

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

---

**Кафедра вычислительных машин, комплексов, систем и сетей.  
Б.Л. Резников**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА**

***Пособие для выполнения лабораторных и  
практических работ  
(курс электротехники)***

*для студентов II курса  
направления 230100(бакалавриат)  
дневного обучения*

**Москва - 2013**

ББК 6П2.1

Р34

Рецензент к.т.н, проф. Рошин А.Г.

Резников Б.Л, А.А. Пирогов, А.Н. Стратиенко.

Р34

Схемотехническое моделирование устройств электроники в автоматизированной среде **ElectronicsWorkbench, Multisim**: Пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электротехника, электроника и схемотехника». - М.: МГТУ ГА, 2013.

Данное пособие издается в соответствии с учебным планом для студентов 2 курса направления подготовки 230100 (бакалавриат) очного обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры ВМКСС 26 мая 2013 г. и методического совета 26 мая 2013 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Введение .....	4
2. Порядок проведения лабораторных занятий .....	5
3. Лабораторная работа №1 .....	6
4. Лабораторная работа №2 .....	22
5. Лабораторная работа №3 .....	39
6. Задачи .....	54
7. Литература .....	60

## Введение

Пособие содержит методические указания для выполнения лабораторных работ по курсу электротехники для студентов направления подготовки 230100 “Информатика и вычислительная техника” (бакалавриат). В данном пособии используются результаты научных исследований студентов 4 курса специальности 230101 А.А. Пирогова и А.Н. Стратиенко.

Работы выполняются на компьютере, в средах моделирования **Multisim** и **Mathcad**

Допускается реализация предлагаемых заданий с помощью других пакетов программ схемотехнического моделирования, таких как MicroCap, Electronics Workbench. и т.д.

Кафедра ВМКСС располагает двумя компьютерными лабораториями, в которых установлены лицензионные версии программ **NI Multisim 10 и 12.**

**Multisim** – современная автоматизированная среда и инструмент проектирования электронной техники. Содержащая более двадцати методик для анализа и получения заданного качества работы электронного устройства.

Пакет состоит из набора взаимосвязанных модулей, предназначенных для проектирования, анализа и настройки аналоговых, цифровых, радиочастотных и гибридных схем, оптимизации расположения деталей и дизайна корпуса.

Система виртуального схемотехнического моделирования Multisim является новой версией, уже хорошо зарекомендовавшего себя, семейства программ фирмы Electronics Workbench. Соответственно она включает в себя все достоинства предыдущих версий и имеет расширенные возможности, которые заметно повышают функциональные технические качества предшествующего продукта. Существенным достоинством нового пакета является то, что он содержит модуль **3D**, который позволяет представить промышленный образец компонента или прибора, применяемого в разработке.

Для молодых профессионалов, начинающих свой творческий путь в организациях, разрабатывающих электротехнику и электронику, владение хотя бы одной из моделирующих программ просто необходимо.

**Mathcad** – это автоматизированная среда для выполнения на компьютере разнообразных математических и технических расчетов.

В предлагаемых к выполнению лабораторных работах Mathcad применяется как средство, упрощающее решение систем уравнений, полученных в результате применения базовых методов расчета, например, по первому и второму законам Кирхгофа и других.

## Порядок проведения лабораторных занятий

Для выполнения лабораторной работы студенту необходимо:

изучить теоретический материал и ознакомиться с примерами решения задач по теме;

подготовить необходимые шаблоны для заполнения результатов (заготовки отчета, таблицы, графики).

Допуск к лабораторной работе осуществляется преподавателем после личной беседы с каждым студентом.

Кроме тематики предстоящей работы, студент должен знать правила безопасной работы с электроустановками и расписаться об этом в журнале.

После допуска студенты приступают к выполнению лабораторной работы в соответствии с данными методическими указаниями.

Окончание выполнения работы преподаватель должен отметить в журнале. Далее оформление отчета и защита.

Отчет оформляется индивидуально каждым студентом, в соответствии с требованиями по выполнению подобных документов и должен содержать:

цель работы;

задание на выполнение;

чертежи разработанных схем;

расчетные формулы и результаты измерений;

анализ результатов и заключени по работе.

## **Лабораторная работа №1**

### **«Исследование электрических цепей постоянного тока»**

#### **Цель работы**

Экспериментальное исследование электрических цепей постоянного тока и проверка законов электротехники – Кирхгофа, Ома в Multisim 10.1.1 на IBM PC. Расчет цепей постоянного тока с использованием вычислительных возможностей Mathcad 14 на IBM PC. Предлагается использовать метод расчета узловых потенциалов и метод наложения. Экспериментальная проверка предполагает возможности перехода к эквивалентным схемам замещения и получения навыков работы с контрольно-диагностическим комплексом и методами анализа **Multisim**.

#### **Содержание работы**

1. Экспериментальное исследование свойств элементов цепей постоянного тока и основных законов электротехники (I и II законы Кирхгофа, закона Ома);
2. Проверка основных методов расчета и автоматизированный расчет электрических цепей по законам Кирхгофа, методом узловых потенциалов, методом наложения;
3. Проверка теоремы об эквивалентном генераторе и возможности перехода к эквивалентным схемам замещения.

#### **Инструменты**

При выполнении лабораторной работы №1 используются инструменты системы автоматизированного проектирования **Multisim** и системы компьютерной алгебры **Mathcad**.

## Теоретические сведения

### Базовые понятия. Элементы электрических цепей и их свойства

Для передачи электрической энергии от источников к приемникам элементы, способные передавать эту энергию, объединяют в электрическую цепь. Например, компьютер (приемник электрической энергии), за которым вы сейчас работаете, получает энергию для своей работы из электросети (соединительные провода, коммутационное оборудование и т.д. и т.п.), а энергию получают на электростанции (источник электрической энергии). На основе сказанного дадим определение термину электрическая цепь.

**Электрическая цепь** – совокупность взаимосвязанных элементов, компонентов или устройств, предназначенных для передачи электрической энергии от источников электрической энергии к потребителям.

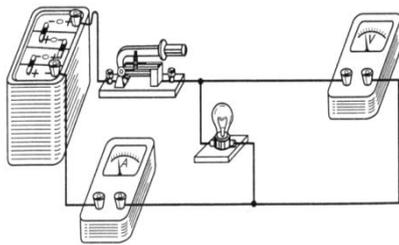


Рис. 1. Электрическая цепь

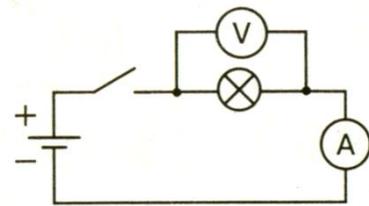


Рис. 2. Схема электрической цепи

Любая цепь содержит пассивные и активные элементы, входящие в электрическую цепь, которые характеризуются вольт-амперной характеристикой (далее ВАХ) (рис. 3), т.е. зависимостью  $U(I)$  или  $I(U)$ , где  $I$  - ток, протекающий через элемент;  $U$  - напряжение (разность потенциалов) на его зажимах, т.е. разность потенциалов между двумя точками пространства.

В том случае, если ВАХ элемента цепи представляет собой линейную зависимость во всем возможном для данного элемента диапазоне токов и напряжений, то такой элемент называется **линейным**. В противном случае – **нелинейным**. Если цепь состоит только из линейных элементов, то такая цепь называется линейной.

Выше говорилось о простейшей электрической цепи. При описании схем используют следующие термины: *ветвь*, *контур*, *узел*.

**Ветвь** – участок цепи между двумя узлами.

**Контур** – это некоторая последовательность ветвей.

**Замкнутый контур** – это последовательность ветвей, которая начинается и заканчивается в одном и том же узле, причем ветви входят по одному разу (не повторяются).

**Узел** – это место соединения трех и большего количества ветвей.

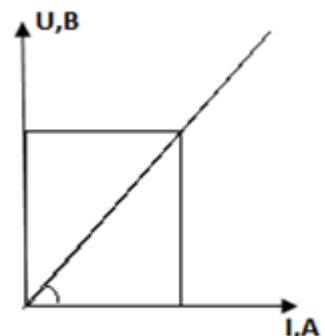


Рис. 3. ВАХ

**Приемники электрической энергии и их параметры.** В электрических схемах линейных цепей приемники (потребители) принято изображать в виде сопротивления  $R$ . Например, в электрической схеме (рис. 1) электрическая лампа будет заменена на сопротивление соответствующей величины (рис. 2).

Сопротивление представляет собой коэффициент пропорциональности между током и напряжением для данного приемника. Математической формулировкой вышеприведенного высказывания является закон Ома:

$$U = I \cdot R. \quad (1.1)$$

**Электрический ток** – направленное движение электрически заряженных частиц под воздействием электрического поля. Обозначается буквой  $I$ , а основная единица тока в Международной системе единиц (СИ) - Ампер [А].

**Электрическое напряжение** – это разность электрических потенциалов между выделенными точками. Обозначается буквой  $U$ , а основная единица напряжения в Международной системе единиц (СИ) - Вольт [В].

**Электрическое сопротивление** – физическая величина, характеризующая свойство проводника, препятствовать прохождению электрического тока и равная отношению напряжения на концах проводника к силе тока, протекающего по нему. Сопротивление обозначается буквой  $R$ , а основная единица сопротивления в Международной системе единиц (СИ) - Ом [Ом].

Элемент электрической цепи, предназначенный для использования его электрического сопротивления, называется **резистором** (рис. 5). УГО резистора представлено на рис. 6. Резисторы бывают неуправляемые и управляемые; управляемый резистор называется **реостатом**. Необходимо отметить, что любой элемент, входящий в электрическую цепь, имеет внутреннее электрическое сопротивление. Например, сопротивлением соединительных проводов при анализе схем электрических устройств, как правило, пренебрегают или включают его в сопротивление нагрузки.

**Электрическая проводимость** – величина, обратная сопротивлению. Данная величина обозначается буквой  $G$ , а основная единица проводимости в Международной системе единиц (СИ) - Сименс [См].

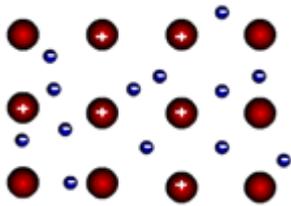


Рис. 4. Сопротивление



Рис. 5. Резисторы

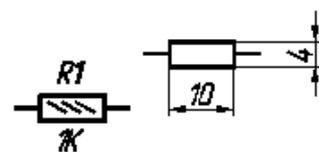


Рис. 6. УГО резистора

**Источники электрической энергии.** При выполнении лабораторных работ используются математические модели источников электрической энергии – источник ЭДС ( $E$ ) и тока ( $J$ ).

**Источник ЭДС** – это идеальный источник электрической энергии бесконечно большой мощности с внутренним сопротивлением, равным нулю ( $R_{вн} = 0$ ). В таком источнике разность потенциалов не зависит от протекающего через него тока, что видно в ВАХ (рис. 10).

**Источник тока** – это идеальный источник электрической энергии бесконечно большой мощности с внутренним сопротивлением, равным бесконечности ( $R_{вн} = \infty$ ). У этого источника ток, протекающий через него, не зависит от разности потенциалов на его концах, что отображено ВАХ (рис. 11).

Модель реального источника электрической энергии можно получить при последовательном соединении источников ЭДС ( $E$ ) и внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  (рис. 7) (схема Тевенина), либо в виде параллельно соединенных источника тока ( $J$ ) и внутреннего сопротивления  $R_{вн}$  (рис. 8) (схема Нортон).

Подобно приемникам энергии источники характеризуются ВАХ. Так на рис. 9 представлена ВАХ реального источника электрической энергии. ВАХ реального источника электрической энергии характеризуется двумя точками -  $I_{кз}$  и  $U_{хх}$  – это два режима работы источника. Анализируя ВАХ реального источника электрической энергии, можно сказать, что для этого источника характерно: уменьшение напряжения на его зажимах с увеличением тока.

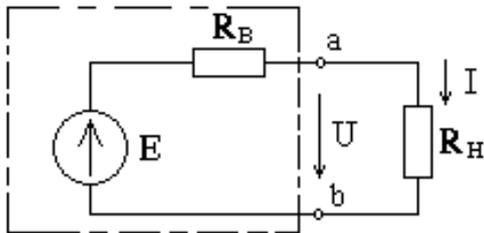


Рис. 7. Схема Тевенина

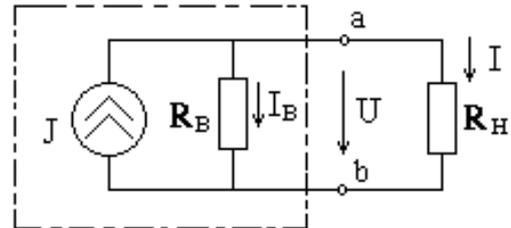


Рис. 8. Схема Нортон

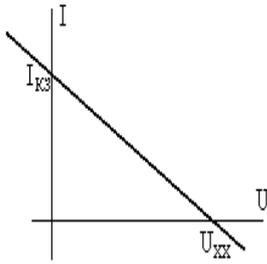


Рис. 9. ВАХ

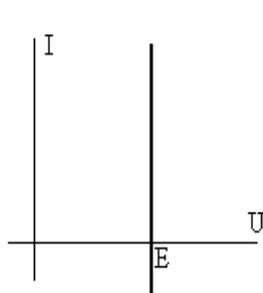


Рис. 10. ВАХ

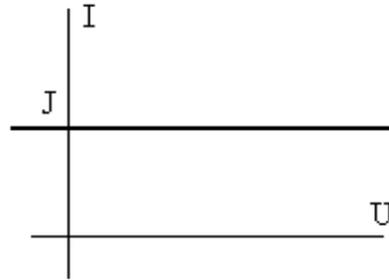


Рис. 11. ВАХ

Выше было сказано, что схемы, представленные на рис. 7 и 8, эквивалентны. Докажем это. Так как соотношения  $E$  ( $U_{хх}$ ) и  $I_{кз}$  связаны соотношением  $I_{кз} R_{вн} = E$ , то при этом  $E$  равно напряжению холостого хода  $U_{хх}$  (при  $R = \infty$ ) источника электрической энергии, а  $J$  равен току короткого замыкания  $I_{кз}$ .

Утверждение эквивалентности источников легко проверить: если к зажимам (**ab**) источника электрической энергии подключить сопротивление нагрузки  $R$  (рис. 12), то в цепи потечет ток  $I$ , величина которого определяется по второму закону Кирхгофа:

$$E = IR_{вн} + IR \quad (1.2)$$

Из полученного выражения найдем ток короткого замыкания. Для этого разделим обе части на  $R_{вн}$ , получим:

$$\frac{E}{R_{вн}} = I + I \frac{R}{R_{вн}} \quad (1.3)$$

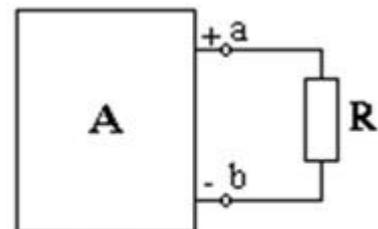


Рис. 12 Эквивалентная СХЭ

В выражении выше обозначим левую его часть как ток короткого замыкания источника электрической энергии  $I_k = \frac{E}{R_g}$ , а соотношение  $I_g = I \frac{R}{R_g}$  – внутренним током источника тока, тогда

$$I_k = I + I_g. \quad (1.4)$$

Тогда электрической схеме, представленной на рис.8, соответствует выражение 1.4.

**Мощность электрическая.** Любой приемник и источник электрической энергии можно охарактеризовать, если рассматривать критерий мощности.

**Мощность электрическая** – это физическая величина, характеризующая скорость передачи или преобразования электрической энергии (1.5). Мощность помогает оценить энергетические условия. Обозначается буквой **P**, а основная единица мощности в Международной системе единиц (СИ) - Ватт (Вт).

**Мощность элемента** электрической цепи определяется как произведение напряжения на его зажимах на ток, протекающий через этот элемент:

$$P = UI = RI^2 = GU^2. \quad (1.5)$$

**Максимальная мощность источника** электрической энергии достигается при максимальном токе, т.е. при токе короткого замыкания. В этом случае мощность равна

$$P_k = I_k E = \frac{E^2}{R_g}. \quad (1.6)$$

Вся мощность рассеивается на внутреннем сопротивлении. Мощность, выделенная на сопротивлении нагрузки, составит:

$$P = U \cdot I = I \cdot R \cdot I = I^2 \cdot R = \left(\frac{E}{R_g + R}\right)^2 \cdot R. \quad (1.7)$$

Максимальная мощность выделится в нагрузке, если сопротивление нагрузки **R** выбрать из условия равенства нулю частной производной

$$\frac{dP_n}{dR_n} = E^2 k^2 ((R_{эк} + R_n)^2 - R_n(2R_{эк} + 2R_n)) / (R_{эк} + R_n)^4. \quad (1.8)$$

$$\text{Из равенства выше получим: } R = R_g \quad (1.9)$$

$$\text{и } P_{max} = \frac{E^2}{4R_g} = \frac{P_k}{4}. \quad (1.10)$$

Иллюстрацией к выражению 8 является рис. 13.

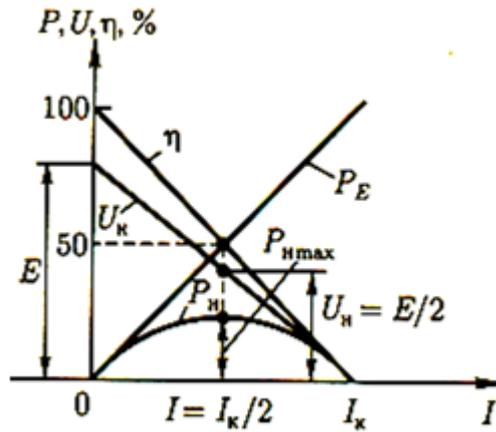


Рис. 13. Иллюстрация к выражению 8

### Измерительное оборудование

При выполнении лабораторной работы применяется следующее измерительное оборудование: вольтметр, амперметр, мультиметр.

