

УДК 621.31

**АНАЛИЗ СЛОЖНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЕЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Мешкова А.Н.

Научные руководители – к.т.н., доцент Новаш И.В., Климкович П.И.

Введем основные определения, необходимые для понимания последующего анализа сложных резистивных цепей с применением 3D-моделирования.

Сложной называется электрическая цепь (схема), содержащая не менее двух узлов, не менее трех ветвей и не менее двух источников энергии в разных ветвях [1].

В сложной электрической цепи наблюдаются одновременно в той или иной мере разнородные физические процессы, а именно, процесс генерирования электрической энергии, процесс преобразования электрической энергии в другие виды и процесс обмена энергией между магнитным полем, электрическим полем и источниками энергии. В общем случае для отображения этих физических процессов схема замещения цепи должна содержать кроме источников энергии все разнородные схемные элементы.

Математически физические процессы в такой схеме можно описать системой дифференциальных уравнений, составленных для схемы замещения по законам Кирхгофа. Цепи постоянного тока представляются эквивалентными схемами, содержащими только постоянные источники энергии и резистивные элементы. Такие схемы получили название резистивных или постоянного тока. Установившийся режим постоянного или переменного тока в таких схемах описывается системой линейных алгебраических уравнений, составленных по законам Кирхгофа.

Для расчета таких цепей применяются следующие методы [2]:

– метод наложения (основан на принципе суперпозиции и звучит следующим образом: ток или напряжение в i -ой ветви равен алгебраической сумме токов или напряжений, создаваемых каждым источником в отдельности, при условии, что все остальные источники заменены своими внутренними сопротивлениями);

– метод эквивалентного источника (позволяет определить ток в одной из ветвей (или нагрузке) в соответствии с принципом компенсации, согласно которому любой пассивный участок цепи (ветвь или ее часть) может быть заменен источником ЭДС с тем же напряжением; а любая ветвь с известным током – источником тока с таким же значением);

– метод уравнений Кирхгофа (теоретическая база метода: 1-й и 2-й законы Кирхгофа. 1-й закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов ветвей в узле схемы равна нулю. 2-й закон Кирхгофа: алгебраическая сумма падений напряжений в произвольном контуре схемы равна алгебраической сумме ЭДС);

– метод контурных токов (теоретическая база метода: 2-й закон Кирхгофа в сочетании с принципом наложения. Предполагают, что в каждом элементарном контуре-ячейке схемы протекает «свой» контурный ток, а

действительные токи ветвей получаются по принципу наложения контурных токов как их алгебраические суммы);

– метод узловых потенциалов (теоретическая база метода: 1-й закон Кирхгофа в сочетании с потенциальными уравнениями ветвей. В этом методе потенциал одного из узлов схемы принимают равным нулю, а потенциалы остальных узлов считают неизвестными, подлежащими определению).

Рассмотрим переход от 2D к 3D-моделированию при анализе режимов работы электрических цепей, отметим преимущества такого перехода, а также выполним расчет сложной резистивной цепи с применением 3D-модели.

Имея перед глазами 2D чертёж, зачастую затруднительно представить взаимосвязь между элементами схемы, определить их общие точки, а также расположение отдельных элементов относительно друг друга. Так, например, глядя на рисунок 1а, достаточно тяжело представить взаимосвязь между сторонами 4 и 12, 5 и 8, определить их расположение относительно сторон 2 и 10, 6 и 7 и установить корреляцию между ними. Однако, стоит попробовать предать данному объекту объем (рисунок 1б) и становится понятно, что 5, 4, 8, 12 представляют собой грань многогранника 1–12 и она связана с гранью 6, 2, 7, 10 посредством ребер 1, 3, 11 и 9. Преобразовывая дальше, приходим к выводу, что перед нами куб (рисунок 1в), что даёт нам полное представление о расположении элементов относительно друг друга, а также показывает их взаимосвязь.

