вкладка «Частотный анализ», в которой выбирается пункт «Эксперимент»

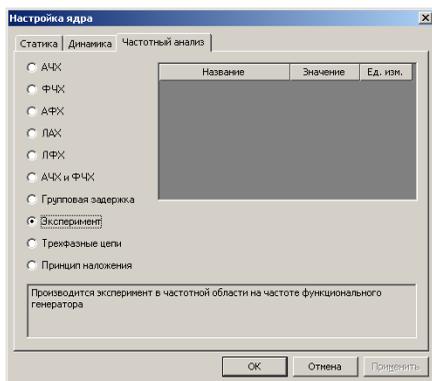


Рис 3. Выбор режима «Частотный анализ, эксперимент»

3. Рассчитать U_R , U_L , построить топографическую векторную диаграмму воздушного трансформатора для режима холостого хода ($I_2=0$; $Z_H=10^9$).

4. Подключить к зажимам 2-2' трансформатора емкостную нагрузку $Z_H=Z_C$. Значение емкости $C=0.25E-3$ Ф.

Повторить схему действий п.3. Данные измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

ω	U_1	U_2	I_1	I_2	P	Примечание
рад/с	В	В	А	А	Вт	
						$\varphi_n = -90^\circ$

5. По экспериментальным и расчетным данным построить топографическую векторную диаграмму напряжений схемы рис. 2 при емкостной нагрузке. Для этого необходимо:

- записать уравнения законов Кирхгофа в комплексной форме;
- рассчитать напряжения на участках цепи и данные расчета внести в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные данные				
$U_{R2}=I_2 \cdot R_2$	$U_{X2}=I_2 \cdot X_2$	$U_{R1}=I_1 \cdot R_1$	$U_{X1}=I_1 \cdot X_1$	$U_{M1}=I_2 \cdot X_M$
В	В	В	В	В

6. Из диаграммы определить $U_{M2}=I_1 \cdot X_M$. Сравнить значения первичного напряжения U_1 и угол сдвига фаз φ_1 , полученные из опыта и векторной диаграммы.

7. Приняв $K=1$, $A=2$ при тех же значениях входного напряжения и частоты для схемы рис. 2 рассчитать параметры идеального трансформатора: Z_{BX} , Z_H , L_1 , R_1 , L_2 , R_2 , а также I_1 , U_2 , I_2 .

У к а з а н и е. При построении диаграммы для схемы рис. 2 разметить условно положительные направления напряжений на участках цепи, учитывая согласный характер включения катушек. Уравнение равновесия напряжений для второго контура удобнее записать $U_2 + I_2 R_2 + I_2 j \omega X_L = I_1 j \omega X_M$.

В начале построения диаграммы выбираем вектор тока I_2 с начальной фазой $\varphi_2 = 0$ и с началом отсчета из точки 2'.

Отчет по работе

Отчет по работе должен содержать следующие пункты.

- 1) схему замещения трансформатора и задание на работу;
- 2) основные соотношения для определения параметров схем замещения трансформатора;
- 3) данные вычислительного эксперимента по определению электрических переменных на обмотках трансформатора;
- 4) данные аналитических расчетов параметров идеального трансформатора;
- 5) топографические диаграммы напряжений для схемы замещения трансформатора с предварительно рассчитанными параметрами.

Лабораторная работа № 8. Исследование трехфазных цепей, соединенных звездой

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить [4, с. 144 – 159], [6, с. 169 – 188], [10, с. 122-142]
2. Определение порядка чередования фаз.

3. Определение соотношений между фазными и линейными токами и напряжениями в симметричной трехфазной цепи, соединенной звездой.

4. Исследование поведения высших гармонических составляющих в трехфазной цепи, соединенной звездой (включая аварийные режимы работы) и влияние нулевого провода на степень асимметрии.

5. Исследование поведения высших гармонических составляющих в трехфазных цепях, соединенных звездой.

Методические указания

Фазами принято называть участки цепи, в каждом из которых действуют одинаковые по частоте (или спектральному составу) и амплитуде источника ЭДС, отличающиеся друг от друга начальной фазой (А, В, С).

$$\dot{E}_A = E; \quad \dot{E}_B = \dot{E} \cdot e^{-j120}; \quad \dot{E}_C = E \cdot e^{j120} \quad (1)$$

В случае, когда сопротивлением линейных проводников можно пренебречь, эти ЭДС равны фазовым напряжениям на нагрузке, а линейные – определяются соответствующими разностями фаз.

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{aligned} \quad (2)$$

В симметричном режиме нейтральные точки нагрузки и генератора эквивалентны.

Наличие несимметрии приводит к смещению нулевой точки нагрузки

$$\dot{U}_{O'O} = \frac{\dot{E}_A \cdot Y_A + \dot{E}_B \cdot Y_B + \dot{E}_C \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (3)$$

где Y_A, Y_B, Y_C – комплексные проводимости фаз и нулевого провода.

Напряжение на фазах нагрузки в несимметричном режиме:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_A &= \dot{E}_A - \dot{U}_{0'0} \\
 \dot{U}_B &= \dot{E}_B - \dot{U}_{0'0} \\
 \dot{U}_C &= \dot{E}_C - \dot{U}_{0'0}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Векторная диаграмма напряжений, поясняющая рассмотренные соотношения, приведена на рис. 1.

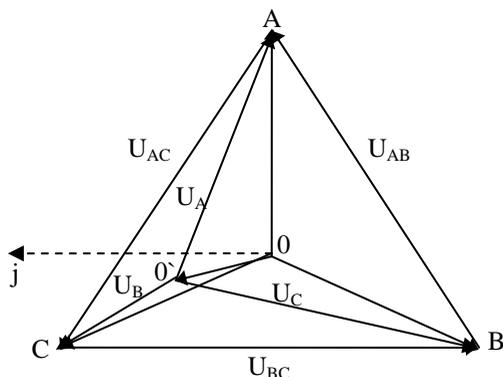


Рис. 1. Векторная диаграмма напряжений

Если в одну из фаз включить конденсатор (или катушку индуктивности) так, чтобы реактивное сопротивление было равно резистивному сопротивлению двух других фаз, характер смещения нулевой точки позволит определить порядок чередования фаз.

Фаза с конденсатором принимается за фазу А, тогда фаза с большим током – В, а с меньшим – С. Рисунок 1 выполнен именно для такого случая смещения. Соотношения для токов определяется 1-м законом Кирхгофа, и сложности не представляют.

Высшие гармоники ЭДС фаз можно определить соотношениями:

$$\begin{aligned}
 E_{AK} &= E_{KM} \cdot \sin(K \cdot \omega \cdot t) \\
 E_{BK} &= E_{KM} \cdot \sin\left(K \cdot \omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot K\right) \\
 E_{CK} &= E_{KM} \cdot \sin\left(K \cdot \omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot K\right)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где K – номер гармоники.

Обычно постоянная составляющая и четные гармонические составляющие в трехфазных ЭДС отсутствуют, поведение же остальных необходимо исследовать.

Контрольные вопросы:

1. Какие из аварийных режимов работы в трехфазной цепи, соединенной звездой, с нулевым проводом и без него приведут к разрушению цепи огромными токами?
2. Влияет ли на степень несимметрии цепи наличие нулевого провода, если влияет, то как?
3. Как меняется порядок чередования фаз высших гармонических составляющих?

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

На рис. 2 приведена компонентная цепь для проведения вычислительного эксперимента в СМ МАРС.

Приборы, изображенные на схеме, позволяют контролировать токи и напряжения на элементах цепи.

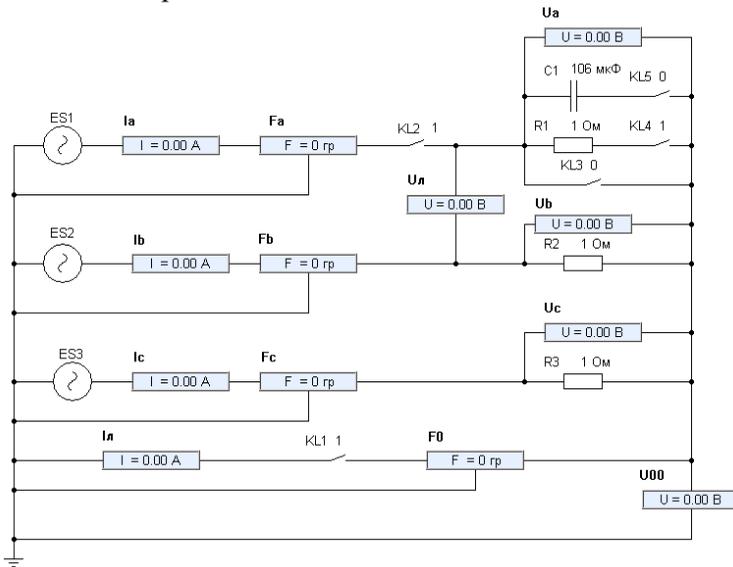


Рис. 2. Компонентная цепь для расчета в СМ МАРС

1. Установить в соответствии с табл. 3 значения ЭДС фаз так, чтобы ЭДС фазы А имела нулевую начальную фазу, ЭДС фазы В – (-120°), а ЭДС фазы С - (+120°). Сопротивления всех трех фаз взять одинаковыми (допускается выбор только резисторов, только катушек индуктивности или только конденсаторов).

У к а з а н и е: В качестве режима анализа рекомендуется выбрать расчет трехфазных цепей в частотной области. Для этого с помощью пункта «Параметры моделирования» в меню «Анализ» необходимо вызвать окно настройки режима анализа. В данном окне в качестве активной необходимо выбрать вкладку «Частотный анализ», в ней - пункт «Трехфазные цепи» (рис. 3).