**Вольтметр** - измерительный прибор, предназначенный для измерения напряжения на элементе цепи (УГО прибора на рис.14, а). При использовании прибор подключается параллельно к исследуемому участку цепи. Важно соблюдать полярность при подключении вольтметра. Положительная клемма «+» вольтметра подключается к положительной клемме «+» источника электрической энергии, а отрицательная клемма «-» - к отрицательной клемме «-» (рис. 2).

Следует отметить, что вольтметр обладает высоким внутренним параллельным сопротивлением порядка 10 МОм и выше. Делается это для того, чтобы вольтметр пропускал небольшой ток (не вносил изменений в результаты измерений), т.к. он подключен к узлам схемы.

**Амперметр** – измерительный прибор, предназначенный для измерения тока через элемент цепи (УГО прибора на рис.14,б). При использовании прибор подключается последовательно с исследуемым элементом. Важно соблюдать полярность при подключении амперметра. Положительная клемма «+» амперметра подключается к положительной клемме «+» источника электрической энергии, а отрицательная клемма «-» - к отрицательной клемме «-» (рис. 2). Т.к. амперметр подключается последовательно, то его внутреннее сопротивление должно быть очень маленьким от 1 нОм и ниже, такое сопротивление не будет оказывать влияние на измеряемый ток.

**Мультиметр** - это прибор, который включает функции четырех устройств (амперметра, вольтметра, ваттметра, омметра) и позволяет измерять соответственно параметры (ток, напряжение, мощность, сопротивление).

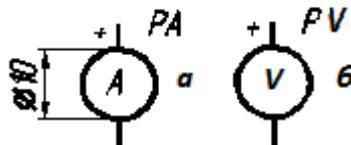


Рис. 14. УГО Вольтметра и амперметра

**Коммутационное оборудование.** В лабораторных работах будет использоваться ключ для коммутации (замыкания и размыкания) электрической цепи или ее участков. Ключ можно отнести к простейшему коммутационному оборудованию (рис. 15).

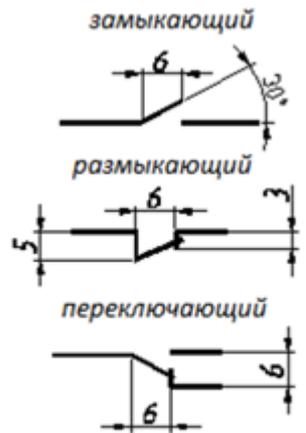


Рисунок 15 – УГО ключа

## Методы расчета электрических цепей

**Законы Кирхгофа.** Немецким физиком Густавом Робертом Кирхгофом (1824-1884) были сформулированы два закона электрических цепей. Законы Кирхгофа, записанные для узлов и контуров цепи, дают полную систему линейных уравнений, которая позволяет найти все токи и напряжения.

Первый закон гласит, что алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю

$$\sum_{i=1}^n \pm I_n = 0 \quad (1.11)$$

где  $n$  – число ветвей входящих в узел.

Или же в любом узле сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла

$$\sum_{i=1}^g \pm I_i = \sum_{j=1}^m \pm I_j, \quad (1.12)$$

где  $n$  – токи, входящие в узел, а  $m$  – токи, исходящие из узла.

Второй закон гласит, что в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений равна алгебраической сумме источников ЭДС, входящих в этот контур

$$\sum_{k=1}^m U_{R_k} = \sum_{k=1}^m I_k R_k = \sum_{k=1}^n E_k, \quad (1.13)$$

где  $m$  – число резистивных элементов в контуре, а  $n$  – число источников энергии в контуре. Или же в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма напряжений равна нулю

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0, \quad (1.14)$$

где  $n$  – число участков в контуре.

Под напряжением в этом случае понимается как падение напряжения на компоненте схемы под действием протекающего тока, так и напряжение на выводах источников ЭДС, входящих в данный контур.

**Алгоритм решения задачи по законам Кирхгофа:**

1. Нумерация узлов, входящих в электрическую цепь. Подсчет количества ветвей, ветвей, содержащих источник тока, и подсчет узлов.
2. Выбор произвольного направления токов в ветвях электрической цепи;
3. Составление необходимого числа уравнений по первому закону Кирхгофа, т.е. количество узлов схемы минус единица.
4. Выбор направления обхода контура.
5. Составление необходимого числа уравнений по второму закону Кирхгофа, т.е. количество ветвей схемы минус количество уравнений по первому закону Кирхгофа, минус количество ветвей, содержащих источник тока.

**Метод узловых потенциалов (МУП).** МУП – метод расчета электрических цепей путем записи системы линейных алгебраических уравнений, в которой неизвестными являются потенциалы в узлах цепи. **В результате применения метода определяются потенциалы во всех узлах цепи, а также токи во всех ветвях.**

**Алгоритм решения задачи по МУП:**

1. Пронумеровать узлы схемы.
2. Принять потенциал одного из узлов схемы равным нулю, т.е. заземлить этот узел.
3. Записать общий вид системы уравнений для данной системы.
4. Подсчитать коэффициенты и правую часть.
5. Решить систему любым из доступных способов.
6. Рассчитать токи по закону Ома.

Пусть имеется схема, состоящая из четырех узлов, найдем в ней потенциалы узлов и токи в ветвях. Для этого заземлим один из узлов, пусть это будет четвертый узел, тогда  $\varphi_4 = 0$ . При решении задачи расчета электрической цепи данным методом возникает система уравнений, общий вид этой системы:

$$\begin{aligned}\varphi_1 G_{11} + \varphi_2 G_{12} + \varphi_3 G_{13} &= I_{11} \\ \varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} + \varphi_3 G_{23} &= I_{22} \\ \varphi_1 G_{31} + \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} &= I_{33}\end{aligned}\quad (1.15)$$

В приведенной системе  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – искомые потенциалы узлов ( $\varphi_4 = 0$ );  $I_{11}, I_{22}, I_{33}$  – эквивалентные токи узлов, равные сумме произведений ЭДС ветви на её проводимость для ветвей, сходящихся в соответствующий узел. При этом ЭДС, направленные к узлу, берутся со знаком “+”, от узла – со знаком “-”;  $G_{11}, G_{22}, G_{33}$  – суммы проводимостей ветвей, сходящихся к соответствующему узлу;

$G_{12}, G_{13}, G_{23}$  – суммы проводимостей ветвей, непосредственно включенных между узлами 1 и 2, 1 и 3, 2 и 3. Эти коэффициенты входят в систему со знаком “-”.

После записи всех коэффициентов удобнее перейти к матричной форме:

$$\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\varphi} = [\mathbf{I}], \quad (1.16)$$

где  $\mathbf{G}$  – матрица проводимостей,  $\mathbf{I}$  – вектор эквивалентных токов узлов,  $\boldsymbol{\varphi}$  – искомый вектор узловых потенциалов. После решения данной системы, например в Mathcad, получим значения потенциалов узлов  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ .

Зная величины потенциалов в узлах, определим токи в ветвях, пользуясь законом Ома для участка цепи (рис. 16):

$$I = \frac{\varphi_i - \varphi_j + E}{R}. \quad (1.17)$$

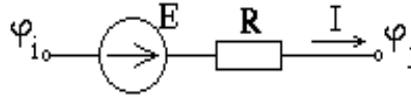


Рис. 16. Участок цепи

**Метод частичных схем (метод наложения).** Метод наложения непосредственно вытекает из метода контурных токов. Токи в ветвях исходной схемы равняются алгебраической сумме частичных токов, вызванным каждым из источников электрической энергии по отдельности.

*Суть метода состоит в том, чтобы поочередно оставлять источники энергии.* При этом неиспользуемые источники электрической энергии заменяются соответствующими им сопротивлениями.

**Алгоритм расчета схемы по методу частичных схем:**

1. В исходной схеме указать условно положительные направления токов;
2. Оставить один источник электрической энергии, а остальные, заменить на соответствующие сопротивления (ветвь, где находился источник ЭДС замыкается накоротко, а ветвь, где находился источник тока, заменятся «обрывом»);
3. Рассчитать данную схему и выписать частичные токи, после чего следует перейти к пункту номер один, пока не будут рассчитаны все частичные схемы;
4. Для токов исходной схемы записать алгебраическую сумму частичных токов. Если направление токов в исходной схеме и в частичной совпадают, то данный ток записать со знаком плюс, в противном случае - со знаком минус.

**Метод эквивалентного генератора. Переход к схемам Тевенина и Нортон.** Данный метод основан на теореме об эквивалентном генераторе. Теорема гласит: любую сложную линейную электрическую цепь можно заменить относительно каких-либо двух ее точек эквивалентным генератором, ЭДС которого равна напряжению холостого хода, а внутреннее сопротивление – входному сопротивлению относительно этих точек.

**Алгоритм применения метода эквивалентного генератора:**

1. Используя вольтметр или мультиметр, определить напряжение холостого хода ( $U_{xx}$ );
2. Используя амперметр или мультиметр, определить ток короткого замыкания хода ( $I_{кз}$ );
3. Зная величины  $U_{xx}$  и  $I_{кз}$  определить величину  $R_{вн}$ .
4. Осуществить переход к одной из схем: Тевенина или Нортон.

В том случае, если правило применяется к какой-либо выделенной ветви, содержащей сопротивление  $R$  и ЭДС  $E$ , а оставшаяся часть схемы заменена на эквивалентный генератор, ток в ветви можно рассчитать как

$$I = \frac{U_{xx} + E}{R_{вн} + R} \quad (1.18)$$

где  $U_{xx}$  и  $R_{вн}$  – параметры эквивалентного генератора.

Для окончательного перехода к эквивалентным схемам нужно определить экспериментально напряжение холостого хода ( $U_{xx}$ ) (рис. 18) и ток короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) (рис. 19). Так же Multisim позволяет определить величину сопротивления ( $R_{вн}$ ), для этого используется виртуальный Мультиметр.

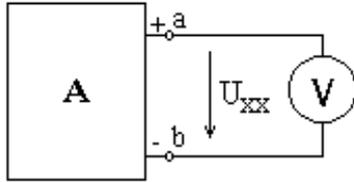


Рис. 18. Измерение  $U_{xx}$

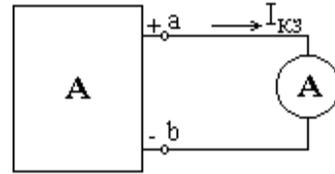


Рис. 19. Измерение  $I_{кз}$

Для измерения напряжения используется вольтметр. Схема подключения вольтметра для определения напряжения холостого хода представлена на рис. 18. Для измерения тока короткого замыкания используется амперметр. Схема подключения амперметра для определения тока короткого замыкания представлена на рис. 19. После определения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода возможно определить эквивалентное сопротивление и осуществить переход к схеме Нортон (рис.20) или Тевенина (рис. 21). Зная величину тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, можно определить величину внутреннего/эквивалентного сопротивления

$$R_{вн} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}. \quad (1.19)$$

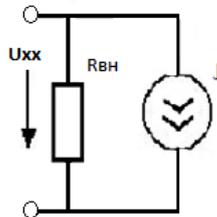


Рис. 20. Схема Нортон

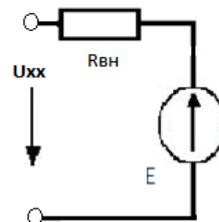


Рис. 21. Схема Тевенина

### Описание лабораторной установки

Лабораторная работа №1 выполняется в Multisim 10.1.1 и Mathcad 14 на IBM PC. Задание, представленное для выполнения лабораторной работы, в полном объеме может быть выполнено в старших версиях Multisim. В работе используется источник постоянного тока, резисторы, амперметры, вольтметры, ваттметры.

### Рабочее задание

1. Исследование реального источника электрической энергии. Переход к эквивалентным схемам замещения.
2. Исследование и построение зависимостей  $U = f I$  и  $P = f I$  ..
3. Проверка первого закона Кирхгофа.
4. Проверка второго закона Кирхгофа. Расчет электрической цепи по законам Кирхгофа.



ыт	U,											
	В											

Продолжение таблицы.1.1

Рас чет	$R =$ $U/I, \text{ Ом}$											
	$P = U \cdot$ $I, \text{ Вт}$											

На основе полученных данных (таблица 1.1) установить влияние нагрузки на величину напряжения источника, построить зависимость  $U = f I$ .

Построить зависимость  $P = f I$ . На полученном графике указать точку, в которой достигается максимум мощности ( $P = P_{\max}$ ). Указать соотношение максимальной мощности и мощности короткого замыкания.

### Проверка первого закона Кирхгофа.

Собрать схему, представленную на рис.24, и проверить выполняется ли первый закон Кирхгофа для узла номер один. Указать какой из токов и насколько изменится, если увеличить величину сопротивления  $R_1$  на 20 Ом от текущей величины этого сопротивления.

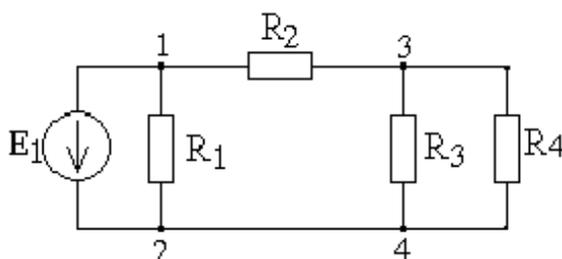


Рис. 24. СхЭ

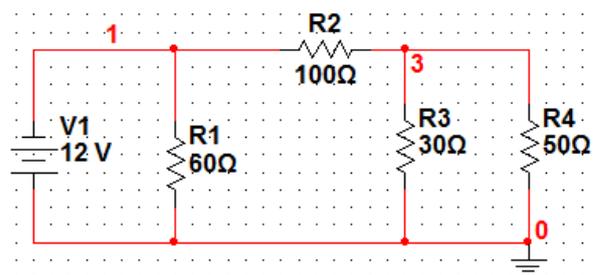


Рис. 25. СхЭ

### Проверка второго закона Кирхгофа. Расчет электрической цепи по законам Кирхгофа.

Собрать схему, представленную на рис. 26. На данной схеме принять сопротивления  $R_1$  и  $R_1$  входящими в первый контур;  $R_2$  и  $R_6$  – во второй контур;  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  – в третий контур. В данной схеме определить величины токов по законам Кирхгофа экспериментальным методом; проверить экспериментальные значения расчетом электрической цепи в Mathcad. Полученные данные записать в таблицу 2.

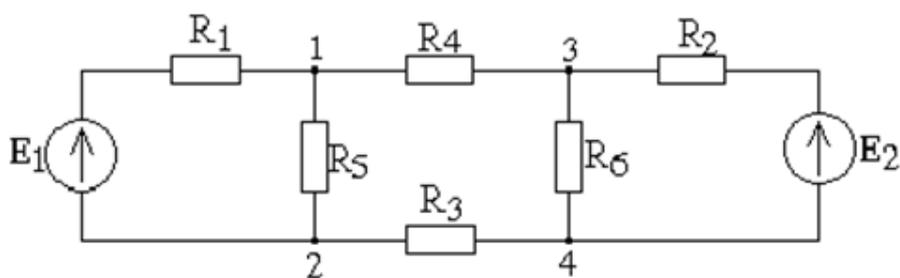


Рис. 26. Электрическая цепь

Таблица 1.2.

Ток	Расчетное значение	Экспериментальное значение
...	...	...

### Проверка принципа наложения. Расчет электрической цепи по методу частичных схем.

Для схемы рис.26 выполнить проверку принципов наложения. Проверка принципа наложения осуществляется для токов первой, второй и третьей ветвей путем их замера при действии только ЭДС  $E_1$ , только ЭДС  $E_2$  и одновременном действии обеих ЭДС. Данные следует занести в таблицу 1.3.

Таблица 1. 3.

	$I_1, A$	$I_2, A$	$I_3, A$
$E_1 = E$ $E_2 = 0 V$			
$E_1 = E$ $E_2 = 0 V$			
$E_1 = E$ $E_2 = 0 V$			

### Проверка метода узловых потенциалов. Расчет электрической цепи по методу узловых потенциалов.

Для проверки метода узловых потенциалов в схеме на рис. 26 потенциал узла номер четыре следует принять равным нулю. Величины потенциалов

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  можно определить, измерив напряжения  $U_{14}, U_{24}, U_{34}$ . Полученные данные записать в таблицу 1.4.

Таблица 1.4.

$\varphi_1 =$ $U_{14}, \text{В}$	$\varphi_2 =$ $U_{24}, \text{В}$	$\varphi_3 =$ $U_{34}, \text{В}$
...	...	...

Составить систему (3.17) уравнений по МУП для схемы рис.26 и решить данную систему в Mathcad 14. После определить токи в каждой из ветвей данной схемы. Результаты опыта сравнить с расчетными данными.

