

УДК 621.311.018

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Дасаев Б.Р.¹, студент гр. ЭС-23, III,Чебану Е.М.¹, студент гр. ЭС-24, II курсНаучный руководитель: Исаев А.С.¹, канд. техн. наук, доцент¹ФГБОУ ВО НИ «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», г. Новомосковск

Введение. Переходный режим – процесс перехода от одного длительного (установившегося) режима к другому. Для электрических цепей качественно он характеризуется наличием накопителей энергии – индуктивностей и ёмкостей (при их отсутствии обмена энергией между источником и пассивными элементами нет – переходный процесс отсутствует).

Теория переходных процессов как раздела электротехники в должной мере проработана и в полном объеме отражена в учебно-методической литературе (в частности, с использованием современной информационной терминологии приведено в учебнике [1]). Развитие программного обеспечения (в первую очередь – программ прикладной математики) приводит к возможности использования современных вычислительных методов. В учебном пособии [2] подробно приведено математическое моделирование современных электротехнических комплексов с использованием Matlab и MathCAD. В работе [3] сделан аргументированный выбор в пользу организации лабораторного практикума в предметной области электроэнергетики с помощью виртуального (программного) лабораторного стенда. Подобный подход имеет определённые преимущества в экономическом (нет материальных расходов на создание и последующее обслуживание лабораторной установки) и техническом (возможность моделирования и изучения абсолютно всех режимов, включая аварийные) аспекте. При этом лабораторная модель характеризуется хорошей адаптацией для проведения занятий в дистанционном формате и позволяет создавать цифровой аналог реальному объекту (традиционные стенды для всего этого подходят плохо).

Методы работы основаны на построении и программной реализации математической модели RLC-цепи постоянного тока. В качестве инструментальной среды (программное средство) принят Matlab. Выбор обусловлен наличием библиотек Simulink (реализация математических методов) и SimPowerSystems/Simscape (построение технических мехатронных моделей). Это позволяет создать виртуальную лабораторную установку с хорошими средствами визуализации результатов и возможностью их проверки (связь на уровне файлов).

В качестве контрольного примера рассмотрена цепь с одним источником ЭДС и двумя накопителями энергии (индуктивность и ёмкость). Пере-

ходный процесс вызван коммутацией ключа, приводящего к уменьшению сопротивления цепи шунтированием резистора R_2 (рис. 1). Изначально схема приведена в учебно-методическом пособии [с.31, 3] – классическим методом получена зависимость (устойчивый периодический процесс) напряжения на емкости $u_C(t) = 104 - 51,49e^{-2900t} \sin(3950t + 53,7^\circ)$.

