

УДК 621.31

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Мешкова А.Н.

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

Произведем расчет переходных режимов электрических цепей с применением 3D-моделирования. Для этого разберемся с тем, что же называют переходным процессом и для чего необходим его расчёт. Переходным называется процесс, возникающий в электрической цепи при переходе ее от одного установившегося режима (старого) к другому установившемуся режиму (новому) [1]. Переходные процессы в цепи возникают в результате коммутаций. Под коммутацией понимают скачкообразные (мгновенные) изменения структуры (схемы) цепи или параметров ее отдельных элементов, вызванные включением, отключением или переключением отдельных ее участков.

В результате переходных процессов токи и напряжения на отдельных участках цепи могут значительно возрасти и превысить их значения в установившемся режиме. Расчет переходных процессов в электрических цепях является весьма важным мероприятием: результаты таких расчетов в инженерной практике используются для правильного выбора уровня изоляции токоведущих частей электроустановок и для проверки технических устройств на динамическую устойчивость.

В данной работе рассмотрим протекание переходных процессов в электрической цепи при действии постоянной и синусоидальной ЭДС для двух начальных условий: нормально замкнутым и нормально разомкнутым контактом (рисунок 1).

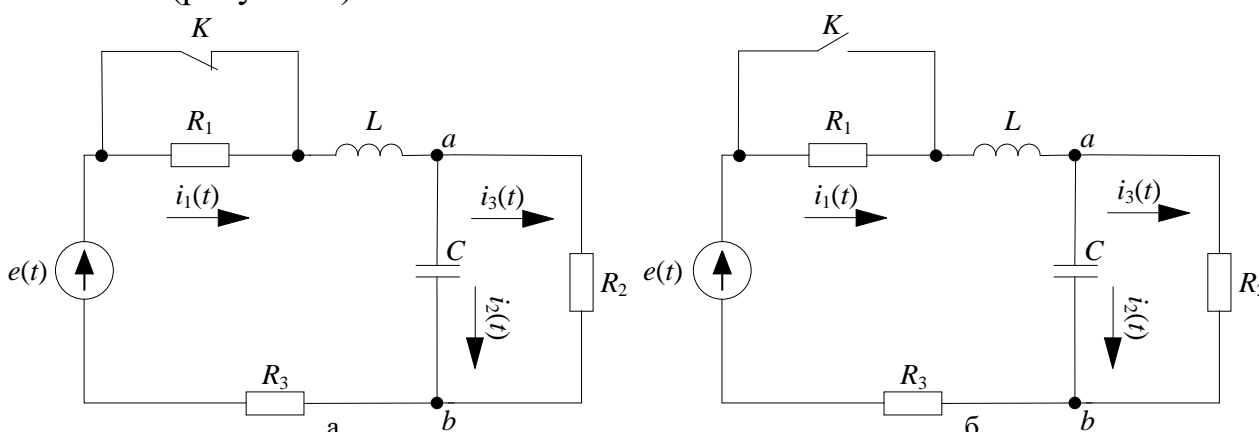


Рисунок 1 – Схема электрической цепи при нормально замкнутом (а) и нормально разомкнутом (б) контакте

Для лучшего представления об электрической цепи и протекающих в ней процессах перейдем от плоского изображения схемы к её 3D-модели, что также позволит оценить модель наглядно [3].

Отметим несколько очевидных преимуществ такого представления схем:

– трехмерная модель производит гораздо большее впечатление, чем обычный плоский 2D-чертёж, поскольку такая модель намного легче поддается восприятию;

– уже на ранней стадии моделирования можно увидеть подробные черты будущего объекта, которые, возможно, пока существуют только в форме идеи. Это позволяет доработать мысль, что-то улучшить, изменить;

– 3D-модели схем позволяют избавиться от основного недостатка 2D-чертежей: сложность представления изделий в пространстве;

– трёхмерная модель помогает быстро донести свои идеи до любого человека, не знакомого с вашим проектом. Когда перед нами имеется трехмерная модель, у нас есть возможность детально рассмотреть конструкцию и решить поставленные задачи гораздо быстрее, чем это бывало прежде.

Используя систему автоматизированного проектирования КОМПАС-3D и применяя объемное отображение условно-графических элементов, создадим 3D-модели электрической цепи (рисунок 1) для нормально замкнутого (рисунок 2а) и нормально разомкнутого контакта (рисунок 2б) при действии постоянной ЭДС.