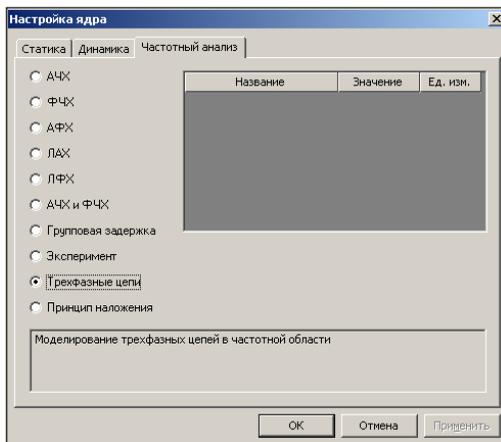


Рис 3. Выбор режима «Частотный анализ, трехфазные цепи»

Расчет провести при двух положениях ключа KL1 (KL2 – замкнут, KL2 – разомкнут). Результаты расчетов токов и напряжений занести в табл. 1.

Таблица 1

I _A	φ _A	I _B	φ _B	I _C	φ _C	I ₀	φ ₀	V ₀	V _A	V _B	V _C	V _л	Примечание
А	°	А	°	А	°	А	°	В	В	В	В	В	
													KL1 - разомкнут KL2 - замкнут
													KL1 - замкнут KL2 - разомкнут

По данным таблицы произвести расчет мощности цепи. Вычислить отношение линейного напряжения нагрузки к фазовому.

2. Установить в фазе А конденсатор, замкнуть ключ KL5 и разомкнуть ключ KL4, оставив в двух других фазах резисторы, и вновь произвести расчет для двух положений ключа KL1. Результаты расчета занести в табл. 2.

Таблица 2

I A	φ A	I B	φ B	I C	φ C	I 0	φ 0	V_0' 0	V A	V B	V C	V л	Примечание
A	°	A	°	A	°	A	°	B	B	B	B	B	
													KL1 - разомкнут KL2 - замкнут
													KL1 - замкнут KL2 - разомкнут

По данным расчетов построить векторную диаграмму токов и напряжений для разомкнутого положения ключа KL1 и проверить порядок чередования фаз и первый закон Кирхгофа для токов. Для разомкнутого положения ключа KL1 построить векторную диаграмму токов.

3. Разомкнув ключ KL2 (обрыв фазы нагрузки), произвести расчет цепи при двух положениях ключа KL1. Результаты занести в табл. 2, сравнить с результатами п. 2 и сделать выводы (объяснить значения величин).

4. При разомкнутом ключе KL1 и замкнутом KL2 замкнуть ключ KL3 (короткое замыкание фазы нагрузки). Произвести расчет цепи и занести результаты в табл. 2. По данным расчетов построить векторную диаграмму напряжений и токов.

Отчет по работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Схему исследуемой цепи;
2. Расчетные соотношения для определения напряжений и токов;
3. Таблицы 1 и 2;

4. Осциллограммы (диаграммы) напряжения п. 5 программы;
5. Ответы на вопросы и выводы по работе.

Варианты задания параметров приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Номер варианта	E_m	ω	R_A	R_B	R_C	C_A	L_A
	В	1/с	Ом	Ом	Ом	мкФ	Гн
1	60	314	30	30	30	106	$9.55 \cdot 10^{-2}$
2	90	628	40	40	40	40	$6.37 \cdot 10^{-2}$
3	127	1256	50	50	50	15.9	$3.98 \cdot 10^{-2}$
4	150	1570	100	100	100	6.37	$6.37 \cdot 10^{-2}$
5	220	3140	200	200	200	1.59	$6.37 \cdot 10^{-2}$

Лабораторная работа № 9. Анализ цепей с периодическими сигналами негармонической формы

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить: [5, с.383-385], [6, с.200-208], [10, с. 113-121].
2. Научиться получать периодические сигналы негармонической формы с помощью сумматора напряжений.
3. Производить расчет гармонических составляющих с помощью преобразования Фурье вручную и на компьютере.
4. Исследовать принцип наложения при расчете схем переменного тока для разных гармоник.

Методические указания

Способы представления синусоидальных функций. Любая периодическая функция с конечным числом разрывов может быть представлена в виде гармонического ряда Фурье:

$$f(\omega_1 t) = A_0 + \sum A_{km} \cdot \sin(k\omega_1 t + \psi_k) \quad (1)$$

или

$$f(\omega_1 t) = A_0 + \sum (B_{km} \cdot \sin(k\omega_1 t) + C_{km} \cdot \cos(k\omega_1 t)), \quad (2)$$

где A_0 - постоянная составляющая;

k - номер гармоники;

A_{km} - амплитуда k -й гармоники;

B_{km} и C_{km} - амплитуды синусных и косинусных составляющих;

$\omega_1 = 2\pi/T$ - угловая частота основной гармоники.

Коэффициенты разложения функции в ряд Фурье определяются по формулам:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega_1 t) dt, \quad (3)$$

$$B_{km} = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega_1 t) \cdot \sin(k\omega_1 t) dt, \quad (4)$$

$$C_{km} = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega_1 t) \cdot \cos(k\omega_1 t) dt. \quad (5)$$

Амплитуда и фаза k -й гармоники выражаются через амплитуду синусной и косинусной составляющих:

$$A_{km} = \sqrt{B_{km}^2 + C_{km}^2}, \quad (6)$$

$$\Psi_k = \arctg(C_{km}/B_{km}). \quad (7)$$

При расчете цепи по комплексным значениям разложение функции использует ряд Фурье в комплексной форме:

$$f(t) = \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{\infty} \dot{A}_{mk} e^{jk\omega_1 t}, \quad (8)$$

где $\dot{A}_{mk} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) e^{jk\omega_1 t} dt = a_k - jb_k = A_{mk} e^{-j\alpha_k}$ - комплексная

амплитуда k -ой гармоники.

Энергетические характеристики несинусоидального тока.

При расчете энергетических характеристик в цепях несинусоидального тока используют следующие величины:

- Действующие значения напряжения \underline{U} и тока I ;
- Среднюю мощность P ;
- Реактивную Q и полную S мощности;
- Коэффициент искажений k_p ;
- Коэффициент мощности k_m .

Действующие значения напряжения и тока определяют как геометрическую сумму действующих значений отдельных гармоник:

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum U_k^2}; \quad (9)$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum I_k^2},$$

где $U_k = U_{mk} / \sqrt{2}$ - действующее значение k -й гармоники напряжения;

$I = I_{mk} / \sqrt{2}$ - действующее значение k -й гармоники тока;

U_0, I_0 - постоянные составляющие напряжения и тока соответственно.

Среднюю мощность несинусоидального тока определяют как сумму мощностей отдельных гармоник:

$$P = P_0 + \sum P_k, \quad (10)$$

где $P_k = U_k I_k \cos \varphi_k$ - средняя мощность k -й гармоники тока;

$P_0 = U_0 I_0$ - мощность постоянного тока.

Полная мощность несинусоидального тока :

$$S = UI \quad (11)$$

Реактивная мощность:

$$Q = \sum Q_k, \quad (12)$$

где $Q_k = U_k I_k \sin \varphi_k$ - реактивная мощность k -й гармоники тока.

Полная мощность S оказывается больше геометрической суммы средней и реактивной мощностей, поэтому разность этих мощностей носит название *мощности искажений*:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \geq 0 \quad (13)$$

Тогда коэффициент искажений k_D :

$$k_D = D / S. \quad (14)$$

Коэффициент мощности в цепи несинусоидального тока определяют по формуле

$$k_M = P / S = \cos \varphi_e \quad (15)$$

где φ_e - угол сдвига фаз эквивалентного синусоидального тока.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность приближенного способа определения коэффициентов ряда Фурье?
2. Какие виды симметрии сигналов известны?
3. При каком виде симметрии в их разложении отсутствуют:
 - постоянная составляющая;
 - четные гармоники;
 - синусоидальные составляющие.
4. Зависят ли коэффициенты B_k и C_k от начала отсчета при представлении ряда Фурье формулой (1).

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

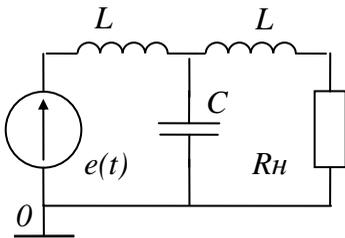


Рис. 1. Принципиальная схема

К электрической цепи, схема которой изображена на рис. 1, приложено периодическое несинусоидальное напряжение, форма которого приведена в табл. 3. Параметры элементов схемы для различных вариантов расчета приведены в табл. 4.

1. Разложить исходный входной сигнал в ряд Фурье с помощью спектроанализатора, используя схему (рис. 2). Сигнал задать с помощью генератора сигнала произвольного вида (П). Для формы 5 взять источник ES. За ос-

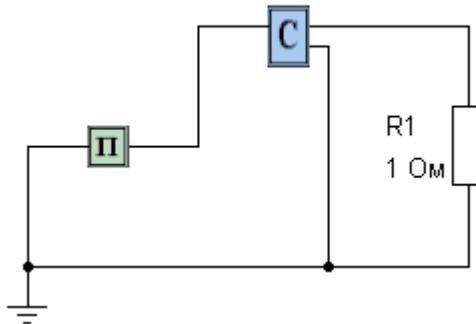


Рис. 2. Компонентная цепь для разложения входного сигнала в ряд Фурье

новную частоту принять частоту генератора. Анализ произвести до 4 значимых гармоник.

По результатам разложения заполнить табл. 1.

Таблица 1

Номер гармоники	Частота ω рад/с	Амплитуда A_i В	Фаза φ_i , Рад

2. Исходный сигнал и сумму синусоид подать на одинаковые цепи (рис. 1). Реакции цепей от воздействий сигнала и его спектрального разложения подать на один график, по которому оценить погрешность аппроксимации.

Схема для проведения данного эксперимента приведена на рис. 3.