**Проверка теоремы об эквивалентном генераторе. Определение параметров эквивалентного генератора экспериментальным и расчетным путем. Переход к схемам Тевенина и Нортон.**

Для проверки теоремы об эквивалентном генераторе используется электрическая цепь из предыдущего опыта. Определим опытным путем ток короткого замыкания и напряжение холостого хода в ветви, содержащей сопротивление  $R_3$ . При измерении величин следует пользоваться мультиметром. По полученным данным вычислить величину входного сопротивления ( $R_{42xx}$ ), используя формулу (3.20). Для вычисления тока в третьей ветви используется формула:

$$I_3 = \frac{U_{42xx}}{R_{42xx} + R_3}. \quad (1.20)$$

Используя ту же теорему об эквивалентном генераторе, определим расчетным путем ток в ветви, содержащей сопротивление  $R_3$  относительно точек 4 и 2, рассчитав значения  $E_{\text{эКВ}} = U_{42xx}$  и  $R_{\text{в}} = R_{42xx}$ . Определив параметры, осуществить переход к схемам замещения. Подключив сопротивление  $R_3$  к каждой из этих схем, определить ток. Полученные данные сравнить с экспериментальными данными.

### Содержание отчета

Отчет оформляется в соответствии с ГОСТ

Отчет должен содержать:

- электрические схемы опытов;
- результаты измерений, расчеты и выводы по каждому опыту;
- графики, схемы замещения;
- вывод по лабораторной работе.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое замкнутая электрическая цепь и из каких элементов она состоит?
2. Что такое «ветвь» и «узел» в электрической схеме?
3. Что такое «линейный элемент» в электрической цепи? Чем отличается линейный элемент электрической цепи от нелинейного элемента?
4. Как определить линейный элемент? Привести примеры линейных элементов электрической цепи.
5. Чем отличается реальный источник электрической энергии от идеального источника ЭДС или тока?
6. В чем заключаются особенности ВАХ идеального источника тока и ЭДС?
7. Как по показаниям амперметра и вольтметра можно определить величину сопротивления участка электрической цепи?
8. Как определить сопротивление приемника электрической энергии, если имеется его ВАХ?
9. В каких единицах измеряются сила тока, напряжение, сопротивление, проводимость, мощность и потенциал? При помощи каких приборов измеряются эти величины?
10. Как подключаются измерительные приборы при проведении измерений в электрической схеме?
11. Для чего предназначен амперметр? Каково его внутренне сопротивление?
12. Для чего предназначен вольтметр? Каково его внутренне сопротивление?
13. Поясните предназначение мультиметра. Что можно измерить этим прибором?
14. Методы анализа Multisim, применяемые в данной лабораторной работе.
15. Методы расчета электрических цепей (законы Кирхгофа, МУП, метод эквивалентного генератора).
16. Количество уравнений, требуемое для расчета схемы по законам Кирхгофа. Какое правило применяется при составлении уравнений согласно двум законам Кирхгофа?
17. Особенности использования МУП. Как по МУП определить токи, протекающие в ветвях?
18. Особенности использования метода эквивалентного генератора.
19. Сформулируйте теорему об эквивалентном генераторе.
20. Что такое резистор?
21. Как определить величину эквивалентного сопротивления при параллельном соединении (разветвлении) двух, трех сопротивлений? Как определить эквивалентное сопротивление мостового соединения сопротивлений?

22. Как включается ваттметр по отношению к контролируемому приемнику электроэнергии?

23. Поясните условие выделения максимума мощности в нагрузке.

## **Лабораторная работа №2**

### **«Исследование электрических цепей синусоидального тока»**

#### **Цель работы:**

Экспериментальное исследование электрических цепей переменного тока и проверка законов электротехники – Кирхгофа, Ома для комплексных токов в Multisim 10.1.1 на IBM PC. Опытное исследование установившихся процессов, явления резонанса и частотных характеристик в цепях синусоидального тока. Получение навыков работы с двухлучевым виртуальным осциллографом и осциллографом Agilent 54622D.

#### **Содержание лабораторной работы:**

1. Экспериментальное исследование свойств электрических цепей постоянного тока;
2. Экспериментальная проверка основных законов электротехники (I и II закон Кирхгофа, закона Ома), установившихся процессов;
3. Экспериментальное подтверждение явления резонанса;
4. Построение частотных характеристик в цепях синусоидального тока.

#### **Инструменты, используемые при выполнении работы:**

При выполнении лабораторной работы №2 в качестве измерительного оборудования используются виртуальные аналоги реальных инструментов системы автоматизированного проектирования **Multisim**.

#### **Краткие теоретические сведения**

##### **Базовые понятия**

В электроэнергетике, промышленности и «быту» широкое применение получили цепи переменного тока. Объясняется это тем, что на переменном токе работают трансформаторы, а двигатели переменного тока проще, прочнее и дешевле двигателей постоянного тока. Но главной особенностью распространения стала возможность трансформации электроэнергии, т.е. простого и с малыми потерями преобразования тока большой величины и низкого напряжения в ток малой величины и высокого напряжения или обратного преобразования, что повсеместно применяется для передачи энергии на большие расстояния. Следует отметить, что с цепями синусоидального тока человек сталкивается повсеместно, и яркий тому пример – электросети в домах.

Чтобы понять процессы, происходящие в цепях синусоидального тока, обратимся к математическому описанию синусоидальной величины

Все перечисленные выше синусоидальные величины изменяются во времени по закону

$$a(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.1)$$

где  $a$  – мгновенное значение, например, для тока выражение 4.1 примет вид

$$i t = I_m \sin(\omega t + \psi);$$

$A_m$  - амплитуда синусоидальной величины (например, максимальное значение тока или максимальное отклонение от нуля);  $\omega$  - угловая частота;  $\psi$  - начальная фаза.

График синусоидальной величины представлен правее на рис.27.

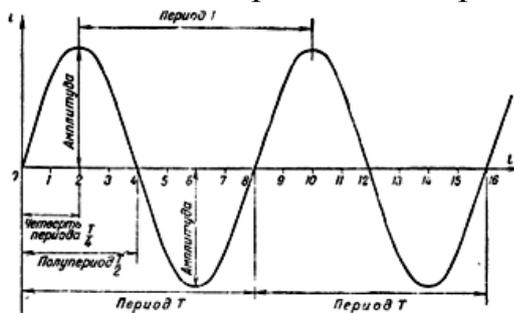


Рис. 27. График синусоидальной величины

При исследовании процессов, происходящих в цепях синусоидального тока, применяется различное представление синусоидальных величин, например: векторное и комплексное. Применяя последнее, удобно производить расчет этих цепей.

### Векторное и комплексное представление синусоидальной величины

Для внесения ясности и понимания выражения 4.1 проще всего представить синусоидальную величину в виде вращающегося вектора (рис. 28). Чтобы представить синусоидальную величину  $a = A_m \sin \omega t + \psi$  с начальной фазой  $\psi$  вращающимся вектором необходимо построить радиус-вектор  $A_m$ , равный амплитуде  $A_m$ , под углом  $\psi$  к горизонтальной оси. Это будет исходное положение вектора в начальный момент времени  $t=0$ .

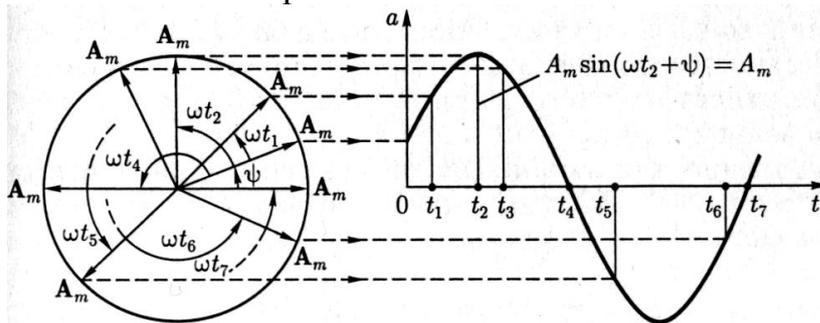


Рис. 28. Векторное представление синусоидальной величины

При вращении радиус-вектора с постоянной угловой частотой  $\omega$  против часовой стрелки его проекция на вертикальную ось будет равна  $A_m \sin \omega t + \psi$ . По значениям этих величин можно построить график зависимости синусоидальной величины от фазы  $\omega t$  или от времени  $t$  (рис.28).

**Представление синусоидальной величины в виде комплексных чисел.** В цепях синусоидального тока для представления величин активно исполь-

зуются комплексные числа, так как от представления в виде радиус-вектора нетрудно перейти к представлению этой величины в комплексном виде.

**Комплексная величина** – это вектор на комплексной плоскости, модуль которого равен действующему значению, а **фаза** – начальной фазе величины, т.е. угол поворота относительно начала координат на комплексной плоскости. Пример построения представлен на рис.

Так синусоидальной величине (2.1) ставится в соответствие комплексная величина

$$A = A \cdot e^{j\Psi}, \quad (2.2)$$

где  $A$  – действующее значение синусоидальной величины.

$$A = A_m \bar{2} \quad (2.3)$$

**Комплексная величина** – это вектор на комплексной плоскости, модуль которого равен действующему значению, а **фаза** – начальной фазе величины, т.е. угол сдвига относительно оси абсцисс.

При работе с комплексными величинами применяется три формы записи комплексного значения синусоидальной величины:

*показательная форма*

$$A = Ae^{j\Psi};$$

*тригонометрическая форма*

$$A = A \cos \psi + A \sin \psi ;$$

*и алгебраическая форма*

$$A = \text{Re}A + j\text{Im}A,$$

где  $\text{Re}A = A \cos \psi$  и  $\text{Im}A = A \sin \psi$  – действительная и мнимая составляющие комплексного значения синусоидальной величины;

$$A = \sqrt{(\text{Re}A)^2 + (\text{Im}A)^2}; \quad \psi = \arctg \frac{\text{Im}A}{\text{Re}A}, \quad \psi = \arcsin \frac{\text{Im}A}{A}, \quad \psi = \arccos \frac{\text{Re}A}{A}.$$

Переход от показательной формы к тригонометрической выполняется с помощью преобразований **Эйлера**:

$$e^{\pm j\Psi} = \cos \psi \pm j \sin \psi. \quad (2.4)$$

Так синусоидальному току  $I = \text{Im} \sin \omega t + \psi i = 10 \sin(\omega t + 45^\circ)$ , соответствует комплексное значение тока  $I = Ie^{j\Psi} = \frac{10}{2} e^{j45^\circ}$ .

Для того чтобы синусоидальную величину  $a = A_m \sin \omega t + \psi$  с начальной фазой  $\psi$  представить комплексным числом, строят вектор на комплексной плоскости (рис.28) из начала координат под углом  $\psi$  к оси действительных величин, длина которого в масштабе построения равна амплитуде  $A_m$  синусоидальной величины.

При увеличении во времени фазы  $\omega t + \psi$  синусоидальной величины угол между вектором и осью действительных величин растет, т.е. получается вращающийся вектор

$$A_m e^{j(\omega t + \psi)} = A_m \cos(\omega t + \psi) + A_m \sin(\omega t + \psi).$$

Представление синусоидальной величины комплексной амплитудой  $A_m$  и соответствующим ей вектором на комплексной плоскости геометрически подобно представлению той же синусоидальной величины вращающимся радиус-вектором  $A_m$  в момент времени  $t=0$ .

### Основные законы электротехники для цепей переменного тока

Подобно электрическим цепям постоянного тока в цепях синусоидального тока выполняются законы Ома и Кирхгофа, для комплексных токов. В символической форме они имеют вид:

**первый закон Кирхгофа**, в узле:  $\sum_k I_k = 0$ ,  
(2.5)

где  $k$  – количество ветвей входящих в узел;

**второй закон Кирхгофа**, в контуре:  $\sum_k E_k = \sum_k U_k$ ,  
(2.6)

где  $k$  – количество падений напряжения на приемниках и источниках

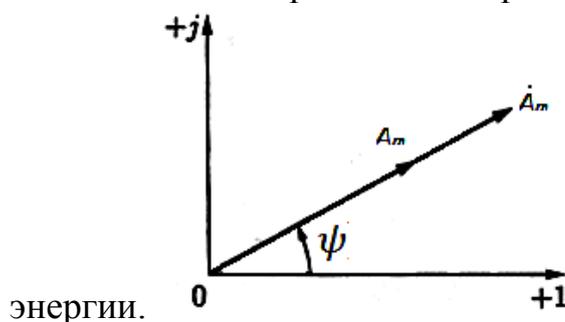


Рис. 29. Векторное представление синусоидальной величины

**Закон Ома** электрических цепей синусоидального тока:  $I = \frac{U}{Z} = U \cdot Y$ ,  
(2.7)

где  $Z$ ,  $Y$  – комплексные сопротивления и проводимость.

### Векторные диаграммы

**Векторная диаграмма** (ВД) – это изображение векторов токов, напряжений и ЭДС на комплексной плоскости в соответствии с законами Кирхгофа. Она позволяет наглядно представить взаимное фазовое расположение синусоидальных токов и напряжений, а также их абсолютные значения в выбранном масштабе.

Простейшим примером является векторная диаграмма на рис. 30 для последовательной схемы, изображенной на рис. 31.

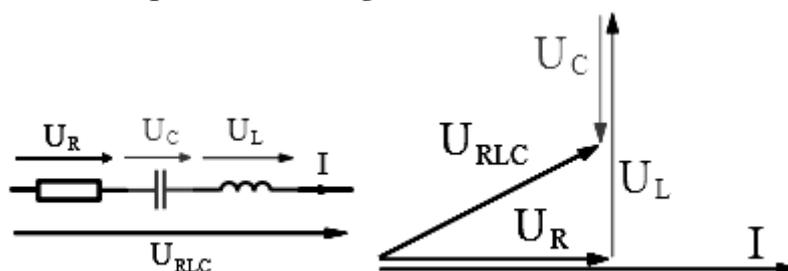


Рис. 30. Участок цепи

Рис. 31. Векторная диа-

грамма

Заметим, что положение угла  $\varphi$  на векторной диаграмме отсчитывается против направления движения часовой стрелки от вектора комплексного значения тока  $I$ , а отрицательное значение – по направлению движения часовой стрелки.

### Элементы цепей синусоидального тока и комплексное сопротивление. Угол сдвига фаз и его измерение

Ясно, что процессы в цепях синусоидального тока по сложности на порядок отличаются от цепей постоянного тока, что обусловлено применением в таких цепях катушек индуктивности, конденсаторов и резисторов. Рассмотрим эти элементы, а также процессы, протекающие в компонентах цепей синусоидального тока, и изменения, вносимые в электрическую цепь таким элементом, более подробно.

Зависимости между током и напряжениями резистивных, индуктивных и емкостных элементов определяются происходящими в них физическими процессами. Также при анализе цепей синусоидального тока необходимо помнить, что реактивное *индуктивное* сопротивление ( $X_L$ ) индуктивной катушки и реактивное *ёмкостное* сопротивление ( $X_C$ ) конденсатора зависят от частоты  $f$  источника синусоидального напряжения

$$U = U_m \sin(\omega t + \Psi_u), \text{ т.е.}$$

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \text{ и } X_C = 1 / \omega C = 1 / (2\pi f C), \quad (2.8)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота напряжения, рад/с;  $f = 1/T$  – циклическая частота, Гц;

$T$  – период синусоидального напряжения, с;  $\Psi_u$  – его начальная фаза, рад или град.

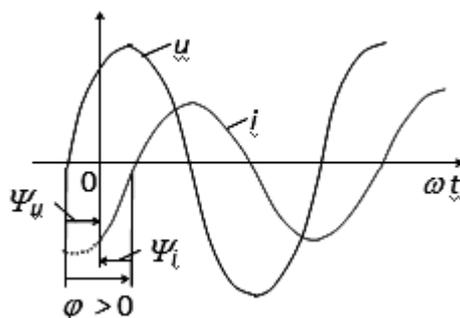


Рис. 32. Фазовый сдвиг

В ветвях с реактивными элементами  $L$  и  $C$  между напряжением и током возникает *фазовый сдвиг*  $\varphi = \Psi_u - \Psi_i$ , где  $\Psi_i$  – начальная фаза тока. Угол  $\varphi$  (в рад или град) – это алгебраическая величина, изменяющаяся в диапазоне от  $-90^\circ$  ( $-\pi/2$  рад) до  $+90^\circ$  ( $+\pi/2$  рад). Знак и величина угла зависят от типа и величины параметров последовательно соединённых элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$  ветви и частоты  $f$  напряжения.

Рассмотрим более подробно процессы в элементах цепей синусоидального тока и формируемые векторные диаграммы.

**Резистивный элемент.** Ток в резистивном элементе синусоидальный равен

$$i = i_{Rm} \sin \omega t + \psi_i ,$$

и напряжение, приложенное к элементу, равно

$$U_R = RI_{Rm} \sin \omega t + \psi_u = U_{Rm} \sin(\omega t + \psi_u),$$

где амплитуды тока и напряжения связаны соотношением  $U_{Rm} = RI_{Rm}$ , а их начальные фазы одинаковые:  $\psi_u = \psi_i$ , т.е. ток и напряжение **синфазны** – совпадают по фазе (рис.33) и таблица 2.1(1)).

