

УДК 621.314.1+681.586.7

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-36-45>

EDN TIPRXB



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Проектирование DC/DC-преобразователя, построенного по Zeta-топологии на базе драйвера TPS40200

В.К. Битюков ¹,
А.И. Лавренов ^{1, @},
Д.А. Малицкий ²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² ООО «СПУТНИКС», Москва, 121205 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: lavrenov@mirea.ru

Резюме

Цели. Целью работы является исследование типовых характеристик разработанного Zeta-преобразователя на основе драйвера TPS40200 (Texas Instruments, США) при различных входных напряжениях и нагрузках и сравнение экспериментальных характеристик Zeta-преобразователя с аналогичными, полученными при помощи SPICE¹-моделирования в системе автоматизированного проектирования (САПР) *Multisim*, а также с помощью предельной непрерывной математической модели.

Методы. Использована предельная непрерывная математическая модель Zeta-преобразователя и САПР *Multisim*. Принципиальная электрическая схема преобразователя разработана по методике расчета обвязки драйвера TPS40200, представленной в его технической документации. С использованием САПР *Altium Designer* произведена разводка печатной платы.

Результаты. Спроектирован и создан экспериментальный стенд DC/DC-преобразователя, построенного по Zeta-топологии со связанными дросселями на базе драйвера TPS40200. Результаты исследования показали высокую корреляцию как его нагрузочных характеристик, так и его постоянных и переменных составляющих токов, протекающих через обмотки дросселей, и напряжений на конденсаторах от входного напряжения при двух сопротивлениях нагрузки 50 и 100 Ом, полученных различными методами: экспериментальным, расчетным и моделированием.

Выводы. Предельная непрерывная математическая модель преобразователя и метод расчета, основанный на ней, являются базой для проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по топологии Zeta. Экспериментально доказана достоверность математической модели, а также метода проектирования. Предложенный метод проектирования позволяет учесть магнитную связь и активное сопротивление обмоток дросселей. Учет магнитной связи позволяет уменьшить номиналы дросселей до двух раз при неизменных пульсациях либо уменьшить пульсации до двух раз при неизменных номиналах дросселей.

Ключевые слова: DC/DC-преобразователь, топология Zeta, преобразователь, математическая модель, метод проектирования, TPS40200, Altium Designer, Multisim, печатная плата

¹ SPICE (англ. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – программа-симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. [SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) is an open source simulator of general-purpose electronic circuits.]

• Поступила: 05.06.2024 • Доработана: 16.08.2024 • Принята к опубликованию: 06.02.2025

Для цитирования: Битюков В.К., Лавренов А.И., Малицкий Д.А. Проектирование DC/DC-преобразователя, построенного по Zeta-топологии на базе драйвера TPS40200. *Russian Technological Journal*. 2025;13(2):36–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-36-45>, <https://elibrary.ru/TIPRXB>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Zeta topology DC/DC converter design based on TPS40200 driver

Vladimir K. Bityukov ¹,
Aleksey I. Lavrenov ^{1, @},
Daniil A. Malitskiy ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Sputniks, Moscow, 121205 Russia

@ Corresponding author, e-mail: lavrenov@mirea.ru

Abstract

Objectives. The study set out to investigate typical characteristics of a Zeta converter developed by the authors based on the TPS40200 driver under various input voltages and loads and compare the experimental characteristics of the Zeta converter with those obtained through SPICE¹ simulation in the *Multisim* computer-aided design (CAD) system, as well as with the results derived from a continuous-time mathematical model.

Methods. A continuous-time mathematical model of the Zeta converter and the *Multisim* CAD system were used. The schematic diagram of the converter was developed according to the TPS40200 driver circuit design methodology presented in its datasheet. The printed circuit board layout was created using the *Altium Designer* CAD system.

Results. An experimental test bench of the Zeta topology DC/DC converter was designed and built using coupled chokes based on the TPS40200 driver. The results of the study showed a high correlation of both its load characteristics and its DC and AC components of currents flowing through the choke windings and capacitor voltages from the input voltage at two load resistances of 50 and 100 Ohm obtained by experimental, computational, and modeling methods.

Conclusions. The continuous-time mathematical model of the converter, along with the calculation method based on it, forms a foundation for the design of DC/DC converters using the Zeta topology. The experiment confirms the validity of both the mathematical model and the calculation method. The proposed design methods takes the magnetic coupling and the active resistance of inductors into account. The magnetic coupling permits a two-fold reduction of inductor values while maintaining the same ripple or a reduction in the ripple by up to half with unchanged inductor values.

Keywords: DC/DC converter, Zeta topology, converter, mathematical model, design method, TPS40200, Altium Designer, Multisim, printed circuit board

¹ SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) is an open source simulator of general-purpose electronic circuits.

• Submitted: 05.06.2024 • Revised: 16.08.2024 • Accepted: 06.02.2025

For citation: Bityukov V.K., Lavrenov A.I., Malitskiy D.A. Zeta topology DC/DC converter design based on TPS40200 driver. *Russian Technological Journal*. 2025;13(2):36–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-2-36-45>, <https://elibrary.ru/TIPRXB>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной тенденцией развития современных автономных радиоустройств является уменьшение массогабаритных параметров и улучшение тактико-технических характеристик используемых в них преобразователей электроэнергии [1–3]. Традиционно для электропитания подобных устройств используются дроссельные DC/DC-преобразователи различных топологий [4–6]. В топологиях, где используются два дросселя для накопления и передачи энергии, уже долгое время принято использовать связанные дроссели, что позволяет уменьшить их массогабаритные параметры, а также улучшить основные характеристики стабилизатора [7, 8]. Примеры современных устройств, построенных на основе связанных дросселей, приведены в [9, 10]. Основой проектирования таких преобразователей часто являются их математические модели [11–15]. Экспериментальное исследование преобразователя, построенного с использованием метода расчета, предложенного в [16], ранее не проводилось, а проверка достоверности этого метода выполнена сравнением расчетных характеристик с результатами моделирования. Поэтому было принято решение об экспериментальном исследовании DC/DC-преобразователя, построенного по Zeta-топологии со связанными дросселями.