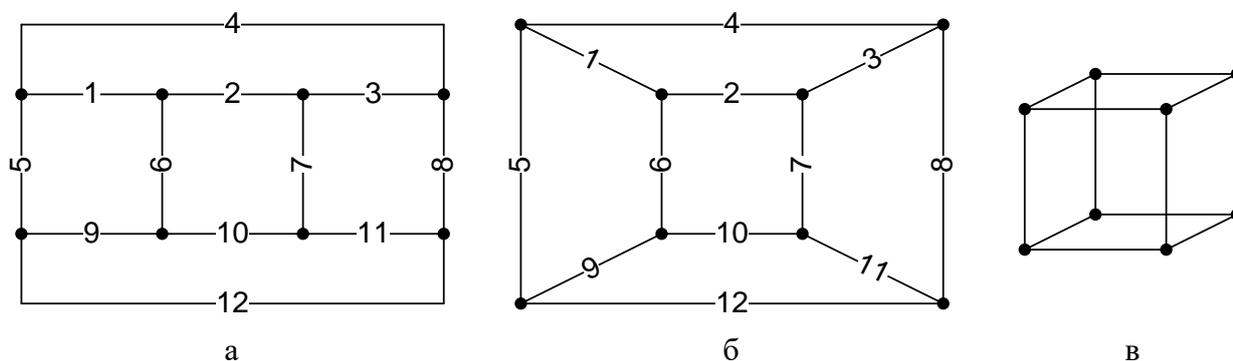


Рисунок 1 – Визуализация перехода от плоского (а) к объёмному (б, в) представлению

Данный переход представляет практический интерес для изучения дисциплины «Теоретические основы электротехники», так как при составлении систем уравнений по любому из известных методов необходимо знать общие точки (узлы) элементов, контуры протекания токов, связь элементов между собой, а такое изображение схем наилучшим образом наглядно и просто позволяет решить эту задачу.

Рассмотрим данную методику представления схем на реальном примере. Пусть у нас имеется схема сложной резистивной цепи (рисунок 2) с определенными параметрами ее резистивных элементов и источников энергии. Для выполнения расчетов предварительно зададимся положительными направлениями токов в ветвях схемы и номерами узлов.

Создадим 3D-модель цепи, используя 3D-модели реальных электротехнических изделий: источников питания и резисторов (рисунок 3).

Такой переход позволяет практически «в живую» лицезреть проектируемую схему; оценить ее габариты; получить информацию об элементах схемы (сопротивление резисторов, напряжение источников питания), взглянув на 3D-модель.