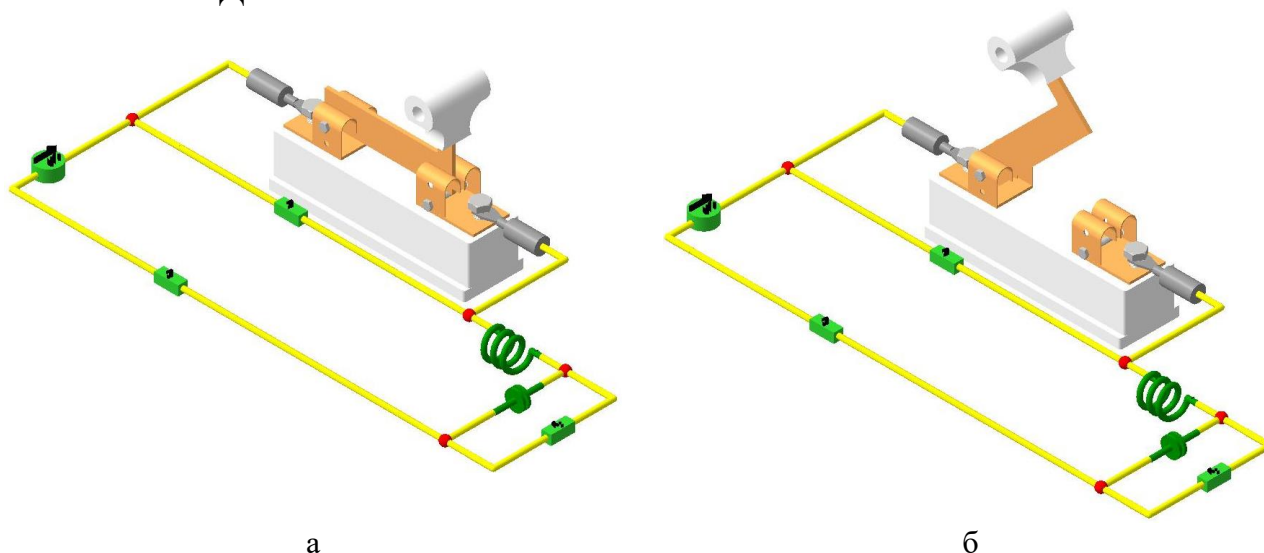


Рисунок 2 – 3D-модель электрической цепи:
а – при замкнутом контакте; б – при разомкнутом контакте

Уже на данном этапе схема воспринимается и поддается анализу намного быстрее и легче. Однако для приближения к реальным условиям заменим условно графические обозначения элементов 3D-моделями реальных изделиями: катушка индуктивности (рисунок 3), конденсатор (рисунок 4), резисторы (рисунок 5), источник питания (рисунок 6). Такой переход позволит достичь очень высокой степени детализации и даст нам наиболее полное представление о данной электрической цепи.

На рисунке 7 изображены расчетные схемы с использованием 3D-моделей реальных изделий для нормально замкнутого и нормально разомкнутого контакта при действии постоянной ЭДС. Такое представление электрической цепи позволяет нам оценить габариты схемы и получить модель, максимально приближенную к реальности.