1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ДРАЙВЕРА TPS40200

В качестве драйвера для построения Zeta-преобразователя выбрана микросхема TPS40200 (Texas Instruments, США) по ряду причин. Во-первых, данный драйвер может обеспечить коэффициент полезного действия до 95% при различных токах нагрузки и в широком диапазоне входных и выходных напряжений¹. Во-вторых, эта микросхема

достаточно простая, и весь необходимый функционал настраивается с помощью внешней обвязки, что позволяет использовать этот драйвер для управления Zeta-преобразователем, хотя подобный функционал производителем не заявлен. В-третьих, значимыми факторами выбора именно этого драйвера были его цена и доступность.

Принципиальная электрическая схема DC/DC-преобразователя, построенного на драйвере TPS40200, состоит из двух функциональных частей, рассчитываемых отдельно друг от друга (рис. 1). Первая часть, отвечающая за логику устройства, – это драйвер TPS40200 и все прилегающие к нему элементы. Вторая часть – силовая часть преобразователя, построенного по топологии Zeta, отвечающая за преобразование постоянного тока. Номиналы элементов Zeta-топологии были рассчитаны с помощью метода проектирования [16], основанного на предельной непрерывной математической модели преобразователя.

С помощью частотно-задающей цепи R1C1 на первом контакте RC драйвера TPS40200 формируется пилообразный сигнал необходимой частоты. Частота коммутации силового ключа VT1 выбрана равной 500 кГц, но из-за отклонений параметров элементов электронной компонентной базы в пределах технологических допусков реальная частота коммутации может варьироваться.

Часть схемы, отвечающая за пороговое значение входного тока Zeta-преобразователя, состоит из токоопределяющего резистора R7 и сглаживающего фильтра R6C6, необходимого для снижения влияния высокочастотной составляющей, возникающей при переключении силового ключа VT1. C2 – запускающий конденсатор, определяющий время запуска 9 мс. C3C4R2 – частотно-компенсирующая цепочка, частота среза которой примерно в 6–10 раз меньше частоты коммутации.

На принципиальной электрической схеме рассмотрены выводы PLS-40, обозначенные TP и P, для контроля токов и напряжений, соответственно.

¹ TPS40200 Datasheet. TPS40200 Wide Input Range Non-Synchronous Voltage Mode Controller datasheet (Rev. G). Texas Instruments. SLUS659G–FEBRUARY 2006–REVISED NOVEMBER 2014.

