

Труды МАИ. 2025. № 141
Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.)

Научная статья

УДК 004.942

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184509>

EDN: <https://www.elibrary.ru/RLCUXT>

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СРЕДСТВАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЯЕМОГО ПИД-КОНТРОЛЛЕРОМ ПОНИЖАЮЩЕГО ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Дмитрий Юрьевич Тарасов¹, Георгий Львович Сухомлинов^{2✉}, Валерий
Вадимович Михайлов³**

^{1,2}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Российская Федерация

³Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова,
Королёв, Московская область, Российская Федерация

¹tarasovdu@bmstu.ru

²sukhomlinov@bmstu.ru ✉

³mo_techuniv@mosreg.ru

Аннотация. Рассматривается регулируемый посредством цифровой (пропорциональной, интегральной и дифференциальной) обратной связи понижающий импульсный преобразователь напряжения постоянного тока, решение задачи по идентификации значений параметров которого аппаратными средствами было представлено ранее в литературе. Показывается, как подобная задача по идентификации применительно к тому же преобразователю может быть решена средствами численного моделирования. При этом используются две

вычислительные модели. Одна из них, осуществляющая частотный анализ, предназначена для расчёта на устойчивость рассматриваемого регулируемого преобразователя. Другая модель, основанная на методе численного интегрирования, ориентирована на исследование переходного и установившегося режимов в работе того же преобразователя. С использованием отмеченных моделей устанавливаются значения параметров обратной связи, обеспечивающие хорошее согласование получаемых расчётных и имеющихся экспериментальных результатов по переходному режиму в работе данного преобразователя.

Ключевые слова: понижающий импульсный преобразователь напряжения постоянного тока, обратная связь, частотный анализ, неявная схема Эйлера численного интегрирования

Для цитирования: Тарасов Д.Ю., Сухомлинов Г.Л., Михайлов В.В. Идентификация средствами численного моделирования параметров обратной связи в системе управляемого ПИД-контроллером понижающего импульсного преобразователя напряжения постоянного тока // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184509>

Original article

IDENTIFICATION BY MEANS OF NUMERICAL SIMULATION OF FEEDBACK PARAMETERS IN A SYSTEM OF A DC-DC BUCK CONVERTER CONTROLLED BY A PID CONTROLLER

Dmitry Yu. Tarasov¹, Georgy L. Sukhomlinov^{2✉}, Valery V. Mikhailov³

^{1,2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

³Leonov Moscow Region University of Technology, Moscow region, Korolev, Russian Federation

¹tarasovdu@bmstu.ru

²sukhomlinov@bmstu.ru✉

³mo_techuniv@mosreg.ru

Abstract: In the introductory part of the article, it is noted that DC-DC buck converters are widely used as power sources in various technical devices designed to operate in conditions of low input voltage levels. The principle of operation of the DC-DC buck converter being considered, regulated by means of a digital PID controller, is described. It is indicated that currently computational studies in the development of such converters are carried out, as a rule, using such powerful software systems as MATLAB/Simulink. At the same time, there remains a demand for the creation of simpler computing tools that can be relied upon not only for specific calculations, but also to confirm the reliability of the results obtained on the basis of these software packages. It is indicated that the purpose of this article is to demonstrate the possibilities of using these calculation tools in solving problems related to the identification of parameters of the noted type of converter by taking into account reliable data on its dynamic characteristics.

The main content of the article is devoted to the description of two of the designated calculation tools used in computational research. The calculation scheme of a step-down pulse converter is presented here and the corresponding (based on an approximate "continuous" calculation model) dynamics problem is formulated in the form of a system of two first-order differential equations (with respect to the current i through the inductor and the voltage U_H of the load). It is assumed that the control system of the converter under discussion is based on the use of a digital PID controller in the feedback structure (which has the capabilities to implement proportional, integral and differential communication). An equation describing the functioning of the feedback link is presented, which includes three parameters in accordance with the three types of communication noted. Based on the obtained ratios, an equation is formulated that establishes the relationship between the control parameter at the input and output of the open loop of the control system under consideration. A reference is given to the algorithm developed and implemented in the form of a program for calculating the frequency characteristics of such an open loop. (Based on their analysis, a conclusion is made about the stability of the closed-loop control system). A system of linear differential equations describing the dynamics of the controlled (feedback) buck converter is also formulated. An algorithm for the numerical solution of this type of dynamics problem based on the use of an implicit

Euler scheme is presented. An example of the application of the described two computational models to the solution of the task of identifying the values of the feedback parameters of the converter accepted for consideration is demonstrated.

The final part of the article contains conclusions on the completed research. A brief description of the two proposed computational models is given here. It is also indicated that the reliability of the results obtained using these computational models is confirmed by a good agreement of these results with the experiment.

Keywords: DC-DC buck converter, feedback, frequency analysis, implicit Euler scheme of numerical integration

For citation: Tarasov D.Y., Sukhomlino G.L., Mikhailov V.V. Identification by means of numerical simulation of feedback parameters in a system of a DC-DC buck converter controlled by a PID controller. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184509>

Введение

Понижающие импульсные преобразователи напряжения постоянного тока, схема функционирования которых представлена на рис. 1, широко используются в качестве источников питания в различных технических устройствах, предназначенных для работы в условиях низких уровней входного напряжения [1-6]. В качестве примера отметим, что подобного типа преобразователи являются неотъемлемыми составляющими электронных устройств, используемых в системах управления авиационно-космических летательных аппаратов.