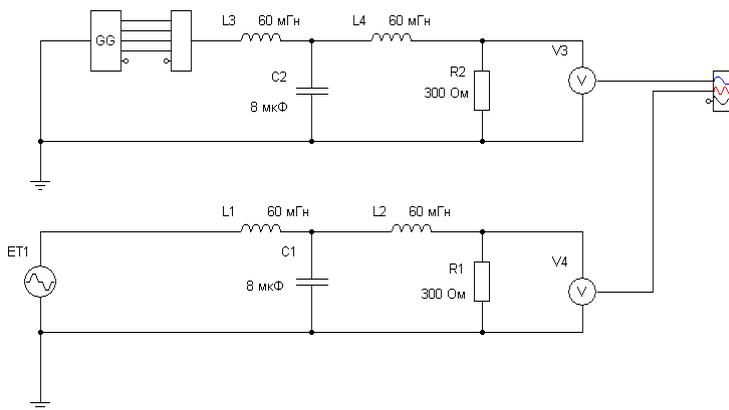


Рис. 3. Схема для сравнения сигналов

У к а з а н и е : Для построения графиков использовать временной анализ с интегрированием по неявному методу Эйлера. Для его настройки необходимо вызвать окно настройки режима анализа с помощью пункта «Параметры моделирования» в меню «Анализ». В появившемся окне сделать активной вкладку «Динамика», на которой выбрать пункт «Неявный метод Эйлера» (рис. 4). В качестве параметров необходимо задать максимальное время анализа порядка 0.2-0.5 с.

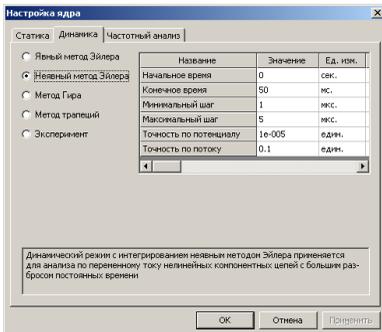


Рис. 4 - Окно настройки режима анализа

Минимальный и максимальный шаг выбрать 10 и 50 мкс соответственно.

3. Используя схему (рис. 5), измерить сопротивление емкости и индуктивности для частоты каждой гармоники.

По результатам анализа заполнить табл. .2.

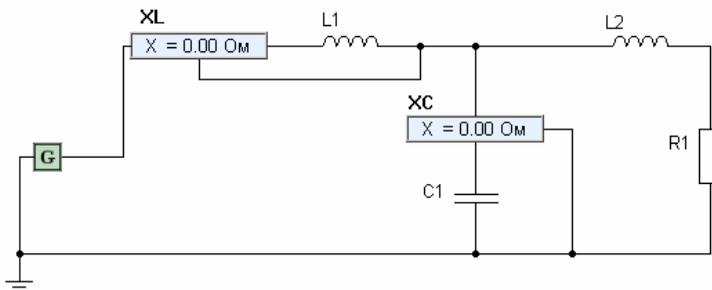


Рис. 5. Схема для анализа сопротивления реактивных элементов

Таблица .2

№	ω	Z_L	Z_C
1			
2			
3			
4			

Отчет по работе

Отчет по работе должен содержать:

- 1) задание на работу и электрическую схему эксперимента;
- 2) таблицу 1 с результатами вычислительного эксперимента;
- 3) графики зависимостей выходного напряжения и исходного сигнала с численной оценкой ошибки аппроксимации в n задан-

ных точках.

4) таблицу 2 со значениями сопротивлений емкости и индуктивности на частотах гармоник исходного сигнала.

Варианты задания параметров приведены в табл. 4, выбираемая форма сигнала – в табл. 3.

Таблица 3

Номер формы сигнала	Форма сигнала
1	
2	
3	
4	

Номер формы сигнала	Форма сигнала
5	

Таблица .4

Вариант	Форма сигнала	ω рад/с	A_m	L мГн	C мкФ	Rн/Rно
1	1	$5_{10}4$	100	60	8	300
2	2	$3_{10}4$	80	40	3	200
3	3	$2_{10}4$	60	10	2	100
4	4	$8_{10}4$	40	20	1	300
5	5	$6_{10}4$	20	40	3	100
6	1	$4_{10}4$	10	50	4	200
7	2	$2_{10}4$	30	40	5	300
8	3	$9_{10}4$	50	60	3	200
9	4	$7_{10}4$	70	50	6	100
10	5	$5_{10}4$	90	60	3	200
11	1	$3_{10}4$	100	30	2	200
12	2	$1_{10}4$	80	20	3	200
13	3	$2_{10}4$	60	40	5	100
14	4	$4_{10}4$	40	60	4	300
15	5	$6_{10}4$	20	50	1	500

Лабораторная работа № 10. Переходные процессы в цепи с одним накопителем энергии

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить: [5, с.326-337], [11, с. 6-45].

2. Изучение переходных процессов в простейших цепях с одним накопителем энергии L - или C - типа, описываемым дифференциальным уравнением первого порядка.

3. Построение переходных кривых с помощью вычислительного эксперимента и аналитических расчетов.

4. Определение основных параметров переходного процесса.

Методические указания

Изменение режима работы цепи с накопителями электрической (C) и магнитной (L) энергии приводит к возникновению переходных процессов. Токи в катушках индуктивности и напряжения на конденсаторах при переходных процессах изменяются плавно и подчиняются законам коммутации.

Математическое описание переходных процессов связано с решением системы дифференциальных уравнений, которое может быть найдено в виде суммы принужденной и свободной составляющих, например, для напряжения $U = U_{np} + U_{св}$ или для тока $i = i_{np} + i_{св}$.

Принужденная составляющая определяется характером источников, действующих в послекоммутационной цепи и соответствует ее установившимся режимам (при $t = \infty$).

Свободная составляющая записывается в виде экспоненциального ряда $i_{св} = A_k \cdot e^{p_k \cdot t}$,

где A_k - постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий, p_k - корни характеристического уравнения.

Рассмотрим переходные процессы в последовательной RC - цепи (рис. 1). Источник $e(t)$ задает два режима:

Режим 1 (P1): $0(t-0)$;
 $e(t) = E_1(t+0)$;

Режим 2 (P2): $E1(t-0)$;
 $e(t) = 0(t+0)$.

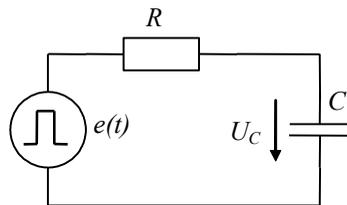


Рис. 1. Принципиальная схема

В момент коммутации напряжение на конденсаторе равнялось напряжению на источнике при $t-0$. Независимое начальное условие по закону коммутации

$$U_C(0+) = U_C(0-) = 0. \quad (1)$$

Режимы P1 и P2 задаются с помощью источника прямоугольных импульсов. Передний фронт задает режим P1, задний фронт – режим P2.

Дифференциальное уравнение целесообразно составить относительно напряжения на конденсаторе. Для момента $t+0$ запишем:

$$UR + UC = EI ,$$

где $U_R = R \cdot i_R$; $i_R = i_C$; $i_C = C \frac{dU_C}{dt}$.

Тогда уравнение относительно U_C принимает вид:

$$RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = EI. \tag{2}$$

Принужденная составляющая U_C :

$$U_{Cnp} = E I . \tag{3}$$

Для записи свободной составляющей запишем характеристическое уравнение $RCp + 1 = 0$. Оно имеет единственный корень $p_1 = -1/(RC)$, где $\tau_C = RC$ - постоянная времени RC-цепи, поэтому свободная составляющая содержит один экспоненциальный член:

$$U_C = U_{Cnp} + U_{Cсв} = E I + A_1 e^{-t/RC} . \tag{4}$$

Постоянную интегрирования A_1 определим, учитывая (1). Полагая в (4) $t=0$, $U_C(0+)=0$, получаем:

$$0 = E I + A_1, \tag{5}$$

откуда $A_1 = -E I$.

Тогда напряжение на конденсаторе после коммутации ($t+0$) определяется выражением:

$$U_C = E I - E I e^{-t/RC} . \tag{6}$$

Ток на емкости определяется путем дифференцирования (6) и умножения его на C :

$$i_C = \frac{E I}{R} e^{-t/RC} . \tag{7}$$

Зависимости напряжения и тока на конденсаторе при различных режимах P1 и P2 приведены на рис. 2.

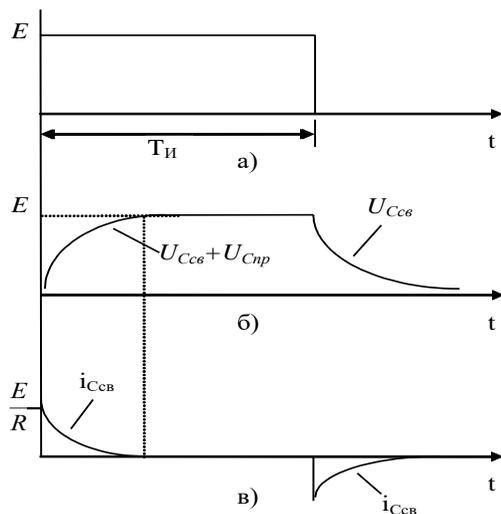


Рис. 2. Зависимости напряжения и тока на конденсаторе

Контрольные вопросы

Подготовка к работе предполагает ответы на следующие вопросы.

1. В чем причина возникновения переходных процессов?
2. Какой закон коммутации действует в RC -цепи?
3. Как определить конечные условия?
4. Как определить постоянные интегрирования?
5. Что такое постоянная времени в цепях RC и RL ?
6. Вывести формулы режима 2 при разряде конденсатора.

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

1. Для исследования процессов зарядки и разрядки конденсатора в графическом редакторе набирается цепь, схема которой приведена на рис. 3. Параметры цепи приведены в табл. 2.

2. Определить временные зависимости напряжения на конденсаторе и тока в цепи в переходном режиме при подаче на вход

импульса (рис. 2а) при зарядке (рис. 2б) и разрядке (рис. 2в) конденсатора.