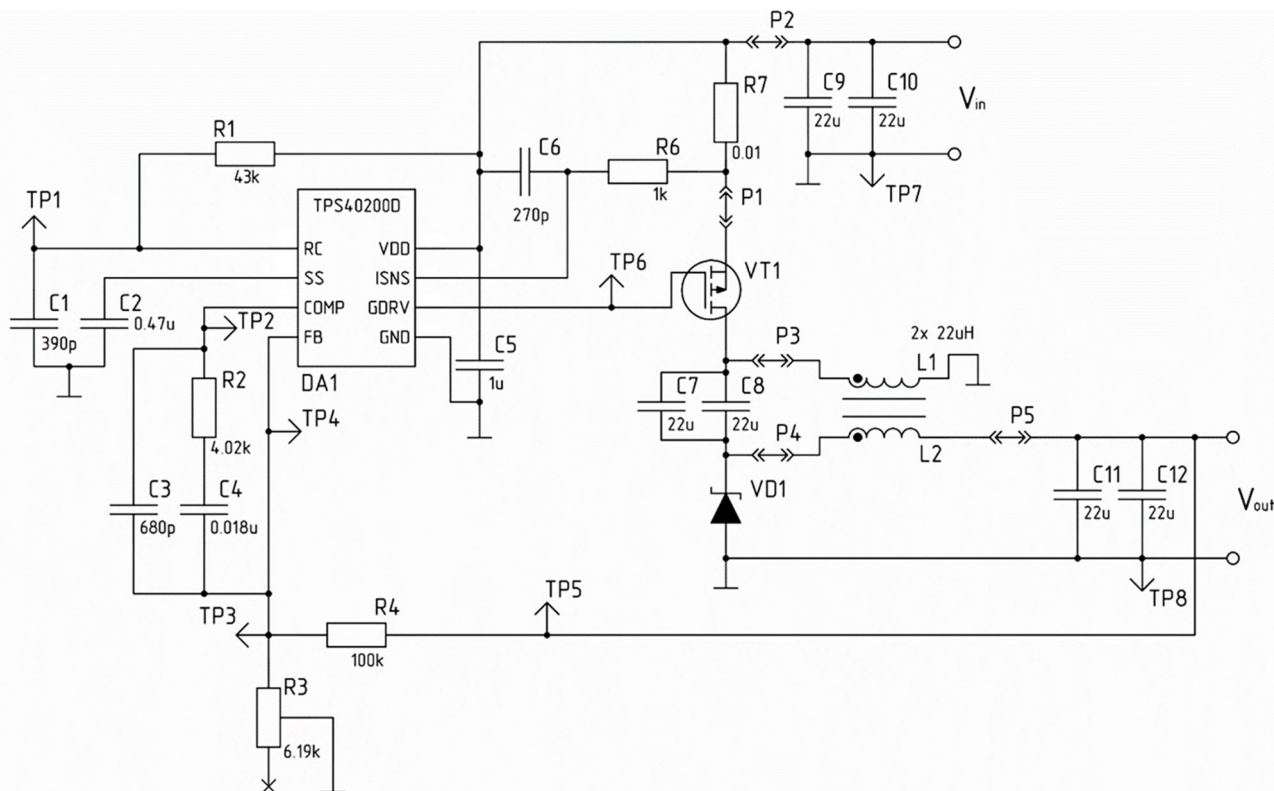


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема DC/DC-преобразователя понижающе-повышающего типа, построенного по топологии Zeta. Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81²

2. ТРАССИРОВКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ЗЕТА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Трассировка печатной платы (ПП) производилась в системе автоматизированного проектирования (САПР) *Altium Designer*³ с учетом требований простоты пайки и удобства измерений с помощью мультиметра или осциллографа (рис. 2 и 3).

Транзистор VT1 выбран р-канальный MOSFET WMO25P06T1 (Wayon Electronics Co., Ltd., Китай) с максимальной рассеиваемой мощностью до 2.5 Вт и динамическими характеристиками, позволяющими работать с частотой переключения до 1 МГц⁴. В качестве драйвера транзистора использована микросхема TPS40200 с большим входным напряжением питания до 52 В, изменяемой частотой переключения до 500 кГц и формирующая ток затвора до 300 мА, что обеспечивает время нарастания напряжения на затворе (длительность фронта) транзистора равное 0.025–0.040 мкс.

Погонная индуктивность по усредненной ширине (2 мм) дорожки от стока транзистора до положительного полюса выхода составляет 0.3 нГн/мм, длина дорожки ~60 мм, что эквивалентно индуктивности 20 нГн.

Межслойная емкость составляет примерно 60 пФ/см². Учитывая номиналы дискретных элементов, влияние паразитных составляющих на параметры устройства минимальны. Большое влияние оказывает существенная толщина диэлектрика, т.к. связь сигнальных линий верхнего слоя с нижним слоем «земли» слабая, что может привести к существенным перекрестным помехам, в частности, в цепи обратной связи.

Рабочая частота преобразователя составляет около 500 кГц, что эквивалентно длине волны 600 м. Это существенно больше размеров платы и длин проводников.

Общий вид разработанной платы с компонентами показан на рис. 4.

² ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. *Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах*. М.: Стандартинформ; 2008. [GOST 2.710-81. Interstate Standard. Unified system for design documentation. *Alpha-numerical designations in electrical diagrams*. Moscow: Standartinform; 2008 (in Russ.).]

³ <https://www.altium.com/altium-designer>. Дата обращения 24.05.2024. / Accessed May 24, 2024.

⁴ WMO25P06T1 Datasheet. 60V P-Channel Enhancement Mode Power MOSFET. Rev. 3.0, 2020. P. 6.

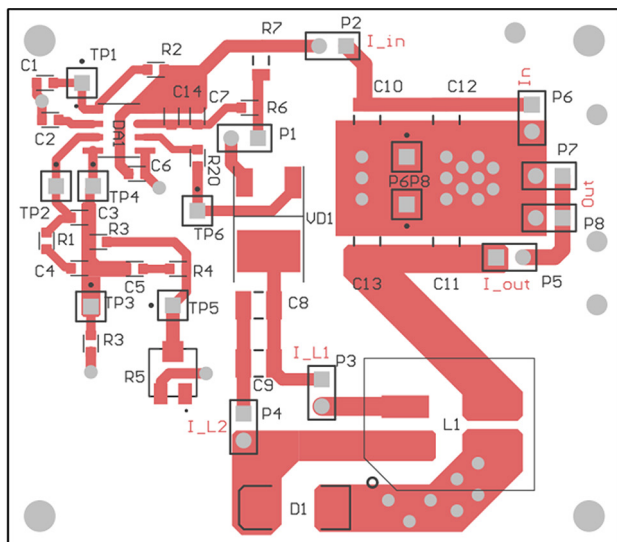


Рис. 2. Верхний слой ПП

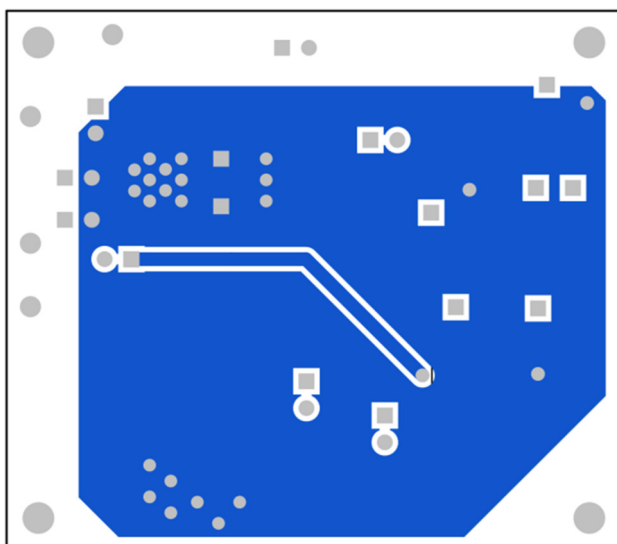


Рис. 3. Нижний слой ПП

В качестве материала подложки платы использован FR4 Tg135 (производитель печатной платы Резонит, Россия) с относительной диэлектрической проницаемостью 4.3 и толщиной 1.93 мм. Толщина металлизации равна 0.035 мм. Тип платы: двухсторонняя. Размеры платы: 58 × 51 мм.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕТА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ДРАЙВЕРА TPS40200