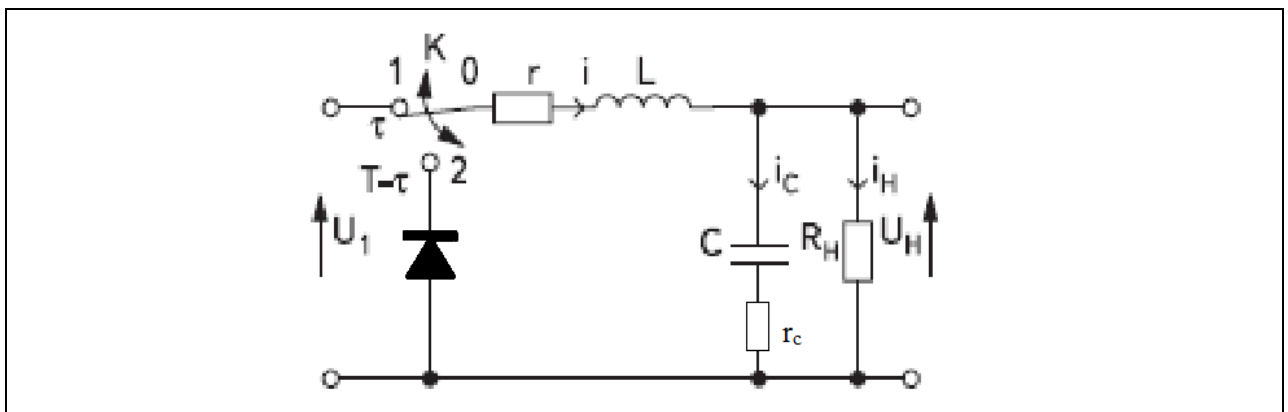


Рис. 1. Расчётная схема понижающего преобразователя.

В результате переключений, производящихся в таких преобразователях посредством широтно-импульсного модулятора [4,5] с заданной тактовой частотой f и периодом $T=1/f$, при условии, что на каждом таком периоде время, в течение которого ключ (см. рис. 1) находится в положении 1, составляет величину $\tau < T$, устанавливаемое на нагрузочном сопротивлении R_n напряжение U_n оказывается уменьшенным по сравнению с входным напряжением U_1 . Такое уменьшение происходит по мере уменьшения значения параметра $\gamma = \tau/T$.

Важным требованием, предъявляемым к подобного типа преобразователю, является его способность надёжно поддерживать требуемое для работы запитываемых от него устройств значение $U_n^{(0)}$ напряжения нагрузки. Отмеченная способность обеспечивается путём включения в схему функционирования такого преобразователя звена обратной связи. Принцип работы рассматриваемого далее регулируемого (с обратной связью) понижающего преобразователя сводится к следующему [5]. При обнаружении (путём осуществляемых замеров) малейшего отклонения (ΔU_n) напряжения нагрузки U_n от требуемого значения $U_n^{(0)}$ оценивается отвечающая этому отклонению величина $\Delta \gamma$, в соответствии с которой корректируется значение параметра γ (вырабатываемое широтно-импульсным модулятором) для установления требуемого значения $U_n^{(0)}$ напряжения нагрузки. Укажем, что реализацию отмеченного типа обратной связи во многих случаях эффективно осуществляют с использованием цифровых контроллеров.

В данной статье (как и ранее в статье [7]) мы будем исходить из предположения, что система регулирования обсуждаемого преобразователя основана на использовании в структуре обратной связи цифрового ПИД-контроллера (обладающего возможностями по реализации пропорциональной, интегральной и дифференциальной связи). Отметим, что в настоящее время расчётные исследования при разработке подобных преобразователей (как и других технических устройств) проводятся, как правило, с использованием таких мощных

коммерческих программных комплексов, как MATLAB/Simulink [8-18]. В то же время сохраняется востребованность и в создании более простых вычислительных инструментов, на которые можно опираться не только при проведении конкретных расчётов, но и для подтверждения достоверности получаемых на основе указанных программных комплексов результатов. В публикациях [7,19] для использования в качестве подобных расчётных инструментов предложены (основанные на неявной схеме Эйлера) вычислительные модели, предназначенные для исследования переходного и установившегося режимов в работе обсуждаемого преобразователя, а также (основанная на частотном анализе [20,21]) вычислительная модель, предназначенная для его расчёта на устойчивость. Цель настоящей статьи продемонстрировать возможности применения указанных вычислительных инструментов при решении задач, связанных с идентификацией параметров описанного типа преобразователя на основе достоверных данных по его динамическим характеристикам.

Укажем, что в работе [22] представлен пример решения подобной исследовательской задачи аппаратными средствами. Там же представлен обширный перечень работ аналогичного направления. В данной статье мы будем вопросы идентификации решать отмеченными выше средствами численного моделирования, используя в качестве объекта моделирования регулируемый преобразователь, принятый к рассмотрению в работе [22]. Отметим, что одну из задач по идентификации применительно к этому преобразователю пришлось решать в рамках моделирования, выполненного в работе [19], где было установлено, что заявленным в работе [22] динамическим характеристикам преобразователя соответствует значение индуктивности $L=560$ мкГн, а не 560 мГн, как указано в [22].