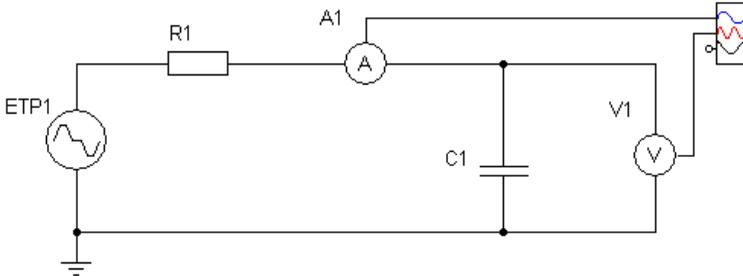


Рис. 3. Компонентная цепь для расчета в CM MAPC

У к а з а н и е: Для данной задачи рекомендуется установить временной режим анализа с интегрированием по явной схеме Эйлера. Для этого необходимо вызвать окно настройки режима анализа с помощью пункта «Параметры моделирования» в меню «Анализ». В нем необходимо активизировать вкладку «Динамика», пункт «Явный (или неявный) метод Эйлера» (рис. 4). За интервал анализа выбрать такой, чтобы в график полностью входили полученные

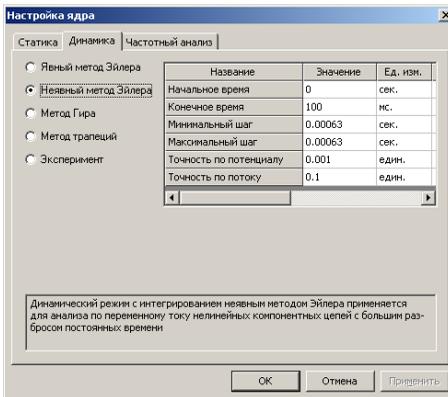


Рис 4. Выбор режима «Динамика, неявный метод Эйлера»

кривые тока и напряжения. Шаг интегрирования выбрать равным

$$Hn = Hx = 0,5 \cdot \tau_c = 0,5 \cdot RC.$$

Время вершины импульса у источника ET выбрать равным $10 \cdot \tau_c$ для гарантированного достижения установленного режима.

3. Определить момент времени, когда напряжение на конденсаторе достигает $0,7 U_{c \text{ уст.}}$

4. Зафиксировать значения тока и напряжения в цепи при

Таблица 1 $t=0, \tau_C, 2 \cdot \tau_C, 3 \cdot \tau_C, 5 \cdot \tau_C$ и данные занести в табл. 1.

U_C / i_C	$t = \tau_C$				
	0	1	2	3	5
U_{C3}					
i_{C3}					
U_{CP}					
i_{CP}					

5. Повторить предыдущий пункт, но для режима разряда конденсатора.

6. Провести аналитический расчет зависимостей $U_C(t)$ и $i_C(t)$ по зависимостям (6) и (7) для $t = 0, \tau_C, 2 \cdot \tau_C, 3 \cdot \tau_C, 5 \cdot \tau_C$.

7. Определить графически постоянную времени, сравнить ее с расчетной.

8. На схеме (рис. 5), на которую подается прямоугольный импульс функциональным генератором **G**, с помощью осциллографа **O** измерить постоянную времени τ_c по снимаемой осциллограмме тока при нескольких значениях емкости конденсатора, которая изменяется с помощью индикатора с прямоугольным бегунком по следующему алгоритму:

- установить необходимое значение емкости C ;
- установить картинку осциллографа в неподвижном режиме с помощью развертки, таким образом, чтобы она содержала 1-2 импульса;
- в вершине импульса установить первую визирную линию;

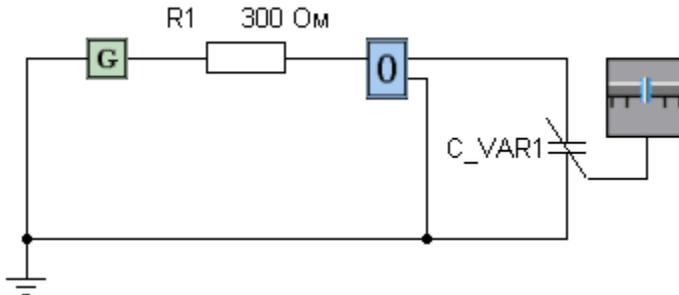


Рис. 5. Схема эксперимента в СИМАРС

- провести касательную к спаду в вершине импульса;
- установить вторую визирную линию в точке пересечения касательной с временной осью. Расстояние между визирными линиями будет соответствовать постоянной времени τ_c .

У к а з а н и е: Данный эксперимент производится во временной области. Для установки данного режима анализа необходимо вызвать окно настройки режима анализа с помощью пункта «Параметры моделирования» в меню «Анализ». В окне необходимо сделать активной вкладку «Динамика», выбрать пункт «Эксперимент» (рис. 6).

По результатам данного эксперимента заполнить табл.2.

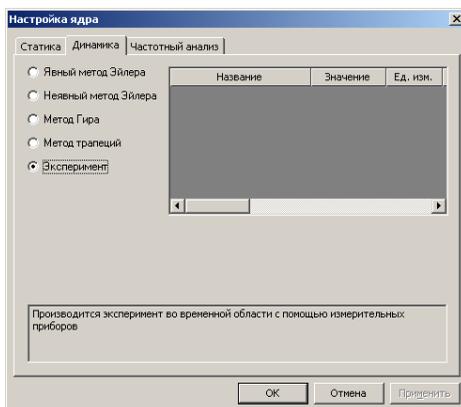


Рис. 6. Выбор режима «Динамика, эксперимент»

Таблица .2

C, Φ	C	$2 \cdot C$	$3 \cdot C$	$4 \cdot C$
$\tau_c, \text{мс.}$				

Отчет по работе

Отчет по работе должен содержать следующее:

- 1) схему вычислительного эксперимента;
- 2) временные зависимости $U_C(t)$ и $i_C(t)$ для двух режимов (P1 и P2) по данным вычислительного эксперимента;
- 3) аналитические выражения $U_C(t)$ и $i_C(t)$ для тех же режимов;
- 4) табл. 1 со значениями $U_C(t)$ и $i_C(t)$ в режиме заряда и разряда емкости.

Варианты задания параметров приведены в табл. 3.

Таблица .3

Номер варианта	<i>R</i>	<i>C</i>	Источник <i>ET</i>
	кОм	мкФ	
1	0.3	4.2	$A=1 В$,
2	0.4	3.1	$T0=0 с$,
3	0.3	3.4	$T1=1E-4 с$,
4	0.5	2.8	$T2=1E-2 с$,
5	0.4	3.8	$T3=1E-4 с$,
6	0.6	2.2	$T4= 1 с$

У к а з а н и е.
A - амплитуда импульсного источника;
T0 - время задержки импульса;
T1 - время нарастания импульса;
T2 - время вершины импульса;
T3 - время спада импульса;
T4 - время паузы импульса.

Лабораторная работа № 11. Исследование переходного процесса в цепи с двумя накопителями энергии

Задание на работу

1. При подготовке к работе изучить: [5, с.337-347] , [11,с. 6-45].
2. Изучить классический метод анализа переходных процессов.
3. Организовать и провести вычислительный эксперимент с целью исследования переходного процесса в *RLC*- цепи при включении её на постоянное напряжение.
4. Определить по результатам эксперимента параметры переходного процесса.

Методические указания

Последовательная RLC -цепь (рис.1) содержит два независимо включенных реактивных элемента (L и C), поэтому процессы в ней описываются дифференциальным уравнением второго порядка. По второму закону Кирхгофа:

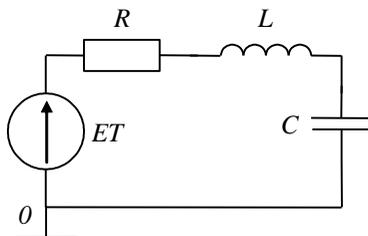


Рис. 1. Принципиальная схема

$$U = E = U_R + U_L + U_C, \quad (1)$$

где $U_R = iR$, $U_L = L \frac{di}{dt}$, $U_C = \frac{1}{C} \int idt$.

Выражение (1) путем дифференцирования приводится к виду:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0. \quad (2)$$

Если ЭДС идеального источника напряжения изменяется во времени по закону:

$$e(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ E = const & \text{при } t \geq 0, \end{cases}$$

то независимые начальные условия имеют нулевые значения:

$$U_C(0+) = U_C(0-) = 0; \quad i_L(0+) = i_L(0-) = i(0) = 0.$$

В связи с тем, что установившееся значение тока после коммутации равно нулю, ток при $t > 0$ содержит только свободную составляющую.

Характеристическое уравнение для RLC -цепи:

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0 \quad (3)$$

имеет два корня:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(-\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (4)$$

Возможны три случая:

1) корни вещественные и различные ($p_1, p_2 < 0$), процесс аperiodический:

$$i(t) = i_{CB}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} = \frac{E}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}); \quad (5)$$

2) корни комплексные сопряженные $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_{CB}$ (подкоренное выражение отрицательно), процесс колебательный:

$$i(t) = A e^{-\delta t} \cos(\omega_{CB} t + a), \quad (6)$$

где $\omega_{CB} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}$, $\delta = \frac{R}{2L}$, a — начальная фаза затухающего колебательного процесса;

3) корни вещественные и равные $p_1 = p_2 = -\delta = -\frac{R}{2L}$ (подкоренное выражение равно нулю), процесс критический или граничный:

$$i(t) = (A_1 + A_2 t) e^{-\delta t} = \frac{E}{L} t e^{-\delta t}. \quad (7)$$

Вычисление постоянных интегрирования

Дифференцируя (5) слева и справа, получим:

$$\frac{di}{dt} = p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}.$$

Используя зависимые начальные условия, так как

$$U_L = L \frac{di}{dt} = E,$$

$$i(0+) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{di}{dt}(0+) = \frac{E}{L},$$

запишем:

$$A_1 + A_2 = 0; \quad p_1 A_1 + p_2 A_2 = \frac{E}{L}.$$

Откуда и определяются коэффициенты A_1 и A_2 .

Оценка характеристик переходного процесса

Если корни различные ($p_1, p_2 < 0$), то

постоянная переходного процесса равна: $\tau_0 = \frac{1}{|p_{\min}|}$

и время переходного процесса равно: $t_n = 5\tau_0$.

Для оценки быстроты протекания колебательного процесса используется декремент колебания, равный отношению:

$$D = \frac{i(t)}{i(t + T_{CB})} = e^{\delta T_{CB}},$$

и логарифмический декремент колебания:

$$\theta = \ln D = \delta T_{CB} = \frac{T_{CB}}{\tau_{CB}}.$$

Время переходного процесса при этом $t_n = \frac{5}{\delta}$.

Варианты переходного процесса в зависимости от вида корней имеют аperiодический или колебательный вид с затуханием.

