

Научная статья

УДК 004.942

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178478>

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ И УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В РАБОТЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Дмитрий Юрьевич Тарасов<sup>1</sup>, Георгий Львович Сухомлинов<sup>2</sup>✉,**

**Валерий Вадимович Михайлов<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Технологический университет им. А.А. Леонова,  
Московская область, Королёв, Россия

<sup>1</sup>[tarasovdu@bmstu.ru](mailto:tarasovdu@bmstu.ru)

<sup>2</sup>[sukhomlinov@bmstu.ru](mailto:sukhomlinov@bmstu.ru) ✉

<sup>3</sup>[mo\\_techuniv@mosreg.ru](mailto:mo_techuniv@mosreg.ru)

*Аннотация.* Предлагается подход к численному моделированию переходных и установившихся режимов в работе импульсных преобразователей напряжения постоянного тока, учитывающий разрывные особенности в формулировке описывающих рассматриваемую проблему дифференциальных уравнений. Алгоритм численного решения поставленной задачи основан на методе численного интегрирования с применением неявной схемы Эйлера. В качестве примера представлены результаты расчётов, касающиеся переходного и установившегося

режимов в работе принятого к рассмотрению понижающего преобразователя напряжения постоянного тока.

**Ключевые слова:** импульсный преобразователь напряжения постоянного тока, дифференциальные уравнения с разрывными особенностями, неявная схема Эйлера численного интегрирования

**Для цитирования:** Тарасов Д.Ю., Сухомлинов Г.Л., Михайлов В.В. Численное моделирование переходных и установившихся режимов в работе импульсных преобразователей напряжения постоянного тока // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178478>

Original article

## **NUMERICAL MODELING OF TRANSIENT AND STEADY-STATE MODES IN THE OPERATION OF PULSED DC-DC VOLTAGE CONVERTERS**

**Dmitry Yu. Tarasov<sup>1</sup>, Georgy L. Sukhomlinov<sup>2</sup>✉, Valery V. Mikhailov<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>Moscow State Technical University. N.E. Bauman,  
Moscow, Russia

<sup>3</sup>Leonov Moscow Region University of Technology,  
Moscow region, Korolev, Russia

<sup>1</sup>[tarasovdu@bmstu.ru](mailto:tarasovdu@bmstu.ru)

<sup>2</sup>[sukhomlinov@bmstu.ru](mailto:sukhomlinov@bmstu.ru)✉

<sup>3</sup>[mo\\_techuniv@mosreg.ru](mailto:mo_techuniv@mosreg.ru)

**Abstract.** It is noted in the introductory part of the article that approaches based on application of the powerful commercial software such as MATLAB/Simulink are widely employed in the research works of the design organizations associated with the various types of the switched-mode DC-DC voltage converters development. At the same time, the trend associated with development of simpler computing tools, which can be relied upon not only while conducting specific computational studies of the said converters, but also for reliability confirming of the results obtained based on this software as well, is still being called for. The purpose of the article consists in describing one of the like type of computational tools based on the numerical integration method and designed for studying transient and steady state operation modes of the converters under discussion.

The article points out that systems of differential equations describing the dynamics of the switched-mode DC-DC voltage converters are characterized by the presence of specifics associated with abrupt changes of their parameters in time initiated by switching by pulse-width modulators with a given clock frequency  $f$  and a period  $T = 1/f$ . With reference to the work of one of the co-authors of the article, dealt with the numerical solution of dynamics problems of the electro-mechanical systems with discontinuous features (such as dry friction), the authors note that a simple and effective way of numerical implementation in such cases is application of an unconditionally computationally stable implicit Euler scheme when integrating over time.

The main content of the article deals with the description of the said approach in relation to the numerical simulation of transients in the operation of a buck switched-mode DC-DC voltage converter. The article presents a design diagram of the converter and corresponding dynamics problem is formulated in the form of a system of the two first-order

differential equations (with respect to the inductor current  $i$  and the load voltage  $U$ ) with discontinuous features. The algorithm of the numerical solution, implemented in the form of a program in the Fortran language, is recounted. The article presents the results of computations performed by this program related to the transient operation modes of the two concrete buck converters. These results fidelity is confirmed by comparison with the simulation results available in the open sources, performed in the MATLAB/Simulink. The article points at the option of the proposed model application (accounting for the discontinuous specifics) in the version corresponding to the so-called “continuous” or “averaged” model. On the example of the transient process computing for one of the considered buck converters performed with “discontinuous” and “continuous” versions of the developed computational model the article demonstrates that computational results of these versions are in good agreement with each other.