Укажем также, что формулировка задачи динамики регулируемого преобразователя, описанного в работе [22], несколько отличается от формулировки, принятой в [7] при построении отмеченных выше вычислительных моделей. А именно, время запаздывания в звене обратной связи в случае, рассматриваемом в [22], не учитывается ($\tau_{12} = 0$). Краткое описание модификации формулировки [7] применительно к этому случаю может быть представлено следующим образом.

Итак, используем широко применяемый в расчётной практике подход, основанный на принятии приближённой (так называемой «непрерывной» или «осреднённой» [23]) расчётной модели рассматриваемого преобразователя. Соответствующие уравнения динамики моделируемого отмеченным образом преобразователя, схема которого изображена на рисунке 1, могут быть представлены в виде (см., например, [7,10]):

$$\begin{aligned}\frac{dv_1}{dt} &= a_{11}v_1 + a_{12}v_2 + b_1U_1\gamma, \\ \frac{dv_2}{dt} &= a_{21}v_1 + a_{22}v_2 + b_2U_1\gamma,\end{aligned}\quad (1)$$

где

$$\begin{aligned}v_1 &= i, \quad v_2 = U_H, \\ a_{11} &= -r/L, \quad a_{12} = -1/L, \quad a_{21} = (LR_H - CR_H r_c r)/d, \\ a_{22} &= -(CR_H r_c + L)/d, \quad b_1 = 1/L, \quad b_2 = R_H r_c / g, \\ g &= L(R_H + r_c), \quad d = gC.\end{aligned}\quad (2)$$

Уравнения (1) можно рассматривать как устанавливающие связь между происходящими во времени изменениями параметров γ и U_H . В изображениях по Лапласу (см. [7]) связь между этими параметрами приводится к виду

$$\tilde{U}_H(p) = G_1(p)\tilde{\gamma}(p), \quad (3)$$

где передаточная функция $G_1(p)$ определяется по схеме

$$\begin{aligned}G_1(p) &= U_1(k_3 + k_4 p) / (p^2 + k_1 p + k_2), \\ k_1 &= r/L + (CR_H r_c + L)/d, \quad k_2 = (R_H + r)/d, \\ k_3 &= R_H/d, \quad k_4 = R_H r_c / g, \quad g = L(R_H + r_c), \quad d = gC.\end{aligned}\quad (4)$$

Основываясь на представленном выше описании схемы функционирования замкнутого контура рассматриваемой системы регулирования понижающего преобразователя, формулируем соотношения, устанавливающие связь между параметрами на «входе» и «выходе» соответствующего разомкнутого контура. Исходим из того, что, как это следует из соотношения (3), малому изменению $\Delta\tilde{\gamma}_{\text{ex}}(p)$ параметра $\tilde{\gamma}(p)$ на входе этого контура соответствует малое изменение $\Delta\tilde{U}_H(p)$ параметра $\tilde{U}_H(p)$. При этом имеет место связь

$$\Delta \tilde{U}_n(p) = G_1(p) \Delta \tilde{\gamma}_{ex}(p). \quad (5)$$

Полагаем, что звену обратной связи соответствует передаточная функция $G_2(p)$, которая на выходе рассматриваемого разомкнутого контура обеспечивает связь вида

$$\Delta \tilde{\gamma}_{вых}(p) = G_2(p) \Delta \tilde{U}_n(p). \quad (6)$$

Считаем, что функционирование звена обратной связи реализовано на основе ПИД-контроллера (как и в работе [7]), но с условием ($\tau_{12} = 0$) для времени запаздывания. В результате для функции $G_2(p)$ имеем выражение

$$G_2(p) = (H_p + H_I / p + pH_D), \quad (7)$$

где H_p, H_I, H_D - коэффициенты, соответствующие пропорциональной, интегральной и дифференциальной связи.

На основе зависимостей (5) и (6) устанавливаем (как и в [7]) связь между поступившим на вход разомкнутого контура рассматриваемой системы регулирования воздействием $\Delta \tilde{\gamma}_{ex}(p)$ и полученным на выходе результатом $\Delta \tilde{\gamma}_{вых}(p)$ в виде

$$\Delta \tilde{\gamma}_{вых}(p) = G_2(p) G_1(p) \Delta \tilde{\gamma}_{ex}(p). \quad (8)$$

Далее замечаем, что соотношения, входящие в формулировки расчётных моделей, представленных в работе [7], могут быть адаптированы применительно к преобразователю, рассматриваемому в работе [22], для которого характерна зависимость вида (7), если в этих соотношениях положить $\tau_{12} = 0$. При этом в разработанную программу расчёта частотных характеристик разомкнутого контура системы регулируемого преобразователя никаких дополнительных изменений вводить не требуется. Что касается дифференциальных уравнений, описывающих динамику рассматриваемого в работе [22] регулируемого (работающего по схеме замкнутого контура) преобразователя, то они приобретают вид

$$\begin{aligned}\frac{d^2 U_H}{dt^2} + k_1 \frac{dU_H}{dt} + k_2 U_H &= U_1 k_3 (\gamma_0 - \Delta\gamma) - U_1 k_4 \frac{d\Delta\gamma}{dt}, \\ \frac{d\Delta\gamma}{dt} &= H_D \frac{d^2 U_H}{dt^2} + H_P \frac{dU_H}{dt} + H_I (U_H - U_H^{(0)}),\end{aligned}\quad (9)$$

где γ_0 - начальное значение параметра γ .