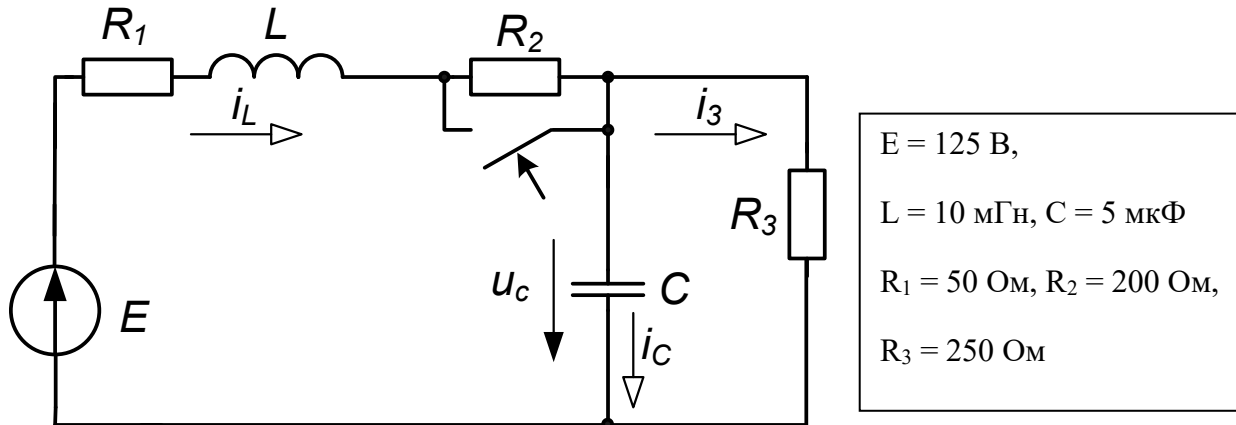


Рисунок 1 – Исходная схема цепи постоянного тока

Параметры предшествующего (до коммутации) режима $i_C(0-)=0$, $i_L(0-)=i_3(0-)=E/(R_1+R_2+R_3)=125/(50+200+250)=0,25 \text{ А}$, $U_C(0-)=i_3(0-)R_3=0,25 \cdot 250=62,5 \text{ В}$. Параметры принуждённого режима (новый установившийся режим при условии $t=\infty$): $i_{Cпр}=0$, $i_{Lпр}=i_{3пр}=E/(R_1+R_3)=125/(50+250)=0,417 \text{ А}$, $U_{Cпр}=i_{3пр} \cdot R_3=0,417 \cdot 250=104 \text{ В}$. По законам коммутации (независимые начальные условия): $i_L(0-)=i_L(0+)$, $U_C(0-)=U_C(0+)$.

Результаты. Модель цепи представлена на рис. 2. Она включает в себя источник постоянной ЭДС *DC Voltage Source*, четырёх блоков линейных элементов *Series RLC Branch* (из них формируются чисто активный R, емкостной C и активно-индуктивный RL элементы). Для измерения параметров режима используются блоки *Current Measurement* и *Voltage Measurement* (аналоги соответственно измерительных трансформаторов тока и напряжения), результаты выводятся на осциллографы *Scope*. Коммутация выполняется блоком *Ideal Switch* под управлением *Step*.

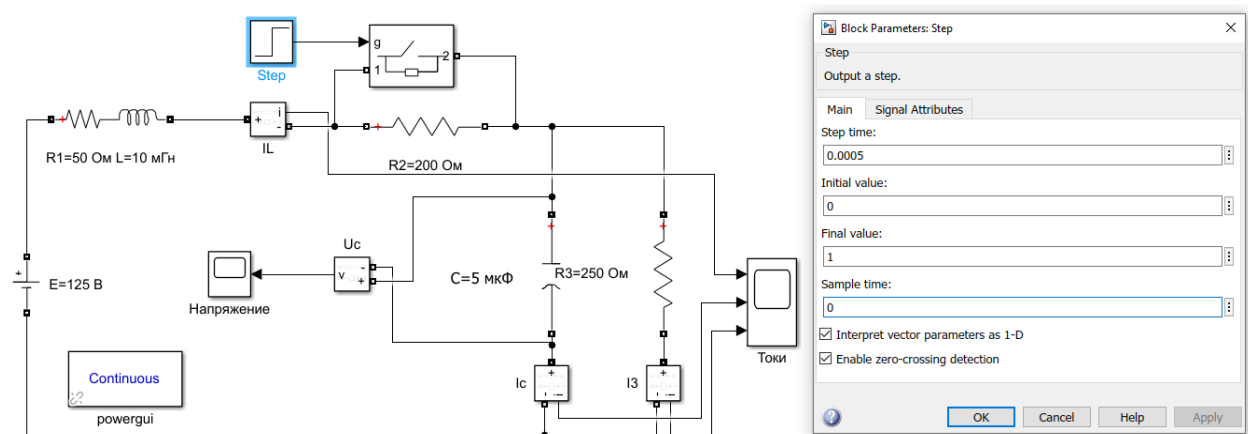


Рисунок 2 – Модель электрической цепи (Matlab SimPowerSystems)

Задание параметров элементов производится в их контекстных меню (на рис. 2 в качестве примера приведено меню для управляющего блока). Связь между элементами выполняется интуитивно понятным способом – соединением манипулятором мышь (тем самым при выполнении лабораторной работы реализуются компетенции в направлении схмотехники).

На рис. 3 представлены результаты моделирования переходного процесса (токи в ветвях схемы и напряжение на ёмкости). В начальный момент времени ключ разомкнут, коммутация происходит через 0,5 мс. Переходный процесс завершается примерно через 2,5 мс (к этому времени полностью затухают токи свободного процесса).