The final part of the article contains conclusions on the research performed. It is noted here that the article presents (based on the implicit Euler scheme implementation) an approach to the numerical modeling of transients of the switched-mode DC-DC voltage converters operation, with account for discontinuous features in the formulation of differential equations describing dynamics of such devices. Transients of two options of the DC-DC buck voltage converters (described in literature) were subjected to the numerical analysis. Fidelity of the numerical simulation results has been confirmed by practical concurrence with the results of computer modeling and physical experiment available in the literature. Capabilities of the continuous version of the developed computational model for solving problems of dynamics of the buck switched-mode DC-DC voltage converters have been demonstrated.

**Keywords:** pulsed DC-DC voltage converter, differential equations with discontinuous singularities, implicit Euler scheme of numerical integration

**For citation:** Tarasov D.Yu., Sukhomlinov G.L., Mikhailov V.V. Numerical modeling of transient and steady-state modes in the operation of pulsed dc-dc voltage converters. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178478>

В исследовательских работах [1-6] проектных организаций, связанных с разработкой различных типов импульсных преобразователей напряжения постоянного тока, широкое применение получили подходы, основанные на использовании таких мощных коммерческих программных комплексов, как MATLAB/Simulink [7-18]. В то же время востребованным остаётся направление, связанное с развитием более простых вычислительных инструментов, на которые можно опираться не только при проведении конкретных расчётных исследований отмеченных преобразователей, но также для подтверждения достоверности получаемых на основе указанных программных комплексов результатов. Ниже представлено описание одного из подобного типа расчётных инструментов, основанного на методе численного интегрирования и предназначенного для исследования переходных и установившихся режимов в работе обсуждаемых преобразователей.

Укажем, что для систем дифференциальных уравнений, описывающих динамику импульсных преобразователей напряжений постоянного тока, характерно наличие особенностей, связанных со скачкообразным изменением во времени

входящих в них параметров, инициируемых переключениями, которые осуществляются широтно-импульсными модуляторами [19] с заданной тактовой частотой  $f$  и периодом  $T=1/f$ . Одним из подходов к расчётному исследованию переходных режимов в работе подобных объектов является использование при решении указанных систем методов численного интегрирования. Здесь могут быть применены, в частности, высокоточные схемы интегрирования типа Рунге-Кутты. Такие схемы позволяют обеспечивать необходимую вычислительную точность при выборе достаточно крупного шага интегрирования по времени. Однако при решении обсуждаемого типа задач шаг интегрирования необходимо мельчить, чтобы получить подробную картину колебаний значений исследуемых токов и напряжений на каждом из тактовых периодов  $T$ . Это относится и к проблеме вычисления средних значений на тактовом периоде отмеченных параметров. Эффективным в условиях выбора мелкого шага способом численного решения задач динамики с разрывными особенностями является (как показано, например, в работах [20,21,22]) использование при интегрировании по времени безусловно устойчивой в вычислительном отношении неявной схемы Эйлера. Проиллюстрируем возможности подобного подхода к численному моделированию переходных режимов применительно к работе понижающего импульсного преобразователя напряжения постоянного тока.

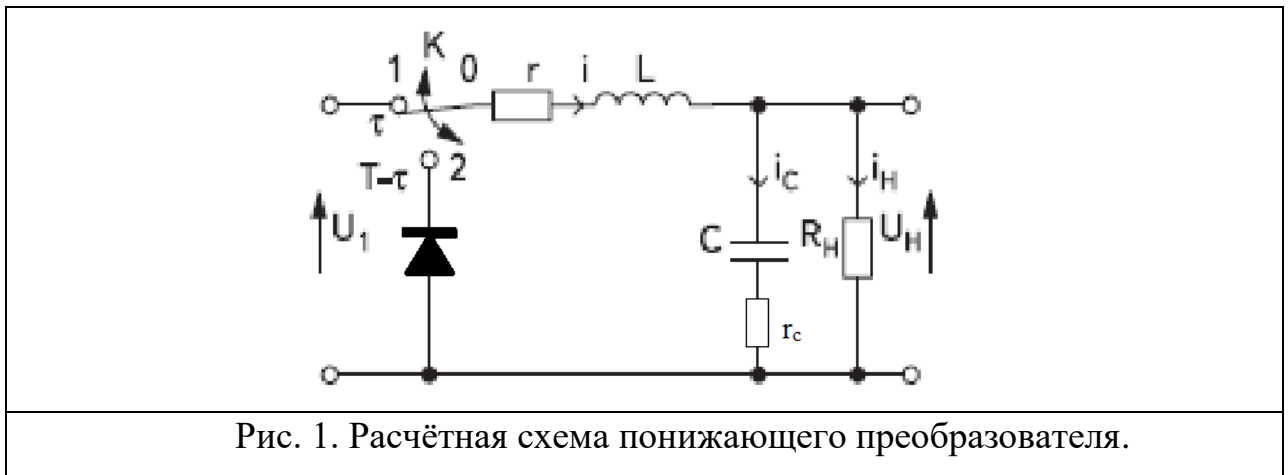


Рис. 1. Расчётная схема понижающего преобразователя.