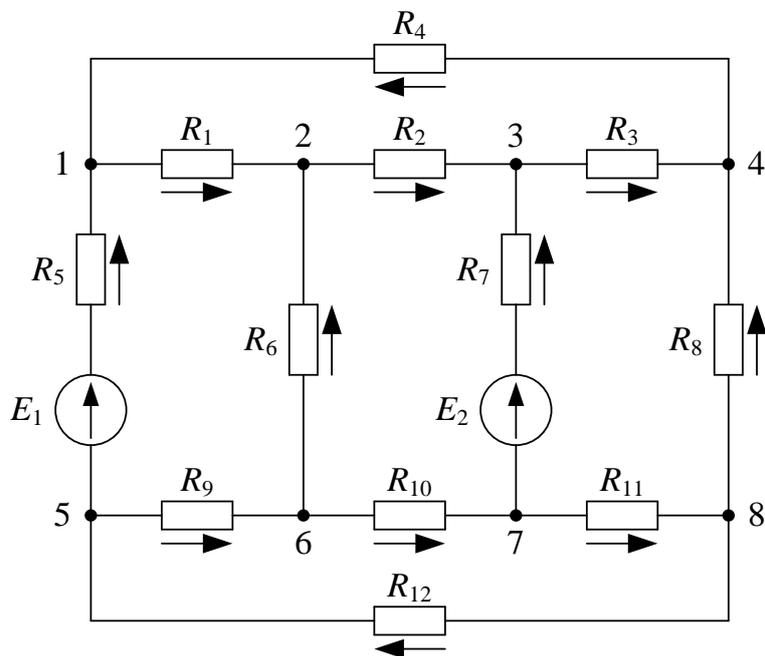


Рисунок 2 – Исходная схема электрической цепи

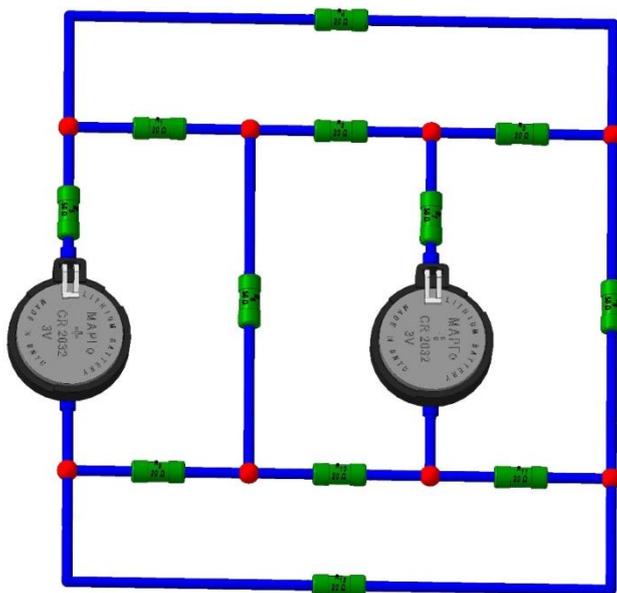


Рисунок 3 – 3D-модель исходной схемы

Далее произведем переход от, так называемого, «плоского-объемного» (рисунок 3) к объемному (рисунок 4) 3D-представлению расчетной цепи (рисунок 2).

Как можно заменить, такое представление электрической цепи наиболее компактно, наглядно и информативно, откуда вытекают следующие преимущества 3D-моделирования над 2D чертежами [3]:

– Трехмерное моделирование является мощным инструментом, который дает лучшее представление об объекте, чем двухмерный план или чертеж. В

объемности и состоит одно из главных преимуществ трехмерного представления объектов.

– 3D САПР программы являются параметрическими, поэтому в них легко можно изменять и редактировать готовую модель, а также, набрав элементную базу, создавать целые проекты.

– Плоский чертеж статичен, а 3D-модель, сохраненную в формате для хранения трёхмерных моделей объектов, можно вращать, изучая ее с любой точки, менять масштаб по своему желанию.

– Имеется возможности многократного использования спроектированной детали или узла для создания целого семейства аналогичных объектов.

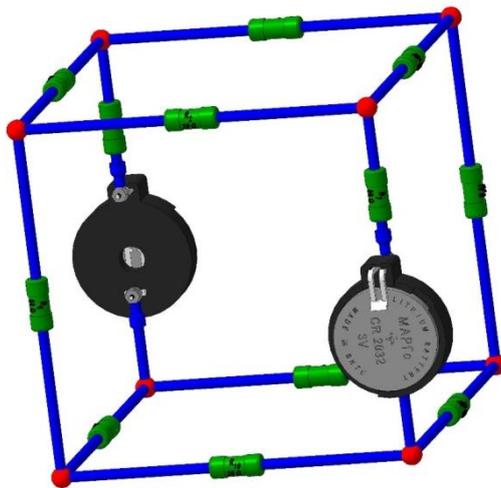


Рисунок 4 – Объёмное представление исходной схемы

Расчет рассматриваемой резистивной цепи (рисунок 2) выполним методом узловых потенциалов в среде вычислительной математики MathCAD и в среде динамического моделирования Simulink (рисунки 5–8). Сопоставление полученных результатов в MathCAD (рисунок 6) и Simulink (рисунок 8) указывает на корректность выполненных расчетов.

