

*ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ*

УДК 621.01

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-35-48

**СРАВНЕНИЕ ПОДХОДОВ К АНАЛИЗУ
ДИНАМИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С НЕНУЛЕВЫМИ
НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ МЕТОДАМИ
СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ***

В.М. ЛЕСС¹, А.В. ПРОКОПОВ², В.Ю. НЕЙМАН³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент факультета энергетики. E-mail: lissv134@gmail.com

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент факультета энергетики. E-mail: saspro684@gmail.com

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники. E-mail: nv.nstu@ngs.ru

Расчет переходных процессов в линейных электрических цепях является важным разделом теории электрических цепей, входящим в учебные планы большинства инженерных направлений подготовки и специальностей технических вузов. Помимо традиционных инженерных методов расчета переходных процессов, входящих в программы подготовки специалистов, определенный интерес представляет использование современных методов расчета, выполненных в компьютерных математических средах. Практическому освоению этих методов способствуют как специально разработанные пакеты компьютерных программ по расчету электрических цепей и электронных схем, так и лидирующие на рынке для технических вычислений программы, реализующие имитационное блочное визуально-ориентированное моделирование систем и устройств самого общего назначения Simulink – главный пакет расширения Matlab. При этом оптимальным подходом в изучении динамических цепей безусловно остается гармоничное сочетание традиционных и компьютерных средств обеспечения учебного процесса. Применение расширения Simulink позволяет не только самостоятельно оценить достоверность выполненных расчетов, но и лучше понять физику процессов, а также иметь хорошую возможность представления результатов расчетов в разнообразных формах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования и расширения возможностей динамического расчета электрических цепей. В качестве объек-

* Статья получена 25 августа 2019 г.

та для исследования рассматривается линейная электрическая цепь второго порядка с ненулевыми начальными условиями. Основной целью исследований является задача сравнения подходов к выполнению анализа переходных процессов в линейных цепях с ненулевыми начальными условиями методами структурного моделирования в Matlab Simulink. Основное внимание уделяется вопросам построения структурных схем моделей электрической цепи. Основу для описания процессов составляют уравнения Кирхгофа, связывающие мгновенные значения токов и напряжений элементов цепи через их параметры. Приведены примеры численного моделирования с использованием вариантов структурных схем моделей электрической цепи. Рассмотрены преимущества и недостатки рассмотренных подходов, а также получены рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: линейная электрическая цепь, переходный процесс, ненулевые начальные условия, методы структурного моделирования, варианты структурных схем

ВВЕДЕНИЕ

Математическое описание и исследование особенностей протекания динамических процессов, происходящих в электрических цепях, электронных схемах и электротехнических устройствах, представляют сложную и трудоемкую задачу. В большинстве случаев данные исследования выполняются с использованием современных пакетов программ, что может быть эффективным при наличии общих подходов и методов математического описания изучаемых объектов.

В теории и практике исследования сложных объектов используются разные подходы к получению исходных уравнений, описывающих их динамическое состояние. Наиболее общий подход к математическому описанию процессов в динамике базируется на составлении систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), одним из способов решения которых в полной мере отвечает интерактивный инструмент для моделирования, имитации и анализа динамических систем Matlab Simulink [1–3].

Возможности расширения Simulink позволяют осуществлять различные задачи математического моделирования сложных динамических систем и объектов в различных областях науки и техники, а также задачи анализа и синтеза многих видов электрических цепей и устройств с автоматическим учетом многосторонних связей и соотношений между элементами схемы [4–10]. При этом достаточно просто формируются каналы вычисления мгновенных значений токов, напряжений и их производных величин, мгновенных мощностей, а также могут использоваться многие другие функции, входящие в состав приложения Simulink [11–13].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ динамических цепей при изучении переходных процессов достаточно сложен и многообразен [14–16]. Существуют различные методы расчета переходных процессов в линейных электрических цепях. Например, необходимость определения постоянных интегрирования из начальных условий существенно осложняет расчет переходных процессов классическим методом решения линейных дифференциальных уравнений, описывающих исследуемые процессы. Особенно это относится к цепям при ненулевых начальных условиях второго и более высокого порядка. В проводимых исследованиях рассмотрены подходы к расчету переходных процессов в линейных электрических цепях с ненулевыми начальными условиями методами структурного моделирования в Matlab Simulink. Основное внимание в работе уделяется вопросам построения развернутых структурных схем модели цепи на примере расчета переходного процесса в линейной цепи второго порядка с ненулевыми начальными условиями.