Итак, рассматриваем понижающий преобразователь, расчётная схема которого представлена на рис. 1. Соответствующие уравнения динамики такого преобразователя могут быть представлены в виде (см., например, [9]):

$$\begin{aligned} \frac{dv_1}{dt} &= a_{11}v_1 + a_{12}v_2 + b_1U_1y(t), \\ \frac{dv_2}{dt} &= a_{21}v_1 + a_{22}v_2 + b_2U_1y(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $y(t)$  - периодическая функция, представимая на периоде  $T$  в виде

$$y = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < t < \tau, \\ 0 & \text{при } \tau < t < T. \end{cases} \quad (2)$$

Параметры, входящие в запись (1), определяются по схеме

$$\begin{aligned} v_1 &= i, \quad v_2 = U_H, \\ a_{11} &= -r/L, \quad a_{12} = -1/L, \quad a_{21} = (LR_H - CR_Hr_c)/d, \\ a_{22} &= -(CR_Hr_c + L)/d, \quad b_1 = 1/L, \quad b_2 = R_Hr_c/g, \\ g &= L(R_H + r_c), \quad d = gC. \end{aligned} \quad (3)$$

Численное решение системы дифференциальных уравнений (1) при начальных условиях ( $v_1 = 0, v_2 = 0$  при  $t = 0$ ) осуществляем с использованием неявной схемы Эйлера. Считая шаг  $\Delta t$  интегрирования по времени достаточно малым, в соответствии с указанной схемой представляем уравнения (1) на таком шаге в виде

$$\begin{aligned}\frac{v_1^1 - v_1^0}{\Delta t} &= a_{11}v_1^1 + a_{12}v_2^1 + b_1U_1y(t_1), \\ \frac{v_2^1 - v_2^0}{\Delta t} &= a_{21}v_1^1 + a_{22}v_2^1 + b_2U_1y(t_1).\end{aligned}\tag{4}$$

Здесь  $v_1^0, v_2^0$  - значения искомым функций в начале текущего шага интегрирования (при  $t = t_0$ ), а  $v_1^1, v_2^1$  - их значения в конце данного шага (при  $t = t_1$ ), которые определяются на основе решения системы алгебраических уравнений (4).

Алгоритм численного решения задачи реализован в виде цикла по временным шагам  $\Delta t$  с вычислением значений  $v_1^1, v_2^1$  на основе системы (4). При этом в завершение каждого шага отмеченные значения принимаются в качестве исходных данных  $v_1^0, v_2^0$ , необходимых для выполнения расчётов на следующем шаге. Наличие диода в расчётной схеме учитывается следующим образом. Обращаем внимание на то, что диод должен пропускать ток только в положительном направлении в условиях, когда ключ находится в положении 2. Чтобы не допустить возможность протекания тока в противоположном направлении в ситуации, когда  $i < 0$ , присваиваем сопротивлению  $r$  чрезвычайно большое значение (например,  $10^{12}$ ). Алгоритм реализован в виде программы на языке Фортран. Надёжность результатов, получаемых с использованием данной программы, продемонстрируем путём сравнения с представленными в статье [13] результатами компьютерного моделирования и физического эксперимента, переходного и установившегося режимов в работе одного из представителей понижающих преобразователей.

Итак, рассматриваем понижающий преобразователь, имеющий, согласно [7], следующие характеристики:  $U_I=25\text{В}$ ,  $r_C=80\text{ мОм}$ ,  $r=124\text{ мОм}$ ,  $R_H=57\text{ Ом}$ ,  $L=15\text{ мГн}$ ,



$C=25$  мкФ. Тактовая частота переключателя составляет величину  $f=1000$  Гц (соответственно, тактовый период имеет значение  $T=1/f=1\text{мс}$ ), при этом  $\gamma=\tau/T=0,5$ .

