

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению контрольной работы
для студентов заочной формы обучения
направления 0907 — радиотехника
по дисциплине
«ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ РЭА»

Севастополь

2006

Методические указания по выполнению контрольной работы для студентов заочной формы обучения направления 0907 — радиотехника по дисциплине «Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭА» / Сост. В. В. Вертегел — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — 21 с.

Целью указаний является оказание помощи студентам-заочникам в выполнении контрольной работы и подготовке к экзамену по дисциплине «Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭА».

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники (протокол № _____ от _____ 2006 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: к. т. н., доцент кафедры радиотехники Савочкин А.А.

Ответственный за выпуск: д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиотехники Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Краткие теоретические сведения.....	5
1.1. Общие сведения о математических моделях радиоэлектронных устройств	5
1.2. Математические модели аналоговых устройств, используемых при схемотехническом проектировании	6
1.3. Формирование математической модели радиоэлектронного устройства	9
1.4. Алгоритм автоматизированного формирования матрицы главных сечений	14
1.5. Ввод данных схемы в ЭВМ	19
2. Расчетное задание №1. «Формирование системы топологических уравнений».....	20
3. Расчетное задание №2. «Автоматизированное формирование МГС»..	22
4. Задание №3. Теоретические вопросы к контрольной работе	22
Библиографический список	23

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина “Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронной аппаратуры” (ОКПиМРЭА) является одной из специальных дисциплин в программе подготовки радиоинженеров по специальности «Радиотехника».

Целью контрольной работы по курсу ОКПиМРЭА является изучение методов построения математических моделей электрических цепей для автоматизации схемотехнического проектирования и углубление знаний студентов о современных методах и средствах автоматизированного проектирования РЭА.

Контрольная работа включает в себя выполнение двух расчетных задания (№1 и №2) и письменные ответы на два теоретических вопроса. Расчетные задания посвящаются следующим разделам курса: “Формирование математической модели линейной цепи”, “Подготовка данных схемы для ввода в ЭВМ” [1]. Теоретические вопросы охватывают основные, наиболее важные аспекты методов и средств автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры [1, 2, 3] и являются одновременно вопросами для подготовки к зачету.

Контрольная работа выполняется в отдельной тетради или на листах формата А4 с соблюдением требований ГОСТ 7.1-84. Перед ответом или решением необходимо привести формулировку вопроса или задания.

Выбор варианта расчетного задания производится по последней цифре N номера зачетной книжки, который соответствует номеру рисунка заданной схемы электрической цепи. Выбор номеров теоретических вопросов производится по предпоследней M и последней N цифрам номера зачетной книжки в соответствии с таблицей 4.1.

Контрольная работа, выполненная не по своему варианту, с нарушением требований настоящих указаний или небрежно, к проверке и рецензированию не принимается.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Общие сведения о математических моделях РЭА

Проектирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) с применением ЭВМ требует её описания на языке математики в виде, удобном для её программной реализации. Математическое описание проектируемого объекта называют математической моделью.

Математическая модель — совокупность математических элементов (чисел, переменных, векторов, матриц, множеств, графов и т.д.) и соотношений между ними, отражающих свойства физического объекта проектирования.

Математическую модель любого объекта проектирования характеризуют внутренними, входными, выходными и внешними параметрами. Параметры элементов, из которых состоит проектируемое устройство, называют **внутренними**. Параметры действующих на устройство внешних сигналов — **входными**, параметры устройства, по которым оценивают его качество — **выходными**, а параметры окружающей среды — **внешними**. Например, при схемотехническом проектировании каскада усиления в качестве внутренних параметров выступают параметры элементов принципиальной схемы усилителя. Коэффициент усиления, динамический диапазон, полоса пропускания, коэффициент гармоник — выходные параметры. В качестве входных параметров выступают — частота, амплитуда входного сигнала, напряжение питания, а в качестве внешнего параметра — температура.

Каждому иерархическому уровню или аспекту проектирования присущи свои математические модели, различающиеся характером применяемого при их создании и использовании математического аппарата.

Так на компонентном уровне проектирования математические модели объектов представляют в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процессы в сплошных средах с заданными краевыми условиями. На функционально-логическом и схемотехническом уровнях — в виде систем логических уравнений (для цифровой аппаратуры) и систем дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями (для аналоговых устройств), а на системном уровне — в виде имитационных моделей.

В том случае, когда систему уравнений математической модели можно решить в общем виде и выразить взаимосвязь между входными, выходными, внутренними и внешними параметрами в аналитической форме, модель называют **аналитической**.

При автоматизированном проектировании с использованием ЭВМ системы уравнений математических моделей решаются численными методами. Такие модели называют **алгоритмическими (численными)**.

На каждом уровне проектирования различают математические модели проектируемого радиотехнического объекта и компонентов, из которых состоит объект. Математическая модель компонента представляет собой систему уравнений, устанавливающих связь между параметрами этого компонента. Эти уравнения называются **компонентными**.

Математическую модель объекта проектирования, представляющего объединение компонентов, получают на основе математических моделей компонентов, входящих в объект. Объединение компонентных уравнений в математическую модель объекта осуществляется на основе фундаментальных физических законов, например законов Кирхгоффа. Уравнения, описывающие эти законы, называются **топологическими**, они отражают связи между компонентами в устройстве. Совокупность компонентных и топологических уравнений для проектируемого объекта и образует систему уравнений, являющуюся математической моделью объекта.

В современных программах компьютерного моделирования РЭА формирование систем уравнений математических моделей проектируемых устройств выполняется автоматически из набора базовых элементов, компонентные уравнения для которых хранятся в библиотеках программ. Разработчику требуется ввести внутренние, входные и внешние параметры, а также выбрать для расчета и отображения необходимые выходные параметры. Вместе с тем, для правильного использования программ разработчику РЭА необходимо понимать принципы формирования математических моделей проектируемых устройств и методы их анализа, что и является основным содержанием изучаемой дисциплины.

1.2. Математические модели аналоговых устройств, используемых при схемотехническом проектировании

При проектировании РЭА на схемотехническом уровне наиболее широкое распространение получили **электрические модели**. Понятие электрической модели включает либо систему уравнений, связывающих напряжения и токи в электрической схеме, являющейся моделью проектируемого объекта, либо саму электрическую схему, составленную из базовых элементов (резисторов, конденсаторов и т.п.), на основе которой в ЭВМ автоматически формируется система уравнений. Для синтеза адекватных реальному объекту моделей большинства радиотехнических устройств базовый набор должен содержать, по крайней мере, пять типов сосредоточенных схемных элементов: резистор; конденсатор; индуктивность; источник напряжения; источник тока. На основе этих элементов строятся электрические модели трансформаторов, а также активных элементов (диодов, транзисторов, интегральных схем) и пр.

При анализе электронных схем удобно входящие в них активные элементы представлять некоторыми электрическими цепями. Такая цепь будет эквивалентной активному элементу, если с требуемой точностью (в пределах используемых в элементе режимов) будут совпадать токи в соответствующих выводах элемента и эквивалентной ему электрической цепи.

