

8. *Джеффри Рихтер*. Windows для профессионалов: создание эффективных Win32 приложений с учетом специфики 64-разрядной версии Windows. – М.: Русская редакция, 2001. – 752 с.

УДК 65.012

Д.С. Дрокин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ЭВМ

Электрические сети повсеместно окружают человека. Это как самые простые, такие как системы освещения, системы энергообеспечения квартир, так и более сложные, например, бытовые электрические приборы, телевизор, радио и т.д.

Что же такое электрическая сеть с точки зрения электроники. Электрическая цепь – это совокупность взаимосвязанных устройств и объектов, образующих замкнутый путь для электрического тока. Следовательно, электрическая цепь это не единый элемент, а совокупность взаимосвязанных элементов, т.е. система.

Задача моделирования электрических сетей возникает при исследовании свойств большинства современных сетей. Поэтому вопросам ускорения и повышения точности процесса исследования электрических сетей сейчас уделяется повышенное внимание [1]. Решение задачи моделирования электрических сетей способствует повышению эффективности научных исследований, созданию новых видов сетей, разработке эффективных технологий и систем управления сетями, совершенствованию процесса сбора и обработки информации об электрических сетях.

На развитие теории и математических методов моделирования электрических сетей оказывает широкое распространение ЭВМ. Возможности современных ЭВМ позволяют моделировать переходные процессы в сложных электрических цепях. Для ускорения процессов исследования электрических цепей требовалось по-новому рассмотреть и процедуру формирования их уравнений, а также методы решения этих уравнений. В качестве переменных при построении моделей электрических цепей обычно принимаются токи индуктивных катушек и напряжения конденсаторов. Такие переменные называют переменными состояния электрической сети, а метод формирования дифференциальных уравнений, характеризующих состояние электрической сети, называется моделированием.

В настоящее время известно множество аналитических методов анализа простейших электрических цепей, в частности, метод уравнений Кирхгофа, метод эквивалентных преобразований, метод пропорционального пересчета, графоаналитический метод и др. Все эти методы эффективны при расчете небольших цепей, но когда количество ветвей и элементов превышает 10 – 20, необходимо затратить достаточно много времени, чтобы получить необходимые зависимости и проанализировать их. В зависимости от количества ветвей, узлов и элементов тратится от 10 до 30 минут для расчета вручную простейших схем, но на предприятиях, в инженерном деле редко встречаются простые схемы.

При автоматизации моделирования электрических сетей широко применяют метод узловых потенциалов. При моделировании электрических сетей используют две формы представления уравнений электрической сети. Первая представляет собой уравнения вход-выход, которые являются системой дифференциальных уравнений высокого порядка (обычно записанные в изображениях по Лапласу). Вторая форма модели – вход-состояние-выход – это нормальная форма Коши системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

В настоящее время известен ряд программных продуктов (MicroCap, Workbench и др.), которые предназначены для моделирования электрических сетей с помощью ЭВМ. Однако практически все они ориентированы на проведение расчетов, получение тех или иных характеристик вход-выход и т.п. в установившихся режимах. С помощью этих программ нельзя получить уравнения электрических сетей в форме Коши, хотя именно эта форма математических моделей позволяет получить наиболее обоснованные выводы о свойствах динамических систем [2].

Поэтому ставится задача разработки методики получения уравнений в форме Коши достаточно сложных электрических сетей, включающих источники тока, R, C и L элементы, с возможностью дальнейшей реализации на ЭВМ в интерактивном режиме. При этом используется известный метод узловых потенциалов и матричный метод описания электрических сетей [1], которые при традиционном использовании приводят к моделям «вход-выход» электрической сети в форме изображений по Лапласу.

Рассмотрим и проведем расчет по изложенной выше методике электрической схемы, представленной на рис. 1.

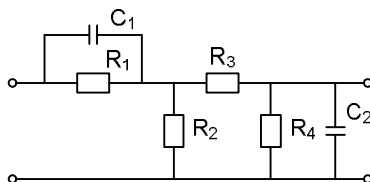


Рис. 1. Электрическая схема

Параметры элементов $C_1 = 1\text{ пФ}$, $C_2 = 1\text{ пФ}$, $R_1 = 250\text{ кОм}$, $R_2 = 200\text{ кОм}$, $R_3 = 300\text{ кОм}$, $R_4 = 500\text{ кОм}$.