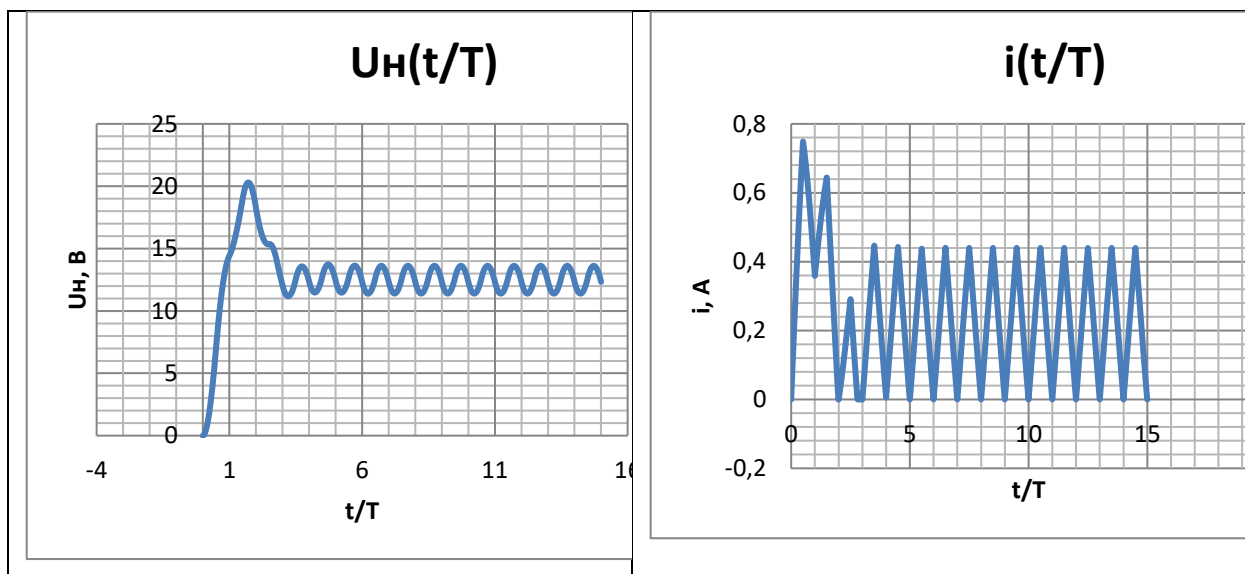


Рис. 2. Картины переходных процессов для напряжения нагрузки  $U_n$  и тока  $i$  в дросселе (вариант преобразователя из работы [13]).

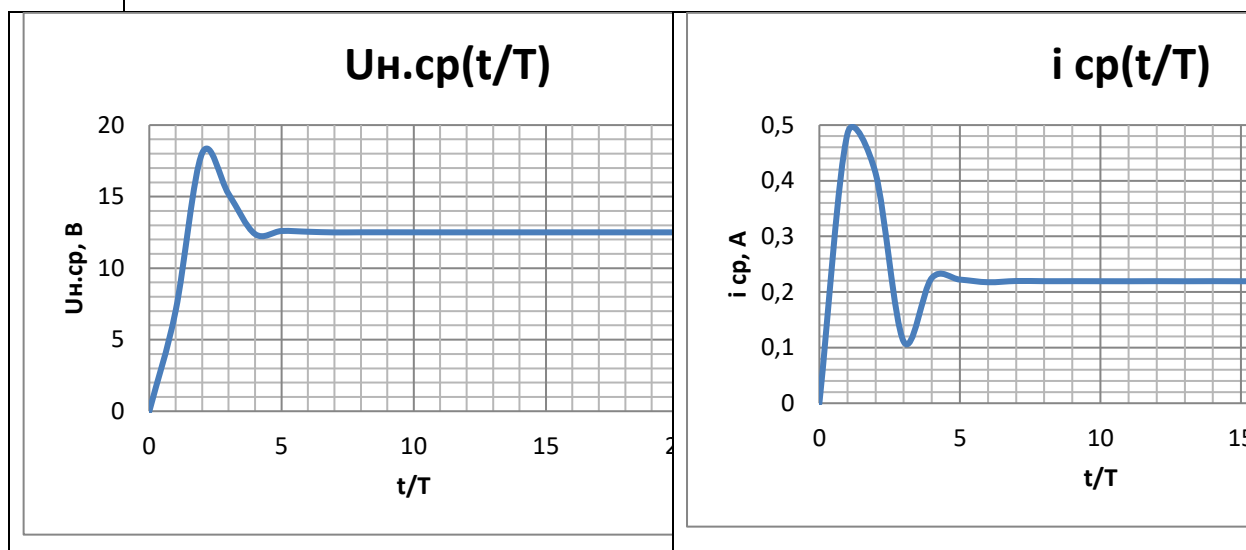


Рис. 3. Картины установления во времени средних (по тактовому периоду) значений напряжения нагрузки  $U_n$  и тока  $i$  в дросселе (вариант преобразователя из работы [13]).