Given

$$g1 \cdot \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R4} + \frac{1}{R5} \right) - g2 \cdot \frac{1}{R1} - g4 \cdot \frac{1}{R4} - g5 \cdot \frac{1}{R5} = \frac{E1}{R5}$$

$$g2 \cdot \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R6} \right) - g1 \cdot \frac{1}{R1} - g3 \cdot \frac{1}{R2} - g6 \cdot \frac{1}{R6} = 0$$

$$g3 \cdot \left(\frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R7} \right) - g2 \cdot \frac{1}{R2} - g4 \cdot \frac{1}{R3} - g7 \cdot \frac{1}{R7} = \frac{E2}{R7}$$

$$g4 \cdot \left(\frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} + \frac{1}{R8} \right) - g1 \cdot \frac{1}{R4} - g3 \cdot \frac{1}{R3} = 0$$

$$g5 \cdot \left(\frac{1}{R5} + \frac{1}{R9} + \frac{1}{R12} \right) - g1 \cdot \frac{1}{R5} - g6 \cdot \frac{1}{R9} = \frac{-E1}{R5}$$

$$g6 \cdot \left(\frac{1}{R6} + \frac{1}{R9} + \frac{1}{R10} \right) - g2 \cdot \frac{1}{R6} - g5 \cdot \frac{1}{R9} - g7 \cdot \frac{1}{R10} = 0$$

$$g7 \cdot \left(\frac{1}{R7} + \frac{1}{R10} + \frac{1}{R11} \right) - g3 \cdot \frac{1}{R7} - g6 \cdot \frac{1}{R10} = \frac{-E2}{R7}$$

$$g := \text{Find}(g1, g2, g3, g4, g5, g6, g7)$$

Рисунок 5 – Система узловых уравнений в MathCAD

$$\begin{aligned}
 I_1 &:= \frac{\xi_1 - \xi_2}{R_1} = 0.0125 & I_5 &:= \frac{\xi_5 - \xi_1 + E1}{R_5} = 0.025 & I_9 &:= \frac{\xi_5 - \xi_6}{R_9} = -0.0125 \\
 I_2 &:= \frac{\xi_2 - \xi_3}{R_2} = -0.0125 & I_6 &:= \frac{\xi_6 - \xi_2}{R_6} = -0.025 & I_{10} &:= \frac{\xi_6 - \xi_7}{R_{10}} = 0.0125 \\
 I_3 &:= \frac{\xi_3 - \xi_4}{R_3} = 0.0125 & I_7 &:= \frac{\xi_7 - \xi_3 + E2}{R_7} = 0.025 & I_{11} &:= \frac{\xi_7 - \xi_8}{R_{11}} = -0.0125 \\
 I_4 &:= \frac{\xi_4 - \xi_1}{R_4} = -0.0125 & I_8 &:= \frac{\xi_8 - \xi_4}{R_8} = -0.025 & I_{12} &:= \frac{\xi_8 - \xi_5}{R_{12}} = 0.0125
 \end{aligned}$$