Вводя обозначения

$$v_1 = U_H, \quad v_2 = \frac{dv_1}{dt}, \quad v_3 = \Delta\gamma, \quad (10)$$

с использованием уравнений (9) и равенств (10) приходим к формулировке рассматриваемой задачи динамики в виде трёх (а не четырёх, как в работе [7]) дифференциальных уравнений первого порядка вида

$$\begin{aligned}\frac{dv_1}{dt} &= v_2, \\ \frac{dv_2}{dt} + k_1 v_2 + k_2 v_1 + k_3 U_1 v_3 + k_4 U_1 \frac{dv_3}{dt} &= k_3 U_1 \gamma_0, \\ \frac{dv_3}{dt} - H_D \frac{dv_2}{dt} - H_P v_2 - H_I v_1 &= -H_I U_H^{(0)}.\end{aligned}\quad (11)$$

Численное решение системы дифференциальных уравнений (11) при заданных начальных условиях осуществляем, как и в работе [7], с использованием неявной (безусловно устойчивой) схемы Эйлера. Считая шаг Δt интегрирования по времени достаточно малым, в соответствии с указанной схемой представляем уравнения (11) на таком шаге в виде

$$\begin{aligned}\frac{v_1^1 - v_1^0}{\Delta t} &= v_2^1, \\ \frac{v_2^1 - v_2^0}{\Delta t} + k_1 v_2^1 + k_2 v_1^1 + k_3 U_1 v_3^1 + k_4 U_1 \frac{v_3^1 - v_3^0}{\Delta t} &= k_3 U_1 \gamma_0, \\ \frac{v_3^1 - v_3^0}{\Delta t} - H_D \frac{v_2^1 - v_2^0}{\Delta t} - H_P v_2^1 - H_I v_1^1 &= -H_I U_H^{(0)}.\end{aligned}\quad (12)$$

Здесь v_1^0, v_2^0, v_3^0 - значения искомых функций в начале текущего шага интегрирования (при $t = t_0$), а v_1^1, v_2^1, v_3^1 - их значения в конце данного шага (при $t = t_1$),

которые определяются на основе решения системы алгебраических уравнений (12) по методу Гаусса. При этом в завершение каждого шага найденные значения v_1^1, v_2^1, v_3^1 принимаются в качестве исходных данных v_1^0, v_2^0, v_3^0 , необходимых для выполнения расчётов на следующем шаге. Кроме того, на основе этих данных с использованием второго уравнения системы (1) определяется текущее значение силы тока в дросселе по схеме

$$i = (v_2^1 - a_{22}v_1^1 - k_4U_1(\gamma_0 - v_3^1)) / a_{21}. \quad (13)$$

В соответствии с представленным описанием осуществлена модификация разработанной в [7] программы, реализующей численное решение рассматриваемого типа задачи динамики, с введением изменений в блоке формирования матрицы и правой части системы алгебраических уравнений (согласно записи (12)).

С использованием модифицированных описанным образом вычислительных моделей проведём расчётные исследования, нацеленные на идентификацию значений параметров обратной связи H_p, H_I, H_D регулируемого преобразователя, исследованного аппаратными средствами в работе [22]. Исходим из того, что значения остальных параметров рассматриваемого преобразователя достоверно известны, а именно:

$$U_1 = 18 \text{ В}, T = 50 \text{ мкс}, L = 560 \text{ мкГн}, r = 0,12 \text{ Ом}, \\ R_n = 10 \text{ Ом}, C = 98 \text{ мкФ}, r_c = 0,365 \text{ Ом}, U_n^{(0)} = 12 \text{ В}.$$

Известно также, что настройка ПИД-контроллера осуществлена таким образом, чтобы запас по фазе в системе регулирования данного преобразователя составлял величину $\Delta\psi = 50$ градусов. Кроме того известна (полученная в результате эксперимента) характеризующая переходный процесс зависимость, отражающая изменение напряжения нагрузки U_n во времени (начиная от момента включения). Таким образом, решение обозначенной проблемы идентификации состоит в том, чтобы подобрать на основе расчётного анализа такие значения параметров H_p, H_I, H_D , которые бы удовлетворяли указанным требованиям по фазовому запасу и переходному процессу.

Остановимся сначала на результатах параметрических исследований, выполненных с применением программы, предназначенной для расчёта частотных характеристик обсуждаемого регулируемого преобразователя. Укажем, что отмеченные параметрические исследования были осуществлены с принятием в качестве начального приближения таких значений параметров H_P, H_I, H_D , которые соответствуют преобразователю, экспериментально исследованному в работе [13]. Данные, относящиеся к девяти из принятых к рассмотрению (в рамках проводимых параметрических исследований) вариантов значений H_P, H_I, H_D , представлены в таблице 1. В нижней строке этой таблицы приведены полученные в результате проведённых расчётов запасы по фазе, отвечающие каждому из этих вариантов. Частотные характеристики разомкнутого контура системы регулирования рассматриваемого преобразователя, соответствующие вариантам 3,5,9 этой таблицы, представлены на рис. 2-3.