Модель полупроводникового диода. Основой полупроводникового диода является *p-n*-переход на границе двух слоёв полупроводникового материала с различными типами проводимости. На рис. 1.1,б приведена широко используемая модель полупроводникового диода (рис. 1.1,а) в режиме большого сигнала.

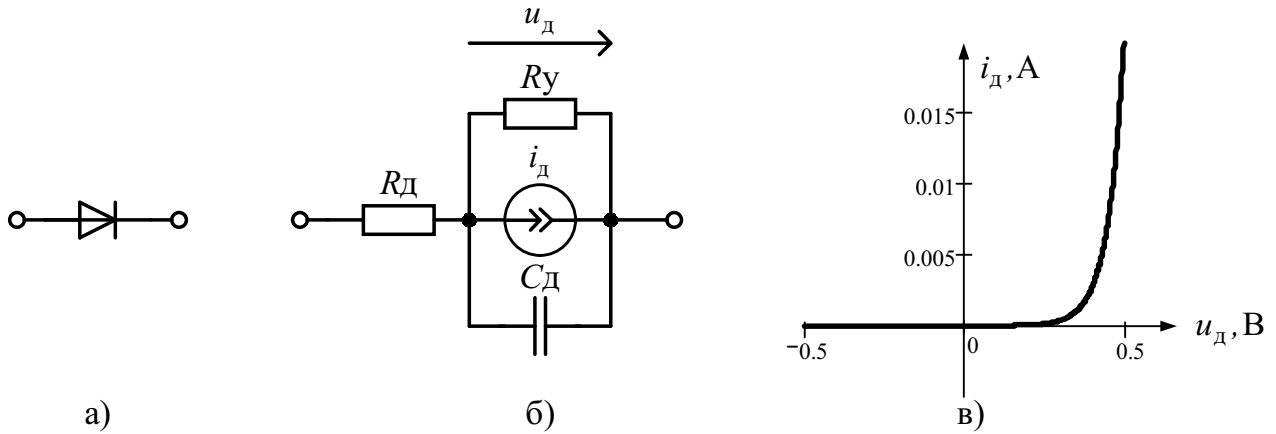


Рис.1.1

Здесь R_d — объёмное сопротивление диода, зависящее от геометрических размеров и степени легирования полупроводника (обычно $0 < R_d < 100$ Ом), R_u — сопротивление утечки диода (обычно $R_u = 10^6 \dots 10^7$ Ом), C_d — сумма барьерной и диффузионной емкостей *p-n*-перехода, I_d — управляемый напряжением на переходе u_d источник тока, ток которого подчиняется закону

$$I_d = f(u_d) = I_0 \left(\exp\left(\frac{u_d}{m_d \phi_T}\right) - 1 \right), \quad (1.1)$$

где I_0 — ток насыщения перехода, обусловленный тепловой генерацией неосновных носителей в слоях полупроводника (обычно $10^{-12} < I_0 < 10^{-6}$ мА для кремниевых диодов и $10^{-8} < I_0 < 10^{-2}$ мА для германиевых), $m_d \phi_T$ — температурный потенциал перехода, $\phi_T = 0,025T / 293$, T — абсолютная температура, $m_d = 1 \dots 2,5$ — эмпирический коэффициент.

Выражение (1.1) достаточно хорошо аппроксимирует вольт-амперную характеристику диода $i_d = f(u_d)$, за исключением области пробоя (рис. 1,в).

Линейная модель биполярного транзистора. При схемотехническом моделировании широкое распространение получила так называемая модель Эберса-Молла, приведённая на рис. 1.2. Эта модель достаточно хорошо отражает свойства транзисторной структуры в линейном режиме работы (режиме малого сигнала). На рис. 1.2. $r_э$, $r_б$, $r_к$ — объёмные сопротивления эмиттерной, базовой и коллекторной областей транзистора, $I_б$, $I_к$ — управляемые напряжением на входном переходе $u_п$ источники тока, $R_{бэ}$ — сопротивление утечки перехода база-эмиттер, $R_{кб}$ — сопротивление утечки перехода коллектор-база.

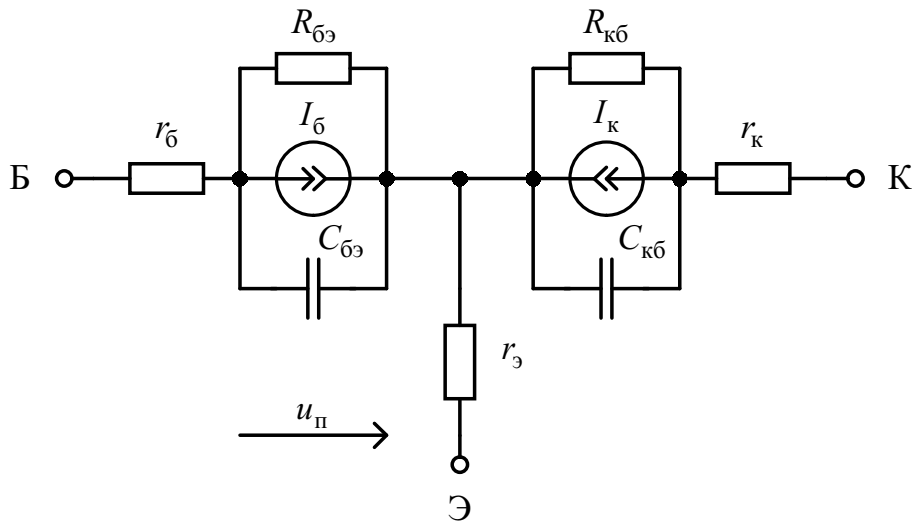


Рис.1.2 — Электрическая модель биполярного транзистора

Объёмные сопротивления областей транзистора, зависящие от их геометрических размеров и степеней легирования полупроводника, имеют значения: $r_э \approx 0,01 \dots 10$ Ом; $r_б \approx 1 \dots 100$ Ом; $r_к \approx 0,1 \dots 10$ Ом. Сопротивления утечки переходов $R_{бэ}$, $R_{кб}$ обычно превышают 1 МОм. Параллельно сопротивлению утечки $R_{бэ}$ включена ёмкость $C_{бэ}$, характеризующая диффузионную и барьерную ёмкость перехода база-эмиттер. При работе транзистора в активном режиме следует учитывать диффузионную ёмкость, которая пропорциональна току базы. При работе в режиме отсечки базового тока следует учитывать барьерную ёмкость, которая определяется обратным напряжением на переходе база-эмиттер. Ёмкость $C_{кб}$ характеризует барьерную ёмкость перехода коллектор-база, так как при работе транзистора в активном режиме и режиме с отсечкой коллекторного тока этот переход закрыт.

Ток источника тока $I_б$ связан с напряжением на переходе соотношением

$$I_б = f(u_п) = I_{б0} \left(\exp\left(\frac{u_п}{m_T \gamma_T}\right) - 1 \right),$$

где $I_{б0}$ — ток насыщения перехода, $\gamma_T = 0,3 \dots 1,2$ В — контактная разность потенциалов, $m_T = 1 \dots 3$ — эмпирический коэффициент.