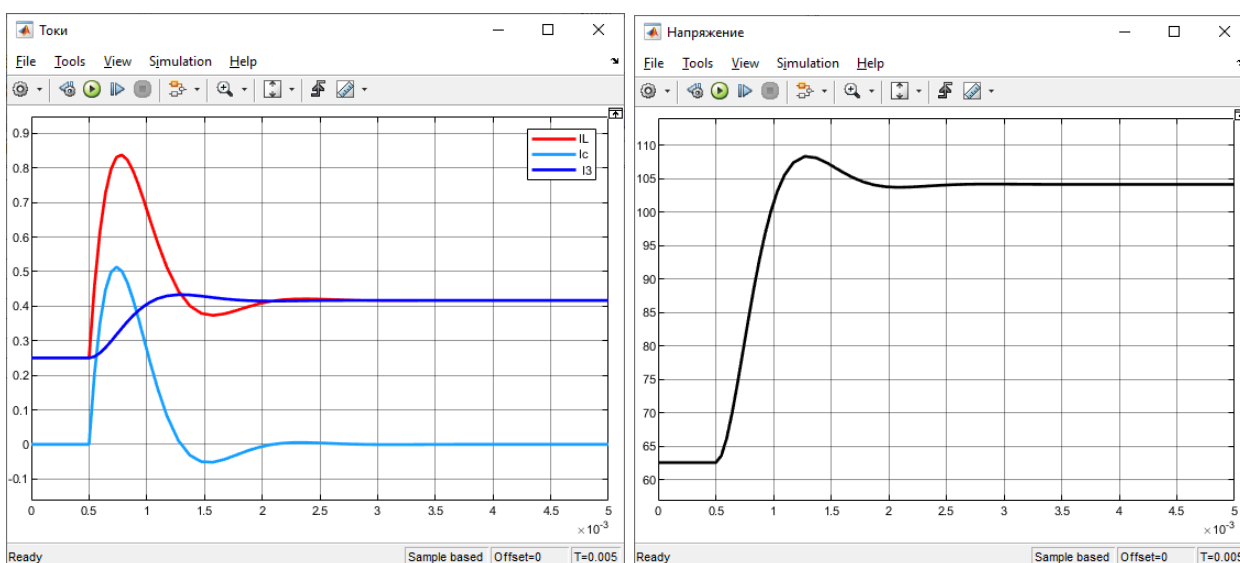


Рисунок 3 – Переходный процесс при замыкании ключа

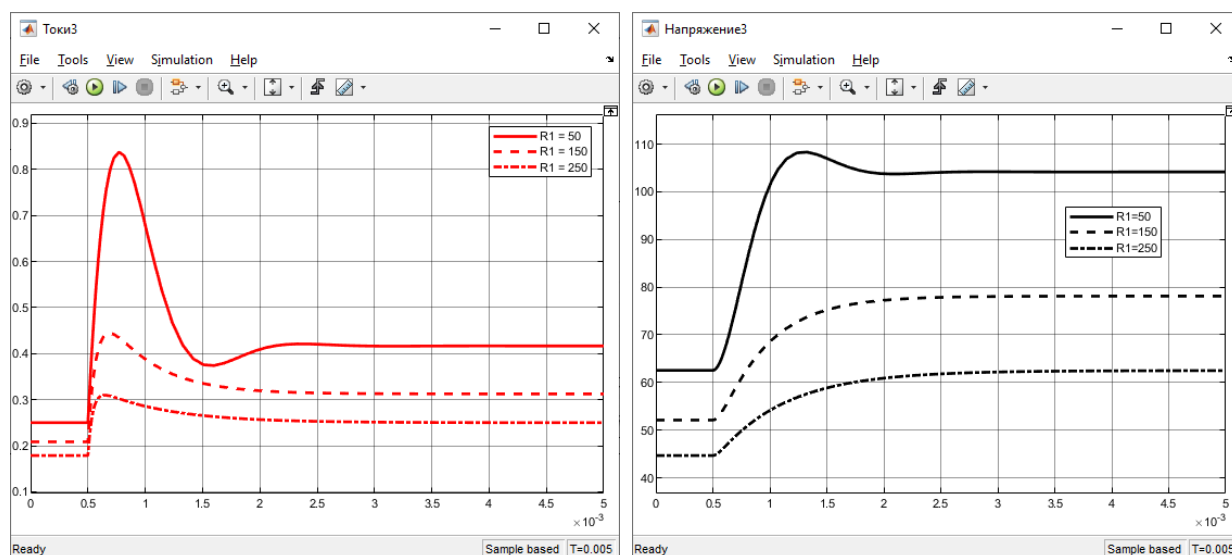


Рисунок 4 – Динамика переходного процесса при вариации сопротивления R_1

Модель обладает достаточной гибкостью – элемент можно не удалять из схемы, а комментировать (элемент меню «*Comment Out*»/«*Comment Through*»), что приводит к его игнорированию при проведении расчёта. Пока-

зания осциллографа можно сохранить для дальнейшего анализа различными способами (оптимальным представляется использование блока «*To Workspace*»). Это позволяет получать характеристики при изменении расчётных условий. В качестве примера приведена вариация переходного процесса при увеличении сопротивления R_1 . По результатам моделирования можно сделать вывод о качественном изменении переходного процесса – при увеличении сопротивления он приобретает апериодический характер.

