

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра вычислительной техники

ЭЛЕКТРОНИКА

АВТОМАТИЗАЦИЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Методические указания
к практическим занятиям

Составитель
С.Г. МОСИН

Владимир 2010

УДК 681.3 (621.3)

ББК 32.85

Э45

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент

Владимирского государственного университета

А. Б. Градусов

Печатается по решению редакционного совета

Владимирского государственного университета

Электроника. Автоматизация схемотехнического проекти-
Э45 рования : метод. указания к практ. занятиям / Владим. гос. ун-т ;
сост. С.Г. Мосин. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. –
32 с.

Содержат методические разработки и материалы к проведению практических занятий по разделу «Автоматизация схемотехнического проектирования» дисциплины «Электроника». Практические работы рассчитаны на изучение принципов построения математических моделей схем электронных устройств на основе теории графов. Рассматриваются методы моделирования электронных схем в статическом режиме, частотной и временной областях.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения по направлению 230100 – «Информатика и вычислительная техника» (специальность 230101 – «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети»).

Ил. 3. Библиогр.: 6 назв.

УДК 681.3 (621.3)

ББК 32.85

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований при проектировании электронных устройств является сокращение временных затрат. Удовлетворить данную необходимость можно путем активного использования средств вычислительной техники и систем автоматизированного проектирования. При применении ЭВМ вместо имитации схемы путем ее макетирования используются специальные программы, предназначенные для моделирования и анализа схемы математическими методами.

Предлагаемые методические указания содержат материал по составлению математических моделей схем электронных устройств с использованием теории графов. Топологические основы формирования математических моделей электронных схем предусматривают описание структуры объекта моделирования в виде матриц инцидентий, главных сечений или главных контуров. В методических указаниях рассмотрены способы составления данных топологических матриц, а также возможности их использования при формировании уравнений математической модели.

Для комплексного исследования основных характеристик проектируемого электронного устройства выполняют его моделирование в статическом режиме, а также частотной и временной областях. В указаниях содержатся описания топологических методов составления уравнений узловых потенциалов и уравнений контурных токов. Приведены правила формирования уравнений математической модели схемы электронного устройства для моделирования в различных режимах. Даны описания математических методов, обеспечивающих решение сформированных систем уравнений.

Методические указания представляют собой цикл из восьми практических занятий, каждое из которых включает теоретическое описание, контрольные вопросы и задания для самостоятельной работы студентов.

Занятие № 1

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ. МАТРИЦА ИНЦИДЕНЦИЙ

В ходе данного занятия рассматриваются общие методы решения задачи формирования системы уравнений математической модели электронной схемы, которые основываются на теории графов. Теория графов – обширная область математики, имеющая множество инженерных и вычислительных приложений. Интерес будут представлять только машинные методы формирования уравнений модели объекта проектирования, поэтому ограничимся лишь теми разделами теории графов, которые имеют непосредственное отношение к текущему занятию.

Для формирования уравнений математической модели на основе электрической модели устройства, состоящей из базовых элементов, используются направленные графы $G(V, S)$, в которых каждая ветвь v_{ij} соответствует двухполюсному базовому элементу модели, а ее направление совпадает с направлением протекания тока. Каждая вершина графа s_i соответствует узлу электрической модели – точке соединения двух или более базовых элементов. Таким образом, направленный граф полностью описывает топологию электрической модели.

Приведем ряд определений теории графов, которые понадобятся для дальнейшего изложения материала.

П у т ь. Путем в графе между вершинами s_i и s_j называют множество ветвей, в котором, двигаясь по смежным ветвям, можно перейти из вершины s_i в вершину s_j . Графически путь представляется отрезком между двумя вершинами без ответвлений.

С в я з н ы й г р а ф. Направленный граф $G(V, S)$ называют связным, если можно указать путь между двумя любыми вершинами графа s_i и s_j .

И н ц и д е н т н о с т ь. Ветвь называется инцидентной вершине, если она начинается или заканчивается в этой вершине.

К о н т у р. Контуром называют связный подграф, в котором каждой вершине инцидентно ровно две ветви.

С о б с т в е н н ы й к о н т у р. Ветвь называется собственным контуром, если оба ее конца инцидентны одному и тому же узлу.

Содержащаяся в графе информация может быть полностью представлена матрицей, называемой *матрицей инциденций*. Для направленного графа $G(V, S)$ с $m+1$ вершинами и n ветвями матрицей инциденций является матрица $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ размерностью $(m+1, n)$, в которой $a_{ij} = 1$, если ветвь j инцидентна вершине i и направлена от нее; $a_{ij} = -1$, если ветвь j инцидентна вершине i и направлена к ней; $a_{ij} = 0$, если ветвь j не инцидентна вершине i .

Графы электрических моделей устройств не содержат собственных контуров, вследствие чего каждый столбец матрицы инциденций содержит только два ненулевых элемента, равных 1 и -1 , а остальные элементы равны нулю. Данная особенность позволяет без потери информации исключить любую строку матрицы инциденций, так как содержащиеся в ней значения могут быть восстановлены. Обычно исключают строку матрицы, соответствующую нулевому узлу схемы. Матрица инциденций, полученная путем исключения одной из строк, называется редуцированной.

Матрица инциденций, описывая топологию электрической модели, позволяет записать первый закон Кирхгофа следующим образом:

$$\mathbf{A} \mathbf{I}_B = 0, \quad (1.1)$$

где $\mathbf{A}$ – матрица инциденций, $\mathbf{I}_B$ – вектор токов, протекающих через ветви графа электрической модели.

Рассмотрим простую цепь, представленную на рис. 1, а и соответствующий ей направленный граф (рис. 1, б). Матрица инциденций для данного примера имеет следующий вид:

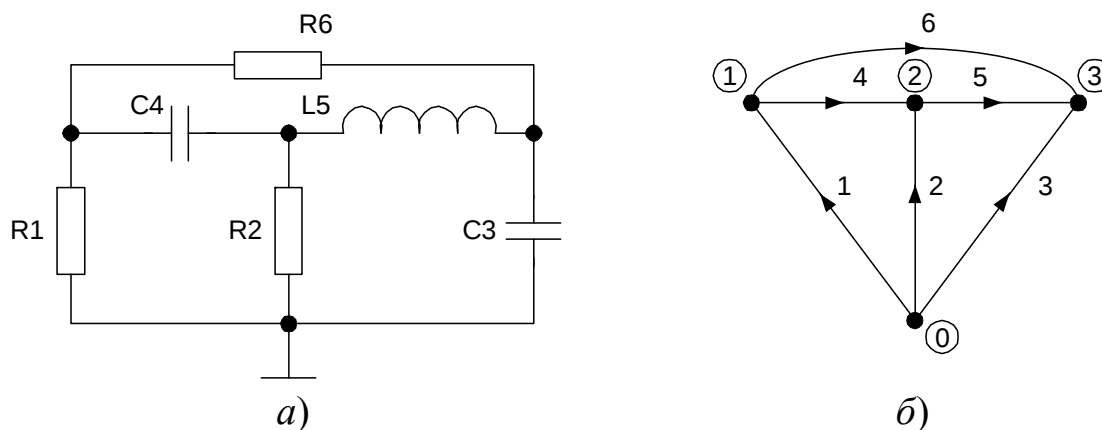


Рис. 1. Электрическая цепь (а) и ее направленный граф (б)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix},$$

где строки соответствуют узлам схемы, а столбцы – ветвям.