Выражение для управляемого источника коллекторного тока, моделирующего усилительные свойства транзистора, имеет вид

$$I_к = \beta I_б,$$

где β — коэффициент усиления тока в схеме с общим эмиттером.

Параметры модели Эберса-Молла могут быть получены либо расчетным путем на основе анализа физико-топологической модели транзистора, либо измерены экспериментально. Следует отметить, что при моделировании работы транзисторных каскадов в режиме больших сигналов следует использовать электрические модели транзисторов, отражающие их нелинейные свойства [1].

1.3. Формирование математической модели радиоэлектронного устройства

Как отмечалось ранее, процесс формирования уравнений математической модели радиоэлектронного устройства на основе электрической модели этого устройства, выполняется с помощью ЭВМ. Сначала рассмотрим метод формирования систем уравнений математической модели, применяемый в классической теории цепей, а далее метод их автоматизированного формирования в ЭВМ на примере электрической схемы, изображенной на рис.1.3,а.

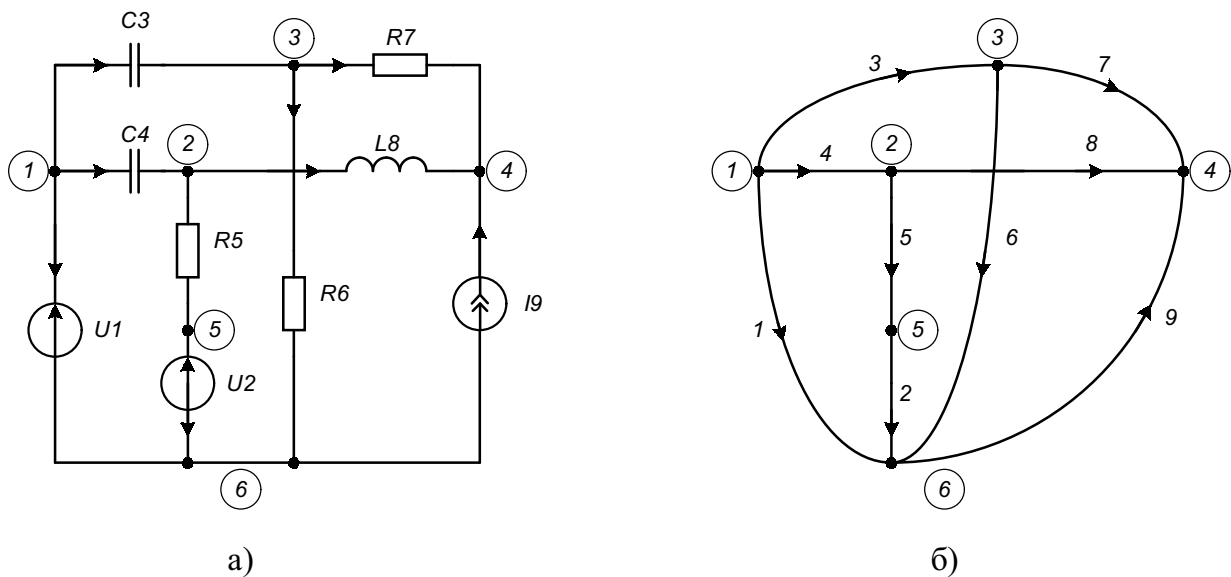


Рис. 1.3 — Схема цепи а) и её граф б)

В приведённой схеме пронумеруем узлы и ветви, а также выберем положительные направления тока и напряжения. Нумерацию узлов будем выполнять произвольно (на рис. 1.3,а номера узлов заключены в кружки). Причем следует иметь в виду, что всякое соединение двух и более элементов рассматривается как узел (обозначение узлом точки соединения двух элементов необходимо, чтобы для каждого элемента можно было указать пару узлов, между которыми включен в схеме элемент).

При нумерации ветвей будем придерживаться последовательности, соответствующей такой **иерархии** типов элементов: управляемые источники напряжения, независимые источники напряжения, емкостные, резистивные, индуктивные элементы, независимые источники тока, управляемые источники тока. Нумерацию будем начинать с ветвей, принадлежащих высшей ступени иерархии. Исчерпав их, будем продолжать нумерацию, перейдя к ветвям следующей ступени, пока не будут пронумерованы все ветви схемы. В пределах каждого типа элементов (ветвей) нумерация последовательная.

Положительные направления тока в элементах (показанного на рис.1.3,а стрелками) выбираются произвольно. При этом будем считать, что выбранное положительное направление для тока одновременно является и положительным направлением для напряжения. В результате расчетов вычисленные значения

токов (напряжений) могут оказаться положительными или отрицательными. Если в результате расчетов получено отрицательное число, то это свидетельствует о том, что положительный ток в ветви течет в противоположном направлении относительно первоначально выбранного.

Полную систему уравнений, являющейся математической моделью электрической схемы, можно представить компонентными уравнениями, отражающими свойства элементов в ветвях, и топологическими уравнениями, отражающими свойства схемы, связанные с её топологическими особенностями.

Компонентные уравнения выражают зависимость между током и напряжением для элементов схемы во временной или частотной форме.

Приведем такие зависимости для различных типов элементов:

- линейный резистивный элемент $u_R(t) = Ri_r(t)$, $u_R(\omega) = Ri_R(\omega)$;
- линейный индуктивный элемент $u_L(t) = Ldi_L(t)/dt$, $u_L(\omega) = j\omega Li_L(\omega)$;
- линейный емкостной элемент $i_C(t) = Cdu_C(t)/dt$, $i_C(\omega) = j\omega Cu_C(\omega)$;
- нелинейный резистивный элемент $u_R(t) = F(i_R(t))$, $u_R(\omega) = \Psi(i_R(\omega))$,
- управляемый источник $Y_y(t) = f(X_y(t))$, $Y_y(\omega) = f(X_y(\omega))$.

Здесь $Y_y(t)$, $Y_y(\omega)$ — управляемые величины (ток или напряжение управляемого идеального источника соответственно тока или напряжения); $X_y(t)$, $X_y(\omega)$ — управляющая величина (ток или напряжение управляющей ветви).

Объединение компонентных уравнений в математическую модель объекта проектирования удобно проиллюстрировать с использованием теории графов. При описании топологии схемы не учитывают компонентных данных. Это позволяет каждую ветвь схемы представлять линией, соединяющей соответствующие узлы. При этом образуется так называемый направленный граф цепи (рис. 1.3,б). При его построении каждому узлу цепи поставлен в соответствие узел графа, каждому элементу цепи — ветвь графа в виде линии, соединяющей соответствующие узлы и имеющей те же обозначения и положительное направление тока, которые выбраны для элемента. Таким образом, направленный граф полностью описывает топологию электрической модели.

Топологические уравнения характеризуют только способ соединения ветвей и не отражают их содержимого, т. е. не учитывают типы и значения параметров включенных в ветви элементов. Такими уравнениями являются уравнения, которые строятся по законам Кирхгофа. По первому закону Кирхгофа для токов (ЗКТ) алгебраическая сумма токов, связанных с узлом, равна нулю. По второму закону Кирхгофа для напряжений (ЗКН) алгебраическая сумма напряжений ветвей в замкнутом контуре равна нулю. Уравнения, полученные по этим законам, не содержат сведений о том, каковы типы элементов, включенных в ветви, и каковы параметры этих элементов.

