

УДК 621.314.1+681.586.7

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-59-67>

EDN APNAQO



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метод проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по Zeta-топологии

В.К. Битюков,
А.И. Лавренов[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Цели работы – разработка нового метода проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по топологии Zeta с возможным учетом магнитной связи дросселей, проведение расчетов по предложенной методике номиналов дросселей и конденсаторов Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями и проверка достоверности предельной непрерывной математической модели и метода проектирования, основанного на ней, с помощью SPICE-моделирования в системе автоматизированного проектирования *Multisim*.

Методы. Поставленные задачи решены при помощи аналитического анализа предельной непрерывной математической модели. Предложенным методом выполнен расчет номиналов связанных дросселей и конденсаторов преобразователя.

Результаты. С помощью системы автоматизированного проектирования *Multisim* проведено моделирование Zeta-преобразователя со связанными дросселями, в ходе которого получены нагрузочные и передаточные характеристики преобразователя, показывающие зависимости токов, протекающих в связанных дросселях, и напряжений на конденсаторах от входного напряжения, а также зависимость выходного напряжения от тока нагрузки. Показано, что представленный метод проектирования достоверен и полностью соответствует результатам моделирования. Установлена корреляция передаточных и нагрузочных характеристик токов и напряжений, полученных моделированием и расчетным путем. Отличия рассчитанных с помощью предельной непрерывной математической модели значений от результатов моделирования в системе автоматизированного проектирования *Multisim* сопоставимы с погрешностью измерений.

Выводы. Предложенный метод проектирования позволяет рассчитать номиналы элементов Zeta-топологии как с учетом индуктивной связи дросселей, так и без него. Кроме того, с помощью данного метода возможно рассчитать постоянные значения и пульсации токов дросселей и напряжений на конденсаторах. Приведенный в статье метод проектирования DC/DC-преобразователей можно использовать как для предварительного оценочного расчета, так и для более детального расчета с анализом работы устройства при различных входных напряжениях и сопротивлениях нагрузки.

Ключевые слова: DC/DC-преобразователь, понижающе-повышающий преобразователь, топология Zeta, предельная непрерывная математическая модель, метод проектирования, моделирование

• Поступила: 24.04.2024 • Доработана: 28.08.2024 • Принята к опубликованию: 03.12.2024

Для цитирования: 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/10.32362/2500-316X-2025-13-1-59-67>, <https://elibrary.ru/APNAQO>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Method for designing DC/DC converters based on Zeta topology

Vladimir K. Bitukov,
Aleksey I. Lavrenov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The work set out to develop a new design method for DC/DC converters based on the Zeta topology to calculate the ratings of inductors and capacitors of the Zeta converter with magnetically coupled inductors and verify the accuracy of the ultimate continuous mathematical model and design method based on it using SPICE simulation in the *Multisim* computer-aided design (CAD) system.

Methods. The proposed method analyzes an ultimate continuous mathematical model to calculate the ratings of coupled inductors and capacitors of the converter.

Results. The simulation of the Zeta converter with coupled inductors was carried out using the *Multisim* CAD system, during which the load and transfer characteristics of the converter were obtained. These characteristics show the dependencies of the currents flowing through the coupled inductors and voltages across the capacitors on the input voltage, as well as the dependence of the output voltage on the load current. The presented design method is shown to be accurate and in full agreement with the simulation results. A correlation between the transfer and load characteristics of currents and voltages obtained by simulation and calculation is established. The differences between the values calculated using the ultimate continuous mathematical model and the results of simulation in the *Multisim* CAD system are comparable to measurement errors.

Conclusions. The proposed design method is used calculate element ratings for the Zeta topology both with and without taking the inductive coupling into account. The method can also be used to calculate the steady-state values and ripple currents of the inductors and voltages across the capacitors. The design method for DC/DC converters presented in the paper can be used for both preliminary evaluation calculations and more detailed calculations, including analysis of the device operation under various input voltages and load resistances.

Keywords: DC/DC converter, buck-boost converter, Zeta topology, ultimate continuous mathematical model, design method, simulation

• Submitted: 24.04.2024 • Revised: 28.08.2024 • Accepted: 03.12.2024

For citation: Bitukov V.K., Lavrenov A.I. Method for designing DC/DC converters based on Zeta topology. *Russian Technological Journal*. 2025;13(1):59–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-1-59-67>, <https://elibrary.ru/APNAQO>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

DC/DC-преобразователи различных топологий [1–3] применяются в космической [4], авиационной [5], медицинской [6] технике и большом количестве мобильных устройств [7, 8], что иллюстрирует практическую значимость настоящего исследования. Потребность в новых методах проектирования DC/DC-преобразователей определяется общей тенденцией к их миниатюризации и переходу к автономному исполнению радиоэлектронных средств. Основная сложность при проектировании DC/DC-преобразователей для подобных устройств связана с использованием низковольтных напряжений и относительно малых токов потребления. При токах менее 0.5 А коэффициент полезного действия DC/DC-преобразователя начинает резко уменьшаться¹, что требует строгой оценки работы устройства в различных режимах и более продвинутых методов расчета [6, 7, 9–11].