На рис. 2 и 3 представлены полученные численным моделированием результаты, касающиеся протекания переходных процессов по напряжению нагрузки  $U_n$  и по току  $i$  в дросселе. Средние (по тактовому периоду) значения напряжения

нагрузки  $U_n$  и тока  $i$  в дросселе получены в процессе численного интегрирования с использованием процедуры осреднения в рамках каждого текущего периода  $T$ . Отметим, что на каждом из периодов интегрирование по схеме Эйлера осуществлялось с выбором 4000 шагов. Проводя сравнение представленных на графиках расчётных результатов с аналогичными результатами по параметрам  $U_n$  и  $i$ , полученными в работе [13] путём моделирования в среде программного комплекса Simulink, отмечаем их хорошее согласование. В частности (см. рис. 2), это относится к пиковым значениям параметров  $U_n$  и  $i$  (20,3 В и 0,75 А), к максимальным и минимальным их значениям в установившемся режиме (13,5 В и 11,5 В; 0,45А и 0 А), а также времени перехода к установившемуся режиму (порядка четырёх тактовых периодов). Здесь следует указать, что реализации отрицательных значений тока  $i$  в дросселе препятствует наличие диода в расчётной схеме преобразователя. Поэтому вместо отрицательных реализуются лишь нулевые значения параметра  $i$ . Уменьшенные (до 18 В и 0,5 А) пиковые значения параметров  $U_{n\text{ ср}}$  и  $i_{\text{ ср}}$  (см. рис. 3) по сравнению с тем, что отмечалось на рис. 2, связано с использованием процедуры осреднения указанных параметров на каждом текущем тактовом периоде. В рамках этой процедуры получены и средние значения (12,5 В и 0,22 А) параметров  $U_n$  и  $i$  в установившемся режиме, что согласуется с результатами, представленными в работе [13].

Далее используем представленную вычислительную модель (с разрывными особенностями) для оценки точности результатов, получаемых с использованием соответствующей непрерывной модели понижающего преобразователя, строящейся в рамках так называемой процедуры "осреднения" [23]. Укажем, что отмеченное

"осреднение" означает использование в качестве значения функции  $y(t)$  на тактовом периоде её среднего на периоде значения  $\gamma=\tau/T$ . В качестве объекта моделирования принимаем понижающий преобразователь, экспериментально исследованный в работе [24].

Итак, рассматриваем понижающий преобразователь, имеющий, согласно [20], следующие характеристики:  $U_I=18\text{В}$ ,  $r_C=0,365\text{ Ом}$ ,  $r=0,12\text{ Ом}$ ,  $R_H=10\text{ Ом}$ ,  $L=560\text{ мкГн}$ ,  $C=98\text{ мкФ}$ . Тактовая частота переключателя составляет величину  $f=20\text{ кГц}$  (соответственно, тактовый период имеет значение  $T=1/f=50\text{ мкс}$ ), при этом  $\gamma=\tau/T=0,338$ .

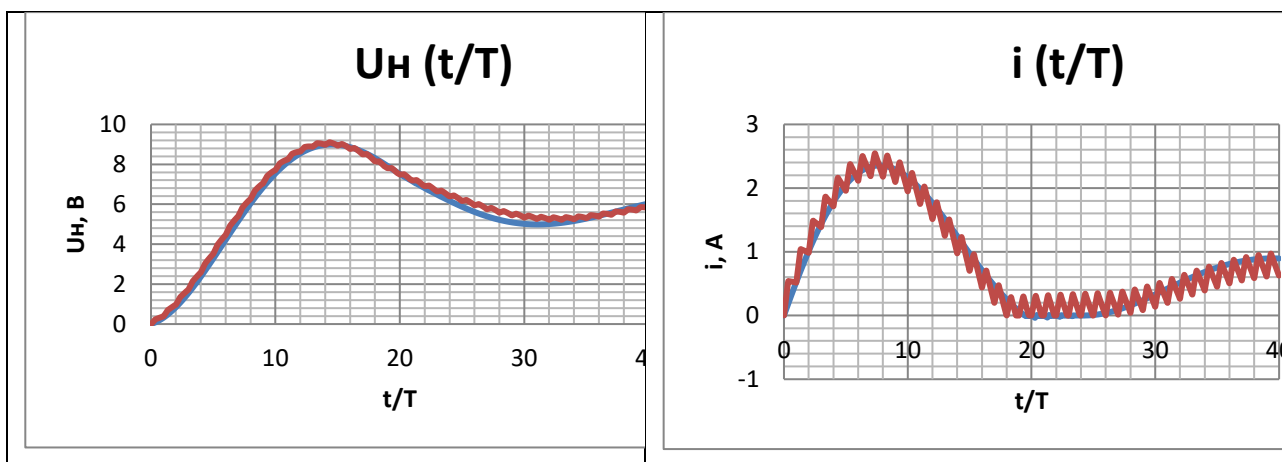


Рис. 4. Картины переходных процессов для напряжения нагрузки  $U_n$  и тока  $i$  в дросселе (вариант преобразователя из работы [24]).

Красный цвет - расчётная модель с разрывными особенностями,  
синий цвет - непрерывная модель.