Анализ переходного процесса в линейной цепи методами структурного моделирования может быть произведен с использованием различных подходов. Остановимся подробнее на некоторых из них и приведем примеры построения развернутых структурных схем в Simulink, а также дадим рекомендации по их использованию.

В качестве примера рассмотрим разветвленную цепь второго порядка при ненулевых начальных условиях, представленную на рис. 1. Цепь получает питание от постоянного источника ЭДС. Напряжение на емкости и ток в индуктивности до коммутации не равны нулю, что определяется ненулевыми начальными условиями цепи (рис. 1).

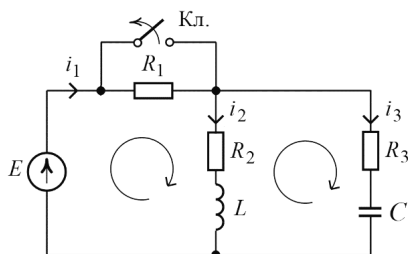


Рис. 1. Электрическая схема линейной цепи второго порядка

Как правило, традиционный процесс решения переходного процесса сводится к определению корней характеристического уравнения и постоянных

интегрирования, которые находятся известными методами. Затем находится окончательное решение переходного процесса как сумма свободной и принужденной составляющих [14, 15].

2. АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕНУЛЕВЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Для анализа данной цепи можно воспользоваться классическим подходом, который основывается на предварительном расчете независимых начальных и дальнейшем их использовании для расчета свободной составляющей переходного процесса, вызванного коммутацией ключа.

При расчете цепи методами структурного моделирования возникает необходимость построения дополнительной модели электрической цепи, соответствующей ее установившемуся режиму до коммутации.

Основой для описания процессов в электрической цепи являются уравнения Кирхгофа, связывающие ток и напряжение каждого элемента цепи через его параметры. Для цепи (рис. 1) до коммутации справедлива следующая система расчетных дифференциальных уравнений, составленная по законам Кирхгофа относительно мгновенных значений токов и напряжений на элементах цепи:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0, \\ i_2 R_2 + L \frac{di_2}{dt} = E, \\ i_3 R_3 + \frac{1}{C} \int i_3 dt - L \frac{di_2}{dt} - i_2 R_2 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Полная развернутая структурная схема модели, построенная на основе системы интегродифференциальных уравнений (1), представлена на рис. 2. При запуске структурной схемы модели производится расчет независимых начальных условий для тока через индуктивность $i_L(0+)$ и напряжения на емкости $u_C(0+)$, соответствующие их конечным величинам в принужденном режиме работы электрической цепи, регистрация которых производится с помощью установленных каналов измерения относительно интересующих нас выходов этой модели. Определяющим при выборе начальных условий является сохранение законов коммутации цепи относительно токов через индуктивность и напряжений на емкости: $i_L(0+) = i_L(0-)$; $u_C(0+) = u_C(0-)$.

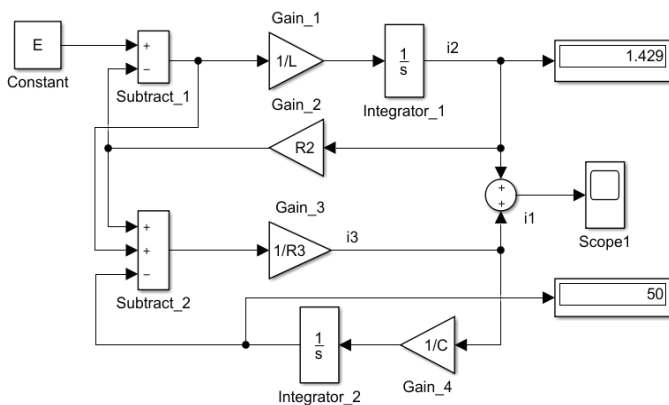


Рис. 2. Структурная модель цепи для расчета начальных условий

Для анализа переходного процесса в цепи (рис. 1) воспользуемся системой дифференциальных уравнений, составленной по законам Кирхгофа относительно мгновенных величин токов и напряжений на момент коммутации ключа:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0, \\ i_1 R_1 + i_2 R_2 + L \frac{di_2}{dt} = E, \\ i_3 R_3 + \frac{1}{C} \int i_3 dt - L \frac{di_2}{dt} - i_2 R_2 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Структурная схема модели цепи, реализованная в соответствии с системой уравнений (2), приведена на рис. 3. Схема использует установку начальных условий для интеграторов «Integrator_1» и «Integrator_2», соответствующих току через индуктивность $i_L(0+)$ и напряжению на емкости $u_C(0+)$, с помощью блоков «Constant_1» и «Constant_2».