Исследование проводилось на кафедре радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА. Экспериментальный стенд, представленный

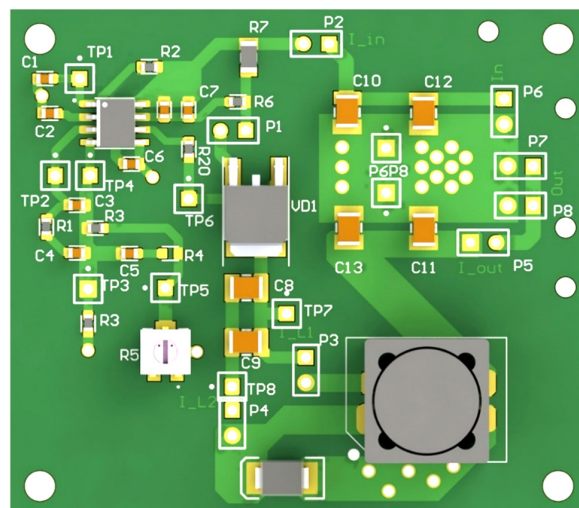


Рис. 4. Общий вид разработанной платы с компонентами

на рис. 5, состоит из Zeta-преобразователя, персонального компьютера, лабораторного источника питания, осциллографа, мультиметра, датчика тока и комплекта проб/проводов для подключения ПП. Для исследования использовалось приборно-аппаратное обеспечение компании Rohde & Schwarz (Германия)⁵, а именно: источник питания NGE100, осциллограф RTB2002 и универсальный мультиметр HMC8012.

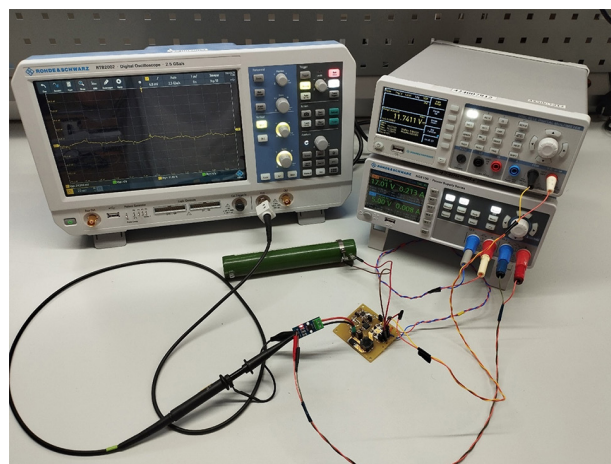


Рис. 5. Стенд для экспериментального исследования

Назначение стенда – экспериментальное исследование типовых характеристик DC/DC-преобразователя, с которыми можно сравнить аналогичные характеристики, но полученные методом проектирования, основанным на предельной непрерывной математической модели преобразователя, и методом моделирования с помощью САПР Multisim⁶.

⁵ <https://www.rohde-schwarz.com/>. Дата обращения 11.07.2024. / Accessed July 11, 2024.

⁶ <https://www.ni.com/ru-ru/shop/product/multisim.html>. Дата обращения 19.02.2024. / Accessed February 19, 2024.

К типовым характеристикам преобразователей традиционно относят нагрузочную характеристику (НХ), представляющую собой зависимость его выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ от тока нагрузки $I_{\text{Н}}$ при постоянном входном напряжении $U_{\text{ВХ}}$, т.е. $U_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{Н}})$ при $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$, а также зависимости постоянных и переменных составляющих токов i_{L1} , i_{L2} и напряжений $u_{C7, C8}$, $u_{C11, C12}$ от входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ при различных сопротивлениях нагрузки.

На рис. 6–8 представлены НХ преобразователя, полученные в экспериментальном исследовании при входном напряжении, равном 6.5, 12.0 и 17.5 В.