Запишем закон Кирхгофа для токов в соответствии с направлениями ветвей графа (см. рис. 1, б):

$$1: -i_1 + i_4 + i_6 = 0,$$

$$2: -i_2 - i_4 + i_5 = 0,$$

$$3: -i_3 - i_5 - i_6 = 0.$$

Тот же результат получаем, используя матрицу инцидентий и выражение (1.1):

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_1 + i_4 + i_6 \\ -i_2 - i_4 + i_5 \\ -i_3 - i_5 - i_6 \end{bmatrix} = 0.$$

С помощью матрицы инцидентий может быть записан и второй закон Кирхгофа. Напряжение на ветви v_{ij} электрической модели можно определить через узловые потенциалы u_i и u_j следующим равенством $v_{ij} = u_i - u_j$. В векторной форме данное равенство может быть записано как

$$v_{ij} = |0 \dots 0 1 0 \dots 0 0 - 1 0 \dots 0| \mathbf{V}_y,$$

где вектор-строка содержит нулевые значения во всех столбцах за исключением i -го, где значение равно 1, и j -го, где значение равно -1 ; $\mathbf{V}_y$ – вектор узловых потенциалов. Сравнивая вектор-строку в последнем равенстве с соответствующим столбцом матрицы инцидентий, можно заметить, что они являются транспонированными по отношению друг к другу.

Обобщая данный результат на все ветви графа электрической модели, второй закон Кирхгофа можно представить следующим образом:

$$\mathbf{V}_B = \mathbf{A}^T \mathbf{V}_y, \quad (1.2)$$

где $\mathbf{V}_B$ – вектор напряжений на ветвях графа электрической модели устройства.

Например, уравнения для напряжений на всех ветвях графа (см. рис. 1, б) имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} v_{01} \\ v_{02} \\ v_{03} \\ v_{12} \\ v_{23} \\ v_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u_1 \\ -u_2 \\ -u_3 \\ u_1 - u_2 \\ u_2 - u_3 \\ u_1 - u_3 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, уравнения (1.1) и (1.2) представляют собой запись обобщенных законов Кирхгофа для токов и напряжений электрической схемы.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные топологические понятия для электрических цепей.
2. Что такое матрица инциденций?
3. Опишите правила построения матрицы инциденций.
4. Каковы основные свойства матрицы инциденций?

Контрольные задания

Для схем, описанных в прил. 1, необходимо:

1. Построить направленный граф.
2. Выбрать направления ветвей.
3. Сформировать матрицу инциденций.
4. Составить записи обобщенных законов Кирхгофа для токов и напряжений. Проверить их справедливость.

Занятие № 2

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ. МАТРИЦА ГЛАВНЫХ СЕЧЕНИЙ

Формирование взаимно независимой системы уравнений можно выполнить на основе матрицы главных сечений. Данный способ опирается на понятия дерева и дополнения к дереву направленного графа.

Д е р е в о. Деревом связного графа называют связный подграф, включающий все узлы графа, но не имеющий контуров. Дерево графа, соответствующее электрической модели с $m+1$ узлами, содержит m ветвей. Ветви графа, вошедшие в дерево, называют **ребрами графа**, а не вошедшие, которые образуют **дополнение к дереву**, – **хордами графа**.

Главным сечением графа называют сечение, проходящее только через одно ребро и через столько хорд, сколько необходимо для разделения графа на две отдельные части. Так как в дерево графа входит только m ветвей, следовательно, существует m главных сечений.

Ветви дерева при построении матрицы главных сечений удобно нумеровать в следующем порядке – сначала ребра, потом хорды, используя для этого следующие правила:

1. Выбрать направления ветвей.
2. Выбрать дерево графа.
3. Пронумеровать последовательными целыми числами, начиная от единицы, вначале все ребра графа, а затем все хорды.

Матрицей главных сечений направленного графа называют матрицу $\mathbf{Q} = [q_{ij}]$, в которой элемент $q_{ij} = 1$, если ветвь j находится в сечении i и ориентация ветви совпадает с ориентацией сечения, задаваемой ребром; $q_{ij} = -1$, если ветвь j находится в сечении i и их ориентации противоположны; $q_{ij} = 0$, если ветвь j не находится в сечении i .

Например, для графа (см. рис. 1, а) один из возможных вариантов дерева и соответствующего этому дереву набора главных сечений показан на рис. 2.

Матрица главных сечений для представленного примера принимает следующий вид:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

где строки соответствуют главным сечениям графа, а столбцы – ветвям.

Общая форма первого закона Кирхгофа с помощью матрицы главных сечений $\mathbf{Q}$ может быть записана следующим образом:

$$\mathbf{Q}\mathbf{I}_B = 0, \quad (2.1)$$

где $\mathbf{I}_B$ – вектор токов в ветвях графа, элементы которого перечислены в порядке нумерации столбцов в матрице $\mathbf{Q}$.

Для дерева (см. рис. 2) общая запись первого закона Кирхгофа в матричной форме имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 - i_5 + i_6 \\ i_2 - i_4 - i_5 + i_6 \\ i_3 - i_4 - i_5 \end{bmatrix} = 0.$$

Матрицу главных сечений можно разделить на две подматрицы

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_p \quad \mathbf{Q}_x] = [1 \quad \mathbf{Q}_x],$$

где индекс «р» соответствует ребрам, а индекс «х» – хордам. Подматрица, соответствующая дереву графа, является единичной – «1».

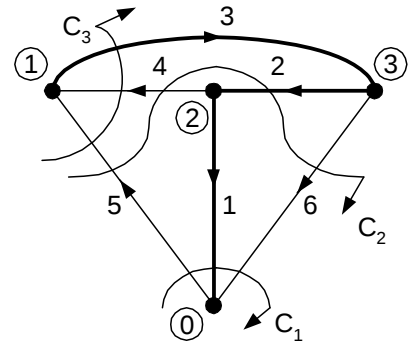


Рис. 2. Дерево направленного графа и его главные сечения

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятия дерева и главного сечения связного графа.
2. Что такое матрица главных сечений?
3. Опишите правила построения матрицы главных сечений.
4. Каковы основные свойства матрицы главных сечений?

Контрольные задания

Для схем, описанных в прил. 1, необходимо:

1. Выделить дерево направленного графа.
2. Провести главные сечения.
3. Сформировать матрицу главных сечений.
4. Составить запись закона Кирхгофа для токов. Проверить ее справедливость.