В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости токов i_1 , i_2 , i_3 и напряжения на емкости u_C от времени для следующих параметров цепи (см. рис. 1): $E = 50$ В, $R_1 = 1000$ Ом, $R_2 = 35$ Ом, $R_3 = 40$ Ом, $L = 0,25$ Гн, $C = 10$ мкФ.

Расчет начальных условий для интеграторов (рис. 3) произведен по структурной схеме (рис. 2) в соответствии с законами коммутации для тока через индуктивность $i_L(0+) = 1.429 \text{ A}$ и для напряжения на емкости $u_C(0+) = 50 \text{ V}$.

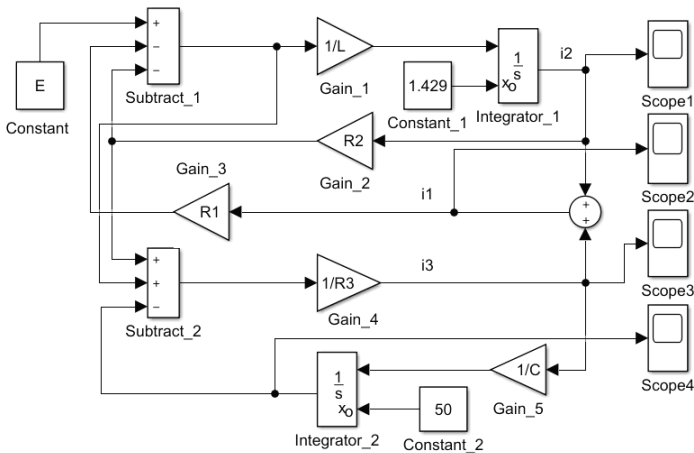


Рис. 3. Структурная схема модели цепи для расчета переходного процесса

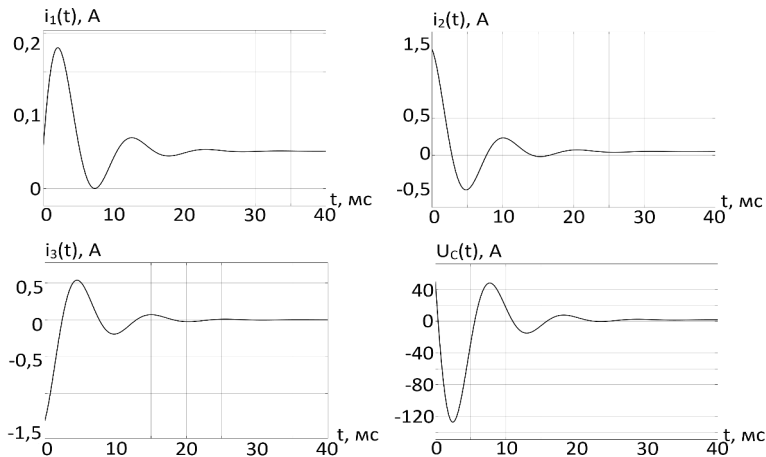


Рис. 4. Графики токов i_1 , i_2 , i_3 и напряжения u_C в переходном процессе

Следует отметить, что значения начальных условий можно отследить по графикам зависимостей на рис. 4 в момент времени $t = 0$.

Реализовать переходный процесс в цепи на рис. 1 можно более простым способом, используя для этого источник воздействия в виде одиночного ступенчатого сигнала «Step» либо управляемого переключателя сигналов «Switch» из набора визуальных объектов библиотеки Simulink. Рассмотрим применение каждого такого блока в отдельности.

Главная особенность построения структурных схем модели цепи с помощью блоков «Step» или «Switch» заключается в возможности использования одной структурной схемы модели цепи. Расчет начальных условий цепи и дальнейшее их использование для расчета переходного процесса происходит последовательно во времени. На первом промежутке времени рассчитываются начальные условия, а на втором – переходный процесс.

Для математического описания переходного процесса может использоваться система интегродифференциальных уравнений (2) для цепи на момент коммутации.