Контрольные вопросы

1. Как составляется характеристическое уравнение?
2. Какие возможны переходные режимы в RLC -цепи в зависимости от вида корней характеристического уравнения.
3. Определить $i(0)$, $U_C(0)$, $U_L(0)$ для схемы рис. 1.
4. Как определить постоянные интегрирования в выражениях для свободных составляющих. Определить их в формулах (5), (6), (7) с учетом начальных условий.

Программа вычислительного эксперимента и аналитических расчетов

Для исследования различных режимов переходных процессов в СМ МАРС строится компонентная цепь, приведенная на рис. 2. Исходные значения параметров цепи приведены в табл. 3.

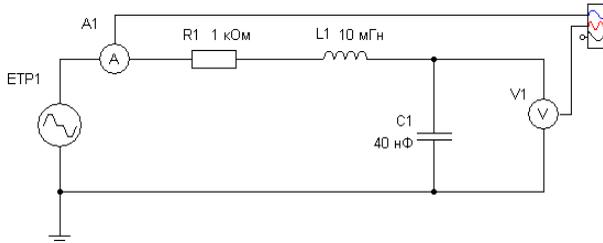


Рис. 2. Схема эксперимента в СМ МАРС

1. Установить значения R, L для заданного варианта из табл.3. Подобрать значения емкости конденсатора C для режима:

- а) апериодического;
- б) колебательного;
- в) критического.

По результатам анализа заполнить табл.1.

2. Провести расчет тока в цепи и напряжения на емкости для каждого из режимов. Данные занести в табл. 2.

Указание. При расчете целесообразно использовать временной режим анализа с интегрированием по явной схеме Эйлера. Для установки данного режима необходимо воспользоваться окном настройки режима анализа, которое вызывается с помощью пункта «Параметры моделирования» в меню «Анализ».

В появившемся окне (рис. 3) необходимо активизировать вкладку «Динамика», на которой выбрать пункт «Явный метод Эйлера». Шаги интегрирования выбрать $Hn = 0.1 \cdot \tau_{CB}$. $Hx = 0,5 \cdot \tau_{CB}$, точность $Eps = E \cdot I_{10-3}$, где E - амплитуда источника напряжения. Максимальное время анализа положить

Таблица .1

Режим	Значение емкости, Ф
Апериодический	
Колебательный	
Критический	

Таблица 2

t	I_L	U_C
0.1 τ_{CB}		
0.3 τ_{CB}		
1.0 τ_{CB}		
2.0 τ_{CB}		
5.0 τ_{CB}		
10.0 τ_{CB}		

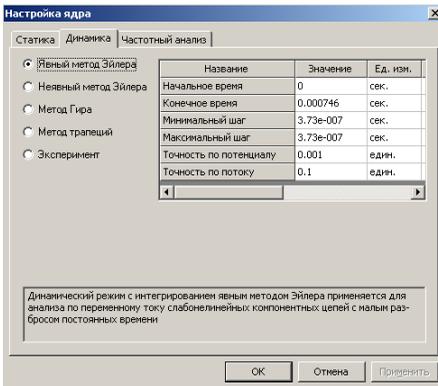


Рис 4. Выбор режима «Динамика, явный метод Эйлера»

$$Tx = 10 \cdot \tau_{CB}$$

3. На основе построенных графиков определить декремент колебаний и логарифмический декремент колебаний, τ_{CB} и T_{CB} , а также время затухания, при котором амплитуда колебаний по сравнению с максимальной уменьшается в 0,1 раз (T_3). Данные занести в табл. 2.

4. Провести аналитические расчеты значений δ , T_{CB} , τ_{CB} , D и θ и также занести в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные данные в СМ МАРС					Аналитический расчет				
T_{CB}	τ_{CB}	D	θ	T_3	δ	T_{CB}	τ_{CB}	θ	D

Отчет по работе

Отчет по работе должен содержать:

- 1) схему исследуемой цепи;
- 2) расчет корней характеристического уравнения для апериодического, колебательного и критического режимов;
- 3) таблицу результатов расчета $i(t)$ и $U_C(t)$ для апериодического процесса (табл. 1);

4) график колебательного процесса для $i(t)$;

5) расчет параметров переходного процесса для колебательного режима (табл. 2).

Варианты задания параметров приведены в табл. 3.

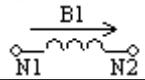
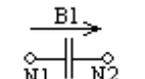
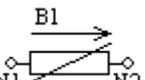
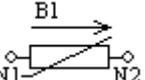
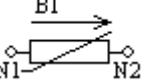
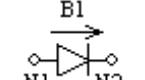
Таблица 3

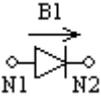
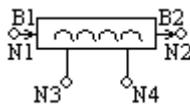
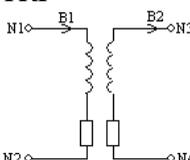
Номер варианта	R	L	C
	Ом	Гн	Ф
1	1000.	10E-3	10E-9
2	2000.	80E-3	20E-9
3	2000.	120E-3	30E-9
4	5000.	100E-3	40E-9
5	3000.	270E-3	30E-9

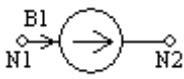
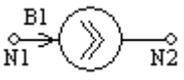
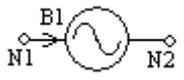
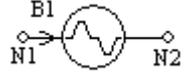
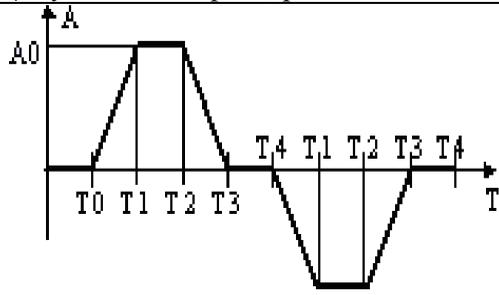
Литература

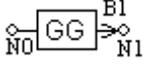
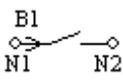
1. Дмитриев В.М., Зайченко Т.Н., Гарганеев А.Г., Шурьпин Ю.А. Автоматизация функционального проектирования электромеханических устройств и систем преобразовательной техники. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. 292 с.
2. Дмитриев В.М., Дмитриев И.В., Шутенков А.В. Автоматизированный учебно-лабораторный комплекс. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 150 с.
3. Купцов А.М. Линейные электрические цепи. Основы теории для самостоятельного изучения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. 222 с.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1994. 559 с.
5. Нейман А.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Ленинград: Энергоиздат, 1981. 533 с.
6. Основы теории цепей / Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
7. Атабеков Г.И., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Нелинейные цепи. М.: Энергия, 1970. 232 с.
8. Компьютерный лабораторный практикум по курсу «Теоретические основы электротехники» / Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Кобрина Н.В., Зайченко Т.Н., Вахитова Х.З. Томск: Томс. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 1997. 110 с.
9. Довгун В.П. Анализ электронных цепей: Учебное пособие. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. 251 с.
10. Дмитриев В.М., Кобрина Н.В., Фикс Н.П., Хатников В.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1: Установившиеся режимы в линейных электрических цепях: Учебное пособие.— Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000.— 220 с.
11. Дмитриев В.М., Вершинин И.М., Гусев Ю.В., Кобрина Н.В., Овчаренко Е.В., Фикс Н.П., Хатников В.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 2: Переходные и статические режимы в линейных и нелинейных цепях. Электромагнитное поле: Учебное пособие.— Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2001.— 200 с.

Кратная справка по компонентам, используемым в виртуальной лаборатории по ТОЭ

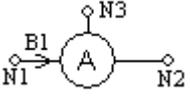
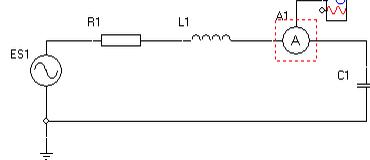
Компонент	Математическая модель и параметры
Пассивные двухполюсники	
Резистор R 	$V_{N1} - V_{N2} - R \cdot V_{B1} = 0,$ $R - \text{сопротивление}$
Индуктивность L 	$\frac{dV_{B1}}{dt} = \frac{V_{N1}}{dt} - \frac{V_{N2}}{dt}, L - \text{индуктивность}$
Емкость C 	$\frac{d(V_{N1} - V_{N2})}{dt} = \frac{V_{B1}}{C}, C - \text{емкость}$
Нелинейный резистор RCV 	$V_{N1} - V_{N2} = A \cdot V_{B1}^2 + B \cdot V_{B1} + C,$ $A, B, C - \text{коэффициенты полинома}$
Нелинейный резистор RCUB 	$V_{N1} - V_{N2} = A \cdot V_{B1}^2,$ $A - \text{коэффициент полинома}$
Нелинейный резистор REXP 	$V_{N1} - V_{N2} = A + B \cdot e^{C \cdot V_{B1}},$ $A, B, C - \text{коэффициенты математической модели}$
Диод (ключевая модель) DK 	$V_{N1} - V_{N2} - R \cdot V_{B1} = 0$ $R = \begin{cases} 10^9 & \text{при } V_{N1} - V_{N2} < 0 \\ 0.1 & \text{при } V_{N1} - V_{N2} \geq 0 \end{cases}$

<p>Диод D</p> 	<p>где R – сопротивление</p> $V_{B1} = \begin{cases} V_{Ry} + \frac{V_{N1} - V_{N2} + V_Z}{R_Z} & \text{при } V_{N1} - V_{N2} \leq -V_Z \\ V_{Ry} + IS \cdot \left(e^{\frac{V_{N1} - V_{N2}}{VT}} - 1 \right) & \text{при } -V_Z < V_{N1} - V_{N2} < V_C \\ V_{Ry} + IC + \frac{V_{N1} - V_{N2} - V_C}{R_f} & \text{при } V_{N1} - V_{N2} \geq V_C \end{cases}$ $V_{Ry} = \frac{V_{N1} - V_{N2}}{R_y}$ <p>где: R_f – минимальное последовательное сопротивление, Ом; R_y – сопротивление утечки; R_Z – дифференциальное сопротивление на участке пробоя; V_Z – напряжение стабилизации, В; VT – температурный потенциал перехода; IS – ток насыщения, А.</p> $V_C = VT \cdot \ln \left(\frac{VT}{R_f \cdot IS} \right) \quad IC = IS \cdot \left(e^{\frac{V_C}{VT}} - 1 \right)$
Пассивные четырехполюсники	
<p>Взаимоиндуктивность LM</p> 	$LK \cdot \frac{dV_{N1}}{dt} \pm VM \cdot \frac{dV_{N3}}{dt} + V_{N1} - V_{N2} - RK \cdot V_{B1} = 0$ $V_{N4} - V_{B1} = 0$ <p>где LK – индуктивность катушки, Гн; RK – омическое сопротивление, Ом; VM – взаимная индукция.</p>
<p>Трансформатор однофазный TRI</p> 	$\frac{d(L_1 \cdot V_{B1} + M \cdot V_{B2})}{dt} = V_{N1} - V_{N2}$ $\frac{d(L_2 \cdot V_{B2} + M \cdot V_{B1})}{dt} = V_{N3} - V_{N4}$ <p>L_1 – индуктивность первичной обмотки; L_2 – индуктивность вторичной обмотки;</p>