Занятие № 3

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ. МАТРИЦА ГЛАВНЫХ КОНТУРОВ

Для упрощения записи второго закона Кирхгофа вводят еще одну матрицу, характеризующую граф электрической модели – матрицу главных контуров. Метод построения матрицы главных контуров основан на выделении дерева в графе $G(V, S)$. Подключение к дереву любой хорды приводит к образованию главного контура для этой хорды, ориентация которого выбирается по направлению обхода, задаваемого хордой. В связном графе с $m + 1$ вершинами и n ветвями можно выделить $n - m$ хорд и, следовательно, $n - m$ главных контуров.

При формировании матрицы главных контуров предлагают использовать следующие правила:

1. Пронумеровать ребра и хорды графа, как было предложено ранее (с. 8).
2. Перебрать хорды в соответствии с их номерами и пронумеровать контуры, начиная с 1.

3. Выбрать направление обхода контура, совпадающее с направлением соответствующей хорды.

Матрицей главных контуров направленного графа называют матрицу $\mathbf{B} = [b_{ij}]$, в которой элемент $b_{ij} = 1$, если ветвь i входит в j -й главный контур и ее направление совпадает с направлением обхода контура, задаваемым хордой; $b_{ij} = -1$, если ветвь i входит в j -й главный контур и ее направление противоположно ориентации контура; $b_{ij} = 0$, если ветвь i не входит в j -й главный контур.

Например, для дерева (см. рис. 2) матрица главных контуров будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где строки соответствуют главным сечениям, а столбцы – ветвям.

Матрица главных контуров позволяет компактно записать второй закон Кирхгофа, устанавливающий, что алгебраическая сумма напряжений в каждом контуре любой сложной схемы всегда равна нулю

$$\mathbf{B}\mathbf{V}_\mathbf{B} = 0, \quad (3.1)$$

где $\mathbf{V}_\mathbf{B}$ – вектор напряжений на ветвях графа.

Для дерева (см. рис. 2) общая запись второго закона Кирхгофа в матричной форме имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{20} \\ v_{32} \\ v_{13} \\ v_{21} \\ v_{01} \\ v_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{32} + v_{13} + v_{21} \\ v_{20} + v_{32} + v_{13} + v_{01} \\ -v_{20} - v_{32} + v_{30} \end{bmatrix} = 0.$$

Матрицу главных контуров можно разделить на две подматрицы

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_\mathbf{p} \quad \mathbf{B}_\mathbf{x}] = [\mathbf{B}_\mathbf{p} \quad \mathbf{1}],$$

где индекс «р» соответствует ребрам, а индекс «х» – хордам. Подматрица, соответствующая хордам графа, является единичной – «1».

Между матрицами главных сечений и главных контуров существует фундаментальное соотношение. Если расположить столбцы матриц в одинаковой последовательности ветвей, то выполняется следующее соотношение:

$$\mathbf{B}\mathbf{Q}^t = 0 \quad (3.2)$$

или

$$\mathbf{Q}\mathbf{B}^t = 0. \quad (3.3)$$

Покажем справедливость данного соотношения для дерева, представленного на рис. 2.

$$\mathbf{Q}\mathbf{B}^t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Из соотношений (3.2) и (3.3) следуют важные выводы

$$\mathbf{B}\mathbf{Q}^t = [\mathbf{B}_p \quad 1] \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{Q}_x^t \end{bmatrix} = \mathbf{B}_p + \mathbf{Q}_x^t = 0$$

или

$$\mathbf{B}_p = -\mathbf{Q}_x^t. \quad (3.4)$$

Уравнение (3.4) показывает, что

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\mathbf{Q}^t & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

и

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & -\mathbf{B}_p^t \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Это означает, что матрицу $\mathbf{B}$ можно легко получить из матрицы $\mathbf{Q}$ и наоборот.

В свою очередь, существует также связь между матрицей инцидентий и матрицей главных контуров, которая при одинаковой после-

довательности столбцов обеих матриц может быть записана в виде следующего равенства:

$$\mathbf{A}\mathbf{B}^t = 0. \quad (3.7)$$

Из записи в блочной форме получаем

$$\mathbf{A}\mathbf{B}^t = [\mathbf{A}_p \quad \mathbf{A}_x] \begin{bmatrix} \mathbf{B}_p^t \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_p \mathbf{B}_p^t + \mathbf{A}_x = 0,$$

откуда следует, что блоки матрицы инцидентий $\mathbf{A}_p$ и $\mathbf{A}_x$, а также блок матрицы главных контуров $\mathbf{B}_p$ связаны соотношением

$$\mathbf{B}_p^t = -\mathbf{A}_p^{-1} \mathbf{A}_x. \quad (3.8)$$

Таким образом, матрица инцидентий связана с матрицами главных контуров и главных сечений следующими выражениями:

$$\mathbf{B} = \left[-\mathbf{A}_p^{-1} \mathbf{A}_x \mid 1 \right]^t, \quad (3.9)$$

$$\mathbf{D} = -\mathbf{A}_p^{-1} [\mathbf{A}_p \mid \mathbf{A}_x] = \mathbf{A}_p^{-1} \mathbf{A}. \quad (3.10)$$

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятие главного контура связного графа.
2. Что такое матрица главных контуров?
3. Опишите правила построения матрицы главных контуров.
4. Каковы основные свойства матрицы главных контуров?

Контрольные задания

Для схем, описанных в прил. 1, необходимо:

1. Выделить дерево направленного графа.
2. Определить главные контуры.
3. Сформировать матрицу главных контуров.
4. Составить запись закона Кирхгофа для напряжений. Проверить ее справедливость.
5. Показать справедливость соотношений (3.2) и (3.3).
6. Используя (3.5) и (3.6), показать, что матрица $\mathbf{B}$ может быть получена из матрицы $\mathbf{Q}$ и наоборот.

Занятие № 4

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ УРАВНЕНИЙ УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Помимо пассивных компонентов в электрическую цепь могут также входить источники тока и напряжения. Следует определить, как необходимо наиболее целесообразно нумеровать соответствующие им ветви графа. Для ответа на данный вопрос воспользуемся выражениями (2.1) и (3.1).

Для (2.1) можно записать

$$\mathbf{Q}\mathbf{I}_B = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{Q}_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_x \end{bmatrix} = i_p + \mathbf{Q}_x i_x = 0$$

или

$$i_p = -\mathbf{Q}_x i_x. \quad (4.1)$$

Другими словами, токи ребер графа выражаются через токи его хорд. Так как все токи, протекающие в цепи, – это токи ребер и хорд графа, то можно записать

$$\mathbf{I}_B = \begin{bmatrix} i_p \\ i_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{Q}_x \\ 1 \end{bmatrix} i_x = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_p^t \\ 1 \end{bmatrix} i_x = \mathbf{B}^t i_x. \quad (4.2)$$

Следовательно, токи хорд можно рассматривать как независимые переменные. Если они известны, то все токи в цепи можно рассчитать, используя выражение (4.2).