С помощью сигнала нулевого уровня, поддерживаемого источником «Step» на первом промежутке времени (рис. 5), происходит расчет начальных условий. В начале второго промежутка времени сигнал источника принимает единичный уровень, что эквивалентно коммутации ключа, т. е. началу времени переходного процесса в цепи. Применение данного подхода позволяет произвести расчет переходного процесса, в отличие от предыдущего примера, ограничившись построением одной структурной схемы цепи. Результатом работы структурной схемы с использованием источника воздействия в виде одиночного ступенчатого сигнала «Step» (рис. 5) являются графики зависимостей токов i_1 , i_2 , i_3 и напряжения на емкости u_C , приведенные на рис. 6.

В структурной схеме модели на рис. 7 расчет переходного процесса реализован с помощью блока переключателя «Switch», выполняющего переключение входных сигналов по сигналу управления, подаваемому на его средний вход. В качестве управления используется источник временного сигнала «Clock». Блок «Clock» формирует сигнал, величина которого на каждом шаге расчета равна текущему времени моделирования. Если сигнал управления, подаваемый на средний вход, меньше величины порогового значения, то на выходе блока переключателя «Switch» проходит сигнал со второго (нижнего) входа «Constant_1». Если сигнал управления станет больше, чем пороговое значение, то на выходе блока переключателя будет поступать сигнал с первого (верхнего) входа. Пороговое значение сигнала определяет время, в течение которого выполняется расчет начальных условий.

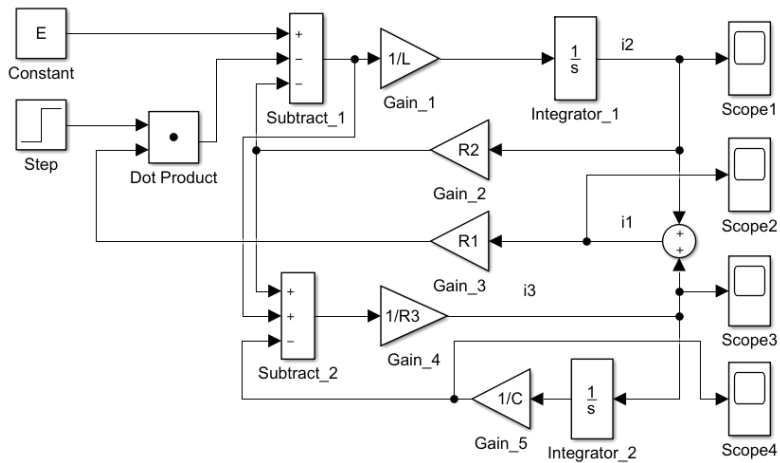


Рис. 5. Структурная схема модели цепи с блоком «Step»

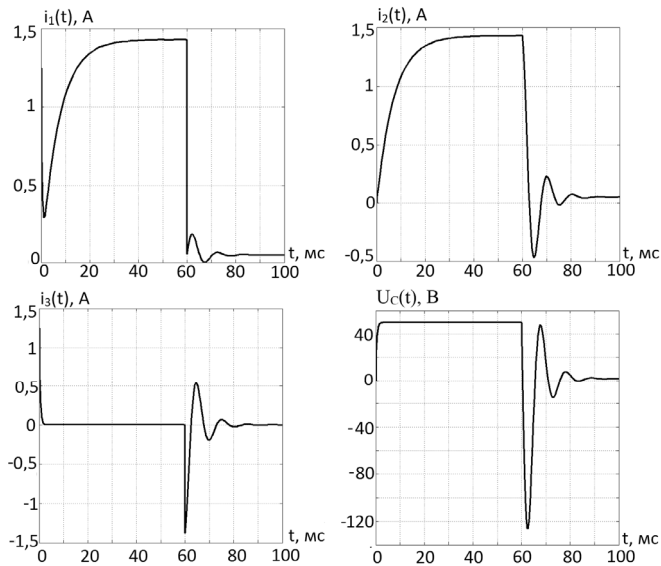


Рис. 6. Графики токов i_1 , i_2 , i_3 и напряжения u_C в переходном процессе с блоком «Step»