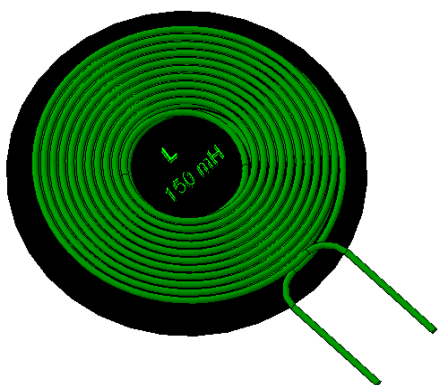


Рисунок 3 – 3D-модель катушки

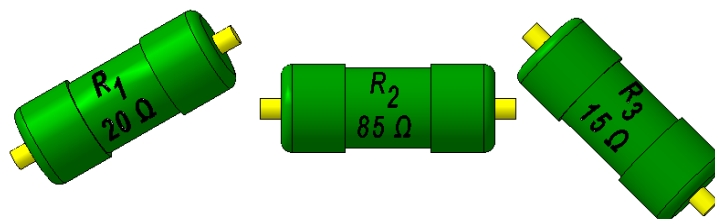


Рисунок 5 – 3D-модель резистора

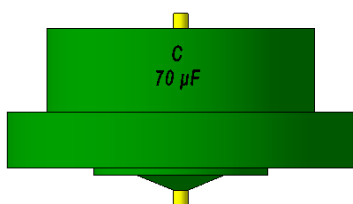


Рисунок 4 – 3D-модель конденсатора

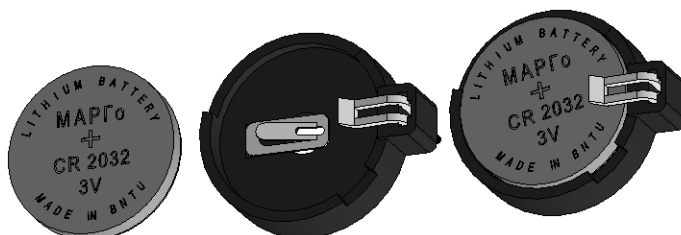


Рисунок 6 – 3D-модель источника питания

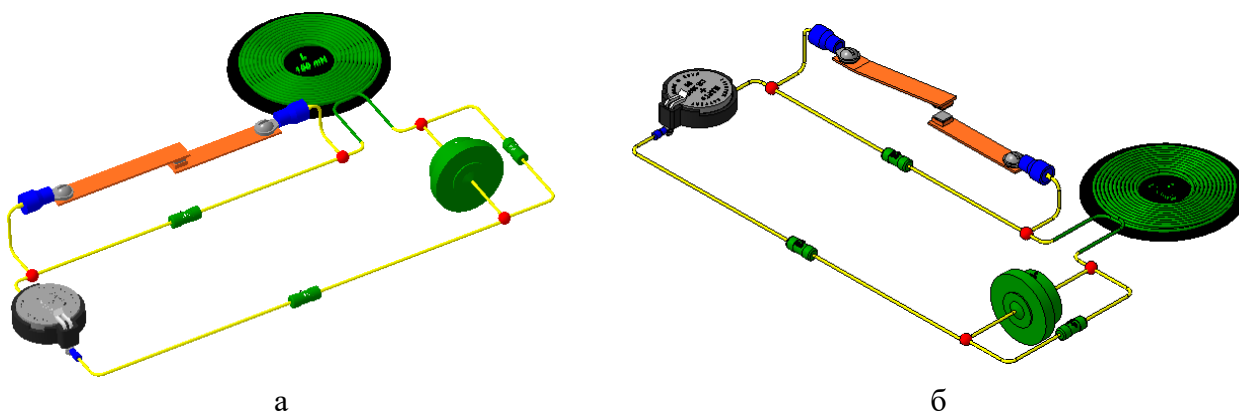


Рисунок 7 – Схема электрической цепи с 3D-моделями реальных изделий:
а – при замкнутом контакте; б – при разомкнутом контакте

Расчет переходных процессов в электрической цепи можно произвести несколькими методами: классическим (решение дифференциальных уравнений с постоянными параметрами методами классической математики), операторным (перенос расчёта переходного процесса из области функций действительной переменной в область функций комплексного переменного, в которой дифференциальные уравнения преобразуются в алгебраические), методом переменных состояний (составление и решение системы дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенной относительно производных. Число переменных состояний равно числу независимых накопителей энергии) [4].

Для проведения расчетов может быть использовано следующее программное обеспечение: среда динамического моделирования Simulink, высокоуровневый язык программирования MatLab, среда компьютерной алгебры MathCAD.

1 Для изначально разомкнутого контакта

1.1 Независимые начальные условия: $i_1(0), U_c(0)$

$$Z := R_3 + R_2 + R_1 = 120 \quad I := \frac{E_m}{Z} = 0.025 \quad |I| = 0.025 \quad \varphi := \arg(I) = 0 \text{-deg}$$

$$U_c := I \cdot R_2 = 2.125 \quad |U_c| = 2.125 \quad i_1(t) := |I|$$

$$U_c(t) := U_c \quad U_c(0) = 2.125 \quad u(t) := |E_m|$$

1.2 Система дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

$$i_1 \cdot (R_1 + R_3) + L \cdot \left(\frac{d}{dt} i_1 \right) + U_c = u(t)$$

$$i_2 \cdot R_2 - U_c = 0$$

$$i_3 = C \cdot \frac{d}{dt} U_c$$

1.3 Определение зависимых начальных условий

$$di_1 = \frac{i_1 \cdot R_3 - U_c + u(t)}{L} \quad dU_c = \frac{i_1 \cdot R_2 - U_c}{C \cdot R_2}$$