Для (3.1) можно записать

$$\mathbf{B}\mathbf{V}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_x \end{bmatrix} = \mathbf{B}_p v_p + v_x = 0$$

или

$$v_x = -\mathbf{B}_p v_p. \quad (4.3)$$

Как и для токов, все напряжения на ветвях можно представить в виде

$$\mathbf{V}_B = \begin{bmatrix} v_p \\ v_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\mathbf{B}_p \end{bmatrix} v_p = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{Q}_x^t \end{bmatrix} v_p = \mathbf{Q}^t v_p. \quad (4.4)$$

Таким образом, напряжения, соответствующие ребрам графа, можно рассматривать как независимые переменные. Если они известны, то, используя (4.4), можно рассчитать все остальные напряжения.

Уравнение (4.2) показывает, что токи, соответствующие хордам, являются независимыми переменными. Ток независимого источника не может быть зависимой переменной. Следовательно, дерево графа не должно включать источники тока.

Уравнение (4.4) показывает, что напряжения, соответствующие ребрам графа, являются независимыми переменными. Следовательно, все ветви, соответствующие независимым источникам напряжения, должны быть включены в дерево графа.

Предложенный ранее способ нумерации позволял формировать подматрицы $\mathbf{Q}_r$ и $\mathbf{B}_x$ в виде единичных матриц. Чтобы сохранить это свойство, необходимо использовать следующие правила нумерации ветвей:

1. Пронумеровать источники ЭДС как $e_1, e_2, \dots, e_i$ и включить их в дерево графа.
2. Дополнить дерево за счет пассивных элементов и пронумеровать их последовательными целыми числами, начиная от 1.
3. Продолжить нумерацию остальных ветвей графа, соответствующих пассивным элементам.
4. Пронумеровать источники тока как $j_1, j_2, \dots, j_m$ и поместить их в дополнение к дереву.

Направление ветвей источников должно выбираться в соответствии с полярностью подключения в электрической цепи, направление остальных ветвей может быть произвольным. Если независимые источники включены в матрицу, то будем называть ее дополненной и снабжать индексом «д».

Например, для схемы, представленной на рис. 3, матрица главных сечений, подготовленная с использованием предлагаемых правил нумерации ветвей, имеет следующий вид:

$$\mathbf{Q}_d = \begin{matrix} & e_1 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & j_1 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_e & \mathbf{Q} & \mathbf{Q}_j \end{bmatrix}. \end{matrix}$$

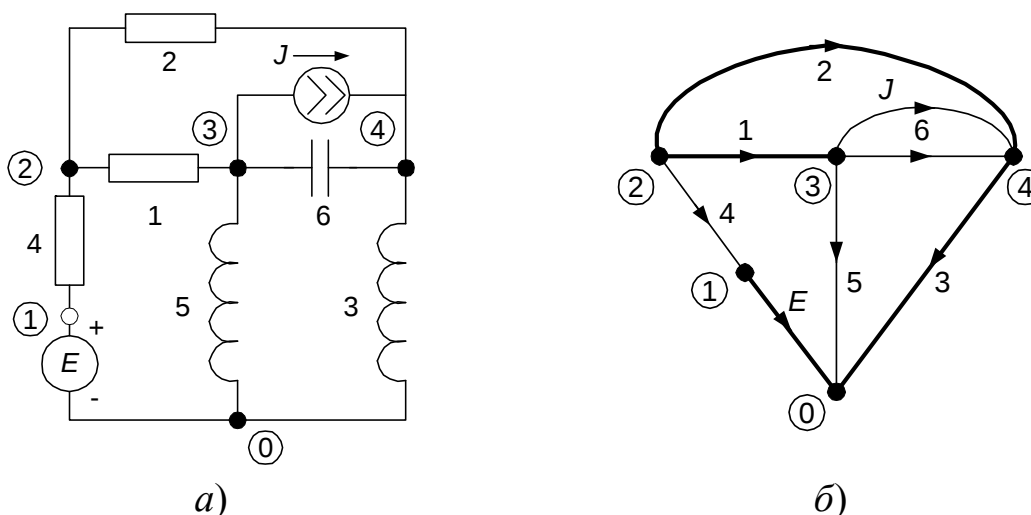


Рис. 3. Электрическая цепь (а) и ее направленный граф (б)

Прежде чем перейти к составлению **уравнений для узловых потенциалов**, необходимо выполнить преобразование источников ЭДС в эквивалентные источники тока.

В уравнениях для узловых потенциалов каждый пассивный элемент описывается с помощью соотношения, связывающего напряжение V_B , ток I_B и проводимость Y_B ветви

$$Y_B V_B = I_B, \quad (4.5)$$

где Y_B – диагональная матрица проводимостей ветвей, V_B и I_B – векторы напряжений и токов ветвей соответственно.

Согласно закону Кирхгофа для токов, используя дополненную матрицу инцидентий (основанную на редуцированной матрице инцидентий), получим:

$$A_d I = 0. \quad (4.6)$$

Представив матрицу A_d в блочной форме записи, преобразуем уравнение (4.6) к виду

$$\begin{bmatrix} A & A_J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_B \\ J_B \end{bmatrix} = 0 \quad (4.7)$$

или

$$A I_B = -A_J J_B, \quad (4.8)$$

где J_B – вектор известных токов источников.

Используя (4.5) в выражении (4.8) для I_B , получаем:

$$A Y_B V_B = -A_J J_B. \quad (4.9)$$

Уравнение (1.2) в случае использования дополненной матрицы инциденций можно представить в виде

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}_d^t \mathbf{V}_y,$$

или

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_B \\ \mathbf{V}_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^t \\ \mathbf{A}_J^t \end{bmatrix} \mathbf{V}_y, \quad (4.10)$$

где $\mathbf{V}_J$ – вектор напряжений на источниках.

Выражение (4.10) можно представить следующим образом:

$$\mathbf{V}_B = \mathbf{A}^t \mathbf{V}_y; \quad (4.11)$$

$$\mathbf{V}_J = \mathbf{A}_J^t \mathbf{V}_y. \quad (4.12)$$

Напряжения на источниках токов можно найти из (4.12) после того, как определены узловые потенциалы $\mathbf{V}_y$. После подстановки (4.11) в (4.9) получаем:

$$\mathbf{A} \mathbf{Y}_B \mathbf{A}^t \mathbf{V}_y = -\mathbf{A}_J \mathbf{J}_B \quad (4.13)$$

или

$$\mathbf{Y} \mathbf{V}_y = \mathbf{J}_y. \quad (4.14)$$

Произведение матриц

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \mathbf{Y}_B \mathbf{A}^t \quad (4.15)$$

равно матрице узловых проводимостей. А вектор в правой части равенства

$$\mathbf{J}_y = -\mathbf{A}_J \mathbf{J}_B \quad (4.16)$$

является вектором эквивалентных узловых источников тока.