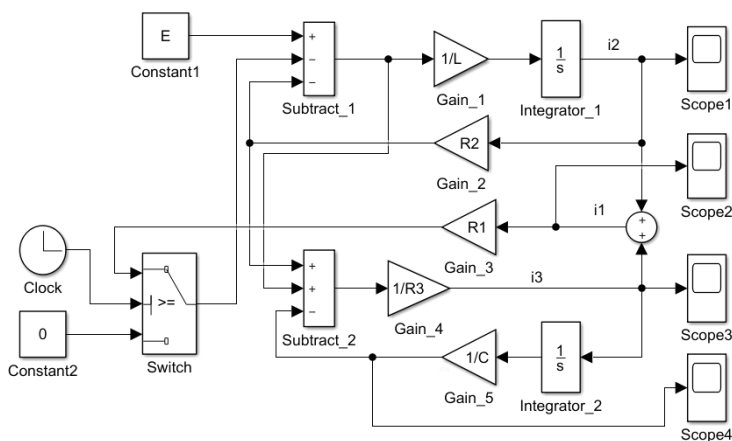


Рис. 7. Структурная схема модели с блоком «Switch»

В конкретном случае оно составляет время $t = 0,06$ с, по завершении которого выполняется переключение сигнала и выполняется расчет переходного процесса.

Результатами работы структурной схемы модели с использованием блока переключателя «Switch» (рис. 7) являются аналогичные графики зависимостей токов i_1 , i_2 , i_3 и напряжения на емкости u_C , приведенные на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ переходных процессов на примере моделирования цепи второго порядка с ненулевыми начальными условиями выявил различные возможности в применении подходов при построении структурных схем моделей методами и средствами визуально-ориентированного программирования.

Более существенным с точки зрения классического представления расчета переходного процесса является подход с использованием интеграторов с внешней установкой начальных условий. Однако по мере усложнения электрической цепи или ее порядка повышается трудоемкость процесса моделирования, вызванная дополнительным построением структурной схемы модели до коммутационной цепи для расчета независимых начальных условий.

Очевидным преимуществом обладают подходы с использованием блоков ступенчатого сигнала «Step» и переключателя «Switch», позволяющие при проведении анализа ограничиться одной структурной схемой модели цепи и тем самым снизить трудоемкость процесса моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.
3. Дьяконов В.П. Simulink: самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 782 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Анализ и синтез мехатронной системы с магнито-коммутационной машиной в пакетах MATLAB-SIMULINK // Силовая электроника. – 2006. – № 7. – С. 82–86.
5. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
6. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Simulation of processes in an electromagnetic converter with energy loss in the massive magnetic core // The 17 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016: proceedings, Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – P. 522–525.
7. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
8. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями // Доклады АН ВШ РФ. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107.
9. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40.
10. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка // Доклады АН ВШ РФ. – 2016. – № 3 (32). – С. 98–114.
11. Прокопов А.В., Лесс В.М. Исследование переходных процессов в сложных цепях высокого порядка при нулевых начальных условиях // Вестник современных исследований. – 2019. – № 3-13. – С. 151–160.
12. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.
13. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопрово-

де // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78.

14. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2000. – 638 с.

15. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Теория электрических цепей: учебное пособие для вузов. – М.: Юрайт, 2017. – 345 с.

16. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Теория цепей современной электротехники: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 347 с.

Лесс Виталий Максимович, бакалавр факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Имеет 2 публикации. E-mail: lissv134@gmail.com

Прокопов Александр Владимирович, бакалавр факультета энергетики Новосибирского государственного технического университета. Имеет 2 публикации. E-mail: saspro684@gmail.com

Нейман Владимир Юрьевич, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – силовые электромагнитные импульсные системы. Имеет более 200 публикаций. E-mail: nv.nstu@ngs.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-35-48

Comparison of approaches in analysis of dynamic chains with non-zero initial conditions by structural modeling methods*

V.M. Less¹, A.V. Procopov², V.Yu. Neyman³

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Energy faculty student. E-mail: lissv134@gmail.com

² Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Energy Faculty Student. E-mail: saspro684@gmail.com

³ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Head of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering. E-mail: nv.nstu@ngs.ru

Calculation of transients in linear electrical circuits is an important section of the theory of electrical circuits, included in the curricula of most engineering areas of training and specialties of technical universities. In addition to the traditional engineering methods for calculating

* Received 25 August 2019.