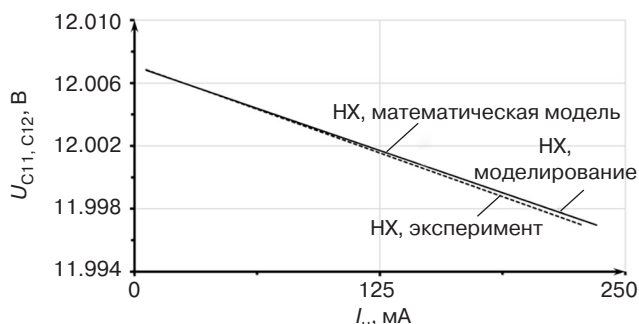


Рис. 6. Нагрузочная характеристика при входном напряжении 6.5 В

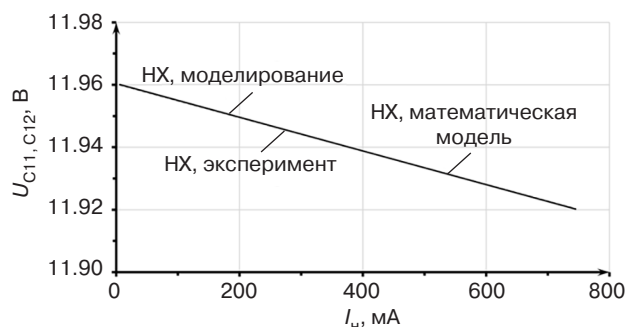


Рис. 7. Нагрузочная характеристика при входном напряжении 12.0 В

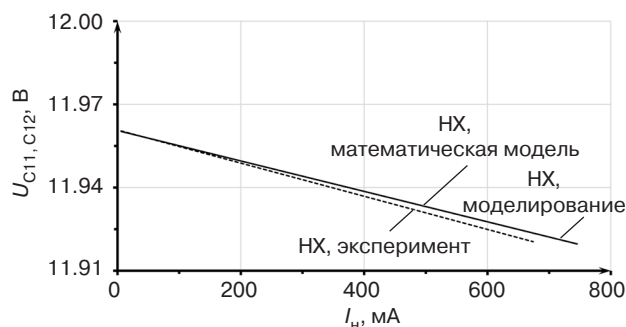


Рис. 8. Нагрузочная характеристика при входном напряжении 17.5 В

Постоянный ток заряда выходного конденсатора пренебрежимо мал по сравнению с током нагрузки. Поэтому можно считать, что ток второго дросселя равен току нагрузки $I_{L2} = I_{\text{Н}}$. Отличие экспериментального значения тока нагрузки $I_{\text{Н}}$ (рис. 6–8)

от расчетного значения не превышает 10% при входном напряжении 17.5 В. Стоит отметить, что при входном напряжении 6.5 В максимальное их различие составляет 3%, а при 12.0 В – 4%.

На рис. 9–16 представлены результаты исследований зависимостей постоянных и переменных составляющих токов i_{L1} , i_{L2} и напряжений $u_{C7, C8}$, $u_{C11, C12}$ от входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ при двух сопротивлениях нагрузки 50 и 100 Ом.

Графики зависимостей постоянных токов, протекающих через обмотки дросселей L1 и L2, от входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ (рис. 9) и напряжений на конденсаторах C7, C8 и C11, C12 от входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ (рис. 10) при сопротивлении нагрузки 50 Ом показывают хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений. Различие постоянных составляющих тока I_{L1} в среднем составило 13%, различие тока I_{L2} – 15%, а различие напряжения $U_{C11, C12}$ – 0.27%. Аналогично для размахов пульсаций соответствующих токов и напряжений получены значения различий: Δi_{L1} – 5%, Δi_{L2} – 21%, $\Delta u_{C11, C12}$ – 15%.

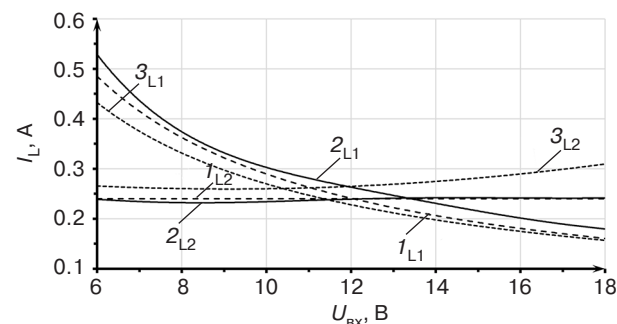


Рис. 9. Зависимости постоянных токов, протекающих через обмотки дросселей L1 и L2, от входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ при сопротивлении нагрузки 50 Ом: 1 – расчет, 2 – моделирование, 3 – эксперимент

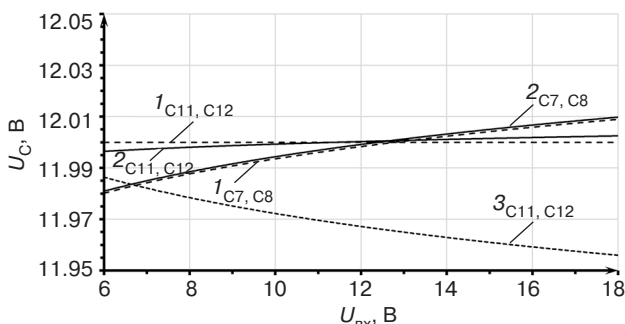


Рис. 10. Зависимости напряжений на конденсаторах C7, C8 и C11, C12 от входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ при сопротивлении нагрузки 50 Ом: 1 – расчет, 2 – моделирование, 3 – эксперимент

Графики зависимостей размахов пульсаций токов Δi_{L1} и Δi_{L2} , протекающих через обмотки дросселей L1 и L2, от входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ (рис. 11) и размахов пульсаций напряжений $\Delta u_{C7, C8}$ и $\Delta u_{C11, C12}$ (рис. 12) на конденсаторах C7, C8 и C11, C12

от входного напряжения U_{BX} при сопротивлении нагрузки 50 Ом показывают хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений.