1.4 решим данную систему дифференциальных уравнений

$$x := \begin{pmatrix} i_1(0) \\ U_c(0) \end{pmatrix} \quad d(t, x) := \begin{bmatrix} \frac{(-x)_0 \cdot R_3 - x_1 + u(t)}{L} \\ \frac{x_0 \cdot R_2 - x_1}{R_2 \cdot C} \end{bmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 0.05, 1000, d) \quad I_2 := \frac{Z^{(2)}}{R_2}$$

Рисунок 8 – Численный метод расчёта переходного процесса для изначально разомкнутого контакта

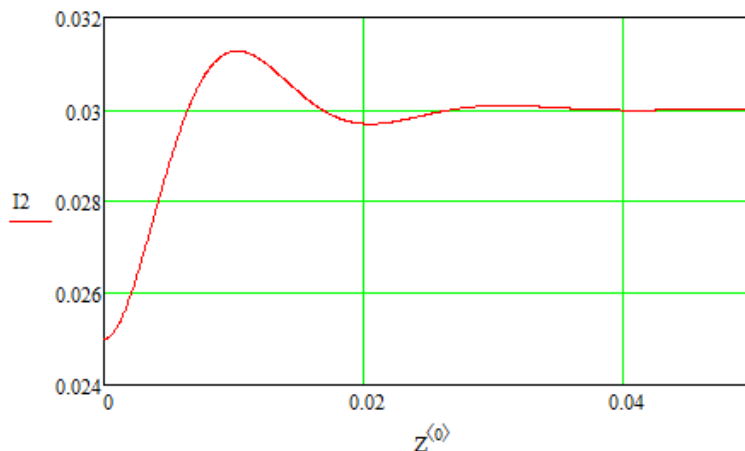


Рисунок 9 – График переходного процесса при разомкнутом контакте

В качестве примера приведем результаты расчета переходного процесса численным методом в среде вычисленной математики MathCAD при действии постоянной ЭДС для нормально разомкнутого (рисунок 8) и нормально замкнутого (рисунок 10) контакта. Графические зависимости процесса при различных видах коммутации на рисунках 9 и 11.

Создадим 3D-модель данной электрической цепи при действии синусоидальной ЭДС. С этой целью используем следующие 3D-модели реальных изделий: для подключения цепи к сети – розетку (рисунок 13), для подсоединения потребителей электрической энергии – вилку (рисунок 14).

2 Для изначально замкнутого контакта

2.1 Независимые начальные условия: $i_1(0), U_c(0)$

$$Z := R_2 + R_3 = 100 \quad I := \frac{E_m}{Z} = 0.03 \quad |I| = 0.03 \quad i_1(t) := |I|$$

$$U_c := I \cdot R_2 = 2.55 \quad |U_c| = 2.55$$

$$U_c(t) := |U_c| \quad U_c(0) = 2.55 \quad u(t) := |E_m|$$

2.2 Система дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

$$i_1 \cdot (R_1 + R_3) + L \cdot \left(\frac{d}{dt} i_1 \right) + U_c = u(t)$$

$$i_2 \cdot R_2 - U_c = 0$$

$$i_3 = C \cdot \frac{d}{dt} U_c$$

2.3 Определение зависимых начальных условий

$$di_1 = \frac{i_1 \cdot (R_3 + R_1) - U_c + u(t)}{L} \quad dU_c = \frac{i_1 \cdot R_2 - U_c}{C \cdot R_2}$$

2.4 решим данную систему дифференциальных уравнений

$$x := \begin{pmatrix} i_1(0) \\ U_c(0) \end{pmatrix} \quad d(t, x) := \begin{bmatrix} \frac{(-x)_0 \cdot (R_3 + R_1) - x_1 + u(t)}{L} \\ \frac{x_0 \cdot R_2 - x_1}{R_2 \cdot C} \end{bmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 0.05, 1000, d) \quad I_2 := \frac{Z^{(2)}}{R_2}$$

Рисунок 10 – Численный метод расчёта переходного процесса для изначально замкнутого контакта