Рисунок 6 – Результаты вычислений в MathCAD

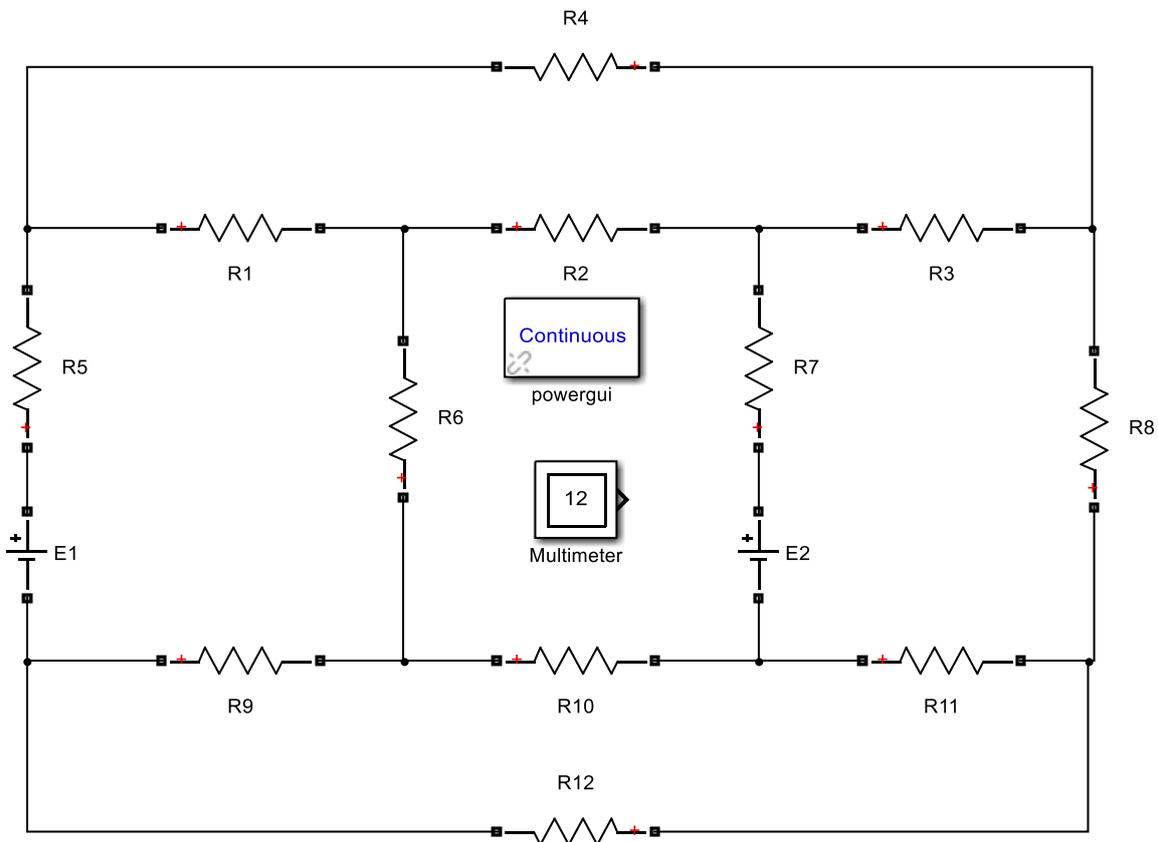


Рисунок 7 – Электрическая цепь в среде моделирования Simulink

Ib: R1	' =	0.0125 A
Ib: R2	' =	-0.0125 A
Ib: R3	' =	0.0125 A
Ib: R4	' =	-0.0125 A
Ib: R5	' =	0.025 A
Ib: R6	' =	-0.025 A
Ib: R7	' =	0.025 A
Ib: R8	' =	-0.025 A
Ib: R9	' =	-0.0125 A
Ib: R10	' =	0.0125 A
Ib: R11	' =	-0.0125 A
Ib: R12	' =	0.0125 A

Рисунок 8 – Результаты моделирования в Simulink

Литература

1. Мазуренко, А.А. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для студентов

электротехнических специальностей / А.А. Мазуренко ; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Электротехника и электроника». – Минск : БНТУ, 2013.

2. Методы анализа линейных электрических цепей // Студопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://studopedia.ru/8_58212_ekvivalentnie-preobrazovaniya-elektricheskikh-tsepey.html/. – Дата доступа : 09.11.2020.

3. Какие САПР мы выбираем: 2D или 3D? / Елена Гореткина // PC Week/RE № 18 (576), 22–28 мая 2007 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.itweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=82523/>. – Дата доступа : 09.11.2020.