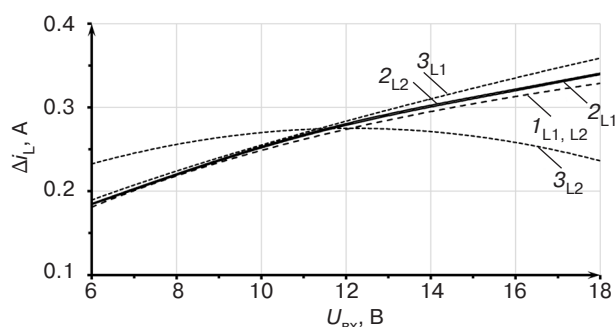


Рис. 11. Зависимости размахов пульсаций токов, протекающих через обмотки дросселей L1 и L2 от входного напряжения U_{BX} при сопротивлении нагрузки 50 Ом: 1 – расчет, 2 – моделирование, 3 – эксперимент

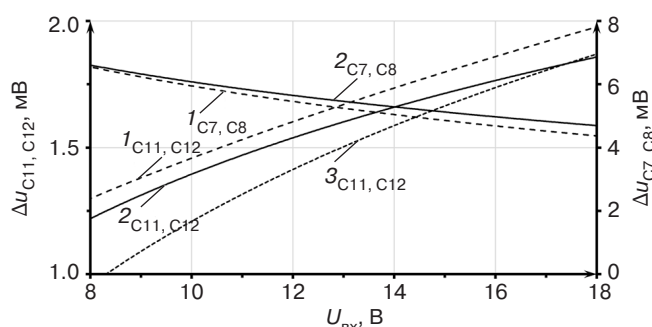


Рис. 12. Зависимости размахов пульсаций напряжений на конденсаторах C7, C8 и C11, C12 от входного напряжения U_{BX} при сопротивлении нагрузки 50 Ом: 1 – расчет, 2 – моделирование, 3 – эксперимент

Для сопротивления нагрузки $R_H = 100$ Ом получены аналогичные зависимости постоянных и переменных составляющих токов i_{L1} , i_{L2} (рис. 13) и напряжений $u_{C7, C8}$, $u_{C11, C12}$ (рис. 14) от входного напряжения U_{BX} . Различие постоянных составляющих тока I_{L1} в среднем составило 16%, различие I_{L2} – 9.0%, а различие $U_{C11, C12}$ – 0.10%. Для размахов пульсаций соответствующих токов и напряжений получены различия: Δi_{L1} – 13%, Δi_{L2} – 30%, $\Delta u_{C11, C12}$ – 38%.

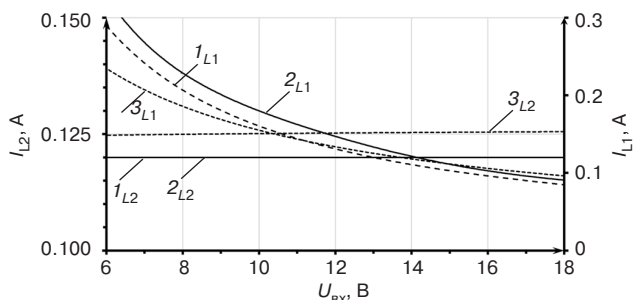


Рис. 13. Зависимости токов, протекающих через обмотки дросселей L1 и L2, от входного напряжения U_{BX} при сопротивлении нагрузки 100 Ом: 1 – расчет, 2 – моделирование, 3 – эксперимент

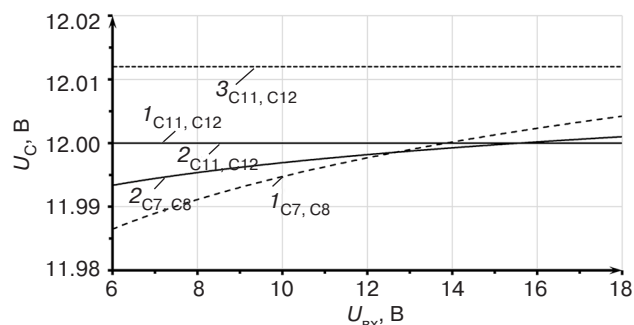


Рис. 14. Зависимость напряжений на конденсаторах C7, C8 и C11, C12 от входного напряжения U_{BX} при сопротивлении нагрузки 100 Ом: 1 – расчет, 2 – моделирование, 3 – эксперимент

Графики зависимостей размахов пульсаций токов Δi_{L1} и Δi_{L2} , протекающих через обмотки дросселей L1 и L2, от входного напряжения U_{BX} (рис. 15) и размахов пульсаций напряжений $\Delta u_{C7, C8}$ и $\Delta u_{C11, C12}$ (рис. 16) на конденсаторах C7, C8 и C11, C12 от входного напряжения U_{BX} при сопротивлении нагрузки 100 Ом показывают хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений.

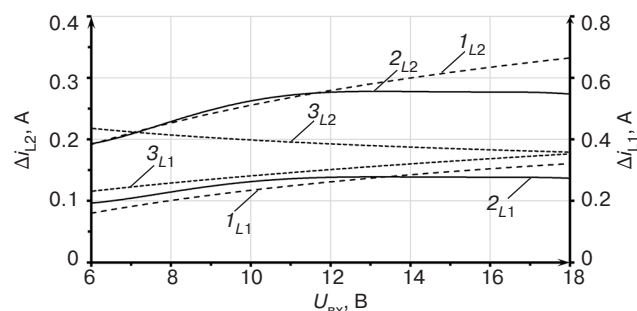


Рис. 15. Зависимость размахов пульсаций токов, протекающих через обмотки дросселей L1 и L2, от входного напряжения U_{BX} при сопротивлении нагрузки 100 Ом: 1 – расчет, 2 – моделирование, 3 – эксперимент