Для начала проанализируем схему обычными методами. Для удобства воспользуемся рис. 2.

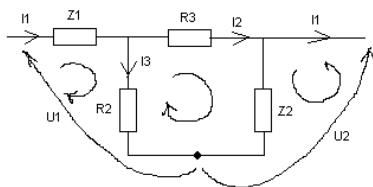


Рис. 2. Анализ электрической схемы

Получим

$$z_1 = \frac{R_1}{R_1 C_1 p + 1} \quad z_2 = \frac{R_4}{R_4 C_2 p + 1}, \quad \begin{cases} I_1 = I_2 + I_3 \\ I_1 \cdot z_1 + I_3 \cdot R_2 + U_1 = 0 \\ I_3 \cdot z_2 - U_2 = 0 \\ -I_2 \cdot R_3 + I_3(R_2 + Z_2) = 0 \end{cases}, \quad I_3 = \frac{U_2}{z_2},$$

$$I_1 = -\frac{U_2 R_2}{z_1 z_2} - \frac{U_1}{z_1}, \quad I_2 = \frac{U_2(R_2 + z_2)}{z_2 R_3}, \quad -\frac{U_2 R_2}{z_1 z_2} - \frac{U_1}{z_1} = \frac{U_2}{z_2} + \frac{U_2(R_2 + z_2)}{z_2 R_3},$$

$$\frac{U_1}{z_1} = -U_2 \left(\frac{1}{z_2} + \frac{(R_2 + z_2)}{z_2 R_3} + \frac{R_2}{z_1 z_2} \right),$$

$$\frac{U_1}{z_1} = -U_2 \left(\frac{z_1 R_3 + z_1 R_2 + z_1 z_2 + R_2 R_3}{z_1 z_2 R_3} \right), \quad \frac{U_2}{U_1} = -\frac{z_2 R_3}{z_1(R_2 + R_3) + z_1 z_2 + R_2 R_3}.$$

Преобразуем правую часть уравнения:

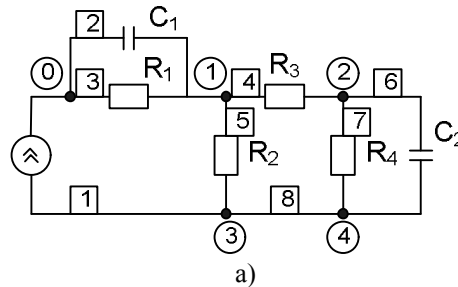
$$\frac{\frac{R_4 R_3}{R_4 C_2 p + 1}}{\frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 C_1 p + 1} + \frac{R_1 R_4}{(R_1 C_1 p + 1)(R_4 C_2 p + 1)} + R_2 R_3} =$$

$$= \frac{\frac{R_4 R_3}{R_4 C_2 p + 1}}{\frac{R_1(R_2 + R_3)(R_4 C_2 p + 1) + R_1 R_4 + R_2 R_3(R_1 C_1 p + 1)(R_4 C_2 p + 1)}{(R_1 C_1 p + 1)(R_4 C_2 p + 1)}} =$$

$$= \frac{R_4 R_3 (R_1 C_1 p + 1)}{R_1(R_2 + R_3)(R_4 C_2 p + 1) + R_1 R_4 + R_2 R_3 (R_1 C_1 p + 1)(R_4 C_2 p + 1)}.$$

Как видно знаменатель правой части уравнения имеет второй порядок, что свидетельствует о том, что рассматривая нами электрическая система 2-го порядка, а следовательно, ее характеристика, также должна представлять кривую 2-го порядка.

Приведем схему к виду (рис. 3) необходимому для анализа по нашему методу



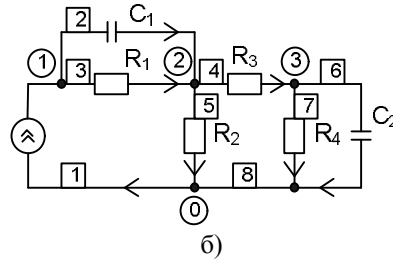


Рис. 3, а, б, Схемы для анализа по заданному методу

Ветви и узлы заданы, источник обозначен в общем виде.
Иначе можно представить в виде

Согласно нашей методике имеем матрицу соединений A :

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

Так как источник токов присутствует только в первой ветви, то вектор столбец токов в изображениях по Лапласу имеет вид

$$I_0 = \begin{bmatrix} \frac{10}{p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Матрицу проводимостей приводить не будем, так как её составление достаточно очевидно. С учетом приведенной выше матрицы A и расчетных соотношений метода, получим матрицу H .