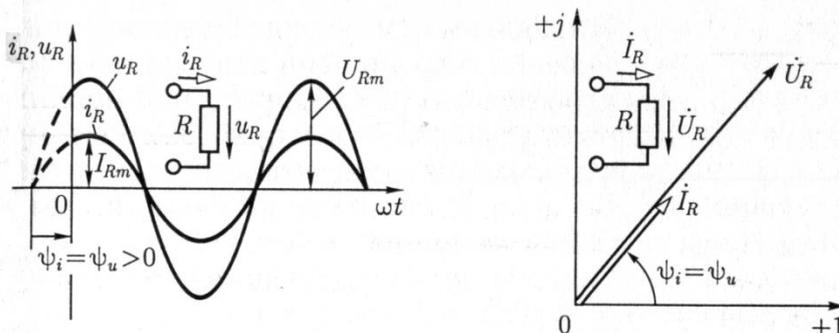


Рис. 33. Векторная диаграмма для резистора

Действующее значение напряжения и тока резистивного элемента связаны:

$$U_R = RI_R.$$

Закон Ома в комплексной форме для резистивного элемента:

$$U_R = RI_R \quad (2.9)$$

**Индуктивный элемент.** Если ток в индуктивном элементе синусоидальный:

$$i = i_{Rm} \sin \omega t + \psi_i ,$$

то напряжение на индуктивном элементе равно

$$U_L = U_{Lm} \sin \omega t + \psi_i + \pi/2 = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u)$$

где амплитуды тока и напряжения связаны соотношением  $U_{Lm} = \omega LI_{Lm}$ , а их начальные фазы одинаковые:  $\psi_u = \psi_i + \pi/2$ , т.е. напряжение в индуктивном элементе опережает ток на  $\pi/2$  или ток в катушке индуктивности отстает от напряжения на  $\pi/2$  (рис.34 и таблица 4.1(2)).

Действующее значение напряжения и тока индуктивного элемента связаны:

$$U_L = \omega LI_L = X_L I_L.$$

Величина  $X_L = \omega L$  в выражении, единица которой Ом, называется индуктивным сопротивлением, а обратная величина  $B_L = 1/\omega L$ , единица  $\text{Ом}^{-1} = \text{См}$  – *индуктивной проводимостью*.

Закон Ома в комплексной форме для индуктивного элемента:

$$U_L = \omega LI_L e^{j\psi_i} = e^{j(\psi_i + \pi/2)},$$

или

$$U_L = j\omega LI_L = jX_L I_L \quad (2.10)$$

Входящая в это выражение величина  $j\omega L = jX_L$  называется *комплексным сопротивлением* индуктивного элемента, а обратная ей величина  $1/j\omega L = -jB_L$  – *комплексной проводимостью* индуктивного элемента.

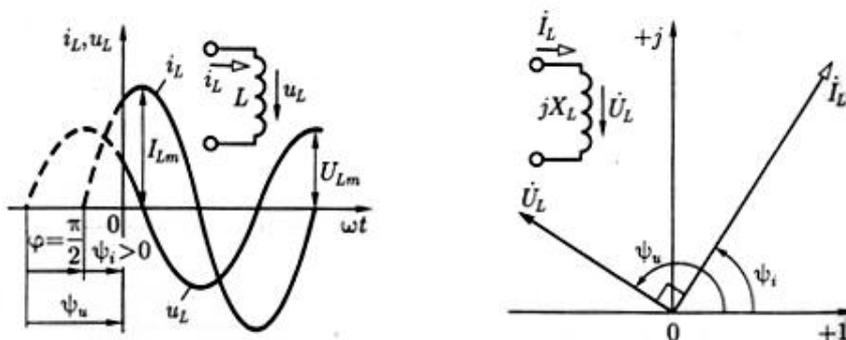


Рис. 34. Векторная диаграмма для индуктивности

Действующее значение напряжения и тока индуктивного элемента связаны:

$$U_L = \omega LI_L = X_L I_L.$$

Величина  $X_L = \omega L$  в выражении, единица которой Ом, называется *индуктивным сопротивлением*, а обратная величина  $B_L = 1/\omega L$ , единица  $\text{Ом}^{-1} = \text{См}$  – *индуктивной проводимостью*.

Закон Ома в комплексной форме для индуктивного элемента:

$$U_L = \omega LI_L e^{j\psi_i} = e^{j(\psi_i + \pi/2)},$$

или

$$U_L = j\omega LI_L = jX_L I_L \quad (2.11)$$

**Емкостный элемент.** Напряжение между выводами емкостного элемента изменяется синусоидально:

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u),$$

а синусоидальный ток

$$i_C = I_{Cm} \sin \omega t + \psi_u + \pi/2 = I_{Cm} \sin(\omega t + \psi_i),$$

где амплитуды напряжения и тока связаны соотношением  $I_{Cm} = \omega C U_{Cm}$ , а их начальные фазы связаны соотношением  $\psi_i = \psi_u + \pi/2$ , т.е. *ток на конденсаторе обгоняет напряжение на  $\pi/2$*  (рис.35 и в таблице 2.1(3)).

Действующее значение напряжения и тока емкостного элемента связаны:

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I_C = I_C B_C.$$

Величина  $B_C = \omega C$  в выражении, единица которой  $\text{Ом}^{-1} = \text{См}$ , называется *емкостной проводимостью*, а обратная величина  $X_C = 1/\omega C$ , единица которой Ом, – *емкостным сопротивлением*.

Закон Ома в комплексной форме для емкостного элемента:

$$U_C = \frac{1}{j\omega C} I_C = -jX_C I_C, \quad (2.12)$$

Величина  $1/j\omega C = -jX_C$ , входящая в выражение 2.18, называется *комплексным сопротивлением емкостного элемента*, а обратная ей величина  $j\omega C = jB_C$  — *комплексной проводимостью емкостного элемента*.

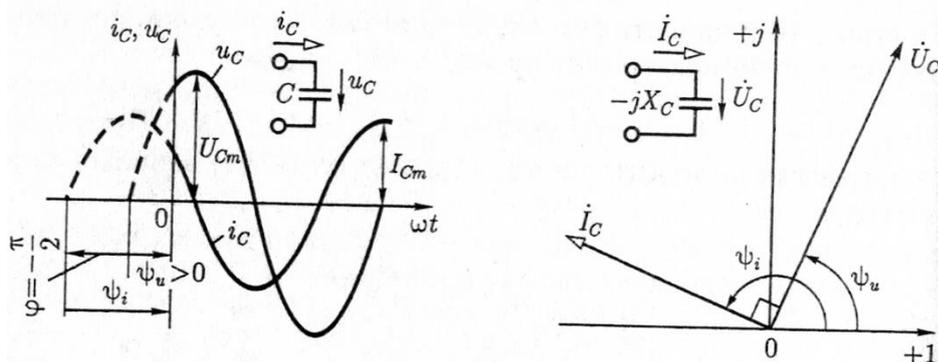


Рис. 35. Векторная диаграмма для конденсатора

Таблица 2.1.

Тип соединения/элемент а	Элементы ветви	Векторная диаграмма	Угол $\varphi = \Psi_u - \Psi_i$
<b>R (1)</b>			$\varphi = 0$
<b>L (2)</b>			$\varphi = 90^\circ (\pi/2)$
<b>C (3)</b>			$\varphi = -90^\circ (-\pi/2)$
<b>RL (4)*</b>			$\varphi = \arctg(X_L/R)$
<b>RC (5)*</b>			$\varphi = \arctg(-X_C/R)$
<b>RLC (6)*</b>		а) $X_L > X_C$ ; см. 4; б) $X_L < X_C$ ;	$\varphi = \arctg[(X_L - X_C)/R]$

		см. 5; в) $X_L = X_C$ ; см. 1.	
--	--	--------------------------------------	--

\*Примечание. Случаи 4, 5 и 6 образуются при смешанном соединении, что определяет процессы в происходящие в электрической цепи и формирует вид векторной диаграммы.

Следует заметить, что в общем виде для цепи синусоидального тока, содержащей последовательно соединенные резистор, катушку индуктивности и конденсатор, комплексное сопротивление имеет вид:

$$Z = R + j \omega L - \frac{1}{\omega C} = z \cdot e^{j\varphi},$$

Где: R – резистор, Ом; L – индуктивность, Гн; C – емкость, Ф;

$$z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} - \text{полное сопротивление цепи.} \quad (2.13)$$

$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$  – аргумент комплексного сопротивления, показывает сдвиг фаз между током и напряжением на участке цепи с комплексным сопротивлением Z, представленный в общем виде.

**Измерение угла сдвига фаз.** Значение угла сдвига фаз  $\varphi$  в ветвях схемы цепи определяют косвенным методом, измеряя временные интервалы на осциллограммах, т. е.

$$|\varphi| = 360^\circ \Delta t / T, \quad (2.14)$$

где  $\Delta t$  – временной интервал между нулевыми значениями синусоид напряжения (провод *m*-го цвета) и тока (провод *k*-го цвета); угол  $\varphi$  берется со знаком "плюс", если ток *отстаёт по фазе* от напряжения, и со знаком "минус", если ток *опережает по фазе* напряжение.

При измерении интервала времени  $\Delta t$  необходимо регулировать горизонтальную и вертикальную развертки, чтобы увидеть и исследовать сигнал на экране осциллографа.

**Явление резонанса. Резонанс токов и напряжений. Частотные характеристики в цепях синусоидального тока**

**Резонанс.** Под *резонансом* следует понимать такой режим, когда на его входе ток и напряжение совпадают по фазе ( $\psi_i = \psi_u$ ), т.е. когда входное сопротивление имеет чисто резистивный характер ( $Z_{вх} = R_{вх}$ ) и, следовательно, сдвиг фаз между напряжением *u* и током *i* на её входе равен нулю ( $\varphi = 0$ ).

Цепи, в которых возникают резонансные явления, называют резонансными цепями или колебательными контурами. Простейший колебательный контур содержит один индуктивный *L* и один емкостный *C* элементы, соединенные между собой и источником синусоидального напряжения последовательно (последовательный колебательный контур) или параллельно (параллельный колебательный контур).

Существуют две основные разновидности резонансных режимов: *резонанс напряжений* и *резонанс токов*. Резонанс напряжений возникает в цепи с последовательным соединением индуктивности и емкости, а при параллельном соединении – резонанс токов.

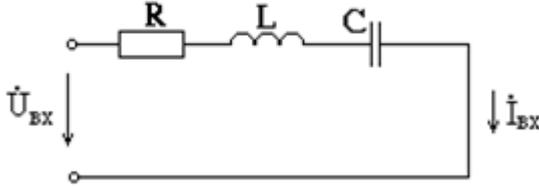


Рис. 36. Последовательное RLC

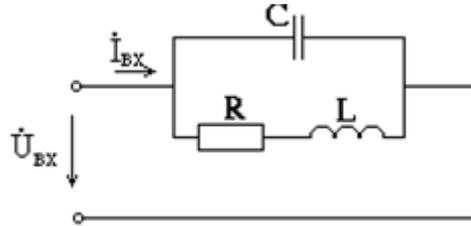


Рис. 37. Параллельное RLC

ное RLC

**Резонанс напряжений.** Условием резонанса в схеме (рис. 36) является равенство нулю реактивного сопротивления на входе цепи:

$$X_{\text{рез}} = X_L - X_C = 0 \text{ или } \omega_{\text{рез}} L = 1/(\omega_{\text{рез}} C),$$

откуда *угловая* (в рад/с) и *циклическая* (в Гц) *резонансные частоты* контура

$$\omega_{\text{рез}} = 1 \sqrt{LC} \text{ и } \omega_{\text{рез}} = 1 / 2\pi \sqrt{LC}. \quad (2.15)$$

Чтобы получить режим резонанса в цепи с последовательным соединением  $L$  и  $C$  компонентов, нужно изменять параметры  $L$  и  $C$ , либо изменяя угловую частоту  $\omega$ .

Следует заметить, что при резонансе напряжений величина входного тока достигает максимального значения, выражаемого формулой:  $I_{\text{вх}} = I_0 = U_{\text{вх}} / R$ , а напряжение на индуктивности и емкости достигают очень больших величин, выражаемых формулами:  $U_L = \omega_0 L I_0$  и  $U_C = I_0 / \omega_0 C$ .

Отношение  $Q = \frac{U_L}{U_R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$  называют добротностью контура.

**Резонанс токов.** Возникает в параллельном колебательном контуре (рис.37). Условием резонанса является равенство нулю входной реактивной проводимости  $Y_{\text{рез}} = Y_L - Y_C = 0$  или

$$Y_L = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = Y_C = \frac{1/(\omega C)}{R_2^2 + 1/(\omega C)^2}$$

откуда **резонансная угловая частота**

$$\omega_{\text{рез}} = 1 \sqrt{LC} \frac{L C - R_1^2 L C - R_2^2}{\rho^2 - R_1^2} \frac{L C - R_2^2}{\rho^2 - R_2^2} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$

где  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  – резонансная частота контура без потерь ( $R_1 = R_2 = 0$ );

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

Действующие значение тока

$$I = Y \cdot U = \frac{U}{\sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}}$$

При угловой частоте  $\omega_{рез} = 1/\sqrt{LC}$  индуктивная  $B_L = 1/(\omega L)$  и емкостная  $B_C = \omega C$  проводимости параллельных ветвей одинаковы, аргумент комплексной проводимости цепи  $\varphi$  равен нулю, т.е.  $\psi_u = \psi_i$ , полная проводимость цепи  $Y = G$  и общий ток  $I_{рез} = GU$  минимальный.

При резонансе действующие значения токов в индуктивном и емкостном элементах одинаковые:  $I_L = 1/\omega_{рез} L U = I_C = \omega_{рез} C U$ , а сдвиг фаз между токами равен  $\pi/2$ , т.к. в индуктивном элементе отстает от напряжения по фазе на угол  $\pi/2$ , а ток в емкостном элементе опережает напряжение на такой же угол  $\pi/2$ .

**Резонанс токов** в отличие от резонанса напряжений – явление безопасное для электроэнергетических установок. Резонанс токов, как и резонанс напряжений, находит применение в радиотехнических устройствах.

**Частотные характеристики.** При измерении частоты источника синусоидальной ЭДС, к которому подключен двухполюсник, будут меняться его входные параметры:  $Z_{вх}(\omega)$ ,  $R_{вх}(\omega)$ ,  $X_{вх}(\omega)$ ,  $\varphi_{вх}(\omega)$ ,  $I_{вх}(\omega)$  и т.д. Эти зависимости называют частотными характеристиками двухполюсника, т.е. это зависимость от угловых частот, входного параметра. Так, для последовательной схемы:

$$Z_{вх}(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

$$R_{вх}(\omega) = R,$$

$$X_{вх}(\omega) = \omega L - \frac{1}{\omega C},$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R},$$

$$I_{вх}(\omega) = \frac{U_{вх}}{Z(\omega)} = \frac{I_0}{1 + \frac{L}{C} R^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2},$$

где  $I_0 = U_{вх}/R$  – ток при резонансе.

Для параллельного контура частотная характеристика:

$$I_{вх}(\omega) = U_{вх} y(\omega) = \frac{1}{g^2 \omega + b^2 \omega}.$$

В случае сложной схемы или неизвестной конфигурации схемы прибегают к снятию частотных характеристик экспериментальным путем. Для этого на вход двухполюсника подают напряжение переменной частоты, неизвестное по модулю и измеряют ток и сдвиг фаз между током и напряжением.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная работа №2 выполняется в Multisim 10.или1.2 Задание, представленное для выполнения лабораторной работы, в полном объеме может быть выполнено в старших версиях Multisim. В работе используется функцио-

нальный генератор (источник синусоидального напряжения), виртуальный двухлучевой осциллограф, осциллограф Agilent, резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы, амперметры, вольтметры, ваттметры.

### Рабочее задание

1. Исследование элементов электрических цепей (угла сдвига фаз  $\varphi$ ).
2. Исследование активного и реактивного сопротивлений элементов цепей синусоидального тока.
3. Проверка выполнения законов Ома и Кирхгофа. Построение векторных диаграмм.
4. Исследование явления резонанса напряжения.
5. Исследование явления резонанса токов.
6. Построение частотных характеристик.

### Порядок проведения лабораторной работы

Параметры элементов в каждой из схем выбираются студентом самостоятельно или по указанию преподавателя. После выполнения каждого всех перечисленных пунктов необходимо сделать вывод, в нём же указать особенности выполнения эксперимента..

Примечание. Питание в схемах осуществляется с помощью виртуального функционального генератора или функционального генератора *Agilent 33120A*. Для снятия осциллограмм используется виртуальный аналог осциллографа *Agilent 54622D*.

#### **- Исследование элементов электрических цепей (угла сдвига фаз $\varphi$ ).**

Собрать электрическую схему в Multisim, представленную на рис. 38. В ней подключить через амперметр активное сопротивление к источнику синусоидального напряжения, с помощью двухлучевого осциллографа наблюдать графики тока и напряжения.

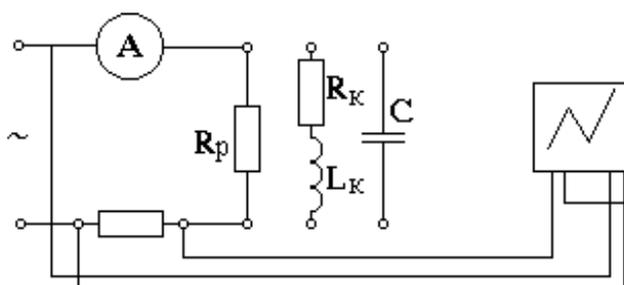


Рис. 38. СхЭ

По осциллограммам определить разность фаз между током и напряжением.

#### **- Исследование активного и реактивного сопротивлений элементов цепей синусоидального тока.**

Собрать электрическую схему в Multisim, представленную на рис.39. В собранной схеме измерить ток, напряжение и мощность на резистивном, индук-

тивном и емкостном элементах электрической цепи. Полученные результаты занести в таблицу 2.2.

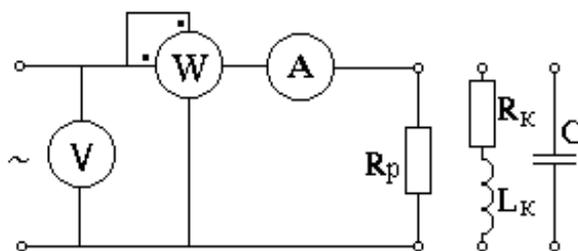


Рис. 39. СхЭ

Таблица 2.2.