Таблица 1. Принятые к рассмотрению девять вариантов значений параметров H_P, H_I, H_D исследуемого регулируемого преобразователя

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H_I,$ $c^{-1} \cdot B^{-1}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$H_P,$ B^{-1}	0,08	0,12	0,15	0,06	0,06	0,08	0,1	0,08	0,08
$H_D,$ $мкс \cdot B^{-1}$	7	7	7	5	3,9	2	5	5	4,8
$\Delta\psi,$ градус	60	53	50	56	50	38	48	51	50

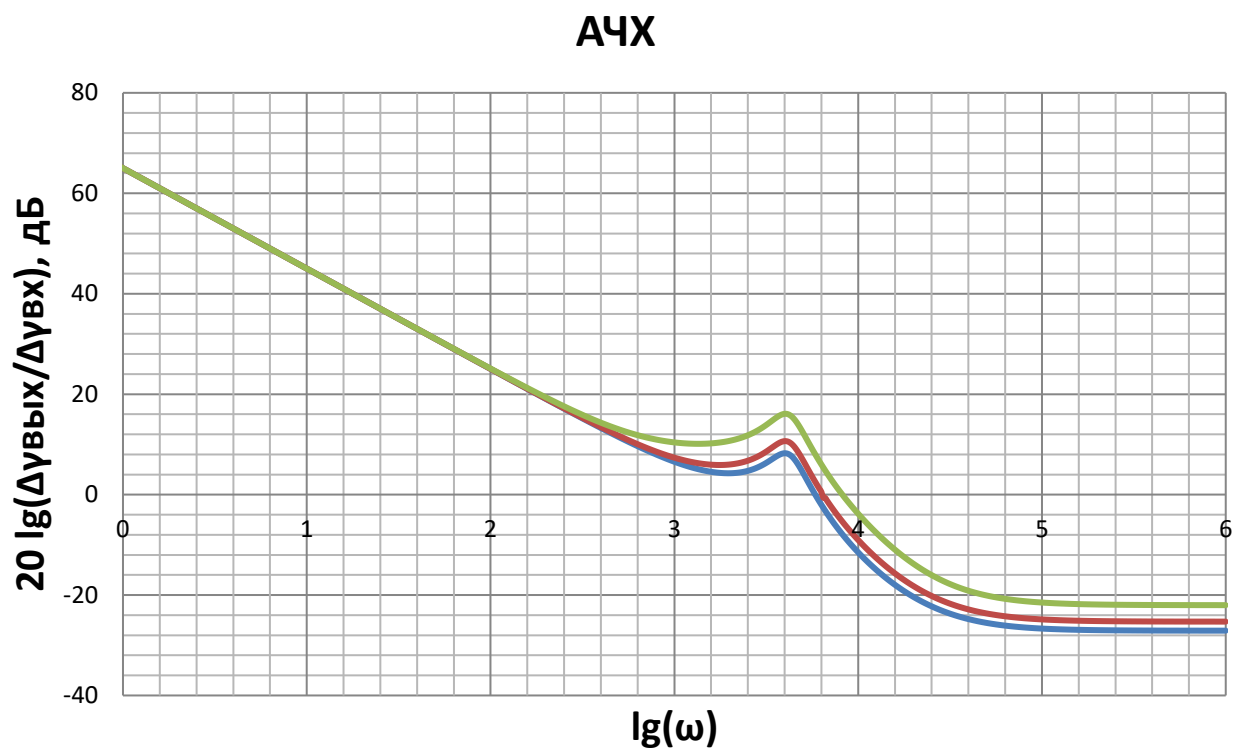


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики. Цвета: синий, красный, зелёный - варианты 5, 9, 3 рассматриваемого преобразователя