Ее порядок $n=2$. Для дальнейшего расчета нам необходим первый столбец, так как в матрице In не равен 0 первый элемент [3].

$$h_{11} = \frac{5,43 \cdot 10^{-11} + 0,0000176p + p^2}{5,4300132 \cdot 10^{-11} + 0,0000176p + 1,0000083p^2} =$$

$$= 0,9999917 - \frac{-1,499988 \cdot 10^{-10} p - 3,199973 \cdot 10^{-16}}{5,429968131 \cdot 10^{-11} + 0,0000175998 \cdot p + p^2};$$

$$h_{21} = \frac{2,12 \cdot 10^{-11} + 0,0000093p + p^2}{5,4300132 \cdot 10^{-11} + 0,0000176p + 1,0000083p^2} =$$

$$= 0,9999917 - \frac{0,00000829978112p - 3,309940528 \cdot 10^{-11}}{5,429968131 \cdot 10^{-11} + 0,0000175998 \cdot p + p^2};$$

$$h_{31} = \frac{1,32 \cdot 10^{-11} + 0,0000033p}{5,4300132 \cdot 10^{-11} + 0,0000176p + 1,0000083p^2} =$$

$$= \frac{0,000003299973p + 1,319989 \cdot 10^{-11}}{5,429968131 \cdot 10^{-11} + 0,0000175998 \cdot p + p^2};$$

$$A(p) = 5,429968131 \cdot 10^{-11} + 0,0000175998 \cdot p + p^2.$$

Следовательно, получим систему, согласно методу:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -5,429968131 \cdot 10^{-11} \cdot x_1 - 0,0000175998 \cdot x_2 + I_1 \end{cases}$$

$$V_1 = -30199973 \cdot 10^{-16} \cdot x_1 - 1,499988 \cdot 10^{-10} \cdot x_2 + 0,9999917 \cdot I_1;$$

$$V_2 = 0,00000829978 \cdot x_1 - 3,309968 \cdot 10^{-11} \cdot x_2 + 0,9999917 \cdot I_1;$$

$$V_3 = 0,000003299973 \cdot x_1 + 1,319989 \cdot 10^{-11} \cdot x_2 + I_1.$$

Полученная система имеет искомую форму Коши.

Решим полученную систему в автоматизированной системе Maple, предназначенной для расчетов уравнений. Для начала найдем $x_1(t)$ и $x_2(t)$:

$$x1(t):=184163142123,14008 \cdot \exp(-0,0000039898924 \cdot t) - 184163142123,14008;$$

$$x2(t):=(0,0000136 \cdot \exp(-0,0000039898924 \cdot t) \cdot 76386239363,845235) -$$

$$- (0,00000399 \cdot \exp(-0,0000039898924 \cdot t) \cdot 260549381486,99).$$

Далее подставим $x_1(t)$ и $x_2(t)$ в V_1 и построим график $V_1(t)$:

Как видно из полученных результатов моделирования полученная характеристика является кривой первого порядка, а заданная электрическая система, как было отмечено при решении обычным методом и рассматриваемом второго порядка. Следовательно, рассматривая электрическая схема является неполной.

В результате моделирования неполной электрической сети предложенным алгоритмом и с помощью известного пакета. В итоге выявлено несоответствие характеристик, полученных с помощью пакета Workbench реальной неполной сети.

На основе метода, описанного в данной статье, разработана программа автоматизации процесса моделирования, связанного с получением системы дифференциальных уравнений вход-состояние-выход электрической сети и её исследованием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. — М.: Радио и связь, 1986.
2. Гайдук А.Р. К исследованию устойчивости линейных систем. Автоматика и телемеханика. 1997. №3. — С. 153-160.
3. Гайдук А.Р. Непрерывные и дискретные динамические системы. — М.: УМ и ИЦ «Учебная литература», 2004.