Алгоритм построения полной системы уравнений по ЗКТ очевиден (если в схеме n узлов, то число независимых уравнений по ЗКТ равно $n - 1$). Сложнее получается полная система уравнений по ЗКН. Если в схеме m ветвей, то составляются $m - (n - 1)$ независимых уравнений по ЗКН. При этом для составления этих уравнений в схеме должны быть предварительно найдены независимые замкнутые контуры, т. е. такие, в каждом из которых имеется хотя бы одна ветвь, не входящая во все другие контуры. Именно поиск таких независимых

контуров и составляет относительную трудность построения полной системы уравнений по ЗКН для цепи со сложной конфигурацией (топологией).

Рассмотрим алгоритм, который может упростить получение топологических уравнений. Для этого введем некоторые понятия, характеризующие граф цепи.

Назовем **деревом графа** совокупность его ветвей, в которой оказываются представленными все узлы, но при этом не образуется ни одного замкнутого контура. На рис. 1.4 повторён граф схемы, приведенной на рис. 1.3,а. Сплошными линиями на рис. 1.4 показан один из вариантов дерева (для заданной схемы могут быть построены и другие). Следует отметить, что в ряде случаев к дереву графа предъявляются определенные требования по порядку его формирования. Так для моделирования методом переменных состояний дерево графа должно быть выбрано таким образом, чтобы в него сначала вошли все источники напряжения, затем конденсаторы, резисторы и индуктивности [1, 2]. В частном случае дерево графа может не содержать всех типов базовых элементов.

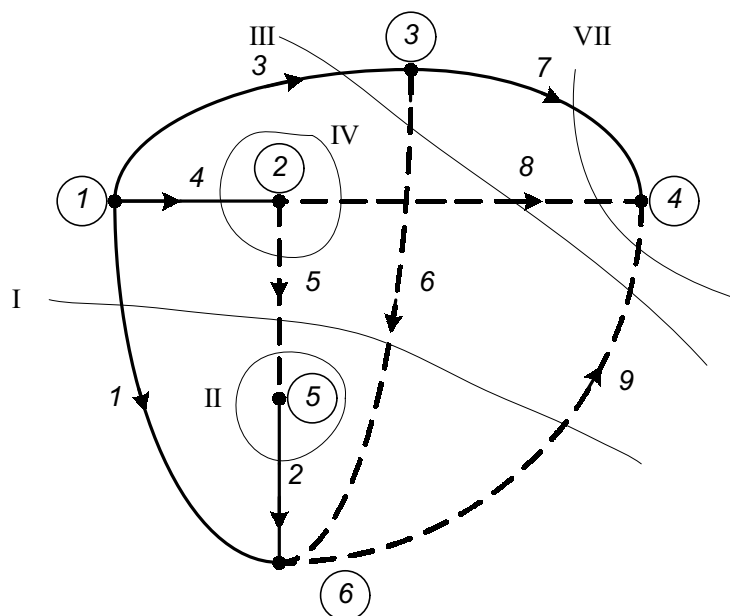


Рис. 1.4 — Пример построения главных сечений

Назовем **ребрами** ветви, входящие в выбранное дерево. На рис. 1.4 штриховыми линиями представлены ветви, не вошедшие в дерево. Совокупность этих ветвей образует так называемое дополнение дерева; входящие в него ветви будем называть **хордами**. Таким образом, каждая ветвь графа является либо его ребром, либо хордой.

Будем называть **сечением** линию, которая однократно пересекает ветви некоторой совокупности ветвей графа и разделяет граф на две несвязанные части. Если такая линия пересекает одно ребро, назовем ее **главным сечением**. На рис. 1.4 показан пример построения главных сечений. Здесь главным сечениям присвоены номера тех ребер, которые они пересекают. Для того чтобы отличать номера главных сечений от номеров ветвей и узлов будем обозначать их римскими цифрами.

Обычно ЗКТ формулируется относительно узлов, но его можно формулировать и относительно главных сечений. На основании принципа нейтральности заряда в любой части схемы количество заряда, втекающего внутрь выделенной сечением части схемы за некоторое время, равно количеству заряда, вытекающего из этой области за то же время. Иначе, **алгебраическая сумма токов относительно сечения равна нулю**. Придерживаясь такой формулировки ЗКТ, получаем следующую систему уравнений для главных сечений, построенных на рис 1.4 (выражая в этих уравнениях токи рёбер через токи хорд):

$$\begin{aligned} i_1 &= -i_5 - i_6 + i_9 \quad (\text{для главного сечения I}); \\ i_2 &= i_5 \quad (\text{для главного сечения II}); \\ i_3 &= i_6 - i_8 - i_9 \quad (\text{для главного сечения III}); \\ i_4 &= i_5 + i_8 \quad (\text{для главного сечения IV}); \\ i_7 &= -i_8 - i_9 \quad (\text{для главного сечения VII}). \end{aligned}$$

Запишем эту систему уравнений в матричной форме

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_7 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_5 \\ i_6 \\ i_8 \\ i_9 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$\bar{\mathbf{I}}_p = -\bar{\mathbf{F}} \bar{\mathbf{I}}_x$$

Введём обозначения $\bar{\mathbf{I}}_p$, $\bar{\mathbf{F}}$, $\bar{\mathbf{I}}_x$ для входящих в (1.2) матриц, после чего систему уравнений представим в общем виде, справедливом для произвольной схемы

$$\bar{\mathbf{I}}_p = -\bar{\mathbf{F}} \bar{\mathbf{I}}_x. \quad (1.2)$$

Матрица $\bar{\mathbf{F}}$, которая называется **матрицей главных сечений**, определяет связь между матрицами-векторами токов рёбер $\bar{\mathbf{I}}_p$ и токов хорд $\bar{\mathbf{I}}_x$.

Выпишем отдельно полученную матрицу главных сечений $\bar{\mathbf{F}}$ рассматриваемой электрической цепи

$$\bar{\mathbf{F}} = \begin{array}{c} \text{Рёбра} \\ U \\ C \\ R_p \end{array} \begin{array}{c} \text{Хорды} \\ R_x \quad L \quad I \\ 5 \quad 6 \quad 8 \quad 9 \end{array} \left| \begin{array}{ccccc} 1 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 4 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right|. \quad (1.4)$$

Здесь строки матрицы принадлежат рёбрам, столбцы — хордам графа. Строки и столбцы матрицы $\bar{\mathbf{F}}$ можно сгруппировать по типам элементов так, как это сделано в (1.4), где U — строки источников напряжения; C — строки емкостных рёбер; R_p — строки резистивных рёбер; R_x — столбцы резистивных хорд; L — столбцы индуктивных хорд; I — столбцы источников тока. При этом матрицу $\bar{\mathbf{F}}$ можно разбить на подматрицы и представить в виде

$$\bar{\mathbf{F}} = \begin{array}{c} \text{Рёбра} \\ U \\ C \\ R_p \end{array} \begin{array}{c} \text{Хорды} \\ R_x \quad L \quad I \end{array} \left| \begin{array}{ccc} \bar{\mathbf{F}}_{UR_x} & \bar{\mathbf{F}}_{UL} & \bar{\mathbf{F}}_{UI} \\ \bar{\mathbf{F}}_{CR_x} & \bar{\mathbf{F}}_{CL} & \bar{\mathbf{F}}_{CI} \\ \bar{\mathbf{F}}_{R_p R_x} & \bar{\mathbf{F}}_{R_p L} & \bar{\mathbf{F}}_{R_p C} \end{array} \right|,$$

где индексы у подматриц указывают типы ветвей, которым принадлежат строки и столбцы подматриц.