Обсуждение. Результаты моделирования являются корректными: выполняются законы коммутации (токи через индуктивность и напряжение на ёмкости не изменяются скачком); соблюдается топология цепи для постоянного тока (установившееся значение тока в ветви с конденсатором равно нулю, в послекоммутационном режиме токи i_L и i_z равны друг другу); соответствуют расчётным параметрам режима (например, напряжение на ёмкости в предшествующем и новом установившемся режиме равны соответственно 62,5 и 104 В; ток головного участка i_L – 0,25 и 0,417 А).

В модели для коммутации используется *Ideal Switch*, а не *Breaker* (рассматривается в [3] при моделировании электромеханических переходных процессов для промышленной электроэнергетики). Последний блок выполняет переключение при равенстве нулю мгновенного значения тока – потому он может использоваться исключительно для цепей переменного тока.

Модель работает в среде Matlab, при дальнейшей работе можно создать исполнимый файл (подобное выполнено в [5] для модели изначально созданной в Matlab Simulink). Это выполняется с помощью приложения Matlab Compiler (в меню – "*Application Compiler*"), которое преобразует модели или скрипты в автономные приложения. В этом направлении представляется дальнейшая работа.

Сравнивая вычислительные возможности программных средств, можно сделать вывод о большей функциональности Matlab. Программа позволяет решать большинство задач (включая дифференциальное и операционное исчисление) как в численном, так и в аналитическом виде (используя средства символьной математики, что представлено в [6]). Хотя в работе [7] для экспериментального моделирования режима успешно использована система Electronics Workbench. Но при этом отмечаются недостатки программы: невозможность перемещать проводники в пределах модели (внешний вид цепи формируется автоматически), сложность оценки точности полученных результатов, частые ошибки при расчете сопротивлений (проводимостей) отдельных компонентов схемы.

Заключение. Разработана алгоритмически и реализована программно математическая модель режима типичной RLC-цепи постоянного тока. Адекватность модели объекту подтверждается соответствием зависимостей результатам непосредственных расчётов и соблюдением классических законов электротехники.

Результаты работы рекомендуются к использованию в учебном процессе при изучении электротехники при проведении практических занятий и лабораторного практикума (включая дистанционные формы обучения).

Список литературы:

1. Черевко, А.И. Теоретические основы электротехники. Расчёты электрических цепей постоянного и переменного однофазного тока: учебное пособие / А.И. Черевко, Л.В. Балакшина, И.Ю. Кузьмин. – Вологда: Издательство «Инфра-Инженерия», 2026. – 328 с. – ISBN 978-5-9729-2888-0. – EDN NUBNQZ.
2. Семенова, М.Н. Математические задачи в энергетике и компьютерное моделирование электротехнических систем: учебное пособие для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации «Электрификация и автоматизация горного производства» / М.Н. Семенова, А.С. Семенов. – М.: Изд. «Перо», 2025. – 85 с. – ISBN 978-5-00270-146-9. – EDN GRCJYX.
3. Исаев, А.С. Программное обеспечение дистанционного проведения лабораторного практикума / А.С. Исаев, Н.А. Пряхина // Педагогика, психология, общество: от теории к практике: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Чебоксары, 20 сентября 2022 года / Гл. редактор Ж.В. Мурзина. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 85-90. – EDN CDGJHW.
4. Константинова, Е.В. Расчет переходных процессов в линейных электрических цепях: практикум / Е.В. Константинова, Е.С. Гафиатулина. – Хабаровск: Изд. ДВГУПС, 2006. – 80 с.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025616060 Российская Федерация. Модель для расчета переходных процессов с помощью интеграла Дюамеля в Matlab/Simulink: заявл. 12.03.2025: опубл. 13.03.2025 / И.В. Черных, А.И. Васильев; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – EDN IXGSTI.
6. Валицкий, И.М. Использование символьных вычислений для переходных процессов электрических цепей / И.М. Валицкий, А.С. Исаев // Проблемы и перспективы развития энергетики: сборник материалов VII Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, Казань, 22-23 октября 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 59-63. – EDN QCBJUO.
7. Мясоедова, М.А. Применение компьютерных технологий для изучения технических дисциплин / М.А. Мясоедова, Л.Г. Мамонова // Образование. Инновации. Качество: Материалы VI Международной научно-методической конференции. В 2-х частях, Курск, 29 января 2025 года. – Курск: Курский государственный аграрный университет им. И.И. Иванова, 2025. – С. 309-316. – EDN UPVYJY.