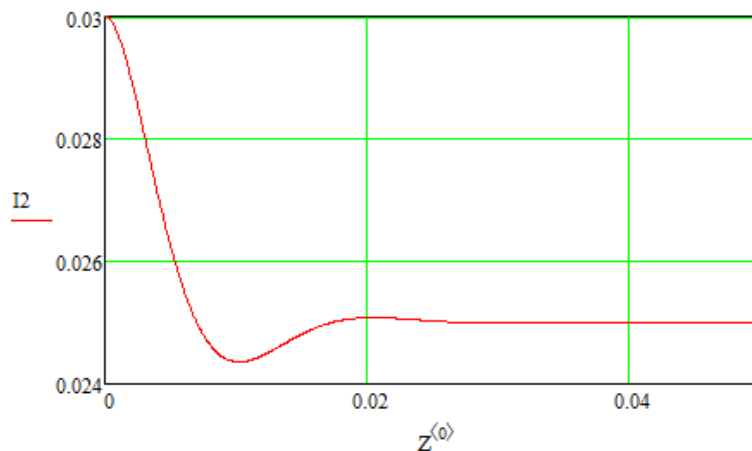


Рисунок 11 – График переходного процесса при замкнутом контакте

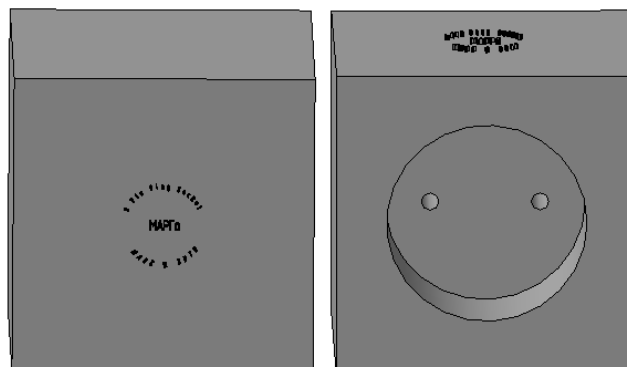


Рисунок 12 – 3D-модель розетки

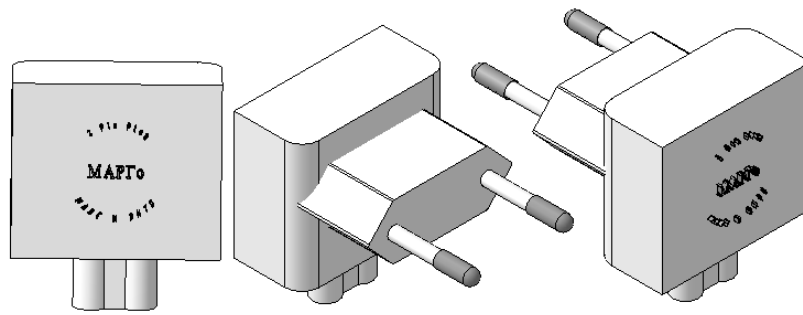


Рисунок 13 – 3D-модель вилки

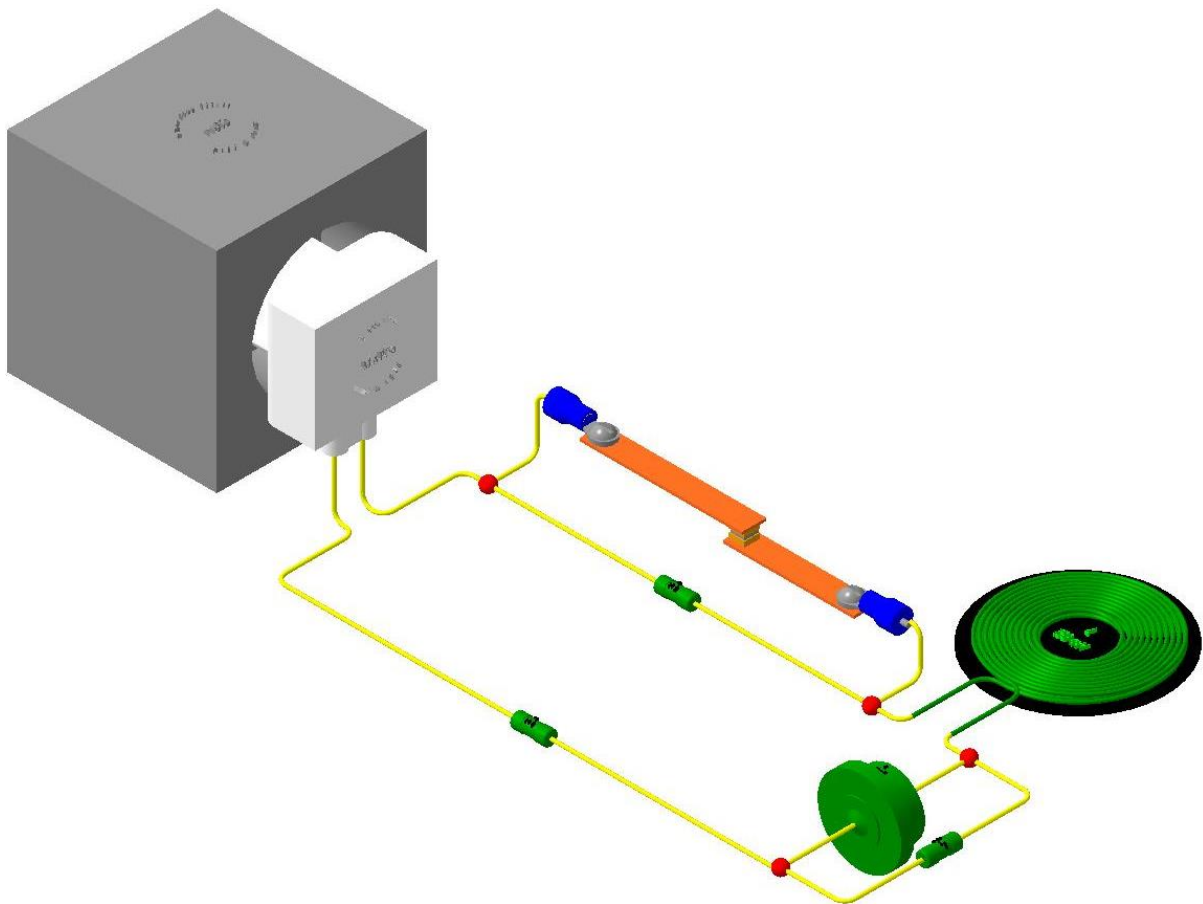


Рисунок 14 – Схема для замкнутого контакта с реальными изделиями

На рисунках 14 и 15 изображены схемы с 3D-моделями реальных электротехнических изделий для нормально замкнутого и нормально разомкнутого контакта при действии синусоидальной ЭДС.

Расчет переходного процесса при действии синусоидальной ЭДС произведем в среде динамического моделирования Simulink (рисунок 16) для нормально разомкнутого и нормально замкнутого контакта, приняв время докоммутационного режима равным 0,005 с. Графические результаты переходного процесса при различных видах коммутации представлены на рисунках 17 и 18.

Применение трёхмерного представления схем в данном случае оказывает огромную помощь в восприятии и понимании рассматриваемых электрических цепей, даёт возможность оценить их устройство и взаимодействие их частей между собой, а также увидеть форму того или иного элемента, входящего в

состав цепей. В случае переходных процессов такое представление также помогает визуализировать момент коммутации, что способствует лучшему пониманию процессов, происходящих внутри электрических цепей.