Уравнения ЗКТ относительно главных сечений из матрицы $\bar{\mathbf{F}}$ получаются следующим образом. Связь тока ребра с токами хорд выражается взятыми с обратным знаком элементами строки матрицы $\bar{\mathbf{F}}$, принадлежащей данному ребру, т.е. элементы строки матрицы $\bar{\mathbf{F}}$, взятые с обратным знаком, служат коэффициентами, линейно связывающими ток ребра, которому принадлежит строка, с токами хорд.

Из матрицы $\bar{\mathbf{F}}$ вытекает не только система уравнений по ЗКТ, но и система уравнений по ЗКН. Элементы столбцов матрицы $\bar{\mathbf{F}}$ являются коэффициентами, линейно связывающими напряжение хорд, соответствующих столбцам, с напряжениями рёбер. Так столбцы матрицы $\bar{\mathbf{F}}$ (1.4) определяют следующую систему уравнений по ЗКН:

$$\begin{cases} u_5 = u_1 - u_2 - u_4; \\ u_6 = u_1 - u_3; \\ u_8 = u_3 - u_4 + u_7; \\ u_9 = -u_1 + u_3 + u_7. \end{cases}$$

Система уравнений по ЗКН может быть записана в матричной форме, представляющей в общем виде зависимость между напряжениями хорд и напряжениями рёбер для произвольной схемы

$$\bar{\mathbf{U}}_x = -\bar{\mathbf{F}}^T \bar{\mathbf{U}}_p, \quad (1)$$

где $\bar{\mathbf{U}}_x$ — вектор напряжений хорд; $\bar{\mathbf{F}}^T$ — транспонированная матрица $\bar{\mathbf{F}}$; $\bar{\mathbf{U}}_p$ — вектор напряжений рёбер.

Выражения (1.3) и (1.5) представляют собой матричную запись топологических уравнений математической модели устройства. Таким образом, для автоматизированного получения в ЭВМ системы уравнений математической модели устройства необходимо сформировать матрицу главных сечений и компонентные уравнения для каждого базового элемента. После подстановки компонентных уравнений в (1.3) или (1.5) получается система уравнений, которая представляет собой математическую модель электрической цепи.

1.4. Алгоритм автоматизированного формирования матрицы главных сечений

Хотя направленный граф цепи полностью описывает топологию электрической модели радиоэлектронного устройства, такая форма её представления неудобна для хранения в памяти ЭВМ. Для записи в ЭВМ наиболее удобно представление информации о графе в виде таблицы (матрицы). Содержащаяся в графе информация может быть представлена матрицей, называемой **структурной матрицей** (другое встречающееся в литературе название этой матрицы — матрица инценденций). Из структурной матрицы путём её преобразования по определённому алгоритму может быть получена матрица главных сечений $\bar{\mathbf{F}}$, которая является основой математической модели радиоэлектронного устройства.

Автоматизированное формирование матрицы главных сечений в ЭВМ производится в два этапа. На первом этапе по введенным в ЭВМ данным формируется структурная матрица. На втором этапе в результате преобразований, производимых над структурной матрицей, получается матрица главных сечений $\bar{\mathbf{F}}$.

Рассмотрим построение структурной матрицы. Для этого составим матрицу следующего вида. Припишем столбцы матрицы определенным ветвям графа, строки — его узлам. Дадим элементам a_{ij} этой матрицы следующие значения:

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{cases} 0, & \text{если } j\text{-я ветвь не подключена к } i\text{-му узлу;} \\ +1, & \text{если } j\text{-я ветвь подключена к } i\text{-му узлу} \\ & \text{и направлена от этого узла;} \\ -1, & \text{если } j\text{-я ветвь подключена к } i\text{-му узлу} \\ & \text{и направлена в сторону этого узла.} \end{cases}$$

Условимся при нумерации ветвей придерживаться следующей их иерархии: управляемые источники напряжения, независимые источники напряжения, емкостные, резистивные, индуктивные элементы, независимые источники тока, управляемые источники тока. Нумерацию начнем с ветвей, принадлежащих высшей ступени иерархии. Исчерпав их, будем продолжать нумерацию, перейдя к ветвям следующей ступени иерархии и т. д., пока не будут пронумерованы все ветви схемы. Именно такой порядок был выбран при нумерации ветвей в графе на рис. 1,б. Для этого графа построим следующую матрицу:

		Ветви									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$\bar{\mathbf{A}} =$	Узлы	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	-1	1	0	0	1	0	
	3	0	0	-1	0	0	1	1	0	0	
	4	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	
	5	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	
	6	-1	-1	0	0	0	-1	0	0	1	

Каждая i -я строка такой матрицы показывает, какие ветви подключены к i -му узлу и каково их направление относительно узла; а каждый j -й столбец указывает, с какими узлами соединена j -я ветвь.

Так как каждая ветвь подключена к двум узлам, то в любом из столбцов матрицы $\bar{\mathbf{A}}$ имеется два ненулевых элемента, один из которых $+1$, другой -1 . В связи с этим значения элементов одной из строк матрицы всегда могут быть определены через элементы других строк. Иначе говоря, одна из строк не является независимой, не несет информации и может быть вычеркнута из матрицы.

Вычеркивая в $\overline{\mathbf{A}}$ последнюю строку, получаем следующую матрицу:

$$\overline{\mathbf{A}}_{\text{стр}} = \begin{array}{c} \text{Узлы} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{array} \end{array} \left| \begin{array}{ccccccccc} & & & & \text{Ветви} & & & & & \\ & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{array} \end{array} \right|$$

Эта матрица, которая дает топологическое описание цепи, называется **структурной** матрицей.

Для преобразования структурной матрицы в матрицу главных сечений необходимо преобразовать $\overline{\mathbf{A}}_{\text{стр}}$ таким образом, чтобы в левой ее части образовалась единичная матрица. Тогда её правая часть будет представлять искомую матрицу главных сечений $\overline{\mathbf{F}}$. В ходе преобразований используются перестановка строк и столбцов матрицы, суммирование или вычитание строк.