M – взаимоиנדуктивностъ.	
Источники	
<p>Источник постоянного напряжения E</p> 	$V_{N2} - V_{N1} = E$ <p>E – амплитуда, В.</p>
<p>Источник постоянного тока I</p> 	$V_{B1} = I$ <p>I – амплитуда, А</p>
<p>Источник синусоидального напряжения ES</p> 	<p>Во временной области</p> $V_{N1} - V_{N2} = \begin{cases} 0 & \text{при } t < T_0 \\ A \sin(\omega(t - T_0) + \varphi) & \text{при } t \geq T_0 \end{cases}$ <p>в частотной области</p> $V_{N1}^r - V_{N1}^r = A \cdot \cos(\varphi)$ $V_{N1}^j - V_{N1}^j = A \cdot \sin(\varphi)$ <p>A – амплитуда, В (А). ω – частота, рад/с. T_0 – время задержки синусоиды φ – угол сдвига фазы, рад.</p>
<p>Источник трапецидального напряжения ET</p> 	 <p>A – амплитуда сигнала; T_0 – интервал ожидания; T_1 – интервал нарастания; T_2 – интервал вершины; T_3 – интервал спада;</p>

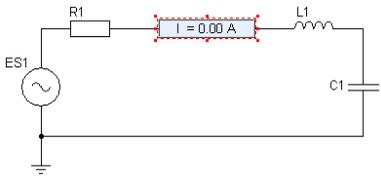
	T_4 – интервал паузы;
Генератор гармоник GG 	$V_{Ni} - V_0 = A_i \cdot \sin(\omega \cdot (t - T_{0i}) + \varphi_i)$ A_i - амплитуда i -го сигнала; ω - частота i -го сигнала; T_{0i} - время задержки i -ой синусоиды; φ_i - угол сдвига фазы i -й гармоники;
Ключи и реле	
Ключ KL 	$V_{N1} - V_{N2} - R(P) \cdot V_{B1} = 0$ $R(P) = \begin{cases} 10(МОм) & \text{при } P = 0 \\ 0.1(Ом) & \text{при } P = 1 \end{cases}$ Состояние ключа: $P=0$ – ключ разомкнут $P=1$ – ключ замкнут

Измерительные компоненты

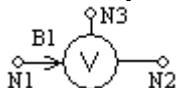
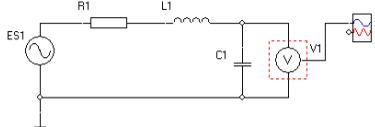
Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
Амперметр А 	$V_{N3} = V_{B1}$	

Амперметр предназначен для измерения текущего значения тока в ветви В1 и передачи его на средства визуализации результатов с помощью информационного узла N3. Прибор работает как во временной, так и в частотной области, а также в статическом режиме. Он может использоваться при расчетах и при проведении эксперимента.

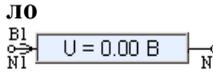
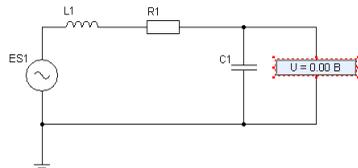
В статическом режиме на узел N3 передается рассчитанное значение тока в ветви В1. Во временной области узел N3 принимает значение тока ветви В1 при каждом значении времени. В частотной области производится расчет амплитуды тока, значение которой передается на информационный узел N3.

Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
Амперметр с цифровым табло 	$A = V_{B1}$	

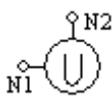
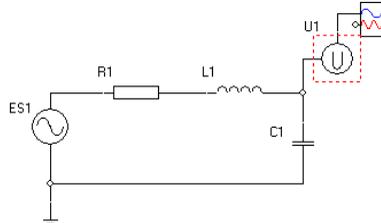
Предназначен для измерения тока в ветви B1 и визуализации его в цифровом виде непосредственно на схеме эксперимента. Прибор применяется как при проведении расчетов во временной области, так и во время проведения экспериментов во временной и частотной областях. При работе в статическом режиме прибор визуализирует значение тока в ветви B1. Во временной области производится визуализация действующего значения тока в данной ветви. В частотной области производится расчет амплитуды тока в ветви B1 на выбранной частоте.

Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
Вольтметр V 	$V_{N3} = V_{N1} - V_{N2}$	

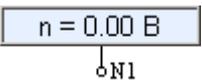
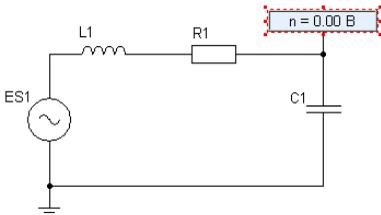
Предназначен для измерения напряжения между узлами N1 и N2 и передачи этого значения на узел N3. Данный компонент может работать как в статическом, так и в динамическом режиме, а также при проведении экспериментов. В статическом режиме данный компонент передает на информационный узел N3 значение напряжения между узлами N1 и N2. В динамическом режиме во временной области на информационный узел передается значение напряжения между узлами N1 и N2 при каждом значении времени, в частотной области при каждом значении частоты на информационный узел передается значение амплитуды напряжения между соответствующими узлами при текущей частоте.

Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
Вольтметр с цифровым табло 	$U = V_{N1} - V_{N2}$	

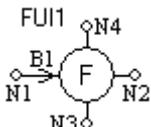
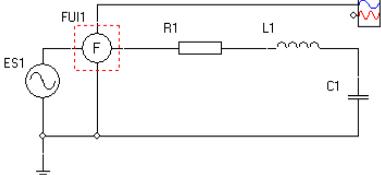
Предназначен для измерения напряжения между узлами N1 и N2 и визуализации полученного значения в цифровом виде. Данный компонент применяется при расчетах в статическом и динамическом режиме, а также при проведении экспериментов во временной и частотной области. При статическом режиме он измеряет текущее значение напряжения между узлами, в динамическом режиме во временной области производится измерение действующего напряжения между узлами, в частотной области – измерения амплитуды напряжения на выбранной частоте.

Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
Потенциометр U 	$V_{N2} = V_{N1}$	

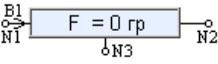
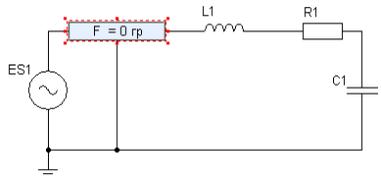
Предназначен для измерения потенциала в некотором узле компонентной цепи и передачи его на средства визуализации (график, таблица и т.п.). Компонент может работать как в статическом, так и в динамическом (временном и частотном) режиме. В статическом режиме на информационный узел N2 передается рассчитанное значение узла N1. В динамическом временном режиме на информационный узел передается текущее значение узла N1, а в частотном анализе рассчитывается амплитуда сигнала в узле N1 на текущей частоте.

Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
Потенциометр с цифровым табло 	$n = V_{N1}$	

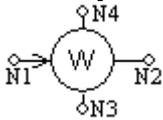
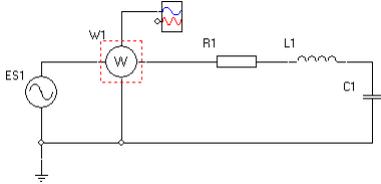
Предназначен для измерения потенциала в узле N1 и визуализации измеряемой величины в цифровом виде. Данный компонент применяется при статическом расчете схемы, а также при проведении эксперимента в частотной области. В статическом режиме компонент измеряет значение потенциала в узле N1, в частотной области компонент измеряет амплитуду потенциала.

Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
Фазометр FUI1 		

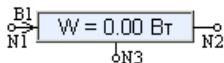
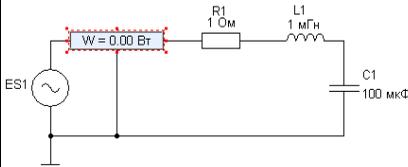
Измеряет разность фаз между напряжением на узлах N1-N3 и токов в ветви B1. Прибор работает только в частотной области, как в расчете, так и при проведении эксперимента. Значение разности фаз на каждом шаге решения поступает на информационный вход N4, к которому может быть подключен график.

Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
Фазометр с цифровым табло 		

Измеряет разность фаз между напряжением на узлах N1-N3 и током в ветви B1 и визуализирует ее в цифровом виде. Результат выдается в градусах. Компонент может работать только в частотной области при проведении экспериментов или расчета на одной частоте.

Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
<p>Ваттметр W</p> 	$V_{N4} = (V_{N1} - V_{N2}) \cdot V_{B1}$	

Компонент измеряет мощность как произведение напряжения между узлами N1 и N2 на ток в ветви B1. Он может работать как в статическом, так и в динамическом режиме. В статическом режиме компонент выдает полученное значение мощности на информационный узел N4. В динамическом временном режиме при каждом значении времени производится расчет значения мощности, которое выдается на информационный узел. При анализе в частотной области данный компонент рассчитывает мощность как произведение амплитуд тока и напряжения при заданной частоте.

Компонент	Мат. модель	Схема включения в цепь
<p>Ваттметр с цифровым табло</p> 	$W = (V_{N1} - V_{N3}) \cdot V_{B1}$	

Измеряет мощность как произведение тока в ветви B1 на напряжение между узлами N1 и N3. Работает в частотном режиме, в котором может измерять полную, активную и реактивную мощности, что задается в качестве параметра данного компонента.