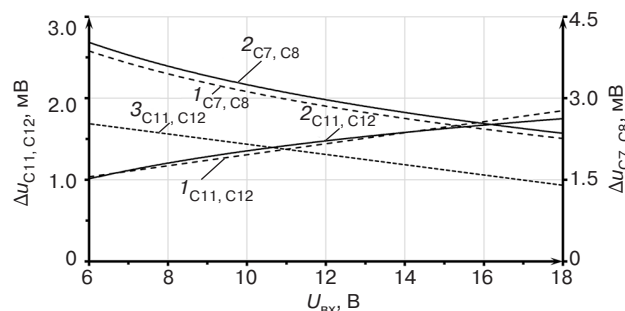


Рис. 16. Зависимость размахов пульсаций напряжений на конденсаторах C7, C8 и C11, C12 от входного напряжения U_{BX} при сопротивлении нагрузки 100 Ом: 1 – расчет, 2 – моделирование, 3 – эксперимент

Результаты исследования Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями показали высокую корреляцию как его НХ, так и зависимостей постоянных и переменных составляющих токов i_{L1} , i_{L2} , протекающих через обмотки дросселей L1 и L2, и напряжений u_{C7} , u_{C8} и u_{C11} , u_{C12} на конденсаторах C7, C8 и C11, C12 от входного напряжения $U_{вх}$ при двух сопротивлениях нагрузки 50 и 100 Ом, полученных различными методами: экспериментальным, расчетным и моделированием. При этом наблюдается практически полное совпадение расчетных значений и значений, полученных при помощи SPICE⁷-моделирования. Приведенные в работе различия экспериментальных характеристик и характеристик, полученных расчетным путем и моделированием, можно считать несущественными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектирован и создан экспериментальный стенд DC/DC-преобразователя, построенного по Zeta-топологии со связанными дросселями на базе драйвера TPS40200. Проведено экспериментальное исследование типовых зависимостей преобразователя при различных значениях входного напряжения и сопротивлениях нагрузки. Выполнено сравнение экспериментальных зависимостей с аналогичными характеристиками, полученными при моделировании с помощью САПР *Multisim* и расчетным методом, базирующемся на предельной непрерывной математической модели преобразователя. Сравнение данных, полученных этими тремя методами, показало их высокую корреляцию.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротков С.М., Лукин А.В. Источники питания для светодиодного освещения. *Практическая силовая электроника*. 2012;2(46):3–9. <https://www.elibrary.ru/papuhr>
2. Образцов А., Образцов С. Схемотехника DC/DC-преобразователей. *Современная электроника*. 2005;3:36–43.
3. Бодин О.Н., Безбородова О.Е., Митрошин А.Н., Чувькин Б.В., Мартынов Д.В., Едемский М.В. Интеллектуальная телемедицинская информационная система. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2024;27(2):103–110. <https://doi.org/10.18127/j15604136-202402-14>
4. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. *Схемотехника электропреобразовательных устройств*. Вологда: Инфра-Инженерия; 2023. 384 с. ISBN 978-5-9729-1439-5. <https://www.elibrary.ru/pqyagy>
5. Мананникова Н.Г., Шевцов Д.А. Новая структура двухтранзисторного силового каскада для однотактного прямо-обратноходового преобразователя электроэнергии. *Практическая силовая электроника*. 2023;1(89):17–20. <https://www.elibrary.ru/cuolqz>
6. Анисимова Т.В., Данилина А.Н., Крючков В.В. Повышающий преобразователь постоянного напряжения с плавающим конденсатором. *Практическая силовая электроника*. 2021;1(81):28–33. <https://www.elibrary.ru/ijaakd>
7. Минибаев Л.М. Использование техники нулевых пульсаций при проектировании источников питания. В сб.: *Проблемы и тенденции научных преобразований в условиях трансформации общества: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции*. Уфа: Аэтерна; 2020. С. 23–26. <https://www.elibrary.ru/pazzxq>
8. Zhu F., Li Q. Coupled Inductors with an Adaptive Coupling Coefficient for Multiphase Voltage Regulators. *IEEE Trans. Power Electron.* 2023;38(1):739–749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3203855>, <https://www.elibrary.ru/hizbts>
9. Zhang Ch., Yuan X., Wang J., et al. Si/WBG Hybrid Half-Bridge Converter Using Coupled Inductors for Power Quality Improvement and Control Simplification. *IEEE Trans. Power Electron.* 2024;39(3):3339–3352. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3342133>, <https://www.elibrary.ru/kbwvtg>
10. Tseng K.Ch., Huang G.Yu., Hsiung H.Yu. An isolated high step-down DC–DC converter with dual coupled inductors for ultracapacitor charger applications. *Int. J. Circuit Theor. Appl.* 2024;52(7):3341–3356. <https://doi.org/10.1002/cta.3905>, <https://www.elibrary.ru/bfcarn>
11. Битюков В.К., Лавренов А.И., Петров Д.Р. Математическая модель Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями (часть 2). *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2023;195(4):48–52. <https://elibrary.ru/mnusik>
12. Битюков В.К., Лавренов А.И., Петров Д.Р. Пульсации токов и напряжений Zeta преобразователя с индуктивно связанными дросселями (часть 2). *Проектирование и технология электронных средств*. 2023;4:27–31. <https://www.elibrary.ru/dspqqt>

⁷ SPICE (англ. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – программа-симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом. [SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) is an open source simulator of general-purpose electronic circuits.]