Решение системы линейных алгебраических уравнений (4.14) позволяет рассчитать вектор узловых потенциалов, а с его помощью и значения токов в ветвях схемы.

Аналогичные соотношения можно получить при использовании матрицы главных сечений $\mathbf{Q}$.

Контрольные вопросы

1. Опишите правила нумерации ветвей, соответствующих независимым источникам тока и/или напряжения.
2. Что такое дополненная матрица главных контуров (инциденций и главных контуров)?

3. Какие правила формирования уравнений для узловых потенциалов в матричной форме с использованием матрицы инцидентий вы знаете?

4. Составьте уравнения для узловых потенциалов с использованием матрицы главных сечений.

Контрольные задания

Для схем, описанных в прил. 2, необходимо:

1. Выделить дерево направленного графа.
2. Определить главные сечения.
3. Сформировать дополненные матрицы инцидентий и главных сечений.
4. Составить уравнения для узловых потенциалов, используя матрицу инцидентий.
5. Составить уравнения для узловых потенциалов, используя матрицу главных сечений.

Занятие № 5

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОСТАВЛЕНИЯ УРАВНЕНИЙ КОНТУРНЫХ ТОКОВ

Прежде чем перейти к составлению *уравнений для контурных токов*, необходимо выполнить преобразование источников тока в эквивалентные источники ЭДС. В этих уравнениях напряжение на каждом пассивном элементе представляется в виде

$$\mathbf{Z}_B \mathbf{I}_B = \mathbf{V}_B, \quad (5.1)$$

где $\mathbf{Z}_B$ – диагональная матрица импедансов ветвей, $\mathbf{V}_B$ и $\mathbf{I}_B$ – векторы напряжений и токов ветвей соответственно.

Согласно закону Кирхгофа для напряжений, используя дополненную матрицу главных контуров, получим:

$$\mathbf{B}_d \mathbf{V} = 0. \quad (5.2)$$

Подставив матрицу $\mathbf{B}_d$ в блочной форме записи, преобразуем уравнение (5.2) к виду:

$$[\mathbf{B}_E \quad \mathbf{B}] \begin{bmatrix} \mathbf{E}_B \\ \mathbf{V}_B \end{bmatrix} = 0 \quad (5.3)$$

или

$$\mathbf{B}\mathbf{V}_B = -\mathbf{B}_E\mathbf{E}_B, \quad (5.4)$$

где $\mathbf{E}_B$ – вектор известных источников ЭДС.

Используя (5.1) в выражении (5.4) для $\mathbf{V}_B$, получаем:

$$\mathbf{B}\mathbf{Z}_B\mathbf{I}_B = -\mathbf{B}_E\mathbf{E}_B. \quad (5.5)$$

Закон Кирхгофа для токов с учетом (4.2) можно записать как

$$\mathbf{I} = \mathbf{B}_d^t \mathbf{I}_x,$$

или

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_E \\ \mathbf{I}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_E^t \\ \mathbf{B}^t \end{bmatrix} \mathbf{I}_x, \quad (5.6)$$

где $\mathbf{I}_E$ – вектор токов, протекающих через источники напряжения.

Выражение (5.6) можно представить следующим образом:

$$\mathbf{I}_E = \mathbf{B}_E^t \mathbf{I}_x; \quad (5.7)$$

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{B}^t \mathbf{I}_x. \quad (5.8)$$

Если токи $\mathbf{I}_x$ известны, то токи, протекающие через источники напряжения $\mathbf{I}_E$, можно найти из (5.7). После подстановки (5.8) в (5.5) получаем

$$\mathbf{B}\mathbf{Z}_B\mathbf{B}^t \mathbf{I}_x = -\mathbf{B}_E\mathbf{E}_B. \quad (5.9)$$

или

$$\mathbf{Z}\mathbf{I}_x = \mathbf{E}_K. \quad (5.10)$$

Здесь произведение матриц

$$\mathbf{Z} = \mathbf{B}\mathbf{Z}_B\mathbf{B}^t \quad (5.11)$$

равно матрице импедансов в уравнениях для контурных токов, а вектор

$$\mathbf{E}_K = -\mathbf{B}_E\mathbf{E}_B \quad (5.12)$$

соответствует вектору источников ЭДС контуров.

Решение системы линейных алгебраических уравнений (5.10) осуществляется относительно вектора токов в хордах графа электрической модели. Зная $\mathbf{I}_x$, можно вычислить токи, протекающие через пассивные элементы модели, и токи, протекающие через источники напряжения.

Контрольные вопросы

1. Опишите правила построения дополненной матрицы главных контуров.
2. Какие правила формирования уравнений контурных токов в матричной форме вы знаете?
3. Составьте уравнения контурных токов с использованием матрицы главных сечений.

Контрольные задания

Для схем, описанных в прил. 2, необходимо:

1. Выделить дерево направленного графа.
2. Определить главные контуры.
3. Сформировать дополненную матрицу главных контуров.
4. Составить уравнения для узловых потенциалов, используя матрицу главных контуров.

Занятие № 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Расчет статического режима имеет самостоятельное значение, например, при составлении карты режимов схемы по постоянному току, когда учитываются номинальные значения токов, напряжений и рассеиваемых мощностей в разных точках и элементах схемы. Однако чаще всего моделирование статического режима является составной частью других, более сложных задач. Например, расчет переходных процессов в схеме можно представить последовательностью расчетов квазистатических режимов в отдельные моменты времени, в каждый из которых нужно выполнить законы равновесия.

При составлении уравнений статического режима в большинстве современных программ схемотехнического моделирования используется базис узловых потенциалов φ . Математическая модель любого элек-

тронного устройства по постоянному току представляет собой систему нелинейных уравнений

$$F(\mathbf{V}) = 0, \quad (6.1)$$

решив которую находят потенциалы на узлах электрической модели.

В базисе узловых потенциалов исходная модель-уравнение (6.1) принимает вид

$$\mathbf{I}(\varphi) = 0, \quad (6.2)$$

где $\mathbf{I}(\varphi)$ – вектор узловых токов.

Процесс формирования математической модели схемы можно описать следующим алгоритмом:

1. Уравнение каждого элемента схемы представляется в виде

$$\mathbf{i}_\varphi = \mathbf{Y}_\varphi \varphi + \mathbf{I}_\varphi, \quad (6.3)$$

где $\mathbf{Y}_\varphi$ – матрица проводимостей элементов, $\mathbf{I}_\varphi$ – вектор эквивалентных узловых источников тока (вектор полюсных токов).

2. Выделяются и обнуляются двумерные и/или одномерные массивы для записи в них матрицы узловых проводимостей схемы $\mathbf{Y}$ и вектора узловых токов $\mathbf{I}$, являющихся основными компонентами математических моделей схемы.

3. Рассматривается очередной k -й элемент схемы. Компоненты его вектора $\mathbf{I}_\varphi$ и матрицы $\mathbf{Y}_\varphi$ заносятся в соответствующие позиции массивов $\mathbf{I}$ и $\mathbf{Y}$ и суммируются с их содержимым.