Генераторы сигналов различных форм

1. Функциональный генератор

Функциональным генератором (рис. П1) задаются сигналы трех различных форм:

- синусоида;
- трапеция;
- треугольник.

Управление параметрами функционального генератора осуществляется следующими органами управления:

Вид сигнала Синусоида

- выбор формы сигнала, по умолчанию устанавливается синусоида;

Амплитуда 10 В

- установка амплитуды выходного сигнала. С помощью комбиниро-

ванного списка устанавливается единица измерения амплитуды, которая может быть задана в микровольтах (мкВ), милливольтах (мВ), вольтах (В), киловольтах (кВ), мегавольтах (МВ);

Частота 10 Гц

- устанавливается частота сигнала, которая может быть задана в герцах (Гц), килогерцах (кГц) или мегагерцах (МГц). Единица измерения частоты задается с помощью комбинированного списка;

Заполнение 10

- устанавливается коэффициент заполнения (в %) для прямоугольного сигнала - это отноше-

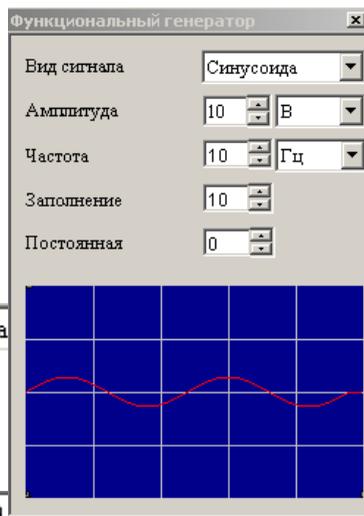


Рис. П1. Лицевая панель функционального генератора

ние длительности импульса к периоду повторения - величина, обратная скважности; для треугольных сигналов - соотношение между длительностями переднего и заднего фронтов;

Постоянная - установка смещения (постоянной составляющей) выходного сигнала.

2. Генератор сигналов произвольного вида

Прибор предназначен для формирования импульса, основанного на ломаной линии, состоящей из пяти точек. Для каждой из точек задается значение сигнала в данной точке и значение времени, в котором должно быть данное значение на выходе генератора. Полученная кривая повторяется периодически. Панель управления параметрами генератора представлена на рис. П2.

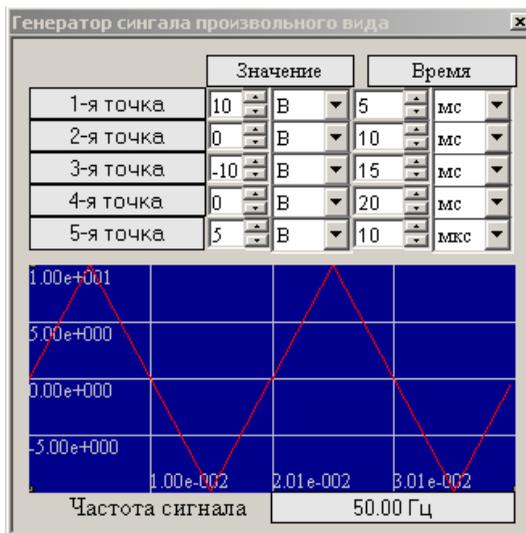
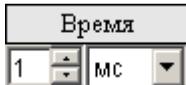


Рис. П2. Лицевая панель генератора сигналов произвольного вида

Для каждой из пяти точек периода сигнала задаются следующие параметры:



- задается значение сигнала в точке. Оно может быть задано в микровольтах (мкВ), милливольтках (мВ), вольтах (В), киловольтах (кВ) и мегавольтах (МВ);



- задается значение времени, в которое наступает заданное значение напряжения. Время может быть задано в микросекундах (мкс), миллисекундах (мс) или в секундах (с).

Измерительные приборы

1. Мультиметр

Мультиметр (рис. ПЗ, П4) позволяет измерять следующий ряд величин:

- напряжение;
- ток;
- сопротивление;
- мощность;
- разность фаз между током и напряжением.

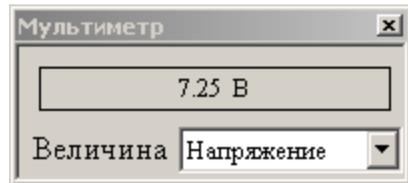
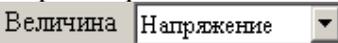


Рис. ПЗ. Панель мультиметра

Выбор измеряемой величины производится органом управления



Мультиметр имеет три вывода и включается в цепь последовательно токовыми выводами 1-2, и параллельно потенциальными выводами 1-3 (рис. П4). Следовательно, между выводами 1-2 мультиметр имеет сопротивление $R_m = 0$, а между выводами 1-3 - сопротивление равно бесконечности.

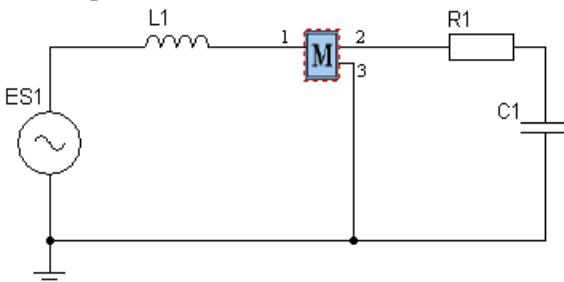


Рис. П4. Схема включения мультиметра

Мультиметр может работать в трех режимах.

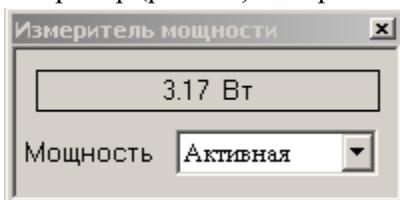
1. В статическом режиме мультиметр измеряет постоянное значение тока или напряжения, по этим данным рассчитывается выбранная переменная.

2. В динамическом временном режиме мультиметр измеряет действующие значения тока и напряжения, по которым определяется необходимая переменная

3. В частотном режиме для анализируемой частоты находятся амплитуды тока и напряжения, по которым производится расчет величины

2. Универсальный измеритель мощности

Прибор (рис. П5) измеряет следующие виды мощностей:



- полная;
- активная;
- реактивная;

Вид мощности, которую изменяет прибор в данный момент выбирается органом управления

Рис. П5. Лицевая панель универсального измерителя мощности



Универсальный измеритель мощности имеет три вывода, включается в схему последовательно токовой парой выводов 1-2 и параллельно – потенциальной парой выводов 1-3 (рис. П6).

Прибор может работать только в частотном режиме, как при статическом расчете на частоте источника синусоидального сигнала, так и при проведении эксперимента в частотной области на частоте функционального генератора.

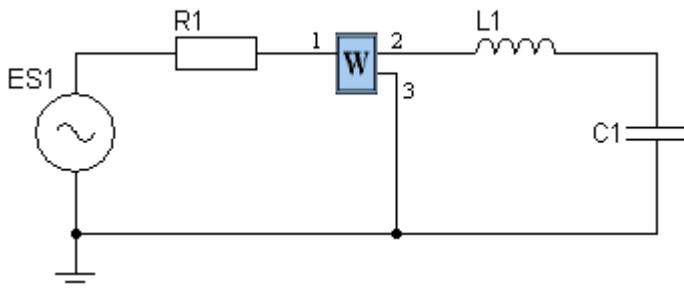


Рис. П6. Схема подключения универсального измерителя мощности

3. Одноканальный осциллограф

Одноканальный осциллограф (рис. П7) позволяет визуализировать форму напряжения или тока в определенном участке цепи.

Осциллограф работает только во временном динамическом режиме и позволяет визуализировать как напряжение, так и ток на определенном участке цепи. Для переключения режимов визуализации переменных между напряжением и током используется

орган управления . Прибор включается в цепь согласно рис. П8.

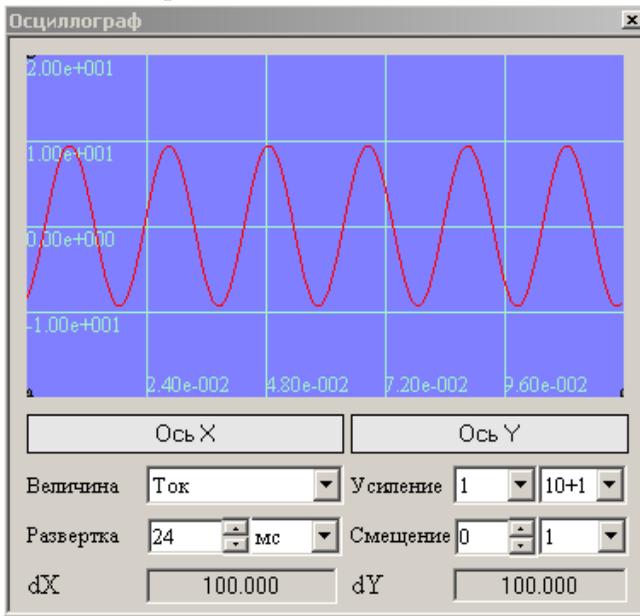


Рис. П7. Лицевая панель одноканального осциллографа

Длительность развертки, соответствующая размеру одного квадрата на экране осциллографа по оси абсцисс, задается с помощью органов управления и может варьироваться от 1 мкс, до 1000 с.

Усиление сигнала соответствует размеру одной клетки на экране осциллографа по оси ординат и задается с помощью органов управления , содержащих два ком-

бинированных списка. С помощью первого списка задается мантисса усиления, которая может быть равна 1, 2 или 5. С помощью второго списка задается порядок усиления сигнала. Диапазон изменения порядка лежит от 10^{-6} до 10^{+6} .

Смещение сигнала относительно 0 производится с помощью органов управления

Смещение	0	▲	▼	1	▼
----------	---	---	---	---	---

. Цифровое табло со спином задает мантиссу смещения сигнала, которая может изменяться от -10 до 10 с шагом 1. Комбинированный список задает порядок смещения, диапазон изменения которого лежит в пределах от 10^{-6} до 10^6 .