transients, which are part of the training programs for specialists, it is of interest to use modern methods of calculation performed in computer mathematical environments. The practical development of these methods is facilitated by both specially developed computer program packages for calculating electrical circuits and electronic circuits, as well as programs leading on the market for technical computing that implement simulation block visual-oriented modeling of systems and devices of the most general purpose Simulink - the main Matlab extension package. In this case, the optimal approach to the study of dynamic circuits, of course, remains a harmonious combination of traditional and computer tools to ensure the educational process. The use of the Simulink extension allows not only to independently evaluate the reliability of the calculations performed, but also to better understand the physics of the processes, as well as to have a good opportunity to present the calculation results in various forms. The relevance of the study is due to the need to improve and expand the capabilities of the dynamic calculation of electrical circuits. A linear electric circuit of the second order with nonzero initial conditions is considered as an object for research. The main goal of the research is to compare the approaches to the analysis of transients in linear circuits with nonzero initial conditions by the methods of structural modeling in Matlab Simulink. The focus is on building block diagrams of electric circuit models. The basis for the description of the processes is the Kirchhoff equations, connecting the instantaneous values of the currents and voltages of the circuit elements through their parameters. Examples of numerical simulation using structural block diagrams of electric circuit models are given. The advantages and disadvantages of the considered approaches are considered, as well as recommendations for their use are received.

Keywords: linear electric circuit, transient, nonzero initial conditions, structural modeling methods, structural schemes options

REFERENCES

1. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
2. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v Matlab 6.0* [Computer simulation of semiconductor systems in Matlab 6.0]. St. Petersburg, Korona print Publ., 2001. 320 p.
3. D'yakonov V.P. *Simulink: 'camouchitel'* [Simulink. Tutorial]. Moscow, DMK Press Publ., 2015. 782 p.
4. German-Galkin S.G. Analiz i sintez mekhatronnoi sistemy s magnitokommutsionnoi mashinoy v paketakh MATLAB-SIMULINK [Analysis and synthesis of a mechatronic system with a magneto-switching machine in packets MATLAB-SIMULINK]. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2006, no. 7, pp. 82–86.
5. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektro-magnitnoi mashiny s inertsionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.

6. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Simulation of processes in an electromagnetic converter with energy loss in the massive magnetic core. *The 17 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016: proceedings*, Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016, pp. 522–525.

7. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda koleba-tel'nogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypriamitelem [Calculation of the dynamics of an electromagnetic drive oscillatory motion with a half-wave rectifier]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2016, no. 6, pp. 64–71.

8. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki elektromagnitnogo udarnogo uzla s uprugimi svyaziyami [A dynamic mathematical model of the electromagnetic impact unit with spring linkages]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 2 (31), pp. 94–107.

9. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Mathematical model of dynamics of two-inductor synchronous impact electromagnetic machines with free head running with free head running-out]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2016, no. 5, pp. 32–40.

10. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki odnokatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s dvukhstoronnim vybegom boika [Mathematical model of the dynamics of a single-coil synchronous electro-magnetic percussion machine with double-sided striking of the striker]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossijskoj Federacii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 98–114.

11. Prokopov A.V., Less V.M. Issledovanie perekhodnykh protsessov v slozhnykh tsepyakh vysokogo poryadka pri nulevykh nachal'nykh usloviyakh [Investigation of transients in complex high-order circuits under zero initial conditions]. *Vestnik sovremennykh is-sledovaniy – Bulletin of Modern Research*, 2019, no. 3-13, pp. 151–160.

12. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeistvii i nizkochastotnykh vibratsii [Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and low-frequency vibrations generation systems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

13. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovode [Simulation of processes in an electromagnetic vibration converter with power loss in the

steel magnetic core]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 73–78.

14. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow, Gardariki Publ., 2000. 638 p.

15. Malinin L.I., Neiman V.Yu. *Teoriya elektricheskikh tsepei* [Theory of electrical circuits]. Moscow, Yurait Publ., 2017. 345 p.

16. Malinin L.I., Neyman V.Yu. *Teoriya tsepei sovremennoi elektrotehniki* [Circuit theory of modern electrical engineering]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2013. 347 p.

Для цитирования:

Лесс В.М., Прокопов А.В., Нейман В.Ю. Сравнение подходов к анализу динамических цепей с ненулевыми начальными условиями методами структурного моделирования // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 2 (95). – С. 35–48. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-35-48.

For citation:

Less V.M., Procopov A.V., Neyman V.Yu. *Sravnenie podkhodov k analizu dinamicheskikh tsepei s nenulevymi nachal'nymi usloviyami metodami strukturnogo modelirovaniya* [Comparison of approaches in analysis of dynamic chains with non-zero initial conditions by structural modeling methods]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (95), pp. 35–48. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-2-35-48.