4. Если список элементов не исчерпан, то повторяется п. 3; если исчерпан, то формирование математической модели схемы заканчивается.

Решение системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), представленной в (6.1), может быть получено с использованием численных методов.

Для решения (6.1) можно использовать *метод простой итерации*

$$\mathbf{V}^{(k+1)} = \mathbf{V}^{(k)} - \lambda \mathbf{F}(\mathbf{V}^{(k)}), \quad (6.4)$$

где k – номер итерации; λ – множитель, регулирующий сходимость.

В общем случае алгоритм (6.4) не гарантирует сходимость, однако при достаточно малых λ алгоритм будет сходиться. Главный недостаток данного алгоритма – медленная сходимость. Более быструю сходимость обеспечивает *метод Ньютона*:

$$\mathbf{F}'(\mathbf{V}^{(k)})\Delta\mathbf{V}^{(k)} = -\mathbf{F}(\mathbf{V}^{(k)}), \quad (6.5)$$

где $\Delta\mathbf{V}^{(k)} = \mathbf{V}^{(k+1)} - \mathbf{V}^{(k)}$ – вектор поправок; $\mathbf{F}(\mathbf{V}^{(k)})$ – вектор невязок; $\mathbf{F}'(\mathbf{V}^{(k)})$ – матрица Якоби.

Решая (6.5) при заданном начальном приближении $\mathbf{V}^{(0)}$ относительно $\Delta\mathbf{V}^{(0)}$, вычисляем $\mathbf{V}^{(1)} = \Delta\mathbf{V}^{(0)} + \mathbf{V}^{(0)}$. Далее, решая (6.5) относительно $\Delta\mathbf{V}^{(1)}$, определяем $\mathbf{V}^{(2)}$ и т.д. до сходимости.

В отличие от линейно сходящегося метода простых итераций алгоритм Ньютона сходится квадратично. При расчете схемы в статическом режиме выражение (6.2) формируется в виде, соответствующем решению методом Ньютона:

$$\mathbf{Y}(\boldsymbol{\varphi}^{(k)})\Delta\boldsymbol{\varphi}^{(k)} = -\mathbf{I}(\boldsymbol{\varphi}^{(k)}), \quad (6.6)$$

где $\mathbf{Y} = [\partial\mathbf{I}/\partial\boldsymbol{\varphi}]$ – матрица узловых проводимостей; k – индекс ньютоновской итерации; $\Delta\boldsymbol{\varphi}^{(k)} = \boldsymbol{\varphi}^{(k+1)} - \boldsymbol{\varphi}^{(k)}$ – вектор поправок.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение анализа электронных схем в статическом режиме?
2. Опишите правила формирования математической модели схемы для анализа в статическом режиме.
3. Какие методы решения СНДУ вы можете перечислить?
4. Укажите достоинства и недостатки использования метода Ньютона для решения систем нелинейных алгебраических уравнений.

Контрольные задания

Для схем, описанных в прил. 2, необходимо:

1. Записать математическую модель схемы в виде системы уравнений (6.2).
2. Составить алгоритм решения полученной системы методом простой итерации.
3. Составить алгоритм решения полученной системы методом Ньютона.
4. Выполнить решение полученной системы методом простой итерации и методом Ньютона при выбранных начальных приближениях $\boldsymbol{\varphi}^{(0)}$.
5. Сравнить полученные результаты.

Занятие № 7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Расчет электрических схем в частотной области позволяет оценить реакцию линейного или нелинейного устройства на гармонические синусоидальные воздействия различной частоты и амплитуды. Основными характеристиками, формируемыми при анализе схем в частотной области, являются амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) представляется в виде модуля коэффициента усиления от частоты входного сигнала, или

$$F(j\omega) = u_{\text{вых}}(j\omega) / u_{\text{вх}}(j\omega), \quad (7.1)$$

где $j\omega$ – комплексная частота.

Существуют различные способы расчета АЧХ. *Аналитический способ* основан на вычислении АЧХ в виде отношения полиномов конечных степеней

$$F(j\omega) = \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)} = \frac{a_m(j\omega)^m + a_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + a_0}{b_n(j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + b_0}. \quad (7.2)$$

При *численном способе* АЧХ вычисляется в виде числового значения $F(j\omega)$ при разных значениях ω . В качестве входного сигнала используется источник напряжения

$$E_{\text{вх}}(j\omega) = 1 \cdot \exp(j\omega)$$

с единичной комплексной амплитудой, нулевой начальной фазой и малым внутренним сопротивлением. В базисе узловых потенциалов этот источник напряжения преобразуется в единичный источник тока

$$I_{\text{вх}}(j\omega) = 1 \cdot \exp(j\omega)$$

с большой параллельно включенной проводимостью.

Таким образом, при использовании указанного входного сигнала будет верно соотношение

$$F(j\omega) = u_{\text{вых}}(j\omega) / E_{\text{вх}}(j\omega) = u_{\text{вых}}(j\omega), \quad (7.3)$$

где $F(j\omega)$ – комплексная АЧХ. Следовательно, при расчете $u_{\text{вых}}(j\omega)$ в любой ветви схемы происходит расчет АЧХ схемы для выбранной ветви.

Метод узловых потенциалов позволяет легко формировать узловые уравнения для моделирования электронных схем в частотной области. В этом случае методика составления узловых уравнений сохраняется, изменяются лишь компонентные уравнения реактивных ветвей, которые имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} i_C &= j\omega C(\varphi_{\text{нач}} - \varphi_{\text{кон}}), \\ i_L &= -\frac{j}{\omega L}(\varphi_{\text{нач}} - \varphi_{\text{кон}}), \end{aligned} \quad (7.4)$$

где $\varphi_{\text{нач}}$, $\varphi_{\text{кон}}$ – потенциалы на концах реактивных ветвей, j – мнимая единица, ω – частота.

Соответственно проводимости реактивных ветвей равны

$$\begin{aligned} y_C &= j\omega C, \\ y_L &= -\frac{j}{\omega L}. \end{aligned} \quad (7.5)$$

Уравнения (7.4) используются при формировании вектора узловых токов, а (7.5) – матрицы узловых проводимостей. При этом в схеме замещения постоянные источники напряжения E закорачиваются, а постоянные источники тока I размыкаются. В результате узловое уравнение линейной схемы в частотной области принимает следующий вид:

$$\mathbf{Y}(j\omega)\boldsymbol{\varphi}(j\omega) = -\mathbf{I}(j\omega). \quad (7.6)$$

Здесь в векторе $\mathbf{I}(j\omega)$ элемент, соответствующий входной ветви, равен 1, а остальные составляющие – нулевые, так как при нулевых начальных приближениях в линейной схеме все токи ветвей равны нулю.