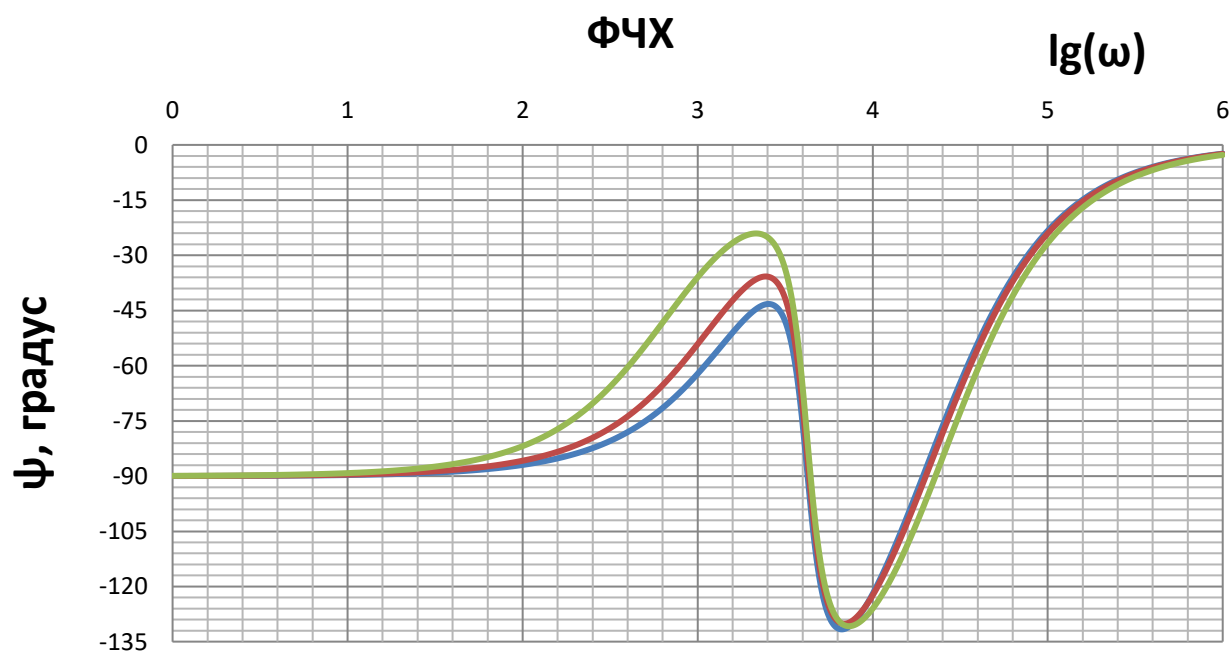
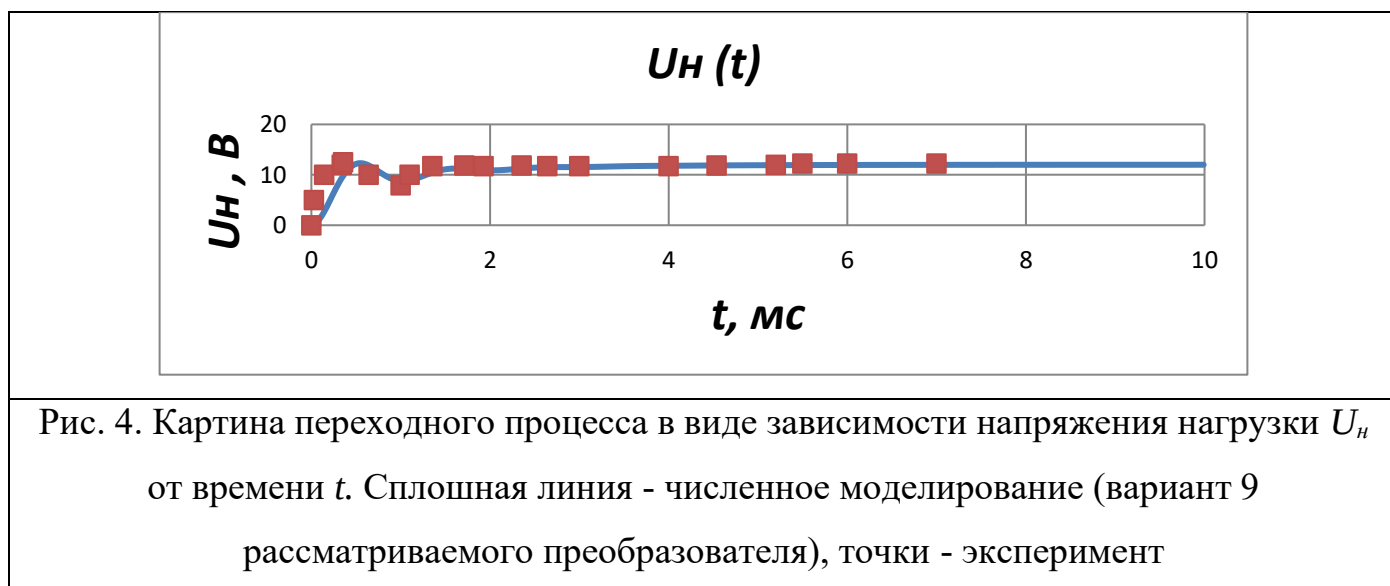


Рис. 3. Фазочастотные характеристики. Цвета: синий, красный, зелёный - варианты 5, 9, 3 рассматриваемого преобразователя

Как видно из полученных результатов, требуемому значению запаса по фазе ($\Delta\psi = 50$ градусов) отвечают варианты 3,5,9 значений параметров H_P, H_I, H_D обратной связи рассматриваемого преобразователя. Остаётся установить, какой из этих трёх вариантов отвечает экспериментально полученной для рассматриваемого преобразователя зависимости, отражающей изменение напряжения нагрузки U_n во времени (начиная от момента включения при $t=0$). Соответствующие расчёты (с принятием $\gamma_0=1$ и нулевых начальных условий) для каждого из отмеченных вариантов рассматриваемого преобразователя проведены с использованием программы, реализующей численное решение описанной выше задачи динамики.

Результаты выполненных расчётов, относящихся к отмеченным вариантам 9 и 3,5, приведены на рис. 4 и 5 в виде графиков, описывающих зависимость напряжения нагрузки U_n от времени t . Здесь же (точками) представлена соответствующая рассматриваемому преобразователю зависимость $U_n(t)$, экспериментально полученная в работе [22]. Как видно, значения параметров H_P, H_I, H_D обратной связи рассматриваемого преобразователя, отвечающие варианту с номером 9, приводят к хорошему (в отличие от вариантов 3 и 5) согласованию получаемых расчётных результатов с экспериментом. Таким образом, решением поставленной задачи по идентификации для принятого к рассмотрению регулируемого преобразователя являются значения параметров обратной связи, соответствующие обозначенному варианту с номером 9.