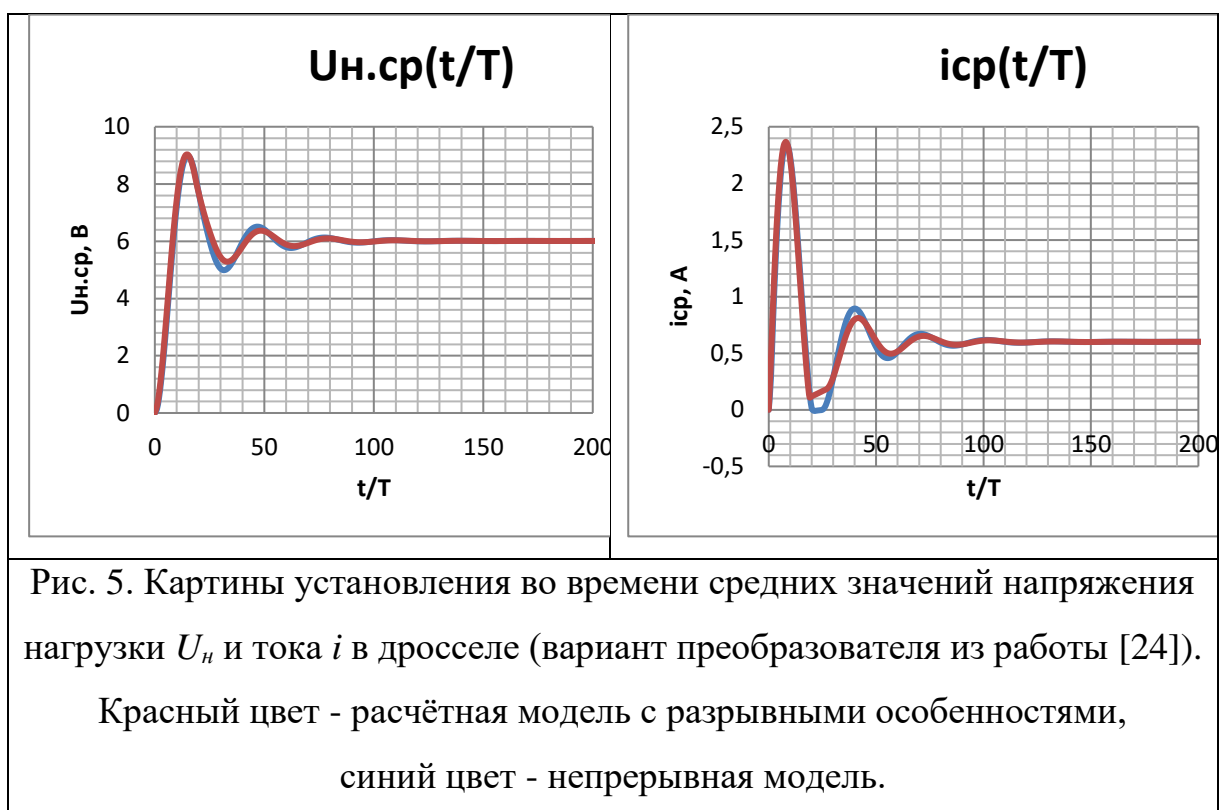


Рис. 5. Картины установления во времени средних значений напряжения нагрузки  $U_n$  и тока  $i$  в дросселе (вариант преобразователя из работы [24]).

Красный цвет - расчётная модель с разрывными особенностями, синий цвет - непрерывная модель.

На рис. 4 и 5 представлены полученные численным моделированием результаты, касающиеся протекания переходных процессов по напряжению нагрузки  $U_n$  и по току  $i$  в дросселе, а также выхода на установившийся режим. Красным цветом изображены кривые, соответствующие результатам, полученным на основе вычислительной модели преобразователя, учитывающей разрывные особенности в его функционировании, а синим цветом - результатам расчётов на основе непрерывной модели. Отмечаем хорошее согласование этих результатов между собой. Это относится и к пиковым значениям получаемых на основе этих моделей результатов (см. рис. 4) по параметрам  $U_n$  и  $i$ , а именно, (9 В и 2,55 А) в случае модели с разрывными особенностями и (8,52 В и 2,38 А) - в случае непрерывной модели. Соответствующие этим моделям графики по параметрам  $U_{n,ср}$  и  $i_{ср}$  (см. рис. 5), включая и пиковые значения, практически совпадают. Обе модели приводят к одному

и тому же времени перехода к установившемуся режиму, которое составляет порядка 100 тактовых периодов (в данном случае порядка 5 мс), и к одинаковым средним значениям (6 В и 0,6 А) параметров  $U_n$  и  $i$ .