Уравнение (7.6) на каждой частоте ω нужно решать лишь один раз, поскольку моделируемая схема является линейной. Систему (7.6) можно решать либо путем обращения комплексной матрицы $\mathbf{Y}(j\omega)$, либо путем решения системы линейных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами. Подставляя в уравнение (7.6) разные значения частоты ω_i и вычисляя вектор $\boldsymbol{\varphi}(j\omega_i)$ на каждой частоте, получаем комплексную частотную характеристику рассчитываемого устройства.

Если интерес представляет частотная характеристика в каком-нибудь одном узле схемы k , то на каждой частоте ω_i нужно выбирать из вектора $\boldsymbol{\varphi}(j\omega)$ комплексное значение потенциала

$$\varphi_k(j\omega) = A_k(\omega) + jB_k(\omega) \quad (7.7)$$

и вычислять точку амплитудно-частотной и фазочастотной (ФЧХ) характеристик в узле k

$$\varphi_{k \text{ АЧХ}}(\omega) = \sqrt{A_k^2(\omega) + B_k^2(\omega)}, \quad (7.8)$$

$$\varphi_{k \text{ ФЧХ}}(\omega) = \arctg \left(\frac{B_k(\omega)}{A_k(\omega)} \right). \quad (7.9)$$

Контрольные вопросы

1. Каково назначение анализа электронных схем в частотной области?
2. Опишите правила формирования математической модели схемы для анализа в частотной области.
3. Какие методы расчета АЧХ вы можете перечислить? Поясните их.
4. Опишите численный метод расчета АЧХ и ФЧХ в узле моделируемой схемы.

Контрольные задания

Для схем, описанных в прил. 2, необходимо:

1. Записать математическую модель схемы в виде системы уравнений (7.6).
2. Составить алгоритм решения полученной системы численным методом.
3. Выполнить решение полученной системы при различных значениях частоты входного синусоидального воздействия.
4. Провести анализ полученных результатов.

Занятие № 8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Для моделирования переходных процессов в электронной схеме необходимо решить систему математической модели, описывающей поведение моделируемого устройства во времени, с учетом начальных условий и временной зависимости входных сигналов.

Расчет переходных процессов в базисе узловых потенциалов выполняется для уравнения (6.6), используя при этом модели реактивных элементов вида:

в дифференциальной форме

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}, \quad (8.1)$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}; \quad (8.2)$$

в интегральной форме

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt, \quad (8.3)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L(t) dt. \quad (8.4)$$

Уравнения (8.1) – (8.4) учитывают в составе вектора $\mathbf{I}(\varphi)$ и матрицы $\mathbf{Y}(\varphi)$. Для этого выбирают некоторый интервал Δt и эти уравнения дискретизируют на данном интервале по формулам численного дифференцирования или интегрирования. Поскольку в методе узловых потенциалов уравнения элементов должны иметь вид

$$i = f(u),$$

то дискретизированные уравнения реактивных элементов представляют в виде

$$\begin{aligned} i_C &= y_C u_C + I_C, \\ i_L &= y_L u_L + I_L, \end{aligned} \quad (8.5)$$

где y_C, y_L – проводимость реактивных ветвей, I_C, I_L – источники тока.

Например, для емкости

$$\begin{aligned} i_C^{n+1} &= C \left. \frac{du_C(t)}{dt} \right|_{t=t_{n+1}} \approx C \frac{\Delta u_C^{n+1}}{\Delta t} = C \frac{u_C^{n+1} - u_C^n}{\Delta t} = C \frac{\varphi_{n+1}^{\text{нач}} - \varphi_{n+1}^{\text{кон}}}{\Delta t} - C \frac{u_C^n}{\Delta t} = \\ &= y_C (\varphi_{n+1}^{\text{нач}} - \varphi_{n+1}^{\text{кон}}) + I_C^n. \end{aligned}$$

Конкретная формула численного дифференцирования или интегрирования определяет тип метода решения, а точка, в которой выполняется дискретизация, – класс метода (явный или неявный).

Получаемые таким образом дискретизации легко вписываются в общую методику составления и расчета модели схемы в базисе узловых потенциалов:

$$\mathbf{Y}(\varphi_{n+1}^{(k)}) \Delta_{n+1}^{(k)} = -\mathbf{I}(\varphi_{n+1}^{(k)}, \varphi_n, \dots, \varphi_{n-k}). \quad (8.6)$$

При формировании вектора токов $\mathbf{I}$ в (8.6) каждое уравнение (8.5) рассматривается как уравнение тока соответствующей ветви. При этом напряжения u_C^{n+1} и u_L^{n+1} заменяются через разности потенциалов, а значения $u_C^n, \dots, u_C^{n-k}, i_L^n, u_L^n, \dots, u_L^{n-k}$ предполагаются известными из предыдущих расчетов или начальных условий.

При формировании матрицы узловых проводимостей $\mathbf{Y}$ вклад каждой емкостной ветви равен проводимости

$$y_C = C/\Delta t,$$

а вклад каждой индуктивной ветви равен проводимости

$$y_L = \Delta t/L$$

с соответствующими знаками.

Таким образом, в базисе узловых потенциалов формирование модели схемы (8.6) для расчета переходных процессов не отличается от формирования модели (6.6) для расчета статического режима. В результате анализ электронной схемы во временной области сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений (8.6) для каждой временной точки.

Контрольные вопросы

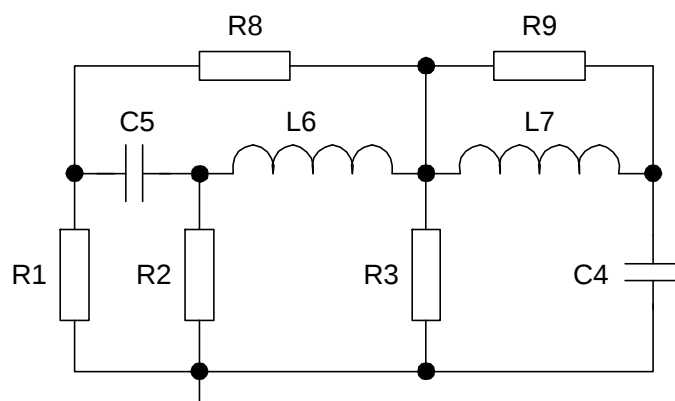
1. Каково назначение анализа электронных схем во временной области?
2. Какие способы дискретизации моделей реактивных элементов вы знаете? Поясните их.
3. Опишите правила формирования математической модели схемы для анализа переходного режима.