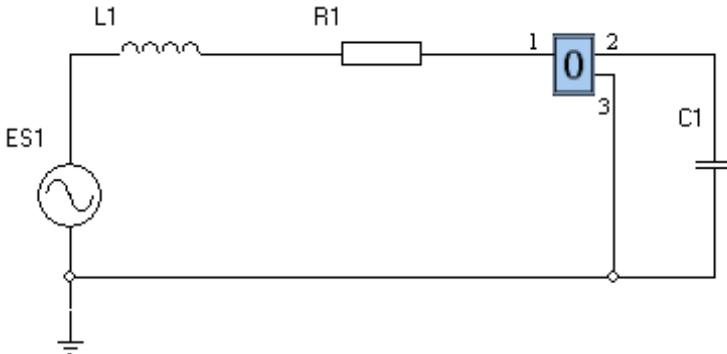


Рис. П8. Схема включения одноканального осциллографа в цепь

Экран осциллографа содержит визирные линии для сканирования графика, изображенного в окне осциллографа. Результат сканирования выдается в виде разности между двумя визирными линиями одной оси. В окне

dX	0.023
----	-------

 выдается разность между соответствующими визирными линиями по оси абсцисс. В окне

dY	9.400
----	-------

 – по оси ординат.

4. Двухканальный осциллограф

Двухканальный осциллограф (рис. П9, П10) предназначен для визуализации двух сигналов, снятых как непосредственно с узлов компонентной цепи, так и с измерительных приборов.

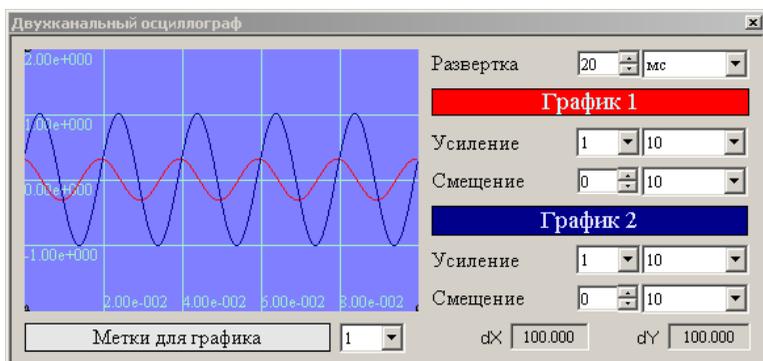


Рис. П9. Лицевая панель двухканального осциллографа

Осциллограф позволяет просматривать оба графика в одном временном масштабе. Для этого задается развертка, как цена деления одного квадрата по оси абсцисс, с помощью органов управления **Развертка** . С помощью цифрового табло со спином численно задается значение времени развертки, а с помощью комбинированного списка задается единица измерения развертки, которая может быть выражена в секундах (с), миллисекундах (мс) или микросекундах (мкс).

Для каждого из сигналов задается его усиление и смещение. *Усиление сигнала* задается с помощью органов управления **Усиление** . С помощью первого комбинированного списка задается мантисса усиления, которая может принимать значения 1, 2, или 5. С помощью второго – задается порядок усиления сигнала (варьируется в пределах от 10^{-6} до 10^6).

Смещение сигнала относительно нуля задается с помощью органов управления **Смещение** . С помощью цифрового табло со спином задается мантисса смещения сигнала, которая может варьироваться от -10 до 10, а с помощью комбинированного списка задается порядок усиления смещения, который меняется от 10^{-6} до 10^6 .

Для выбора сигнала, по которому устанавливаются метки по оси ординат, необходимо воспользоваться органом управления

Для выбора сигнала, по которому устанавливаются метки по оси ординат, необходимо воспользоваться органом управления

График для меток 1. График с номером 1 отображается в окне осциллографа красным цветом. Второй график отображается синим цветом.

Для выбранного сигнала можно получить расстояние между двумя визирными линиями как по оси абсцисс, так и по оси ординат. Визирные линии на экране осциллографа изображаются в виде меток внизу и слева от изображения графика. Разность между визирными линиями по оси абсцисс выводится в поле вывода dX 0.027, по оси ординат разность между визирными линиями выдается в поле вывода dY 0.720.

Двухканальный осциллограф применяется при проведении эксперимента во временной области.

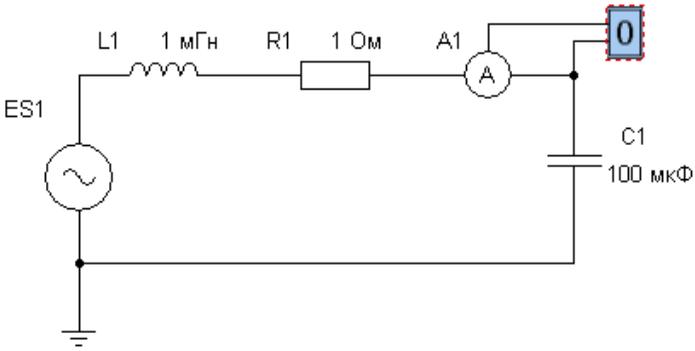


Рис. П10. Схема включения двухканального осциллографа

5. Построитель частотных характеристик

Построитель частотных характеристик (рис. П11, П12) предназначен для анализа компонентной цепи в частотном режиме путем построения амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик как для напряжения, так и для тока.

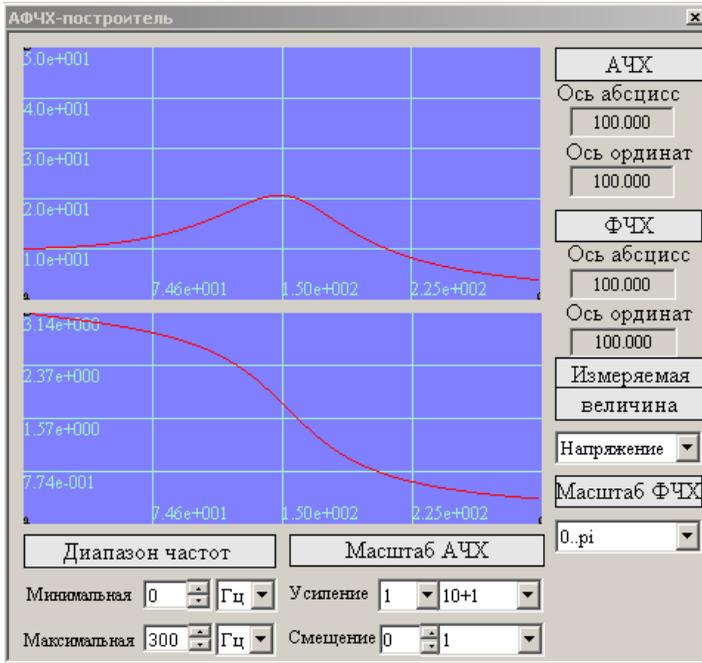
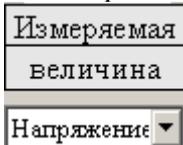


Рис. П11. Лицевая панель построителя частотных характеристик

Частотные характеристики могут быть построены как для напряжения, так и для тока, в заданной точке схемы. Выбор между током и напряжением производится с помощью органа управления

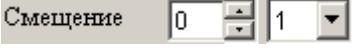


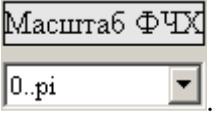
Для этого построитель частотных характеристик имеет три узла.

Диапазон частот, в котором производится построение частотных характеристик, задается с помощью минимальной и мак-

симальной частот этого диапазона. Минимальная и максимальная частоты задаются соответственно с помощью органов управления . С помощью цифрового табло со спином задается численное значение частоты, которое может варьироваться от 1 до 1000. С помощью комбинированного списка задается единица измерения частоты, которая может соответствовать герцам (Гц), килогерцам (кГц) или Мегагерцам (МГц).

Управление амплитудно-частотной характеристикой производится с помощью усиления сигнала и его смещения относительно начала координат. Усиление сигнала указывает размер одной ячейки по оси ординат и задается с помощью органов управления . С помощью первого комбинированного списка задается мантисса усиления сигнала, которая может соответствовать 1, 2 или 5. С помощью второго – порядок усиления сигнала, который изменяется от 10^{-6} до 10^6 .

С помощью органов управления  задается смещение сигнала относительно оси ординат. С помощью цифрового табло со спином задается мантисса смещения, которая может изменяться от -10 до 10. С помощью комбинированного списка задается порядок смещения сигнала, который может варьироваться от 10^{-6} до 10^6 .

Управление масштабом фазочастотной характеристики производится с помощью органа управления . Он предоставляет возможность построить ФЧХ в двух масштабах

- $[-\pi; \pi]$
- $\left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right]$

Исследование графиков АЧХ и ФЧХ можно проводить с помощью визирных линий. Результаты исследования АЧХ и

ФЧХ выводятся соответственно с помощью органов управления

АЧХ	ФЧХ
Ось абсцисс 100.000	Ось абсцисс 100.000
Ось ординат 100.000	Ось ординат 100.000

и

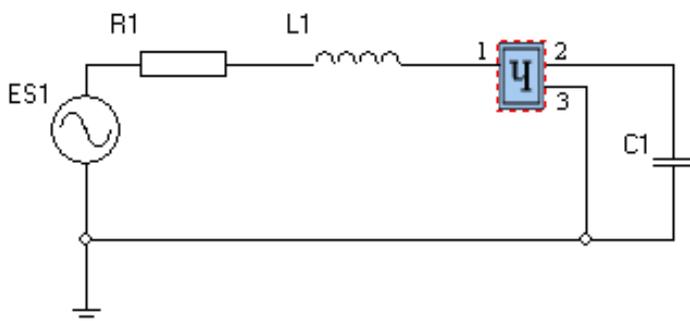


Рис. П12. Схема включения построителя частотных характеристик

Учебное издание

Дмитриев Вячеслав Михайлович
Шутенков Александр Васильевич
Гусев Юрий Васильевич
Ганджа Тарас Викторович
Кураколов Алексей Николаевич

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
Часть 1. Установившиеся режимы в линейных электрических цепях

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники
Высший колледж информатики, электроники и менеджмента

634050, г Томск, пр. Ленина, 40,