В качестве выводов по выполненному исследованию отметим следующее. Представлен (основанный на применении неявной схемы Эйлера) подход к численному моделированию переходных процессов в работе импульсных преобразователей напряжения постоянного тока с учётом разрывных особенностей в формулировке дифференциальных уравнений, описывающих динамику подобных устройств. Численному анализу подвергнуты переходные процессы для двух (описанных в литературе) вариантов понижающих преобразователей напряжения постоянного тока. Достоверность результатов численного моделирования подтверждена практическим совпадением с имеющимися в литературе результатами компьютерного моделирования и физического эксперимента. Продемонстрированы возможности непрерывной версии разработанной вычислительной модели при решении задач динамики понижающих импульсных преобразователей напряжения постоянного тока.

### **Список источников**

1. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
2. Бирзникс Л.В. Импульсные преобразователи постоянного тока. – М.: Энергия, 1974. – 256 с.

3. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование: пер. с англ. - М.: МК-Пресс, 2007. – 288 с.
4. Белов Г.А. Динамика импульсных преобразователей. – Чебоксары: Изд-во Чувашского государственного университета, 2001. – 528 с.
5. Белов Г.А. Импульсные преобразователи с системами управления на серийных микросхемах – Чебоксары: Изд-во Чувашского государственного университета, 2015. – 330 с.
6. Белоус А.И., Солодуха В.А., Ефименко С.А., Пилипенко В.А. Основы силовой электроники. – М.: Техносфера, 2019. – 424 с.
7. Alisoy H., Yashar M., Chalishkan S., Damar M., Masoumisoureh M. Mathematical modeling of the response of a buck converter to disturbances // European Journal of Engineering and Applied Sciences, 2022, vol. 5 (2), pp. 106-111. DOI: [10.55581/ejeas.1212838](https://doi.org/10.55581/ejeas.1212838)
8. Viswanatha V., Venkata S.R.R. A complete mathematical modeling, simulation and computation implementation of boost converter via MATLAB/Simulink // International Journal of Pure and Applied Mathematics, 2017, vol. 114, no. 10, pp. 407-419.
9. Salih M.M., Al-Araji A.S., Jeiad H.A. Modeling and analysis of DC-DC buck converter for mobile applications // International Journal of Science and Research (IJSR), 2020, vol. 9, no. 4, pp. 1088-1093. DOI: [10.21275/SR20416134106](https://doi.org/10.21275/SR20416134106)
10. Naz F. Closed loop buck & boost converter mathematical modeling, analysis and simulation using MATLAB // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2021, vol. 10, no. 4, pp. 263-271. DOI: [10.35940/ijeat.D2525.0410421](https://doi.org/10.35940/ijeat.D2525.0410421)

11. Dash S.S., Nayak B. Control analysis and experimental verification of a practical dc-dc boost converter // Journal of Electrical Systemes and Information Technology, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 378-390. DOI: [10.1016/j.jesit.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jesit.2015.08.001)
12. Walczak M. Modified small-signal models of buck, boost and buck-boost DC-DC converters // Zeszyty Naukowe Wydzialu Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalinckiej, 2015, no. 8, pp. 39-52.
13. Kaur R., Kaur N. Mathematical modelling of buck converter // International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, 2014, vol. 2, no. 5, pp. 1226-1229.
14. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. (SimPowerSystems и Simulink). – М.: ДМК Пресс, 2007. - 288 с.
15. Фадин Д.А. Использование среды MATLAB-Simulink для реализации вычислительных алгоритмов в целочисленных микропроцессорных системах // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57021>
16. Абдали Лаит Мохаммед Абдали, Аль-Малики Муатаз Наджим Кассим, Кувшинов В.В., Кузнецов П.Н., Морозова Н.В. Математическое моделирование с использованием алгоритма контроля точки максимальной мощности для фотоэлектрической системы // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174619>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-20)
17. Гавва Л.М. Параметрический анализ в операционной среде MATLAB напряжённно-деформированного состояния конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов с учётом технологии изготовления // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80504>

18. Красинский А.Я., Ильина А.Н., Красинская Э.М., Рукавишникова А.С. Математическое и компьютерное моделирование продольной динамики планетохода с упругой подвеской // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84612>
19. Анисимова Т.В., Данилина А.Н. Инверторы с многозонной модуляцией // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29546>
20. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. – М.: Наука, 1979. – 208 с.
21. Сухомлинов Г.Л. Вычислительная модель для исследования вынужденных колебаний упругих систем при больших значениях сил трения // Известия вузов. Машиностроение. 2002. № 4. С. 7-14.
22. Сухомлинов Г.Л., Михайлова В.Л. Численное моделирование фрикционных автоколебаний релаксационного типа в следящем электроприводе // Известия вузов. Машиностроение. 2004. № 6. С. 20-28.
23. Коршунов А.И. Методика построения непрерывных моделей импульсных преобразователей напряжения постоянного тока // Компоненты и технологии. 2006. № 8. С. 1-15.
24. Ramana K.V., Majhi S., Gogoi A.K. Identification of DC-DC buck converter dynamics using relay feedback method with experimental validation // IET Circuits, Devices & Systemes, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 777-784. DOI: [10.1049/iet-cds.2017.0542](https://doi.org/10.1049/iet-cds.2017.0542)