Контрольные задания

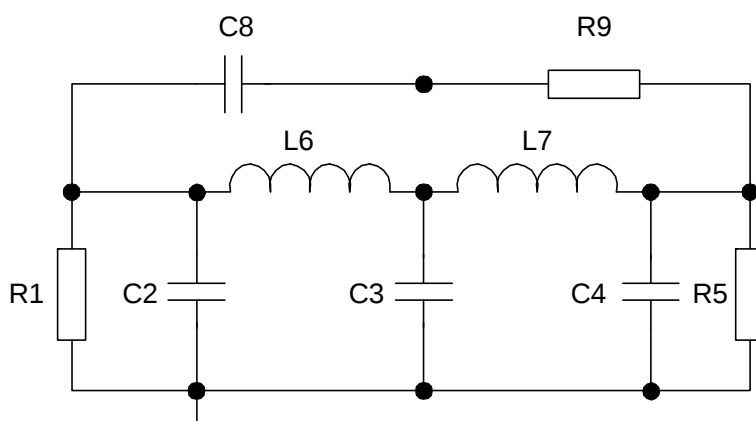
Для схем, описанных в прил. 2, необходимо:

1. Записать математическую модель схемы в виде системы уравнений (8.6).
2. Составить алгоритм решения полученной системы численным методом.
3. Выполнить решение полученной системы в заданном множестве временных отсчетов.
4. Провести анализ полученных результатов.

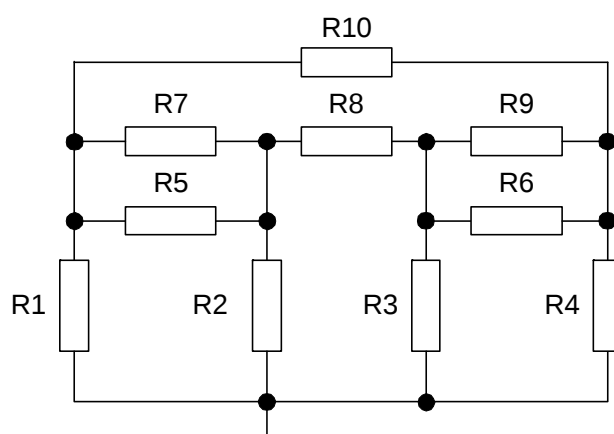
Пассивные электрические цепи



a)



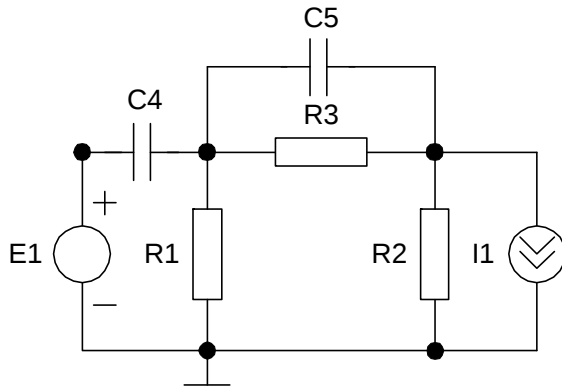
б)



в)

Приложение 2

Электрические цепи с независимыми источниками питания



a)

$$R1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 5 \text{ k}\Omega$$

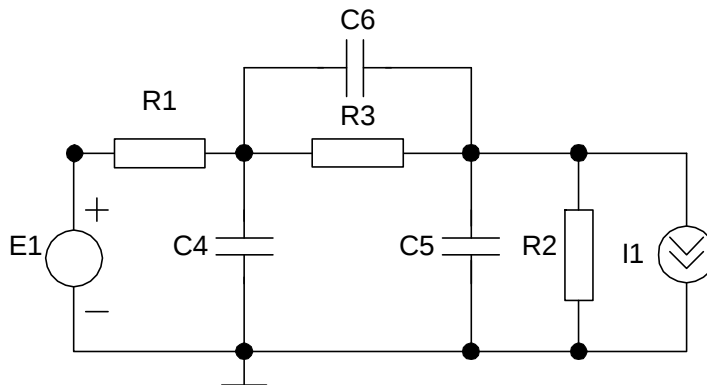
$$R3 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C4 = 10 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C5 = 5 \text{ }\mu\text{F}$$

$$E1 = 5 \text{ V}$$

$$I1 = 1 \text{ mA}$$



б)

$$R1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R3 = 5 \text{ k}\Omega$$

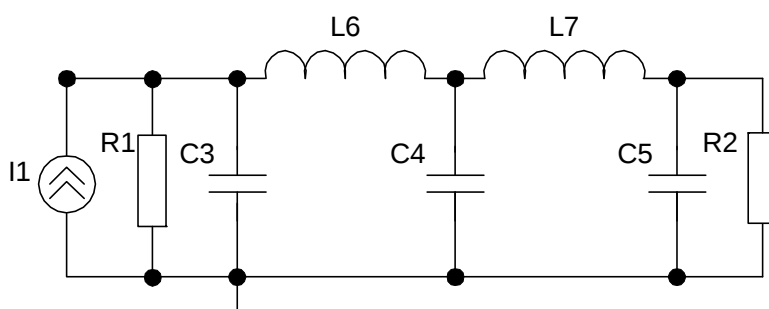
$$C4 = 10 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C5 = 5 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C6 = 5 \text{ }\mu\text{F}$$

$$E1 = 6 \text{ V}$$

$$I1 = 5 \text{ mA}$$



в)

$$R1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 5 \text{ k}\Omega$$

$$C3 = 10 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C4 = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C5 = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$L6 = 5 \text{ мГн}$$

$$L7 = 5 \text{ мГн}$$

$$I1 = 1 \text{ mA}$$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, О. В. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев [и др.]; под ред. О.В. Алексеева. – М.: Высш. шк., 2000. – 479 с. – ISBN 5-06-002691-4.

2. Нерретер, В. Расчет электрических цепей на персональной ЭВМ / В. Нерретер. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 220 с. – ISBN 5-283-02490-3.

3. Влах, И. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем / И. Влах, К. Сингхал. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.

4. Автоматизация схемотехнического проектирования / под ред. В.Н. Ильина. – М.: Радио и связь, 1987. – 368 с.

5. Чуа, Л. О. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы / Л.О. Чуа, П.М. Лин. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.

6. Матханов, П. Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи / П.Н. Матханов. – М.: Высш. шк., 1986. – 325 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Занятие № 1. Топологические основы формирования математических моделей электронных схем. Матрица инцидентий	4
Занятие № 2. Топологические основы формирования математических моделей электронных схем. Матрица главных сечений.	8
Занятие № 3. Топологические основы формирования математических моделей электронных схем. Матрица главных контуров.	10
Занятие № 4. Топологические методы составления уравнений узловых потенциалов	14
Занятие № 5. Топологические методы составления уравнений контурных токов.....	18
Занятие № 6. Моделирование электронных схем в статическом режиме	20
Занятие № 7. Моделирование электронных схем в частотной области	23
Занятие № 8. Моделирование электронных схем во временной области	25
Приложение 1.....	28
Приложение 2.....	29
Список рекомендуемой литературы.....	30

ЭЛЕКТРОНИКА
АВТОМАТИЗАЦИЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Методические указания к практическим занятиям

Составитель
МОСИН Сергей Геннадьевич

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор В.Н. Ланцов

Подписано в печать 29.04.10.
Формат 60х84/16. Усл.-печ. л. 1,86. Тираж 80 экз.
Заказ
Издательство
Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.