Алгоритм получения из матрицы $\overline{\mathbf{A}}_{\text{стр}}$ матрицы $\overline{\mathbf{F}}$ можно представить следующей последовательностью шагов:

- 1) задается $j=1$;
- 2) исключая из рассмотрения первые $(j-1)$ строк и $(j-1)$ столбцов, последовательно просматривают остальную часть матрицы по столбцам и ищут первый ненулевой элемент. Пусть этот элемент a_{ik} ;
- 3) если $k \neq j$, то k -й столбец ставится на j -е место, столбцы от j -го до $(k-1)$ -го сдвигаются вправо;
- 4) если $i > j$, то меняются местами i -я и j -я строки;
- 5) если $a_{jj} = -1$, то меняются на обратные знаки элементов j -й строки;
- 6) если в j -м столбце кроме элемента a_{ji} имеются дополнительные ненулевые элементы, то они устраняются прибавлением (или вычитанием) j -й строки к строкам этих элементов;
- 7) задается $j = j + 1$. Если $j \leq n - 1$ (где n — число узлов цепи), идти к шагу 2; в противном случае $m - (n - 1)$ (где m — число ветвей) правых столбцов матрицы есть искомая матрица $\overline{\mathbf{F}}$.

Согласно этому алгоритму последовательность преобразования ранее полученной структурной матрицы $\overline{\mathbf{A}}_{\text{стр}}$ в матрицу главных сечений $\overline{\mathbf{F}}$ изображена на рис.1.5.

$\begin{array}{c ccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 5 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$	<p>$j=1$. На первом шаге преобразований нет.</p> <p>$j=2$. Рассматриваем матрицу без первой строки и первого столбца. Просматриваем второй столбец сверху в низ. Находим первый ненулевой элемент. Это — a_{52}.</p> <p>Меняем местами вторую и пятую строки.</p>
$\begin{array}{c ccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}$	<p>$j=3$ Рассматриваем матрицу без двух верхних строк и двух левых столбцов. Находим первый ненулевой элемент. Это — a_{33}.</p> <p>Меняем у элементов третьей строки знаки на обратные.</p> <p>Вычитаем поэлементно из первой строки третью и результат записываем в первую строку.</p>
$\begin{array}{c ccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}$	<p>$j=4$ Рассматриваем матрицу без трёх верхних строк и трёх левых столбцов. Находим первый ненулевой элемент. Это — a_{54}.</p>
$\begin{array}{c ccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{array}$	<p>Меняем местами четвертую и пятую строки.</p> <p>Меняем у элементов четвёртой строки знаки на обратные.</p> <p>Вычитаем поэлементно из первой строки четвертую и результат записываем в первую строку.</p>
$\begin{array}{c ccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{array}$	<p>$j=5$ Рассматриваем матрицу без четырёх верхних строк и четырёх левых столбцов. Находим первый ненулевой элемент.</p> <p>Это — a_{57}.</p>

Рис. 1.5 — Последовательность преобразований структурной матрицы

$$\begin{array}{c|ccccccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 7 & 5 & 6 & 8 & 9 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\
 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1
 \end{array}$$

Ставим на место пятого столбца седьмой столбец, а пятый и шестой столбцы сдвигаем вправо.

$$\begin{array}{c|ccccccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 7 & 5 & 6 & 8 & 9 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\
 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array}$$

Меняем у элементов пятой строки знаки на обратные.

$$\begin{array}{c|ccccccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 7 & 5 & 6 & 8 & 9 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\
 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\
 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\
 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array}$$

Вычитаем поэлементно из первой строки пятую и результат записываем в первую строку.
Прибавляем поэлементно к третьей строке пятую и результат записываем в третью строку.

$$\begin{array}{c|ccccccccc}
 & & \text{Рёбра} & & & & \text{Хорды} & & & \\
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 7 & 5 & 6 & 8 & 9 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 0 & -1 \\
 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 & 1 \\
 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & -1 & 0 & -1 & 0 \\
 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array}$$

Левая часть (до пунктирной линии) является единичной матрицей.
Правая часть матрицы представляет собой искомую матрицу главных сечений.

$$\bar{\mathbf{F}} = \begin{array}{c|cccc}
 & & \text{Хорды} & & \\
 & & 5 & 6 & 8 & 9 \\
 \text{Рёбра} & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 \\
 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 & 3 & 0 & -1 & 1 & 1 \\
 & 4 & -1 & 0 & -1 & 0 \\
 & 7 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array}$$

Продолжение рис. 1.5 — Последовательность преобразований структурной матрицы

1.5. Ввод данных схемы в ЭВМ

Современные программы схемотехнического проектирования (*Electronic Workbench*, *MicroCap* и пр.) позволяют разработчику проводить моделирование проектируемого устройства во временной и частотной областях путём составления его электрической схемы из набора базовых элементов, ввода исходных данных в ЭВМ и выбора способа отображения результатов моделирования. Рассмотрим, как формируются в ЭВМ данные, однозначно определяющие построенную электрическую схему.

К этим данным относятся:

- компонентные данные, определяющие тип и параметры элементов, присутствующих в ветвях электрической цепи;
- данные топологии, определяющие набор ветвей и способ, которым они соединены друг с другом;
- положительные направления токов и напряжений в ветвях схемы.

Вводимые в ЭВМ данные содержат следующие сведения о каждой ветви схемы: указание о типе элемента ветви (U , C , R , L , I) и значение параметра (номинала) элемента. Кроме того, вводятся дополнительные параметры (добротность, тангенс угла диэлектрических потерь, активное сопротивление, межвитковая ёмкость, температурный коэффициент и пр.), которые определяются типом элемента и его электрической схемой замещения. Тип элемента, который разработчик располагает на схеме, и его компонентное уравнение определяется автоматически по принадлежности к классу соответствующей группы библиотеки элементов.

В современных программах САПР порядковые номера ветвей; номера узлов, между которыми расположена ветвь; положительные направления токов ветвей и напряжений в ветвях схемы формируются автоматически согласно ранее принятым правилам без участия разработчика.

При вводе компонентных данных в ЭВМ также автоматически производится масштабирование параметров элементов, необходимое в тех случаях, когда в процессе выполнения вычислений могут возникнуть такие большие значения, которые выйдут за пределы представимых в ЭВМ значений и приведут к переполнению разрядной сетки (большие значения, например, могут возникнуть при многократном умножении больших сопротивлений).

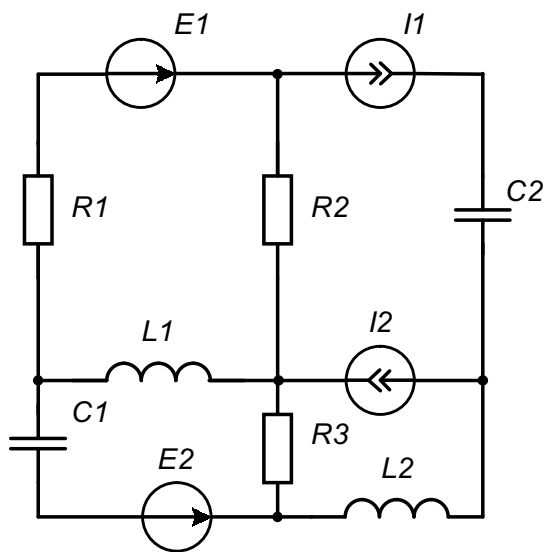
При масштабировании для напряжений, токов, сопротивлений, емкостей, индуктивностей, частот, времени формируются соответствующие масштабные коэффициенты M_U , M_I , M_R , M_C , M_L , M_f , M_t . Масштабные коэффициенты равны таким числами, которые представляют собой целую степень десяти, чтобы в результате масштабирования получались значения параметров наиболее близкие к единице.