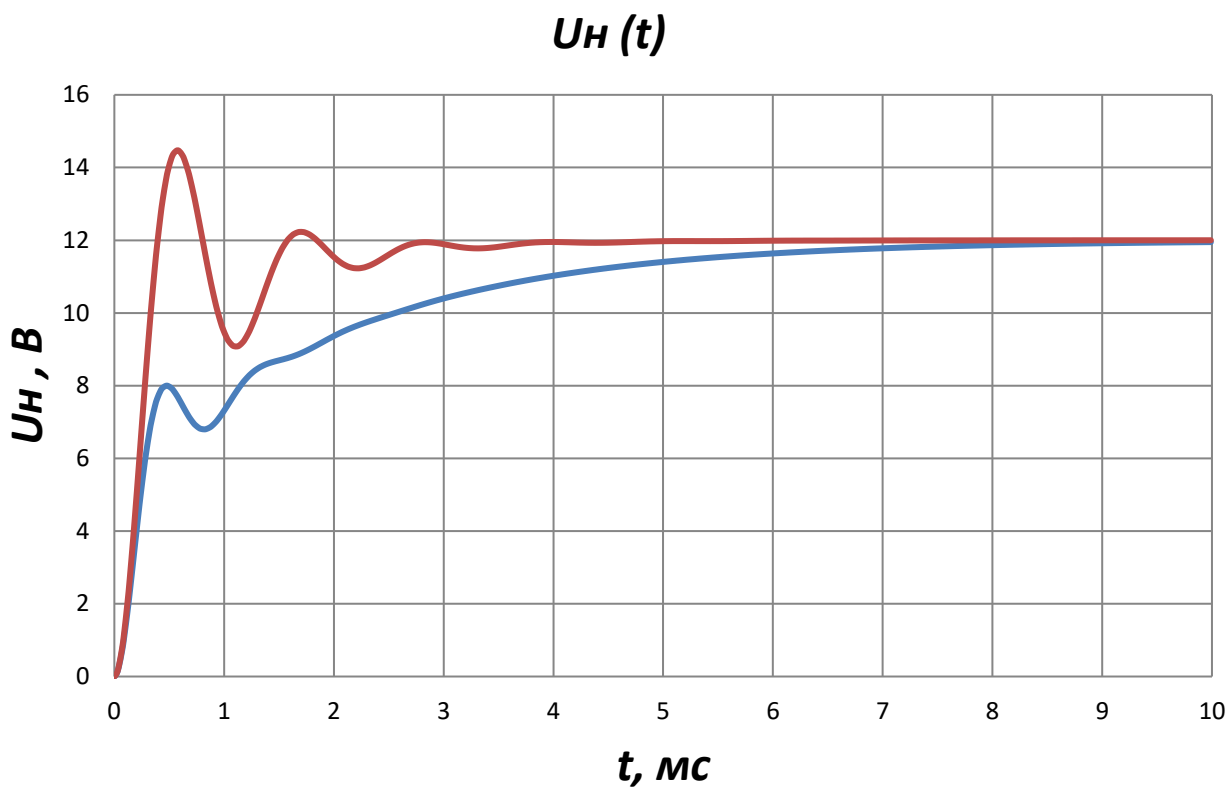


Рис. 5. Картины переходных процессов для вариантов 3 (синий цвет) и 5 (красный цвет) рассматриваемого преобразователя

В качестве выводов по выполненным в данной работе исследованиям отметим следующее.

В статье указано, что понижающие импульсные преобразователи напряжения постоянного тока являются неотъемлемыми составляющими всевозможных электронных устройств, в том числе используемых в системах управления авиационно-космических летательных аппаратов. Указано также на представленные в литературе исследования, связанные с решением аппаратными средствами задач по идентификации параметров, характеризующих динамику подобных преобразователей. Обозначена цель статьи, состоящая в том, чтобы продемонстрировать возможности применения к решению такого рода задач средств численного моделирования. В качестве объекта моделирования принят регулируемый посредством цифровой обратной (пропорциональной, интегральной и дифференциальной) связи понижающий преобразователь, экспериментально

исследованный в литературе. Расчётные исследования выполнены с применением двух вычислительных моделей. Одна из моделей основана на частотном анализе и предназначена для расчёта на устойчивость рассматриваемого регулируемого преобразователя. Другая модель основана на применении неявной схемы Эйлера численного интегрирования и ориентирована на исследование переходного и установившегося режимов в работе того же преобразователя.

Заключение

Достоверность полученных с применением указанных моделей результатов решения поставленной задачи по идентификации значений параметров обратной связи принятого к рассмотрению преобразователя подтверждена хорошим согласованием этих результатов с экспериментом.