Активное сопротивление				Индуктивная катушка					Конденсатор			
, В	, А	, Вт	$R_p$ , Ом	, В	, А	, Вт	$R_k$ , Ом	$X_k$ , Ом	, В	, А	, Вт	$C$ , Ом

**- Проверка выполнения закона Ома и законов Кирхгофа. Построение векторных диаграмм.**

Собрать электрические схемы в среде Multisim (рис. 40). Измерить ток и напряжение на входе схемы и на всех её элементах. Результаты свести в таблицу 2.3.

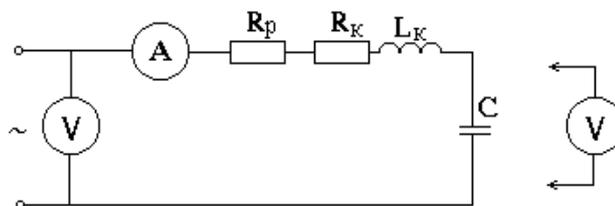


Рис. 40. Электрическая схема

По данным, взятым из таблицы, построить векторную диаграмму цепи. Проверить (по полученной диаграмме) адекватность закона Ома и правил Кирхгофа.

Таблица 2.3.

$V_{вх}$ , В	$I_{вх}$ , А	$V_R$ , В	$V_k$ , В	$V_C$ , В

**- Исследование явления резонанса напряжений.**

Для исследования явления резонанса напряжений собрать схему (рис.1) . Изменяя частоту генератора сигналов, тока и напряжения полу-

читать совпадение их по фазе. В схеме имеет место резонанс. Записать значение резонансной частоты.

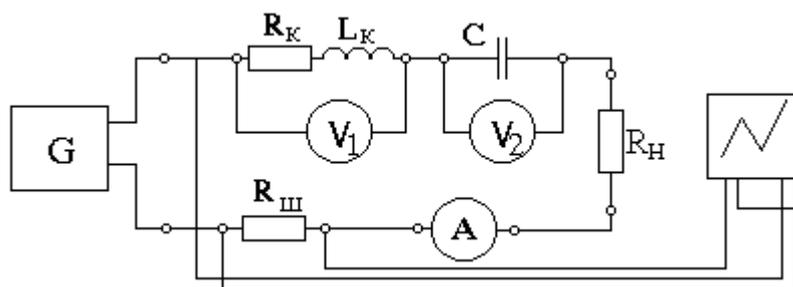


Рис. 41. Рассчитать  $\omega_0$ ,  $I_0$ ,  $U_L$ ,  $U_{C0}$ . Результаты опыта занести в таблицу 2.4.

$$R = P / I^2, X = \frac{U}{I} - R; U_L = \omega_0 L I_0; U_C = \frac{1}{\omega_0} \cdot I_0.$$

Таблица 2. 4.

Параметры схемы					Опыт				Расчет			
вх'	к'	к'	н'	'	о'	о'	ко'	со'	о'	о'	ко	со'
В	Ом	Гн	Ом	Ф	1/с	А	В	В	1/с	А	В	В

Примечание. Если показания приборов  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $A$  становятся чрезмерно большими, уменьшить величину напряжения генератора сигналов для исключения вывода из строя схемы.

#### - Исследование явления резонанса токов.

Для исследования явления резонанса токов собрать электрическую схему (рис. 42) в Multisim. Изменяя частоту генератора сигналов, наблюдать за осциллограммами тока и напряжения. При совпадении их по фазе в схеме имеет место резонанс. Записать значение резонансной частоты.

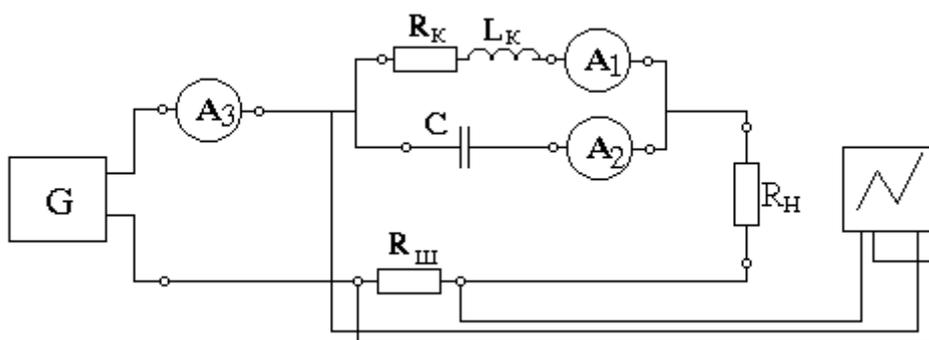


Рис. 42. СхЭ

Результаты опыта занести в таблицу 2.5. Для расчета использовать следующие формулы:

$$\omega_0 = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{L}{C} - R_K^2}$$



, мА									
------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Примечание. Количество и шаг изменения частоты выбрать по указанию преподавателя.

### Содержание отчета

Отчет оформляется в соответствии с ГОСТ .

Отчет должен содержать:

1. электрические схемы опытов;
2. результаты измерений, расчеты и выводы по каждому опыту;
3. графики, осциллограммы;
4. вывод по лабораторной работе.

### Контрольные вопросы:

1. Что такое комплексный ток и напряжение?
2. Что такое действующее значение переменного тока?
3. Как определить сдвиг фаз между током и напряжением в последовательной цепи, содержащей  $R, L, C$ ?
4. Как определить комплексное сопротивление цепи по показаниям вольтметра, амперметра и ваттметра?
5. Сформулируйте законы Кирхгофа в символической форме.
6. Векторные диаграммы. Построение векторных диаграмм. Особенности применения.
7. Особенности построения векторной диаграммы для последовательной цепи.
8. Особенности построения векторной диаграммы для параллельного контура.
9. Явление резонанса. Особенности резонанса токов и напряжения в электрических цепях синусоидального тока?
10. Что называется частотными характеристиками двухполюсника?
11. Что такое полоса пропускания контура?
12. Что такое резистор? Особенности применения элемента в цепях переменного тока?
13. Что такое катушка индуктивности? Назначение? Особенности применения в цепях переменного тока?
14. Объясните характер зависимостей  $I_{вх}(\omega)$ ?
15. Что такое конденсатор? Назначение? Особенности применения в цепях переменного тока?
16. Методы анализа Multisim, применяемые в данной лабораторной работе.
17. Объясните расхождение расчетных и опытных данных в лабораторной работе.

## Лабораторная работа № 3

### «Исследование переходных процессов при разряде конденсатора»

#### Цель работы:

Ознакомиться с иллюстрацией переходного процесса в лабораторных условиях и выявить факторы, влияющие на его характер и продолжительность; экспериментально исследовать апериодический и колебательный переходные процессы в линейных электрических цепях первого и второго порядков и сопоставление экспериментальных результатов с предварительно рассчитанными параметрами.

Оборудование.

#### Содержание лабораторной работы:

1. Экспериментальное исследование поведения электрических цепей содержащих элементы создающих переходные процессы;
  2. Экспериментальная проверка законов изменения тока и напряжений на участках цепи, содержащей R и C, или R L , при разряде конденсатора.
  3. Экспериментальное исследование апериодического переходного процесса в цепи с одним реактивным элементом.;
  4. Экспериментальное подтверждение явления переходного процесса;
  5. Экспериментальные проверки 2-го обобщенного закона коммутации.
- Инструменты, используемые при выполнении работы:

При выполнении лабораторной работы №3 в качестве измерительного оборудования используются виртуальные аналоги реальных инструментов системы автоматизированного проектирования **Multisim**.

#### Теоретические сведения:

##### **Переходный процесс**

Под переходным (динамическим, нестационарным) процессом, или режимом, в электрических цепях понимается процесс перехода цепи из одного установившегося состояния (режима) в другое. При установившихся, или стационарных, режимах в цепях постоянного тока напряжения и токи неизменны во времени, а в цепях переменного тока они представляют собой периодические функции времени. Режим покоя, когда все токи и напряжения в цепи равны нулю, также считается установившимся. Установившиеся режимы при заданных и неизменных параметрах цепи полностью определяются только источником энергии. Следовательно, источники постоянного напряжения (или тока) создают в цепи постоянный ток, а источники переменного напряжения (или тока) – переменный ток той же частоты, что и частота источника энергии.

Переходные процессы возникают при любых изменениях режима электрической цепи: при подключении и отключении цепи, при изменении нагруз-

ки, при возникновении аварийных режимов (короткое замыкание, обрыв провода и т.д.).

В установившемся режиме каждый ток или напряжение имеет постоянную величину (режим постоянного тока) или постоянную амплитуду, частоту и начальную фазу (режим гармонического тока) (рис.45).

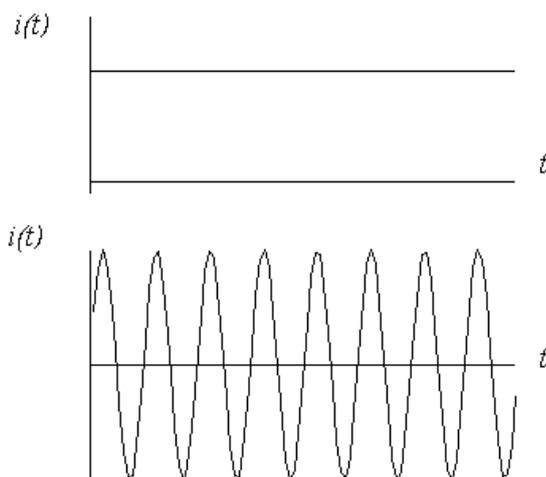


Рис. 45 Осциллограммы постоянного и гармонического токов

Изменения в электрической цепи можно представить в виде тех или иных переключений, называемых в общем случае коммутацией. Физически переходные процессы представляют собой процессы перехода от энергетического состояния, соответствующего предшествующие коммутационному режиму, к энергетическому состоянию - после..

### Законы коммутации

- Ток в любом индуктивном элементе является непрерывной функцией времени и не может изменяться скачком, в частности для момента коммутации  $t=0$

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = i_L(0)$$

- Напряжение на любом емкостном элементе является непрерывной функцией времени и не может изменяться скачком. В частности для момента коммутации

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = u_C(0)$$

Таким образом, токи в индуктивностях и напряжения на емкостях в начальный момент  $t = 0_+$  после коммутации имеют те же значения, что и непосредственно перед коммутацией при  $t = 0_-$  и затем плавно изменяются. Заметим, что токи и напряжения на резисторах, а также токи через емкости и напряжения на индуктивностях могут изменяться скачкообразно, так как с ними непосредственно не связана запасаемая в цепи энергия.

### Длительность переходного процесса

Переходные, это быстро протекающие процессы, длительность которых составляет десятые, сотые, а иногда и миллиардные доли секунды. Сравнительно редко длительность их достигает секунд и десятков секунд. Так как работа

многих электротехнических устройств, особенно устройств промышленной электроники, основана на переходных процессах и эти моменты зачастую наблюдаются изменения допустимых параметров электрической цепи, изучение переходных процессов становится весьма важным.

### Методы расчета переходных процессов.

Переходный процесс в линейной цепи описывается линейными дифференциальными уравнениями, а в нелинейной - нелинейными. В данном курсе будем рассматривать переходные процессы только в линейных цепях, содержащих элементы с постоянными параметрами.

Для решения линейных дифференциальных уравнений с постоянными параметрами разработаны различные аналитические методы: *классический, оперативный, метод интеграла Фурье* и т.д.

**При анализе переходных процессов в электрических цепях считается, что:**

- рубильники включаются и размыкаются мгновенно, без возникновения электрической дуги;
- время переходного процесса, теоретически бесконечно длительное, (переходный режим асимптотически приближается к новому установившемуся режиму), ограничивают условным пределом – длительностью переходного процесса;
- установившийся режим после коммутации рассчитывают при теоретическом условии  $t \rightarrow \infty$ , т.е. когда после коммутации прошло бесконечно большое время.

Установившийся режим до коммутации рассчитывают обычно в предположении, что к моменту коммутации в цепи закончился предыдущий переходный процесс. Хотя иногда приходится анализировать переходные процессы, возникающие в цепи, когда предыдущий переходный процесс, вызванный прежними коммутациями, еще не закончился. Но это не изменяет теоретическую постановку задачи.

Анализ переходных процессов производят путем решения дифференциальных уравнений, составленных для исследуемой электрической цепи на основе законов Кирхгофа или метода контурных токов.

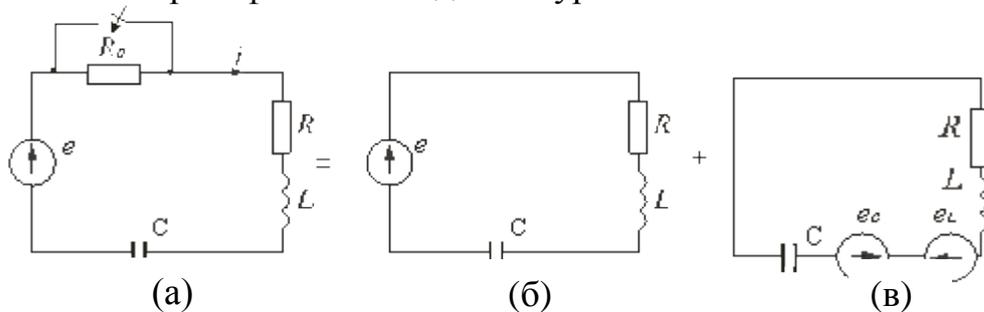


Рис. 46. Метод контурных токов

Пусть в некоторой цепи (рис. 46) внезапно изменяется сопротивление. До коммутации в цепи существовали сопротивления  $R_0$  и  $R$ , после коммутации остается только  $R$ . Требуется определить переходный ток  $i$ . Электрическое состояние схемы после коммутации описывается интегрально-дифференциальным уравнением, записанным на основании II закона Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = e. \quad (a)$$

Если это уравнение продифференцировать по времени получим линейное дифференциальное уравнение второго порядка, у которого в качестве постоянных коэффициентов выступают параметры цепи или их комбинации:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{de}{dt}. \quad (б)$$

Из математики известно, что полное решение линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами находят в виде суммы частного решения неоднородного и общего решения соответствующего однородного уравнения.

Поскольку в правой части дифференциальных уравнений, описывающих электрическое состояние цепей, обычно находится напряжение (или ток) источника (внешняя вынуждающая сила), то частное решение находят из анализа установившегося режима после коммутации. Отсюда этот режим называют *принужденным* и соответственно токи или напряжения, найденные в данном режиме, называют *принужденными*. Расчет принужденного режима, когда внешние источники вырабатывают постоянную или синусоидальную э.д.с. (ток), не представляет трудностей и может быть осуществлен любым известным методом.

**Однородное дифференциальное уравнение** получают из выражения (5(a)) путем "освобождения" его от правой части. Физически это означает, что исследуемая цепь "освобождается" от внешней вынуждающей силы. Токи или напряжения, найденные при решении однородного дифференциального уравнения, называются *свободными*. Свободные токи и напряжения являются результатом действия внутренних источников схемы: э.д.с. самоиндукции, возникающих в катушках, и напряжений на конденсаторах, когда и те, и другие не уравновешены внешними источниками.

Схематически анализ переходного процесса может быть представлен как результат наложения двух режимов: принужденного и свободного. Схема на рис.46 (б) должна быть рассчитана в установившемся (принужденном) режиме, а схема на рис.46(в) --- в режиме, когда цепь освобождена от внешних источников. Действительный (**переходный**) ток в соответствии с принципом суперпозиции равен сумме установившегося (принужденного) и свободного токов:

$$i = i_y + i_{св}$$

Заметим, что физически существует только переходные токи и напряжения, а разложение их на свободные и принужденные составляющие является математическим приемом, позволяющим упростить расчет переходных процессов в линейных цепях. Напомним, что принцип суперпозиции применим лишь к линейным цепям.

Существуют различные методы решения однородного дифференциального уравнения, полученного из выражения (5(б)):

$$\frac{d^2 i_{ce}}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di_{ce}}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot i_{ce} = 0. \quad (в)$$

Классический метод анализа переходных процессов заключается в непосредственном интегрировании дифференциальных уравнений. Решение находят в виде суммы экспонент:

$$i_{ce} = A_1 * e^{p_1 t} + A_2 * e^{p_2 t},$$

где число слагаемых равно порядку дифференциального уравнения.

После подстановки экспонент  $A_k * e^{p_k t}$  в исходное уравнение (5(в)) и дифференцирования можно получить характеристическое уравнение, из которого определяют корни  $p_1, p_2$ . Если встречаются кратные корни (например,  $p_1 = p_2 = P$ ), решение имеет вид  $A_1 * e^{Pt} + A_2 * e^{Pt}$ .

Постоянные интегрирования  $A_1, A_2$  находят из начальных условий, которые определяют с помощью законов коммутации. Различают независимые и зависимые (после коммутационные) начальные условия. К первым относят значения токов через индуктивности и значения напряжений на емкостях, известные из до коммутационного режима работы цепи. Значения остальных токов и напряжений при  $t = 0$  в после коммутационной схеме, определяемые по независимым начальным значениям из законов Кирхгофа для схемы после коммутации, называют зависимыми начальными значениями.

Классический метод анализа применяют обычно для анализа процессов в несложных электрических цепях.

### Классический метод расчета

Классический метод расчета переходных процессов заключается в непосредственном интегрировании дифференциальных уравнений, описывающих изменения токов и напряжений на участках цепи в переходном процессе.