Помимо ранее рассмотренных базовых элементов (U , C , R , L , I) программы САПР содержат библиотеки различных активных элементов (диодов, транзисторов, микросхем), электрические модели которых позволяют моделировать процессы в разнообразных устройствах (детекторах, преобразователях, усилителях и пр.).

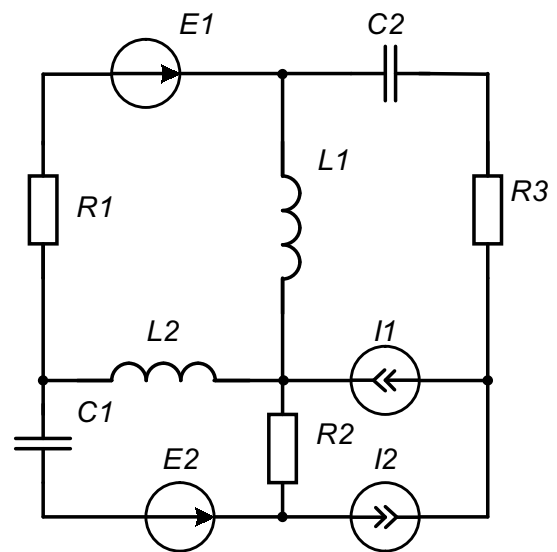
2. РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ №1

«Формирование системы топологических уравнений»

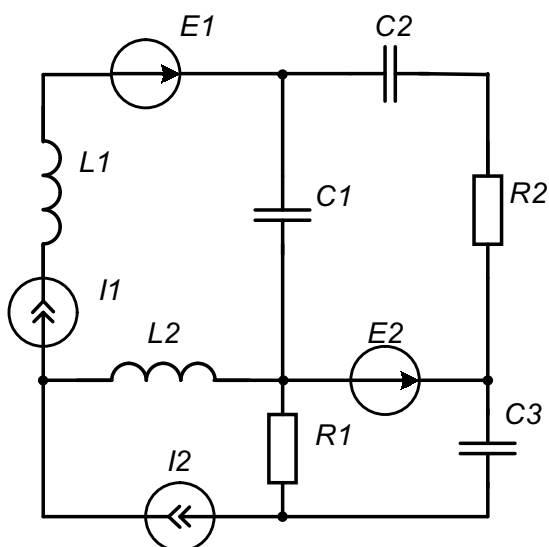
1. Для заданной на рис. 2.1 электрической цепи (номер рисунка соответствует последней цифре номера зачетной книжки) получить полную систему топологических уравнений по закону Кирхгофа для главных сечений.
2. Записать полученную систему уравнений в матричном виде.
3. Получить матрицу главных сечений (МГС).
4. Выписать подматрицы МГС.
5. Записать систему топологических уравнений по закону Кирхгофа для напряжений.



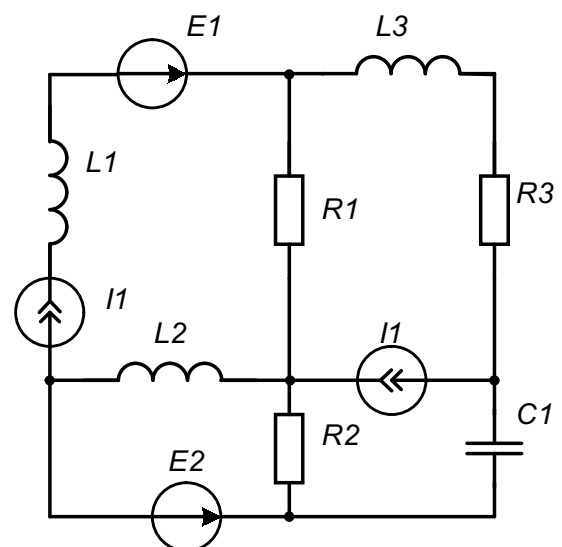
0)



1)

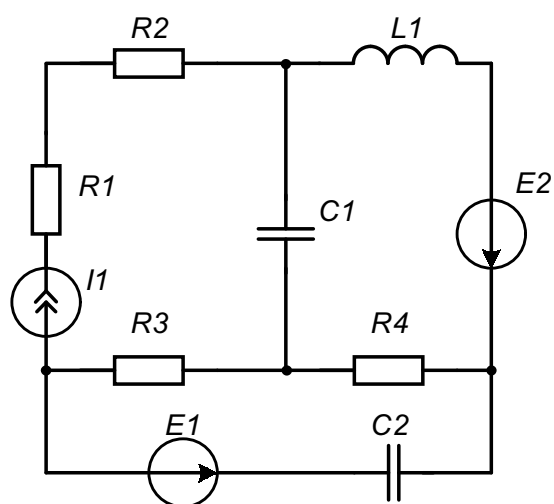


2)

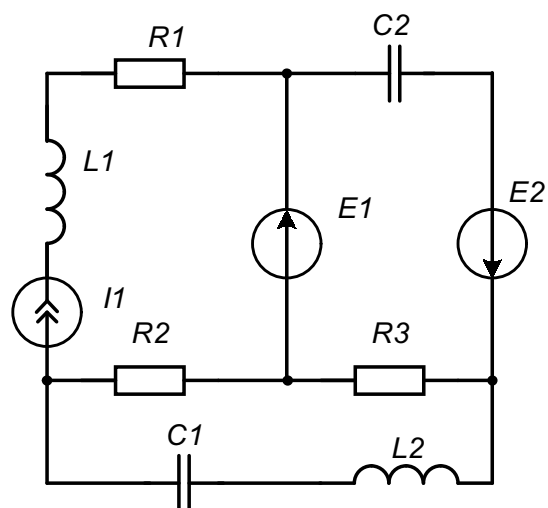


3)

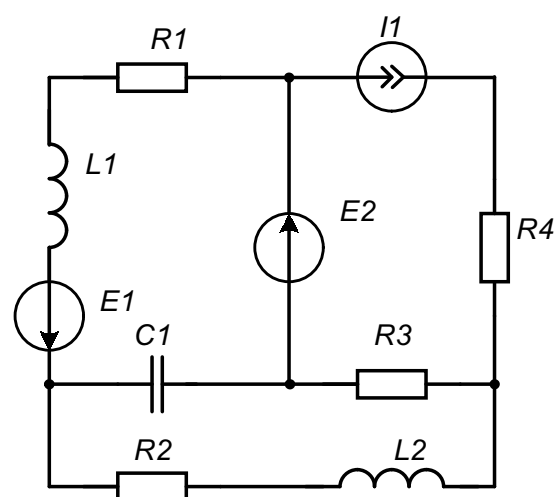
Рис. 2.1 — Электрические цепи к заданию №1