13. Коршунов А.И. Предельная непрерывная модель системы с периодическим высокочастотным изменением структуры. *Силовая электроника*. 2021;5(92):48–51. <https://www.elibrary.ru/sxwxqb>
14. Белов Г.А. Структурные динамические модели импульсных преобразователей постоянного напряжения в ППТ. *Практическая силовая электроника*. 2019;1(73):2–8. <https://www.elibrary.ru/jvniqr>
15. Амелина М.А., Амелин С.А. Непрерывные модели составных преобразователей постоянного напряжения. В сб.: *Энергетика, информатика, инновации – 2021: Сборник трудов XI Международной научно-технической конференции*. Т. 1. Смоленск: Универсум; 2021. С. 323–325. <https://www.elibrary.ru/klxdeg>
16. Битюков В.К., Лавренов А.И. Метод проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по Zeta-топологии. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):59–67. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2025-13-1-59-67>

REFERENCES

1. Korotkov S.M., Lukin A.V. Power sources for LED lighting. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2012;2(46):3–9 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/papuhr>
2. Obratsov A., Obratsov S. Circuit design of DC/DC converters. *Sovremennaya elektronika = Modern Electronics*. 2005;3:36–43 (in Russ.).
3. Bodin O.N., Bezborodova O.E., Mitroshin A.N., Chuvykin B.V., Martynov D.V., Edemskii M.V. Intelligent telemedicine information system. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*. 2024;27(2):103–110 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j15604136-202402-14>
4. Bitukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Skhemotekhnika elektropreobrazovatel'nykh ustroystv (Circuitry of Electrical Converter Devices)*. Vologda: Infra-Inzheneriya; 2023. 384 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9729-1439-5. <https://www.elibrary.ru/pqyagy>
5. Manannikova N.G., Shevtsov D.A. New Topology for the two-transistor power stage for a single-ended power converter. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2023;1(89):17–20 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/cuolqz>
6. Anisimova T.V., Danilina A.N., Kryuchkov V.V. DC Boost Converter with Flying Capacitor. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2021;1(81):28–33 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/jjaakd>
7. Minibaev L.M. Using zero ripple techniques in power supply designing. In: *Problems and Trends of Scientific Transformations in the Conditions of Society Transformation: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ufa: Aeterna; 2020. P. 23–26 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/pazzxq>
8. Zhu F., Li Q. Coupled Inductors with an Adaptive Coupling Coefficient for Multiphase Voltage Regulators. *IEEE Trans. Power Electron.* 2023;38(1):739–749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3203855>, <https://www.elibrary.ru/hizbts>
9. Zhang Ch., Yuan X., Wang J., et al. Si/WBG Hybrid Half-Bridge Converter Using Coupled Inductors for Power Quality Improvement and Control Simplification. *IEEE Trans. Power Electron.* 2024;39(3):3339–3352. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3342133>, <https://www.elibrary.ru/kbwvtg>
10. Tseng K.Ch., Huang G.Yu., Hsiung H.Yu. An isolated high step-down DC–DC converter with dual coupled inductors for ultracapacitor charger applications. *Int. J. Circuit Theor. Appl.* 2024;52(7):3341–3356. <https://doi.org/10.1002/cta.3905>, <https://www.elibrary.ru/bfcarn>
11. Bitukov V.K., Lavrenov A.I., Petrov D.R. Mathematical model of a ZETA-converter with inductively coupled chokes (Part 2). *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM = Elektromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2023;195(4):48–52 (in Russ.). <https://elibrary.ru/mnusik>
12. Bitukov V.K., Lavrenov A.I., Petrov D.R. Current and voltage pulsations of Zeta converter with inductively coupled inductors (Part 2). *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*. 2023;4:27–31 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/dspqrt>
13. Korshunov A.I. Limiting continuous model of a system with periodic high-frequency structure variation. *Silovaya elektronika = Power Electronics*. 2021;5(92):48–51 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/sxwxqb>
14. Belov G.A. Structural dynamic models of pulsed DC-DC switched mode converters in discontinuous current mode. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2019;1(73):2–8 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/jvniqr>
15. Amelina M.A., Amelin S.A. Continuous Models of Composite DC-DC Converters. In: *Power Engineering, Computer Sciences, and Innovations – 2021: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference, Smolensk*. Smolensk: Universum; 2021. V. 1. P. 323–325 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/klxdeg>
16. Bitukov V.K., Lavrenov A.I. Method for designing DC/DC converters based on Zeta topology. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):59–67 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2025-13-1-59-67>

Об авторах

Битюков Владимир Ксенофонович, д.т.н., профессор, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bitukov@mirea.ru. Scopus Author ID 6603797260, ResearcherID Y-8325-2018, SPIN-код РИНЦ 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

Лавренов Алексей Игоревич, аспирант, ассистент, кафедра радиоволновых процессов и технологий, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lavrenov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 6048-5027, <https://orcid.org/0000-0001-5722-541X>

Малицкий Даниил Александрович, инженер-схемотехник, ООО «СПУТНИКС» (121205, Россия, Москва, Технопарк «Сколково», Большой бульвар, д. 42, стр. 1, оф. 358, 359). E-mail: malickij@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4912-3018, <https://orcid.org/0000-0003-4558-9085>

About the authors

Vladimir K. Bityukov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Wave Processes and Technology, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y-8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, RSCI SPIN-code 3834-5360, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

Aleksey I. Lavrenov, Postgraduate Student, Assistant, Department of Radio Wave Processes and Technology, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lavrenov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 6048-5027, <https://orcid.org/0000-0001-5722-541X>

Daniil A. Malitskiy, Circuit Engineer, SPUTNIX (Office 358, 359, 42/1, Bol'shoi bul'var, Skolkovo Technopark, Moscow, 121205 Russia). E-mail: malickij@mirea.ru. RSCI SPIN-code 4912-3018, <https://orcid.org/0000-0003-4558-9085>