В общем случае при использовании классического метода расчета составляются уравнения электромагнитного состояния цепи по законам Ома и Кирхгофа для мгновенных значений напряжений и токов, связанных между собой на отдельных элементах цепи соотношениями, приведенными в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Связь мгновенных значений напряжений и токов на элементах электрической цепи

<b>Резистор (идеальное активное сопротивление)</b>	<b>Катушка индуктивности (идеальная индуктивность)</b>	<b>Конденсатор (идеальная емкость)</b>
--	--	--

$U_R = R i_R$	$U_L = L \frac{di_L}{dt};$ <p style="text-align: center;">При наличии магнитной связи с катушкой, обтекаемой током,</p> $U_L = L \frac{di_L}{dt} \pm M \frac{di_M}{dt}$	$i_C = C \frac{dU_C}{dt}$ $U_C = \frac{1}{C} \int i_C dt$
---------------	---	---

Настоящая работа ставит задачу экспериментально проверить установленные теоретические законы изменения тока и напряжений в переходных процессах первого и второго порядков на участках цепи, содержащей  $R$  и  $C$ , или  $R$ ,  $L$  и  $C$  в схемах, представленных на рис.47 и 48, при разряде конденсатора.

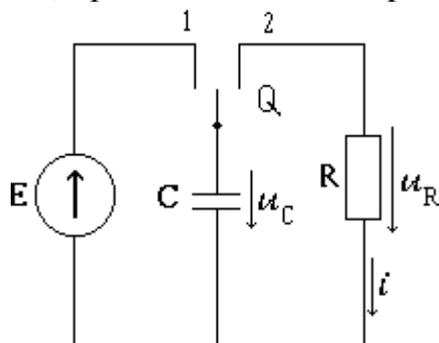


Рис. 47 СхЭ

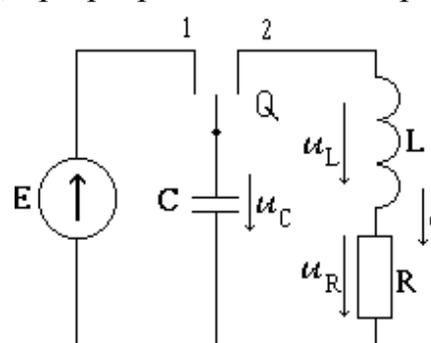


Рис. 48 СхЭ

В этих схемах заряженный конденсатор переключается с контакта 1 на контакт 2 переключателя  $Q$ . После переключения конденсатор разряжается по ветви, содержащей индуктивность  $L$  и сопротивление  $R$ . При отсутствии индуктивности имеем переходный процесс первого порядка, при наличии - второго. Процесс может быть записан в функции времени аналитически (в виде формулы), графически (кривая на графике) и экспериментально в виде осциллограммы.

Аналитически переходный процесс можно записать после решения следующего интегро-дифференциального уравнения, вытекающего из 2-го закона Кирхгофа.

Для процесса первого порядка:

$$-u_C + u_R = \frac{1}{C} \int i dt + iR = 0 \quad (3.1)$$

Для процесса второго порядка:

$$-u_c + u_L + u_R = \frac{1}{C} \int i dt + L \frac{di}{dt} + iR = 0 \quad (3.2)$$

При этом начальные условия определяются **законами коммутации**.

**1-й закон:** Ток в ветви с индуктивностью в первый момент после коммутации равен току в этой же ветви в момент, непосредственно предшествующий коммутации

$$(i_L(0) = i_L(0.)).$$

**2-й закон:** Напряжение на емкости в первый момент после коммутации равно напряжению на этой же емкости в момент, непосредственно предшествующий коммутации

$$(u_C(0) = u_C(0.)).$$

Иначе говоря, ток на индуктивности и напряжение на емкости не могут изменяться скачком. В рассматриваемых схемах до коммутации (положение ключа 1) напряжение на конденсаторе равно ЭДС источника, а ток через индуктивность не течет. Таким образом, совокупность независимых начальных условий для схем (рис. 3.1) имеет вид

$$\text{для процесса первого порядка:} \quad u_C(0) = E \quad (3.3)$$

$$\text{для процесса второго порядка:} \quad i(0) = 0, u_C(0) = E \quad (3.4)$$

Напряжение и ток в переходном процессе в общем случае содержат две компоненты: принужденную -  $u_{Cпр}$ , обусловленную наличием источников ЭДС в схеме после коммутации, и свободную -  $u_{Cсв}$ , обусловленную свободной энергией, запасаемой в магнитном поле индуктивности и электрическом поле емкости:

$$u_C(t) = u_{Cпр}(t) + u_{Cсв}(t) \quad (3.5a)$$

Так как в данной цепи при переключении с клеммы 1 на клемму 2 ЭДС исключается, то и принужденные составляющие напряжения и тока будут отсутствовать, т.е.

$$u_{Cпр}(t) = 0, u_C(t) = u_{Cсв}(t).$$

Дифференциальному уравнению (5.1) соответствует характеристическое уравнение  $1/pC + R = 0$

Его корень  $p = -1/RC$ , а общий вид свободной составляющей:

$$u_C(t) = A e^{-pt} = A e^{-\frac{t}{\tau}} = A e^{-\frac{t}{R_0 C}}.$$

Постоянная интегрирования  $A$  определяется из начального условия (3.3) и, следовательно,  $A = E$ .

$$\text{Окончательно } u_C(t) = E e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Величина  $\tau$  называется *постоянной времени* процесса и численно равна времени, в течение которого свободная составляющая уменьшается в  $e$  (2,72) раз.

Дифференциальному уравнению (5.2) соответствует характеристическое уравнение  $1/pC + pL + R = 0$ ,  
или  $p^2 + pR/L + 1/LC = 0$ .

Решая, получим следующие два корня:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}, \quad (3.5)$$

где  $\delta = R/2L$  - коэффициент затухания свободного тока, 1/с;

$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  - собственная угловая частота, 1/с.

Как видно из (5.5), возможны *три случая* значений корней характеристического уравнения в зависимости от знака подкоренного выражения. Соответственно существует три типа, или характера, переходных процессов. Рассмотрим их применительно к исследуемой цепи.

1) Случай *апериодического* разряда конденсатора.

Имеет место, когда корни действительные и различные, то есть  $\delta > \omega_0$ , или  $R/2L > 1/\sqrt{LC}$ , или  $R > 2\rho$ , где  $\rho = \sqrt{LC}$  - волновое сопротивление контура.

В этом случае переходный процесс описывается следующим уравнением:

$$i(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

где  $A_1$  и  $A_2$  - постоянные интегрирования, которые определяют по начальным условиям (5.4):

$$i(0) = A_1 + A_2 = 0$$

$$u_C(0) = u_L(0) + u_R(0) = Li'(0) + Ri(0) = p_1 A_1 L + p_2 A_2 L = E$$

То есть необходимо решить систему уравнений

$$A_1 + A_2 = 0; p_1 A_1 + p_2 A_2 = E/L \quad (3.6)$$

Откуда 
$$A_1 = -A_2 = \frac{E}{L} \frac{1}{p_1 - p_2}.$$

Окончательно имеем закон изменения тока в цепи

$$i(t) = \frac{E}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}),$$

если принять  $|p_1| < |p_2|$ , то

$$i(t) = \frac{E}{2L\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t});$$

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = \frac{E}{2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t});$$

(3.7)

$$u_C(t) = u_L + u_R = L \frac{di}{dt} + iR = \frac{E}{2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} (p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t})$$

Графики зависимостей  $i(t)$ ,  $u_L(t)$  и  $u_C(t)$  изображены на рис.49.

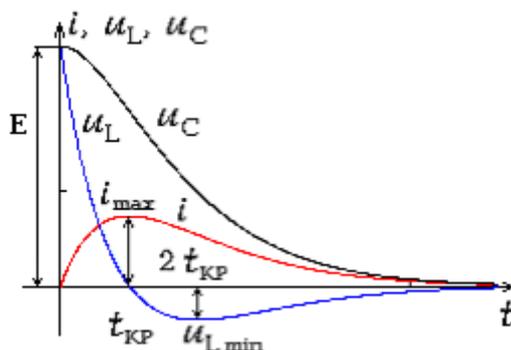


Рис. 49. Графики зависимостей  $i(t)$ ,  $u_L(t)$  и  $u_C(t)$

Из уравнения  $i'(t)=0$  (или  $u_L(t)=0$ ) можно найти значение критического времени, соответствующее максимуму разрядного тока:

$$p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t} = 0,$$

откуда 
$$t_{кр} = \frac{1}{p_1 - p_2} \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right).$$

Напряжение на индуктивности начинает изменяться от значения  $u_L = E$ , с течением времени спадает по аperiodическому закону и при  $t = t_{кр}$  достигает нулевого значения, затем меняет знак и достигает своего отрицательного максимума при  $t = 2t_{кр}$ , в дальнейшем, не меняя знака, уменьшается до нуля.

Энергетическая сторона переходного процесса объясняется следующим образом. Потенциальная энергия электрического поля заряженного конденсатора ( $CE^2/2$ ) с течением времени расходуется на рассеивание в виде тепла в сопротивлении  $R$  и на увеличение запаса потенциальной энергии в магнитном поле индуктивности ( $LI^2/2$ ). От нуля до  $t_{кр}$  энергия магнитного поля увеличивается, достигая своего максимума вместе с током, затем убывает, а тепловые потери в сопротивлении  $R$  уменьшаются не только за счет убыли энергии конденсатора, но и за счет уменьшения энергии, запасенной индуктивностью.

2) Случай критического разряда.

Имеет место, когда корни действительные и равные, то есть

$$\delta = \omega_0, \text{ или } R/2L = 1/\sqrt{LC}, \text{ или } R = 2\rho, \quad p_1 = p_2 = -\delta.$$

В этом случае переходный процесс описывается следующим уравнением:

$$i(t) = (A_1 + A_2 t) e^{-\delta t},$$

где  $A_1$  и  $A_2$  - постоянные интегрирования, которые определяют по начальным условиям таким же образом, как это было сделано для аperiodического разряда. Окончательно выражения, описывающие критический разряд в схеме, имеют вид:

$$i(t) = \frac{E}{L} t e^{-\delta t} ;$$

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = E(1 - \delta t) e^{-\delta t} ; \quad (3.8)$$

$$u_C(t) = u_L + iR = E(1 + \delta t) e^{-\delta t} .$$

Кривые критического переходного процесса по характеру аналогичны кривым (рис.49).

3) Случай колебательного разряда конденсатора.

Имеет место, когда корни комплексно-сопряженные, то есть

$$\delta < \omega_0, \quad \text{или} \quad R/2L < 1/\sqrt{LC}, \quad \text{или} \quad R < 2\rho,$$

$$p_1 = -\delta + j\omega, \quad p_2 = -\delta - j\omega,$$

где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$  - угловая частота затухающих колебаний.

В этом случае переходный процесс описывается следующим уравнением:

$$i(t) = A e^{-\delta t} \sin(\omega t + \alpha) ,$$

где  $A$  и  $\alpha$  - постоянные интегрирования, определяемые по начальным условиям. Получим:

$$A = E/\omega L, \quad \alpha = 0.$$

Окончательно выражения, описывающие критический разряд в схеме, имеют вид:

$$i(t) = \frac{E}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) ,$$

$$u_L(t) = -E \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \alpha') , \quad (3.9)$$

$$u_C(t) = E \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \alpha') ,$$

где  $\alpha' = \arctg \frac{\omega}{\delta}$ .

Графики кривых при колебательном разряде конденсатора изображены на рис. 3.3.

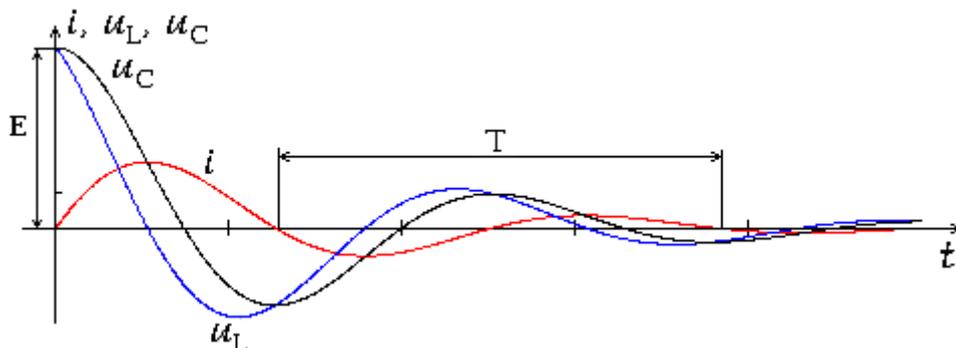


Рис. 50. Графики кривых при колебательном разряде конденсатора

Период затухающих колебаний  $T=2\pi/\omega$ .

Помимо описанных возможны такие случаи коммутации, когда попытка использования законов коммутации в сформулированной выше форме не дает возможности определить начальные условия процесса, так как приводит к противоречию, схемы рис.51, 52.

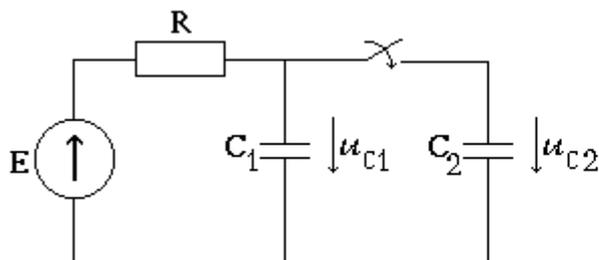


Рис. 51. Схема RC

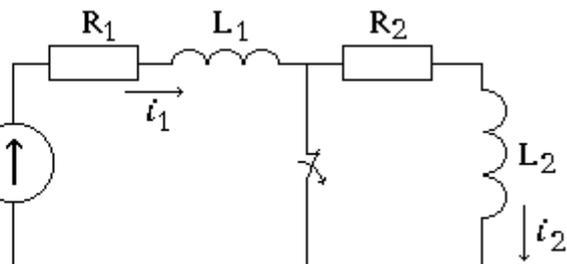


Рис. 52. Схема RL

В схеме рис.51, применяя закон коммутации, запишем  $u_{C1}(0) = E$  и  $u_{C2}(0) = 0$ , но с другой стороны после коммутации  $u_{C1}(0) = u_{C2}(0)$ . Так же и в схеме, (рис.52): ток  $i_1$  до коммутации равен  $E/R_1$ , а ток  $i_2$  равен нулю, но после коммутации это просто один и тот же ток, то есть  $i_1 = i_2$ . Можно заметить, что в этих схемах при коммутации происходит мгновенное изменение одного из параметров цепи: емкости в первом случае и индуктивности во втором. В подобных случаях следует использовать **обобщенные законы коммутации**.

**1** Суммарное потокосцепление в любом замкнутом контуре не  
**-й:** может измениться скачком  $(\sum(L \cdot i)|0+ = \sum(L \cdot i)|0-)$   
**закон**

**2** Суммарный заряд на емкостях, подключенных к какому-либо  
**-й:** узлу, не может измениться скачком  $(\sum(C \cdot u)|0+ = \sum(C \cdot u)|0-)$   
**закон**

Рассмотрим использование обобщенного закона коммутации на примере схемы рис. 3.4. Здесь  $u_{C1}(0_-) = E$ ,  $u_{C2}(0_-) = 0$ .

Суммарный заряд до коммутации:

$$Q(0_-) = C_1 u_{C1}(0_-) + C_2 u_{C2}(0_-) = C_1 E.$$

Суммарный заряд в первый момент после коммутации:

$$Q(0_+) = C_1 u_{C1}(0_+) + C_2 u_{C2}(0_+) = (C_1 + C_2) u_C(0),$$

так как  $u_{C1}(0_+) = u_{C2}(0_+) = u_C(0)$ .

По 2-му обобщенному закону коммутации

$$Q(0_+) = Q(0_-), \text{ или } (C_1 + C_2) \cdot u_C(0) = C_1 E,$$

откуда  $u_C(0) = C_1 E / (C_1 + C_2)$  - независимое начальное условие для переходного процесса в цепи.

График процесса изображен на рис.53.

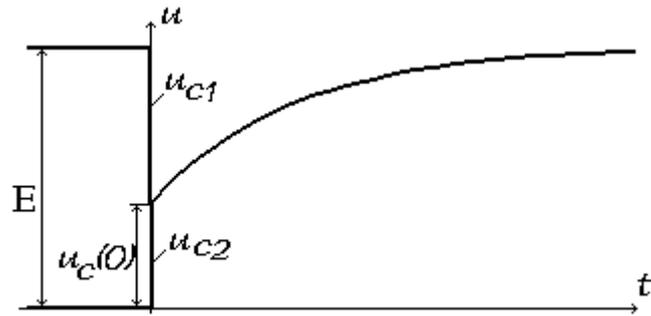


Рис. 53. График переходного процесса

**Рабочее задание**

Установить экспериментально влияние параметров  $R$  и  $C$  цепи апериодического разряда первого порядка на постоянную времени в соответствии с номером в журнале группы. Данные берутся из таблицы .2. Снять осциллограмму разряда.

Таблица 3..2

№ Варианта	Е(В)	R(Ом)	С(Ф)
1	20	2	100
2	25	4	200
3	30	6	150
4	35	8	250
5	40	10	300
6	45	12	350
7	50	14	400

2.2 Определить постоянную времени апериодического разряда конденсатора для цепи первого порядка. Результат сравнить с расчетной величиной.

2.3 В цепи второго порядка экспериментально определить влияние параметров схемы на вид переходного процесса. Снять осциллограмму колебательного разряда конденсатора.