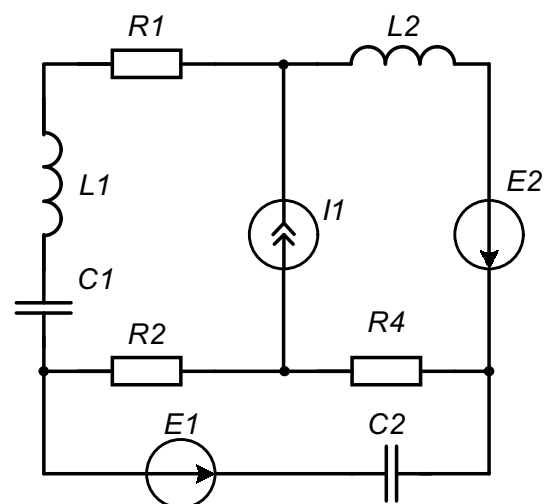
4)



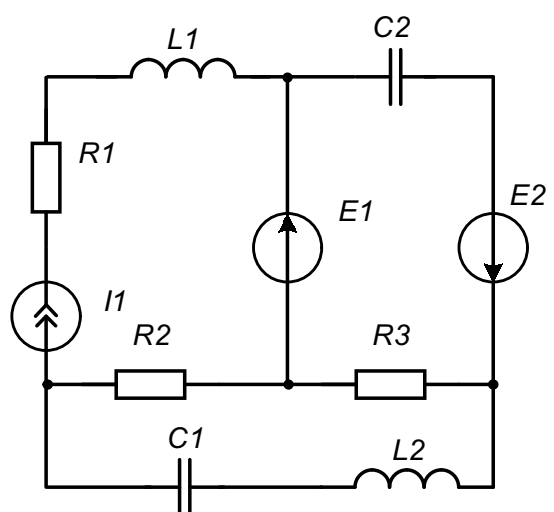
5)



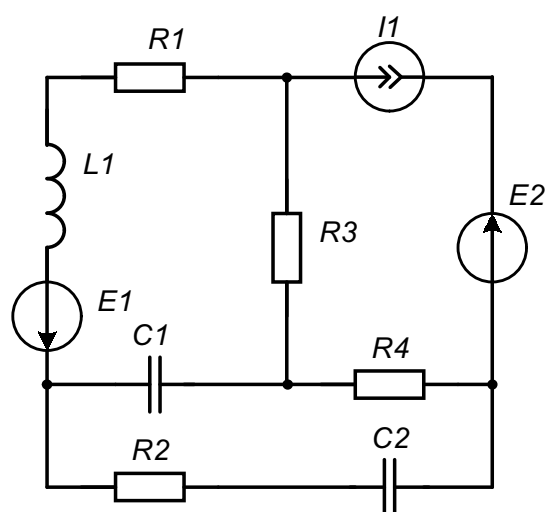
6)



7)



8)



9)

Продолжение рис. 2.1 — Электрические цепи к заданию №1

3. РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ №2 «Автоматизированное формирование МГС»

1. Для электрической цепи из расчетного задания № 1 получить структурную матрицу.

2. Из структурной матрицы, используя алгоритм автоматизированного формирования МГС, получить матрицу главных сечений.

3. Записать последовательно для каждого шага алгоритма преобразованные матрицы с комментариями выполняемых действий.

4. ЗАДАНИЕ №3 Теоретические вопросы к контрольной работе

В соответствии с двумя последними цифрами номера зачетной книжки (N — предпоследняя, M — последняя) дать ответы на теоретические вопросы, номера которых необходимо выбрать из таблицы 4.1

Таблица 4.1— Номера теоретических вопросов

$N \backslash M$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	1, 11	1, 12	2, 13	3, 14	4, 15	6, 17	7, 18	8, 19	5, 16	9, 20
2	1, 13	2, 14	3, 15	4, 16	5, 17	7, 19	8, 20	9, 11	6, 18	10, 12
3	2, 15	3, 16	4, 17	5, 18	6, 19	8, 11	9, 12	10, 13	7, 20	1, 14
4	3, 17	4, 18	5, 19	6, 20	7, 11	9, 13	10, 14	1, 15	8, 12	2, 16
5	4, 19	5, 20	6, 11	7, 12	8, 13	10, 15	1, 16	2, 17	9, 14	3, 18
6	5, 12	6, 13	7, 14	8, 15	9, 16	1, 18	2, 19	3, 20	10, 17	4, 11
7	6, 14	7, 15	8, 16	9, 17	10, 18	2, 16	3, 11	4, 12	1, 19	5, 13
8	7, 16	8, 17	9, 18	10, 19	1, 20	3, 14	4, 13	5, 14	2, 11	6, 15
9	8, 18	9, 19	10, 20	1, 11	2, 12	4, 12	5, 15	6, 16	3, 13	7, 17
0	9, 20	1, 11	1, 12	2, 13	3, 14	5, 10	6, 17	7, 18	4, 15	8, 19

Список теоретических вопросов

1. Методы автоматизированного проектирования РЭА на структурном, функциональном и схемотехническом уровнях.
2. Математические модели компонентов и объектов РЭА. Модели двухполюсников.
3. Математические модели компонентов и объектов РЭА. Математические модели четырехполюсных компонентов РЭА.
4. Математические модели полупроводниковых компонентов РЭА.
5. Моделирование РЭА с использованием теории графов. Топологические уравнения цепи.
6. Численные методы решения систем линейных уравнений.

7. Численные методы решения систем нелинейных уравнений.
8. Численные методы решения систем дифференциальных уравнений.
9. Методы расчета частотных характеристик радиотехнической цепи.
10. Расчет временных характеристик радиотехнической цепи по уравнениям математической модели.
11. Расчет временных характеристик радиотехнической цепи по передаточной функции.
12. Применение метода Монте-Карло в задачах автоматизированного проектирования.
13. Применение метода переменных состояния для анализа линейной цепи.
14. Применение метода узловых потенциалов для анализа линейной цепи.
15. Анализ влияния отклонения параметров элементов на временные характеристики цепи.
16. Задачи оптимизации параметров цепи. Целевая функция и ее виды. Характеристика методов решения однопараметрических задач оптимизации.
17. Метод наискорейшего спуска в решении задач оптимизации.
18. Метод градиентного спуска с равномерным шагом в решении задач оптимизации.
19. Метод дихотомии и его применение в решении задач оптимизации.
20. Метод золотого сечения в решении задач оптимизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калабеков Б. А. Методы автоматизированного расчета электронных схем в технике связи / Б. А. Калабеков, В.Ю. Ланцдус, В. Н. Малафеев.— М. : Радио и связь, 1980. — 357 с.
2. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: Учебное пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров; Под ред. О.В. Алексеева.— М.: Высш. шк., 2000.— 479 с.
3. Автоматизация схемотехнического проектирования/ В.И. Ильин, В.Т. Фроакин, А.И. Бутко; Под ред. В.И. Ильина — М. Радио и связь, 1987.— 420 с.
4. Норенков И.П. Системы автоматизированного проектирования электронной и вычислительной аппаратуры / И.П. Норенков, В.Б. Маничев. — М.: Высшая школа, 1983.— 432 с.
5. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем / И.П. Норенков. — Харьков: Вища школа, 1985.— 346 с.