Список источников

1. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания: пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 240 с.
2. Бирзниекус Л.В. Импульсные преобразователи постоянного тока. — М.: Энергия, 1974. — 256 с.
3. Браун М. Источники питания. Расчёт и конструирование: пер. с англ. - Киев: МК-Пресс, 2007. — 288 с.
4. Белов Г.А. Динамика импульсных преобразователей. — Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2001. — 528 с.
5. Белов Г.А. Импульсные преобразователи с системами управления на серийных микросхемах. — Чебоксары: Изд-во Чувашского 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. Тарасов Д.Ю., Сухомлинов Г.Л., Михайлов В.В. Численное моделирование регулируемых посредством цифровой обратной связи понижающих импульсных преобразователей напряжения постоянного тока // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179695>

8. 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), P. 106-111. DOI: [10.55581/ejeas.1212838](https://doi.org/10.55581/ejeas.1212838)
9. 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 Mathematics. 2017. Vol. 114, No. 10. P. 407-419.
10. 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. P. 1088-1093. DOI: [10.21275/SR20416134106](https://doi.org/10.21275/SR20416134106)
11. 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. P. 263-271. DOI: [10.35940/ijeat.D2525.0410421](https://doi.org/10.35940/ijeat.D2525.0410421)
12. 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. P. 378-390. DOI: [10.1016/j.jesit.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jesit.2015.08.001)
13. Kajiwara K., Tajima H., Maruta H., Kurokawa F., Colak I. Dynamic characteristics of integral gain changeable digital control DC-DC converter for suppression of output capacitance // International Journal of Renewable Energy Research. 2016. Vol. 6, No. 1. P. 237-244.
14. 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. P. 1226-1229.
15. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. (SimPowerSystems и Simulink). - М.: ДМК Пресс, 2007. - 288 с.
16. 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>

17. 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)
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. 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>
20. Основы автоматического управления / Под ред. В.С. Пугачёва. – М.: Наука, 1974. - 720 с.
21. Теория автоматического управления: в 2-х ч. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
22. 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 & Systems. 2018. Vol. 12, No. 6. P. 777-784.
23. Коршунов А.И. Методика построения непрерывных моделей импульсных преобразователей напряжения постоянного тока // Компоненты и технологии. 2006. № 8. С. 1-15.

References

1. Chetti P. *Proektirovanie klyuchevykh istochnikov elektropitaniya* (Design of key power sources). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990. 240 p.
2. Birznieks L.V. *Impul'snye preobrazovateli postoyannogo toka* (Pulse DC converters). Moscow: Energiya Publ., 1974. 256 p.

3. Braun M. *Istochniki pitaniya. Raschet i konstruirovaniye* (Power sources. Calculation and design). Kiev: MK-Press Publ., 2007. 288 p.
4. Belov G.A. *Dinamika impul'snykh preobrazovatelei* (Dynamics of pulse converters) Cheboksary: Izd-vo Chuvashskogo universiteta Publ., 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 universiteta Publ., 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 Publ., 2019. 424 p.
7. Tarasov D.Yu., Sukhomlinov G.L., Mikhailov V.V. Numerical modeling of step-down pulse dc-dc voltage converters regulated by digital feedback. *Trudy MAI*. 2024. № 135. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179695>
8. 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), P. 106-111. DOI: [10.55581/ejeas.1212838](https://doi.org/10.55581/ejeas.1212838)
9. 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 Mathematics*. 2017. Vol. 114, No. 10. P. 407-419.
10. 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. P. 1088-1093. DOI: [10.21275/SR20416134106](https://doi.org/10.21275/SR20416134106)
11. 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. P. 263-271. DOI: [10.35940/ijeat.D2525.0410421](https://doi.org/10.35940/ijeat.D2525.0410421)

12. 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. P. 378-390. DOI: [10.1016/j.jesit.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jesit.2015.08.001)
13. Kajiwara K., Tajima H., Maruta H., Kurokawa F., Colak I. Dynamic characteristics of integral gain changeable digital control DC-DC converter for suppression of output capacitance. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2016. Vol. 6, No. 1. P. 237-244.
14. 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. P. 1226-1229.
15. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink*. (Modeling electrical devices in MATLAB. SimPowerSystems and Simulink). Moscow: DMK Press Publ., 2007. 288 p.
16. Fadin D.A. Realizing computational algorithms on integer microprocessor systems using MATLAB Simulink. *Trudy MAI*. 2015. No. 80. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57021>
17. Abdali Lait Mokhammed Abdali, Al'-Maliki Muataz Nadzhim Kassim, Kuvshinov V.V., Kuznetsov P.N., Morozova N.V. Mathematical technique modeling using the algorithm for control of the maximum power point for a photoelectric system. *Trudy MAI*. 2023. No. 130. (In Russ.). 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)
18. Krasinskii A.Ya., Il'ina A.N., Krasinskaya E.M., Rukavishnikova A.S. Mathematical and computer modeling of rover with elastic suspension longitudinal dynamics. *Trudy MAI*. 2017. No. 95. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84612>
19. 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. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178478>

20. Pugachev V.S. *Osnovy avtomaticheskogo upravleniya* (Fundamentals of automatic control), Moscow, Nauka Publ., 1974. 720 p.
21. Voronov A.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: v 2-kh ch. Ch. 1. Teoriya lineinykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of automatic control: in 2 parts. Part 1. Theory of linear automatic control systems), Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986, 367 p.
22. 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 & Systems*. 2018. Vol. 12, No. 6. P. 777-784.
23. Korshunov A.I. The method of constructing continuous models of pulse DC voltage converters. *Komponenty i tekhnologii*. 2006. No. 8. P. 1-15. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 04.12.2024

Одобрена после рецензирования 16.12.2024

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 04.12.2024; approved after reviewing on 16.12.2024; accepted for publication on 25.04.2025