2.4 По осциллограмме колебательного разряда определить угловую частоту затухающих колебаний и коэффициент затухания. Результаты сравнить с соответствующими расчетными величинами.

2.5 Собрать схему для проверки 2-го обобщенного закона коммутации, определить начальные условия расчетом, сравнить с осциллограммой.

**Описание лабораторной установки**

В лабораторной работе используется следующее оборудование: источник постоянного напряжения, поляризованное реле, конденсатор, индуктивные ка-

тушки, магазин сопротивлений и электронно-лучевой осциллограф. Поляризованное реле обеспечивает повторяемость переходного процесса с частотой 50 Гц и, таким образом, возможность наблюдения его на экране осциллографа.

Данная лабораторная работа выполняется в среде NI Multisim 10.1.1.

### Порядок проведения лабораторной работы

**1. Собрать схему, изображенную на рис.54.** Изменяя параметры схемы  $R$  и  $C$ , наблюдать по экрану осциллографа, как эти изменения влияют на кривую напряжения разряда.

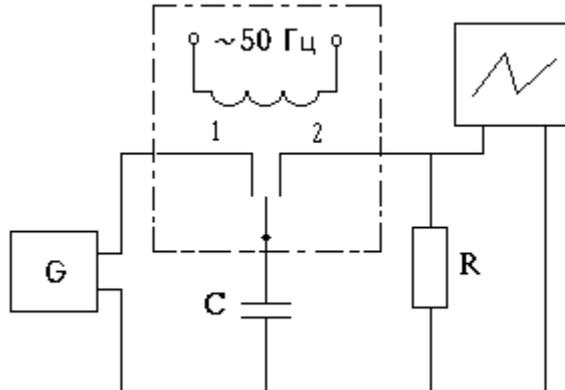


Рис. 54 Электрический контур

Изменяя параметры схемы  $R$  и  $C$ , наблюдать по экрану осциллографа, как эти изменения влияют на кривую напряжения разряда.

**Постоянная времени определяется по кривой разряда, наблюдаемой на экране осциллографа, при определенных фиксированных значениях емкости и сопротивления.**

Время, в течение которого переключатель  $\Pi$  находится на контакте 2, достаточно для того, чтобы разряд конденсатора закончился. В положении переключателя 1 конденсатор практически мгновенно вновь заряжается до напряжения источника. Процесс повторяется с частотой, определяемой частотой переключения поляризованного реле, и при регулировании развертки осциллографа можно добиться изображения на экране только одного процесса, картинка, подобной рис.55.

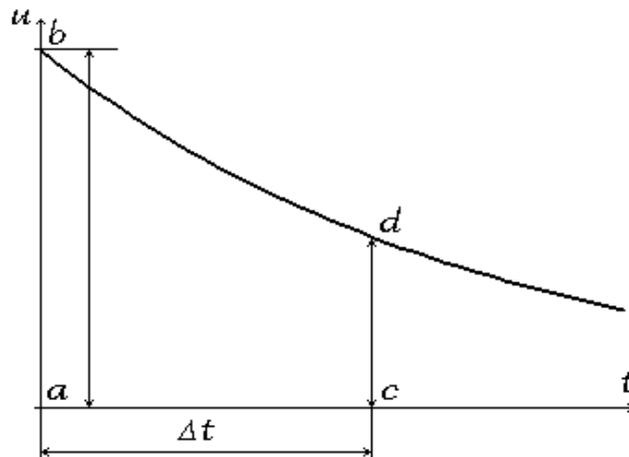


Рис. 55. Осциллограмма

Напряжение на конденсаторе уменьшается по аperiodическому закону

$$u_C(t) = E e^{-\frac{t}{\tau}} = E e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Приняв за 0 точку а, имеем

$$u_C(0) = E = m_U \cdot ab, \quad (3.10)$$

где  $m_U$  - масштаб напряжений на осциллографе. В точке с, то есть при  $t = \Delta t$ , имеем

$$u_C(\Delta t) = E e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = m_U \cdot cd. \quad (3.11)$$

Поделив (3.10) на (3.11), получим

$$\frac{ab}{cd} = e^{\frac{\Delta t}{\tau}}.$$

Откуда

$$\tau = \frac{\Delta t}{\ln \frac{ab}{cd}}, \quad (3.12)$$

Таким образом, для определения постоянной времени необходимо, задавшись интервалом  $\Delta t$  на экране осциллографа (несколько клеток по горизонтали), измерить соответствующие отрезки  $ab$  и  $cd$ , затем выполнить расчет  $\tau$  по формуле (3.12).

Расчетное (теоретическое) значение  $\tau = RC$ .

**Собрать схему цепи, изображенной на рис.56, установив индуктивную катушку с известной индуктивностью и активным сопротивлением.**

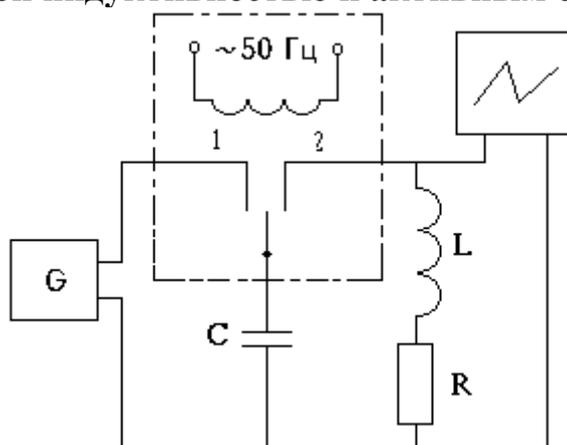


Рис. 56 СхЭ

Изменяя параметры схемы  $R$  и  $C$ , наблюдать по экрану осциллографа, как эти изменения влияют на кривую напряжения разряда. Обратите внимание на

изменение характера процесса (апериодический или колебательный) при сопротивлении большем и меньшем, чем  $R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$

**4. Зафиксировав параметры цепи, при которых явно имеет место колебательный процесс, по осциллограмме (примерный ее вид представлен на рис.57) необходимо определить угловую частоту  $\omega$  и затухание  $\delta$ .**

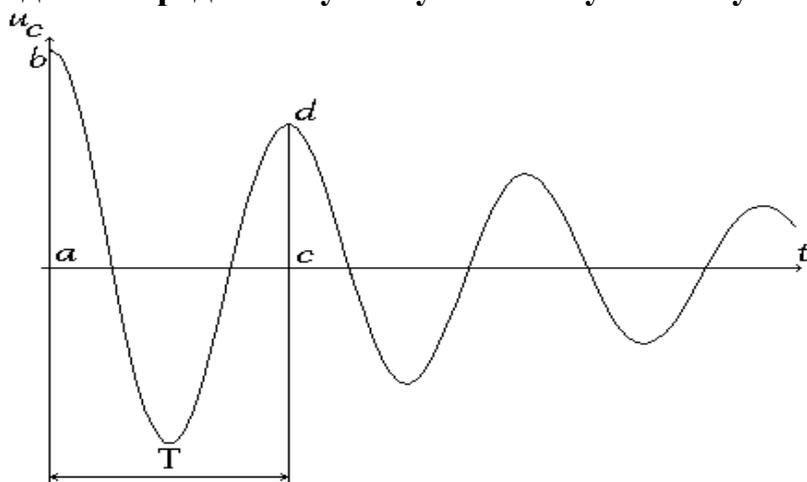


Рис. 57. Осциллограмма к схеме на Рис. 56

Угловая частота вычисляется как  $\omega = 2\pi/T$ , где  $T$  — период колебаний, определяемый непосредственно по осциллограмме, а затухание вычисляется как  $\ln \delta = 1/\tau$ , где постоянная времени  $\tau$  определяется аналогично опыту с процессом первого порядка, то есть по формуле (3.12), в которой в качестве  $\Delta t$  следует взять период  $T$ .

Соответствующие расчетные (теоретические) значения:

$$\delta = \frac{R}{2L}, \text{ и } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \text{ где } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.13)$$

**5. Для проверки 2-го обобщенного закона коммутации собрать схему, изображенную на рис.58.**

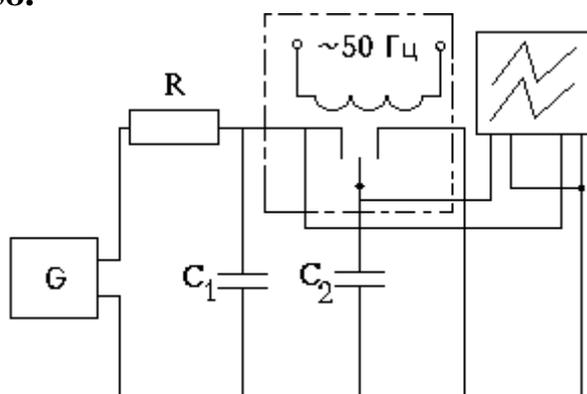


Рис. 58 СхЭ

В опыте используются две батареи конденсаторов. Установить значения емкостей  $C_1$  и  $C_2$ . Рассчитать начальное значение напряжения по формуле

$$u_C(0) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} E$$

и постоянную времени процесса  $\tau = R(C_1 + C_2)$ .

Снять осциллограммы напряжений  $u_{C1}$  и  $u_{C2}$ . По ним определить начальное значение  $u_C(0)$  и постоянную времени и сравнить с расчетом.

### Содержание отчета

Отчет оформляется в соответствии с ГОСТ и требованиями МГТУ ГА.

Отчет должен содержать:

5. электрические схемы опытов;
6. результаты измерений, расчеты и выводы по каждому опыту;
7. графики, осциллограммы;
8. вывод по лабораторной работе.

### 5.9. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы коммутации.
2. Сформулируйте обобщенные законы коммутации.
3. Что такое принужденная и свободная составляющие токов и напряжений в переходном процессе?
4. Как по корням характеристического уравнения определить характер переходного процесса.
5. Запишите выражение для свободной составляющей тока при апериодическом, критическом и колебательном процессах.
6. Объясните энергетический процесс при разряде конденсатора.
7. Как определить собственную частоту и волновое сопротивление контура через его параметры?
8. Объясните, почему при апериодическом разряде напряжение на индуктивности в момент  $t = t_{кр}$  имеет нулевое значение, а при  $t = 2t_{кр}$  наступает его отрицательный максимум?
9. Как угловая частота и затухание при колебательном разряде зависят от параметров цепи R, L, C?
10. Что такое постоянная времени переходного процесса?

### **Задачи**

В данном разделе приведены задачи из следующих тем: «Электрические цепи постоянного тока», «Электрические цепи переменного тока», «Переходные процессы».

### Электрические цепи постоянного тока

**Задача №1.** Построить ВАХ источника электрической энергии и определить внутреннее сопротивление источника энергии, зная, что  $U_{xx} = 50$  В, а  $I_{кз} = 5$  А.

**Задача №2.** Найдите эквивалентное сопротивление участка цепи (рис.59).

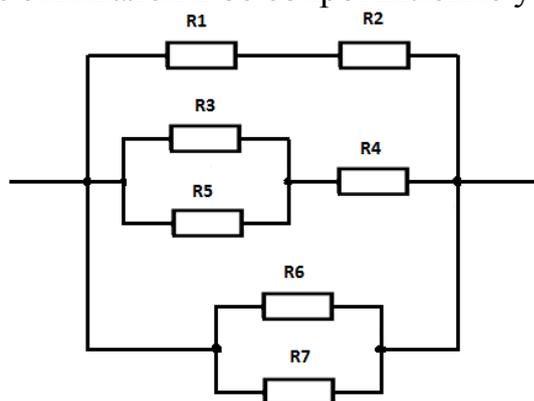


Рис.59 Участок цепи

**Задача №3.** Определить ток в общем виде, протекающий в ветви (рис.60). Параметры элементов:  $E = 100$  В,  $R_1 = 50$  Ом,  $R_2 = 40$  Ом,  $U_{xx} = 400$  В.

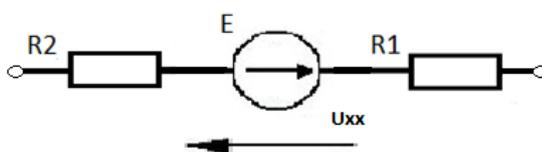


Рис.60. Участок цепи

**Задача №4.** Преобразовать схему замещения реального источника электрической энергии, имеющего следующую ВАХ (рис.61), и указать параметры этой схемы замещения.

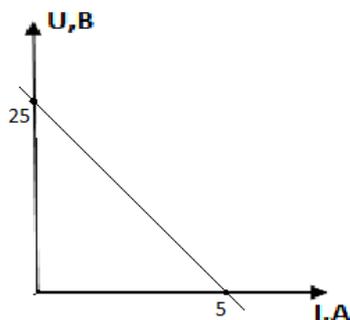


Рис.61 ВАХ

**Задача №5.** Найти зависимость  $U(I)$  в схеме, представленной на рис.62.

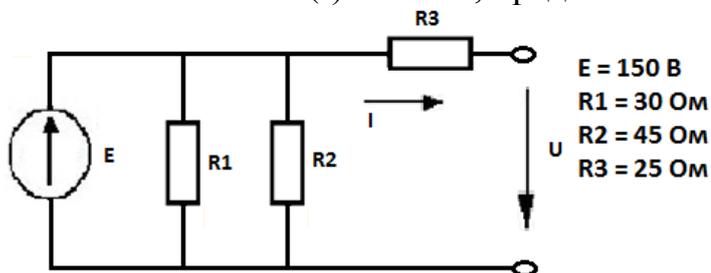


Рис.62 Участок цепи

**Задача №6.** Написать нужное количество уравнений по первому и второму закону Кирхгофа для схемы, представленной на рис.63, а так же, используя произвольные значения сопротивлений и источников тока, найти токи в схеме.

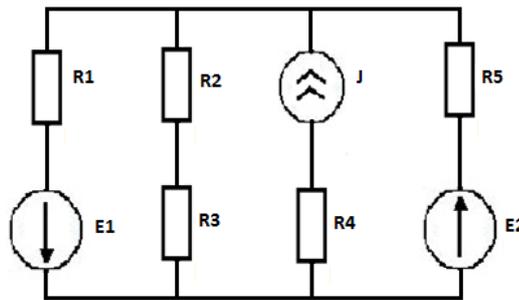


Рис.63. Электрический контур

**Задача №7.** Найти токи в схеме, представленной на рисунке, используя метод частичных схем (значения сопротивлений и источников электрической энергии взять из задачи 6).

**Задача №8.** Рассчитать параметры схемы, представленной на рисунке 63, используя метод узловых потенциалов.

**Задача №9.** Рассчитать токи в ветвях схемы (рис.64), применив метод узловых потенциалов.

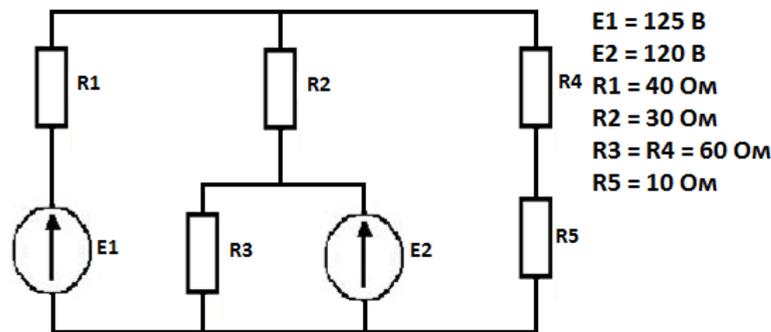


Рис.64 Электрический контур

**Задача №10.** В схеме, представленной на рисунке 6, найти ток, протекающий в ветви, содержащей источник ЭДС ( $E_1$ ), используя метод эквивалентного генератора (параметры схемы взять из задачи 64). При использовании метода эквивалентного генератора осуществить переход к схемам Тевенина и Норттона и сравнить результаты расчета.

**Задача №11.** Для схемы, представленной на рисунке 65, составить баланс мощностей. Параметры схемы:  $E = 100$  В,  $R = 10$  Ом,  $J = 5$  А.

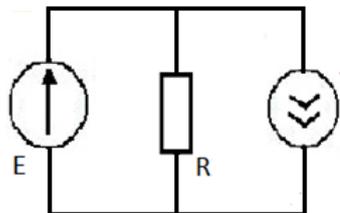


Рис.65 Электрический контур

**Задача №12.** Для схемы, представленной на рисунке 66, составить баланс мощностей. Параметры схемы:  $E = 120$  В,  $R = 45$  Ом,  $J = 8$  А.

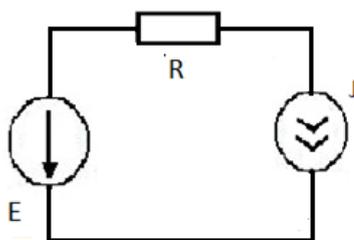


Рис.66. Электрический контур

**Задача №13.** Для схемы, представленной на рисунке 66, составить баланс мощностей. Параметры схемы указаны в задаче 66.

### Электрические цепи переменного тока

**Задача №1.** Запишите выражения комплексной амплитуды тока в показательной и алгебраической формах для следующих синусоидальных величин:

$i_1 t = 20 \sin(\omega t - 30^\circ)$ ;  $i_2 t = 10 \sin(\omega t - 120^\circ)$ ;  $i_3 t = 5 \sin(\omega t + 135^\circ)$ .

Изобразите соответствующие векторы на комплексной плоскости.

**Задача №2.** Изобразите соответствующие векторы на комплексной плоскости. Запишите векторы для мгновенных значений синусоидального тока, соответствующие следующим токам:

$$I_1 = 2 + j3 \text{ A}; \quad I_1 = -2 + j3 \text{ A}; \quad I_1 = -2 - j3 \text{ A}.$$

Сформулируйте законы Кирхгофа в символической форме.