## References

1. Chetti P. *Proektirovanie klyuchevykh istochnikov elektropitaniya* (Design of key power sources), Moscow, Energoatomizdat, 1990, 240 p.
2. Birznieks L.V. *Impul'snye preobrazovateli postoyannogo toka* (Pulse DC converters), Moscow, Energiya, 1974, 256 p.
3. Braun M. *Istochniki pitaniya. Raschet i konstruirovaniye* (Power sources. Calculation and design), Moscow, MK-Press, 2007, 288 p.
4. Belov G.A. *Dinamika impul'snykh preobrazovatelei* (Dynamics of pulse converters), Cheboksary, Izd-vo Chuvashskogo gosudarstvennogo universiteta, 2001, 528 p.
5. Belov G.A. *Impul'snye preobrazovateli s sistemami upravleniya na seriinykh mikroskhemakh* (Pulse converters with control systems on serial microcircuits), Cheboksary, Izd-vo Chuvashskogo gosudarstvennogo universiteta, 2015, 330 p.
6. Belous A.I., Solodukha V.A., Efimenko S.A., Pilipenko V.A. *Osnovy silovoi elektroniki* (Fundamentals of power electronics), Moscow, Tekhnosfera, 2019, 424 p.
7. Alisoy H., Yashar M., Chalishkan S., Damar M., Masoumisoureh M. Mathematical modeling of the response of a buck converter to disturbances, *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2022, vol. 5 (2), pp. 106-111. DOI: [10.55581/ejeas.1212838](https://doi.org/10.55581/ejeas.1212838)
8. Viswanatha V., Venkata S.R.R. A complete mathematical modeling, simulation and computation implementation of boost converter via MATLAB/Simulink, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2017, vol. 114, no. 10, pp. 407-419.

9. Salih M.M., Al-Araji A.S., Jeiad H.A. Modeling and analysis of DC-DC buck converter for mobile applications, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2020, vol. 9, no. 4, pp. 1088-1093. DOI: [10.21275/SR20416134106](https://doi.org/10.21275/SR20416134106)
10. Naz F. Closed loop buck & boost converter mathematical modeling, analysis and simulation using MATLAB, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 263-271. DOI: [10.35940/ijeat.D2525.0410421](https://doi.org/10.35940/ijeat.D2525.0410421)
11. Dash S.S., Nayak B. Control analysis and experimental verification of a practical dc-dc boost converter, *Journal of Electrical Systemes and Information Technology*. 2015, vol. 2, no. 3, pp. 378-390. DOI: [10.1016/j.jesit.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jesit.2015.08.001)
12. Walczak M. Modified small-signal models of buck, boost and buck-boost DC-DC converters, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej*, 2015, no. 8, pp. 39-52.
13. Kaur R., Kaur N. Mathematical modelling of buck converter, *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2014, vol. 2, no. 5, pp. 1226-1229.
14. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink* (Modeling electrical devices in MATLAB. SimPowerSystems and Simulink), Moscow, DMK Press, 2007, 288 p.
15. Fadin D.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 80. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57021>
16. Abdali Lait Mokhammed Abdali, Al'-Maliki Muataz Nadzhim Kassim, Kuvshinov V.V., Kuznetsov P.N., Morozova N.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174619>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-20)

17. Gavva L.M. *Trudy MAI*, 2017, no. 93. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80504>
18. Krasinskii A.Ya., Il'ina A.N., Krasinskaya E.M., Rukavishnikova A.S. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84612>
19. Anisimova T.V., Danilina A.N. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29546>
20. Rakitskii Yu.V., Ustinov S.M., Chernorutskii I.G. *Chislennyye metody resheniya zhestkikh sistem* (Numerical methods for solving rigid systems), Moscow, Nauka, 1979, 208 p.
21. Sukhomlinov G.L. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2002, no. 4, pp. 7-14.
22. Sukhomlinov G.L., Mikhailova V.L. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2004, no. 6, pp. 20-28.
23. Korshunov A.I. *Komponenty i tekhnologii*, 2006, no. 8, pp. 1-15.
24. Ramana K.V., Majhi S., Gogoi A.K. Identification of DC-DC buck converter dynamics using relay feedback method with experimental validation, *IET Circuits, Devices & Systemes*, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 777-784. DOI: [10.1049/iet-cds.2017.0542](https://doi.org/10.1049/iet-cds.2017.0542)

Статья поступила в редакцию 17.12.2023

Одобрена после рецензирования 25.12.2023

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 17.12.2023; approved after reviewing on 25.12.2023; accepted for publication on 27.02.2024