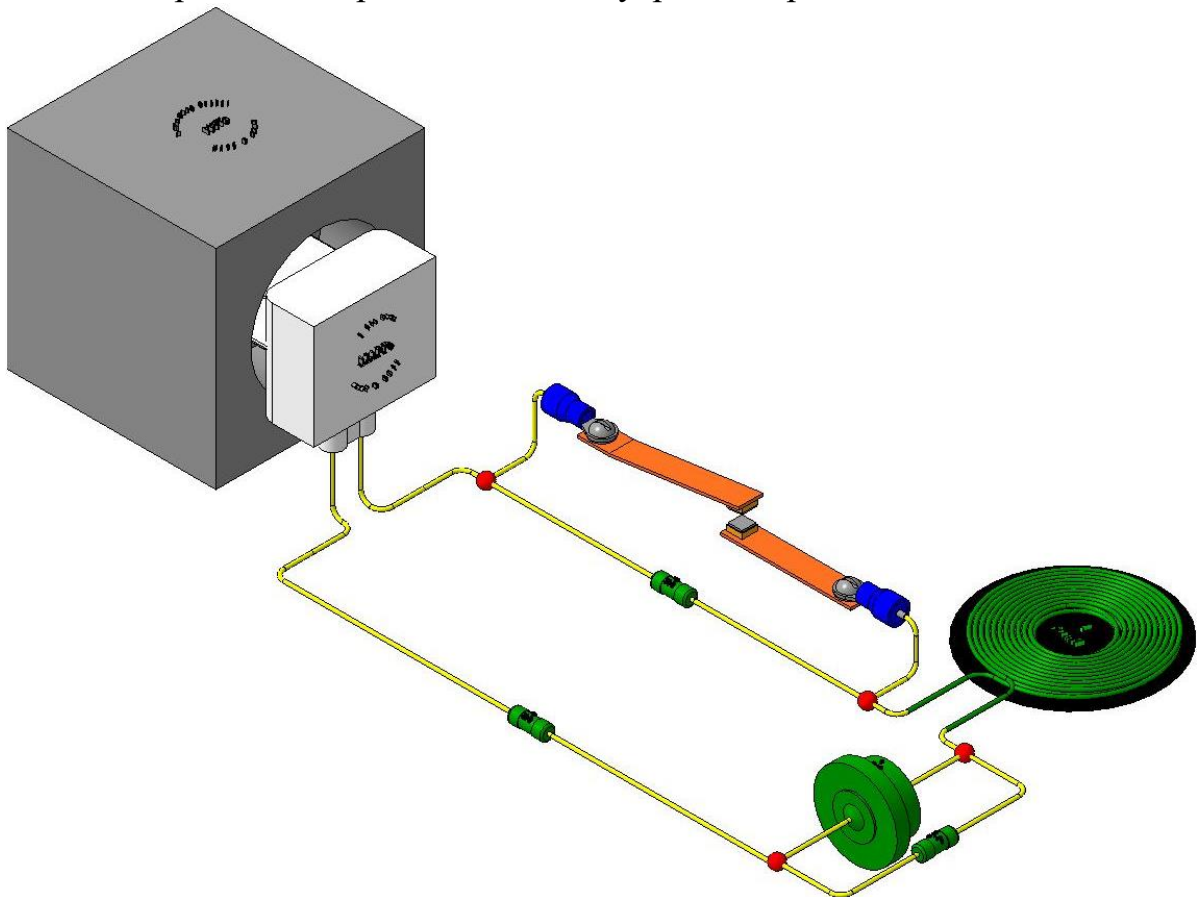


Рисунок 15 – Схема для разомкнутого контакта с реальными изделиями

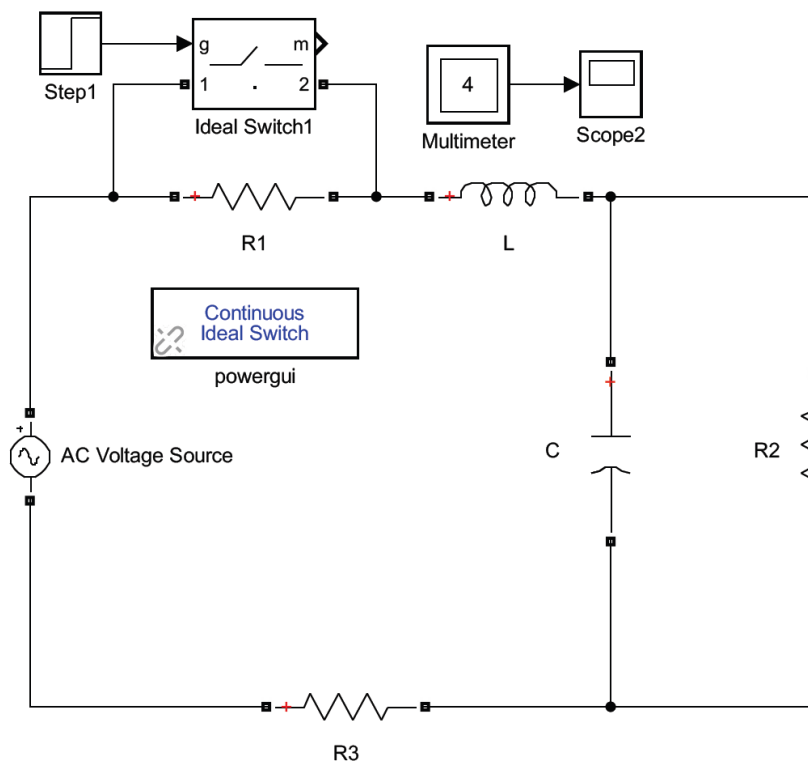


Рисунок 16 – Электрическая цепь в среде моделирования Simulink

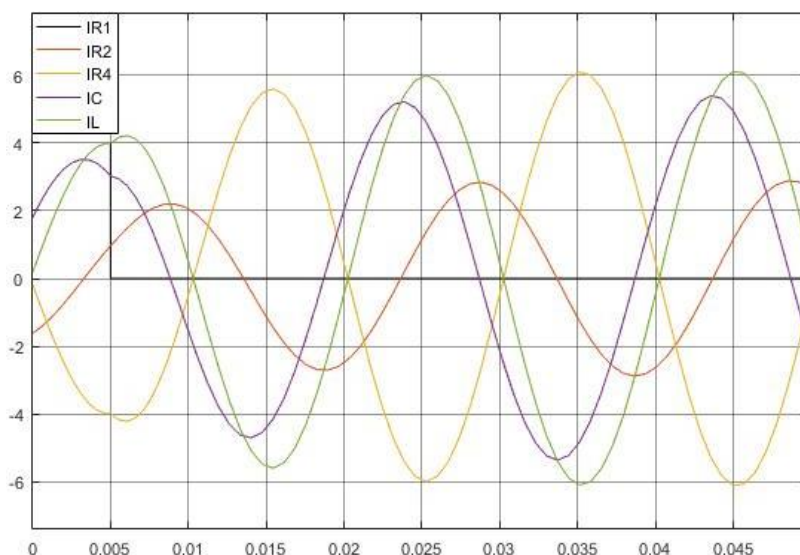


Рисунок 17 – График переходного процесса при разомкнутом контакте

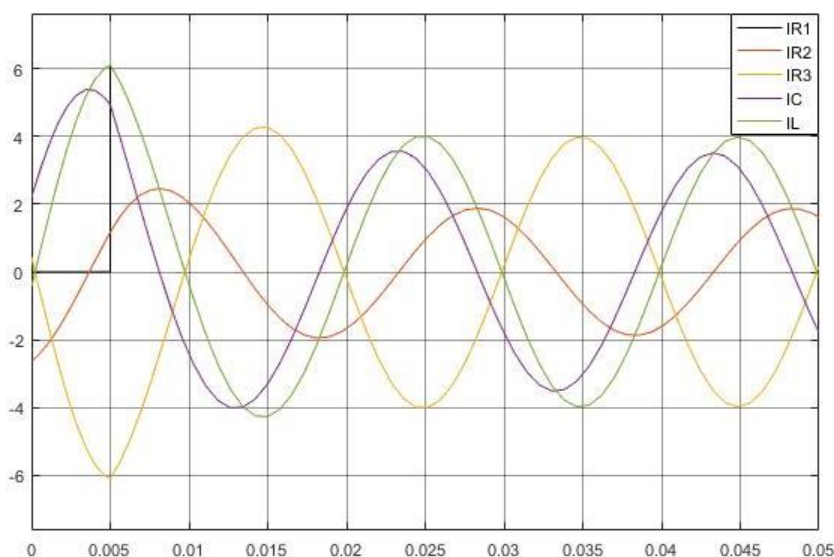


Рисунок 18 – График переходного процесса при замкнутом контакте

Литература

1. Мазуренко, А.А. Теоретические основы электротехники. Ч. 2. Переходные процессы. Нелинейные цепи. Теория электромагнитного поля [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для студентов электротехнических специальностей / А.А. Мазуренко ; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Электротехника и электроника». – Минск : БНТУ, 2013.
2. Бладыко, Ю.В. Применение MathCAD в решении задач электротехники. Ч. 2. Переходные процессы. Нелинейные цепи. Теория электромагнитного поля [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для студентов электротехнических специальностей / Ю.В. Бладыко, А.А. Мазуренко, И.В. Новаш ; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Электротехника и электроника». – Минск : БНТУ, 2013.
3. 2D-3D.RU [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.2d-3d.ru/opisanie-programm/95-preimushhestva-3d-modelirovaniya-nad-2d.html/>. – Дата доступа : 09.07.2020.
4. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Переходные_процессы_в_электрических_цепях#Методы_расчёта_переходных_процессов/. – Дата доступа : 09.07.2020.