**Задача №3.** Напряжение, при котором происходит пробой конденсатора, равно 40 В. Можно ли включить конденсатор в сеть переменного тока с действующим напряжением 35 В?

**Задача №4.** Определите индуктивность катушки, сопротивление которой в цепи переменного тока частотой 50 Гц равно 20 Ом.

**Задача №5.** Найдите комплексное сопротивление участка цепи (рис.67). Параметры участка цепи:  $R = 10 \text{ Ом}$ ,  $X_C = 10 \text{ Ом}$ .

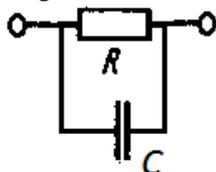


Рис.67 Участок цепи

**Задача №6.** Нарисовать графики следующих величин:

$$u t = 100 \sin(\omega t + 60^\circ); \quad i t = 20 \sin(\omega t + 45^\circ).$$

Найти полное сопротивление и составить треугольник сопротивлений.

**Задача №7.** Найти значение  $U_{v4}$ , если приборы показали  $U_{v1} = 10 \text{ В}$ ,  $U_{v2} = 30 \text{ В}$ ,  $U_{v3} = 20 \text{ В}$ . Схема представлена на рис.68.

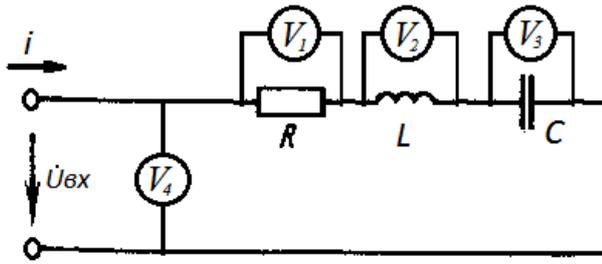


Рис.68. Участок цепи

**Задача №8.** Найти  $i(t)$  и  $Z$  участка цепи (рис.69). Параметры цепи:  $R = 10$  Ом,  $L = 20$  мГн,  $C = 4$  мкФ,  $u t = 100 \sin(\omega t + \frac{\pi}{3})$ ,  $f = 400$  Гц.

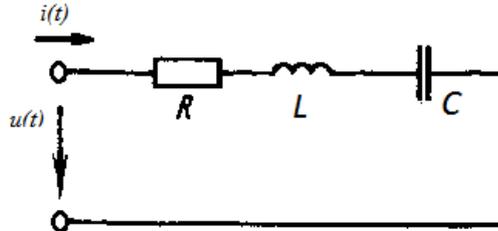


Рис.69. Участок цепи

**Задача №9.** Построить векторную диаграмму и найти общее сопротивление для схемы, представленной на рисунке 70. Параметры схемы:  $u t = 100 \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})$ ,  $R = 20$  Ом,  $L = 10$  мГн,  $C = 8$  мкФ,  $f = 400$  Гц.

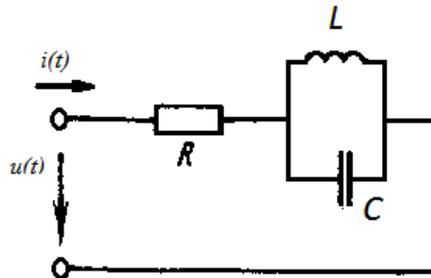


Рис.70. Участок цепи

**Задача №10.** Определить показания вольтметра  $V_2$  в цепи (рис.71), если  $R = 20$  Ом,  $X_L = 15$  Ом,  $X_C = 25$  Ом, показания вольтметра  $V_1 = 141$  В.

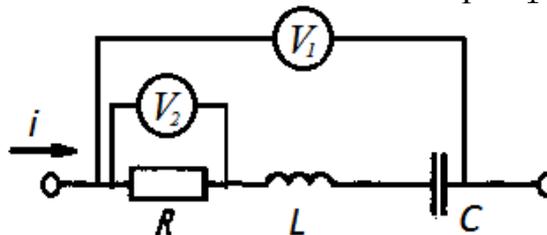


Рис.71. Участок цепи

**Задача №11.** Составить необходимое количество уравнений для схемы, представленной на рис.72. Выбрать произвольные параметры и осуществить расчет схемы.

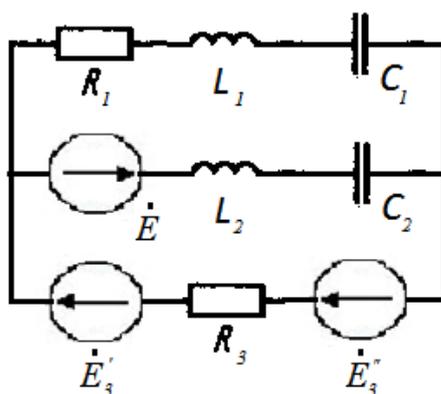


Рис.72 Электрический контур

**Задача №12.** Определить  $S$ ,  $P$ ,  $Q$ , если на выходе в RLC цепи приборы показали:  $U=100$  В,  $I = 1$  А,  $P = 60$  Вт.

**Задача №13.** Составить баланс мощностей в символической форме для схемы, представленной на рис.73. Параметры схемы:  $E = 100 \sqrt{2}$  В,  $R = 10$  Ом,  $X_L = 20$  Ом,  $X_C = 30$  Ом.

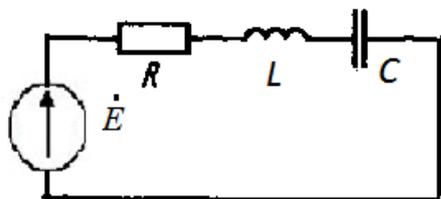


Рис.73. Электрический контур

**Задача №14.** Для схемы, представленной на рисунке 6, по рассчитанным параметрам составить потенциальную диаграмму.

### Переходные процессы в электрических цепях

**Задача №1.** Дана электрическая цепь, в которой происходит коммутация (Рис. 74). В цепи действует постоянная ЭДС  $E$ . Требуется определить закон изменения во времени токов и напряжений после коммутации в ветвях схемы.

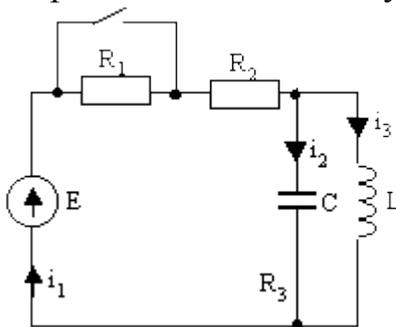


Рис. 74. Электрическая цепь

**Задача №2.** Дана электрическая цепь, в которой происходит коммутация (Рис. 75). Цепь содержит источник постоянной ЭДС. Решить задачу классическим методом (найти закон изменения одной величины)

- Решить задачу операторным методом (найти закон изменения одной величины)

- На основании полученного аналитического выражения требуется построить график изменения искомой величины в функции времени от  $t = 0$  до  $t = 4/P_{\min}$

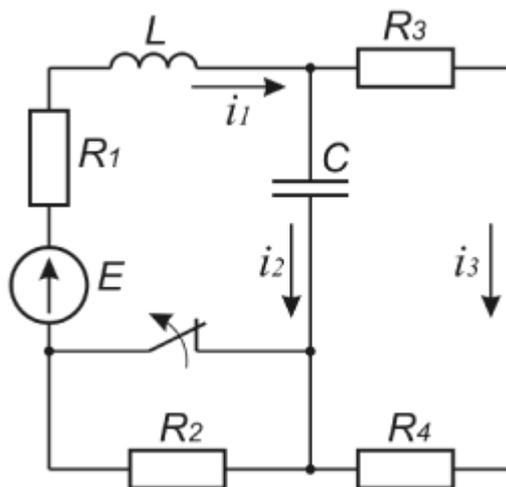


Рис. 75. Электрический контур

**Задача №3.** Для заданной схемы (Рис. 76) по заданным параметрам (Табл. 4.1) и значению постоянной ЭДС определить указанную величину. Задачу решить двумя методами: классическим и операторным. На основании полученного аналитического выражения построить график изменения искомой величины в функции времени в интервале от  $t=0$  до  $t=3/|P_{\min}|$

Таблица 4.1

$E$	$L$	$C$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	Найти
100 В	1 мГн	10 мкФ	20 Ом	2 Ом	18 Ом	2 Ом	$u_C(t)$

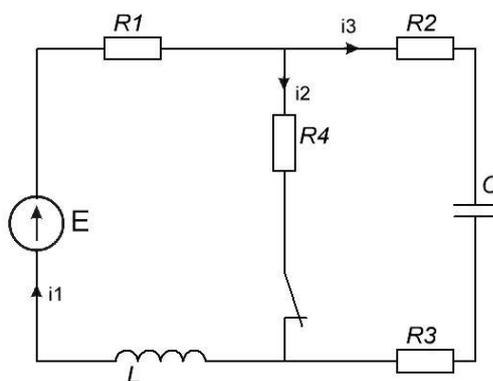


Рис. 76. СхЭ

**Задача №4.** Дано:  $R_1=30 \text{ кОм}$ ;  $R_2=20 \text{ кОм}$ ;  $R_3=40 \text{ кОм}$ ;  $C=0,1 \text{ мФ}$ ;  $J=10 \text{ мА}$ . Схема представлена на рисунке 77.

Требуется определить  $i_1(t)$ , построить осциллограмму.

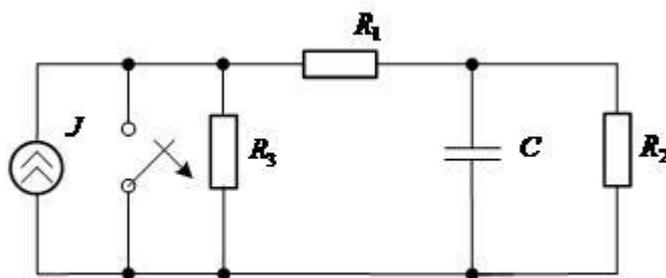


Рис. 77. Электрический контур

**Задача №5.** Дано:  $U=100\text{В}$ ;  $R=270\text{Ом}$ ;  $L=0,01\text{Гн}$ ;  $C=0,07\text{ (Ф)}$ . Определить классическим методом напряжение  $U_C(t)$ . Схема представлена на рисунке 78.

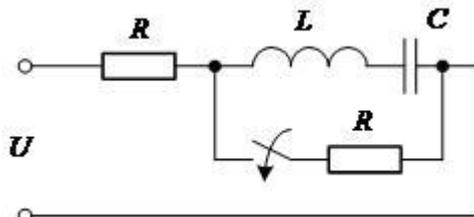


Рис. 78. Участок цепи.

**Задача №6.** Дано:  $E=200\text{В}$ ;  $R=400\text{ Ом}$ ;  $C=5\text{мкФ}$ . Определить все токи в цепи после коммутации классическим методом и любой из токов операторным методом. Схема представлена на рисунке 79.

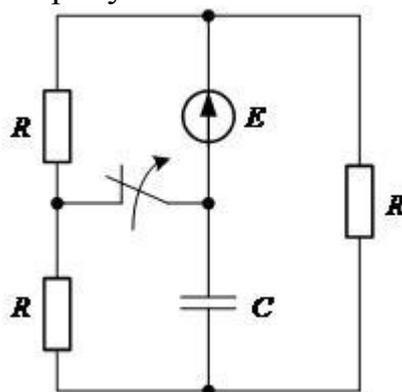


Рис. 79. Электрический контур

**Задача №7.** Дано:  $L=7\text{мГн}$ ;  $C=4\text{мкФ}$ ;  $R=16\text{ Ом}$ . Рассчитать классическим методом переходной процесс в цепи II порядка и нарисовать переменные диаграммы тока через индуктивность и напряжение на емкости на интервале от  $t=0$  до  $t=3\zeta$ . Схема представлена на рисунке 80.

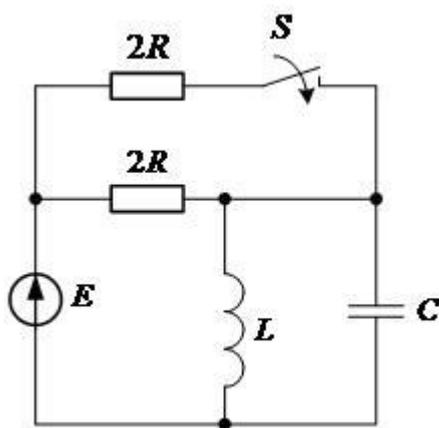


Рис. 80. Электрическая цепь

### Литература

1. Резников Б.Л. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА. Измерительная техника комплекса National Instruments Multisim 10 в образовательном процессе, М. МГТУ ГА: 2012;
2. Резников Б.Л. ЭЛЕКТРОНИКА. Пособие по проведению электротехнической практики, М.: МГТУ ГА, 2010;
3. Резников Б.Л. ЭЛЕКТРОНИКА. Пособие по проведению электромонтажной практики, М.: МГТУ ГА, 2010;
4. Резников Б.Л. СХЕМОТЕХНИКА. Программный комплекс Multisim 10 в учебном процессе, М.: МГТУ ГА, 2010;
5. Артеменко Ю.П., Сапожникова Н.М. ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА. Пособие по выполнению лабораторных работ, М.: МГТУ ГА, 2005;
6. Марченко А.Л., Освальд С.В. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim, М.: ДМК Пресс, 2009;
7. В.Ф. Очков. Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. СПб.: ВHV, 2009;
8. Д. В. Кирьянов. Mathcad 13 (+ CD-ROM). С-Пб: БХВ-Петербург, 2006;
9. Касаткин А.С., Немцов М.В. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. М.: АСАДЕМА, 2005;
10. Кузовкин В.А., Филатов В.В. Электротехника и электроника М.Юрайт, 2013
11. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC (Electronics Workbench) М., Солон Р, 2000.

## Приложение А – Краткое руководство по Mathcad

### Подготовка документа и расчет

Процесс счета и подготовки документации в Mathcad очень прост и интуитивно понятен. Главное окно Mathcad представлено на рис.90, в нем выполняются все действия (размещаются математические выражения, переменные, константы и результаты вычисления, а также графики функций). Окно разделено на несколько областей, каждая такая область обозначает печатную страницу будущего документа.

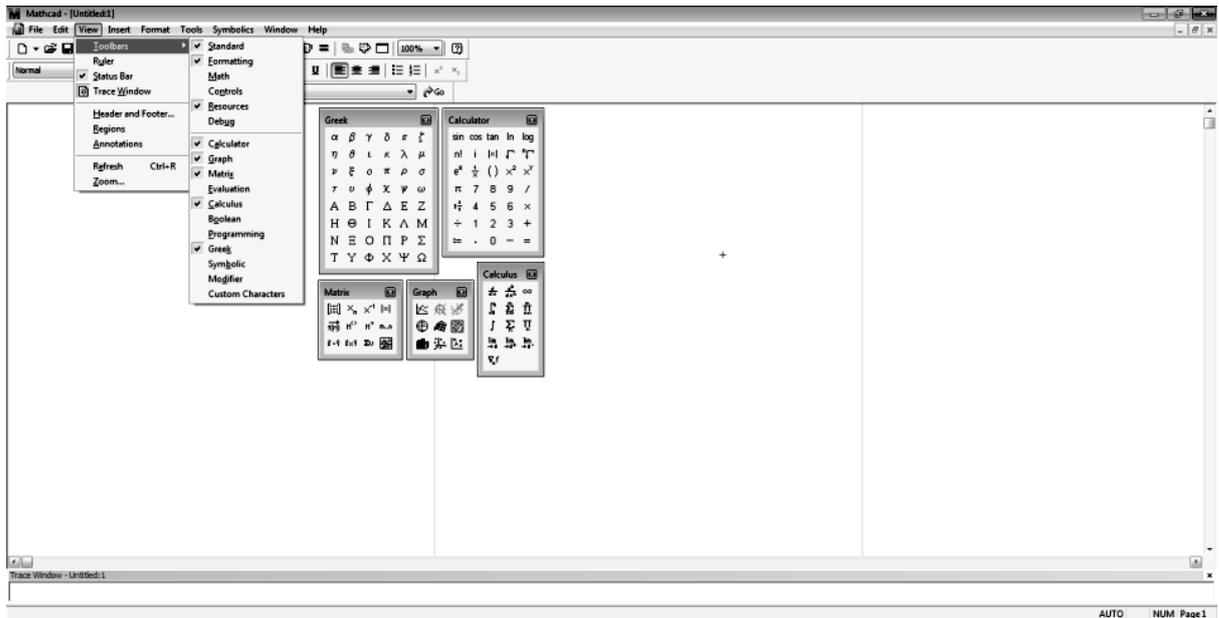


Рисунок 90 – Главное окно Mathcad 14

### Переменные. Имена переменных

Счет в Mathcad очень похож на счет, производимый человеком в обычной жизни. Начинается с объявления или определения переменных, которые обозначают некоторые величины (известные или рассчитываемые в процессе счета). Имена в Mathcad могут содержать любые из следующих символов:

- прописные и строчные латинские буквы.
- цифры 0 до 9.
- знак подчёркивания ( \_ ).
- штрих ( ` ). Обратите внимание, что это не то же самое, что апостроф. Этот символ находится на одной клавише с тильдой (~).
- символ процента (%).
- греческие буквы, собраны в панели инструментов Greek.
- символ бесконечности  $\infty$ , находится в панели инструментов Calculs.

***Имена функций и переменных не могут включать пробелы или любые иные символы, не перечисленные выше!***