Создание DC/DC-преобразователей, как и других радиоэлектронных средств, базируется на соответствующих математических моделях [11]. Они являются основой для единого методического подхода к разработке, проектированию и исследованию устройств. Метод проектирования униполярных DC/DC-преобразователей, построенных по топологии Zeta, с учетом индуктивной связи дросселей основан на одной из таких моделей [12, 13].

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМИНАЛОВ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ ZETA-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УЧЕТОМ МАГНИТНОЙ СВЯЗИ ДРОССЕЛЕЙ

Схема DC/DC-преобразователя, построенного по Zeta-топологии, показана на рис. 1. Она имеет два дросселя, два конденсатора, электронный ключ, обычно выполненный в виде полевого транзистора, и блок управления (БУ), определяющий режим транзистора [2]. Дроссели L1 и L2 выполняют функцию накопления и передачи энергии посредством электромагнитной индукции, а разделительный конденсатор C1 присутствует в схеме для развязки входа и выхода преобразователя. Разделительный конденсатор C1 также иногда называют «летающим», т.к. он выполняет функции не только разделения, но и накопления и передачи энергии. Конденсатор C2 является сглаживающим выходным конденсатором.

Метод расчета Zeta-преобразователя с учетом магнитной связи дросселей основан на соответствующей математической модели [11–13]. Построение

Zeta-преобразователя на связанных дросселях значительно уменьшает пульсации токов [14]. С помощью математической модели получены выражения для постоянных и переменных значений токов и напряжения преобразователя. В процессе анализа полученных выражений были выведены формулы для определения номиналов электрорадиоэлементов (ЭРЭ). Для расчета номиналов ЭРЭ DC/DC-преобразователя необходимо знать следующие параметры:

- постоянное выходное напряжение U_{C2} ,
- диапазон изменения постоянного входного напряжения от $U_{вх\ min}$ и до $U_{вх\ max}$,
- период коммутации силового ключа T ,
- максимальные размахи пульсаций напряжений u_{C1} , u_{C2} и токов i_{L1} , $i_{L2} - \Delta u_{C1}$, Δu_{C2} , Δi_{L1} , Δi_{L2} соответственно,
- диапазон изменения сопротивления нагрузки от $R_{н\ min}$ до $R_{н\ max}$ (или токов нагрузки от $I_{н\ min}$ до $I_{н\ max}$),
- коэффициент связи дросселей k_c .

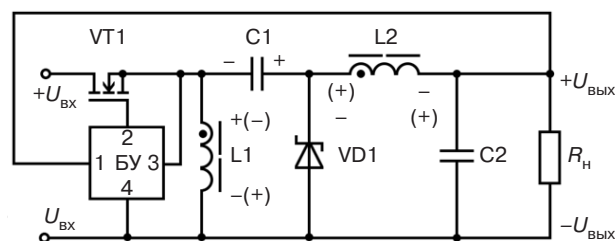


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема преобразователя понижающе-повышающего типа, выполненного по топологии Zeta. Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют обозначениям, принятым в ГОСТ 2.710-81². R_n – сопротивление нагрузки, $U_{вх}$ – входное напряжение, $U_{вых}$ – выходное напряжение

Опциональными параметрами являются r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток связанных дросселей L1 и L2. Сопротивления r_1 и r_2 учтены при построении математической модели для уточнения расчета, а также для упрощенного вывода формул токов дросселей в связи со спецификой построения предельных непрерывных математических моделей.

Для расчета понадобится определить входное напряжение $U_{вх\ 0.5}$ при коэффициенте заполнения $D_{0.5}$, равном 0.5 и минимальном сопротивлении нагрузки $R_{н\ min}$ по формуле:

² ГОСТ 2.710-81. Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Interstate Standard. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izd. Standartov; 1985 (in Russ.).]

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

$$U_{\text{вх } 0.5} = \frac{(-U_{C2}D_{0.5}^2 + 2U_{C2}D_{0.5} - U_{C2})r_2 - U_{C2}D_{0.5}^2r_2 - R_{\text{н ср}}U_{C2}D_{0.5}^2 + 2R_{\text{н ср}}U_{C2}D_{0.5} - R_{\text{н ср}}U_{C2}}{R_{\text{н ср}}D_{0.5}^2 - R_{\text{н ср}}D_{0.5}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{н ср}} = \frac{R_{\text{н min}} + R_{\text{н max}}}{2}$ – среднее сопротивление нагрузки.

Кроме этого, необходимо рассчитать минимальный и максимальный коэффициенты заполнения D_{min} и D_{max} по формулам:

$$D_{\text{min}} = \frac{\sqrt{-(4U_{C2}^2r_1r_2) + (R_{\text{н min}}^2U_{\text{вх max}}^2 - 4R_{\text{н min}}U_{C2}^2r_1)} - 2U_{C2}r_2 - (2R_{\text{н min}}U_{C2} + R_{\text{н min}}U_{\text{вх max}})}{-2U_{C2}r_2 - 2U_{C2}r_1 - (2R_{\text{н min}}U_{C2} + 2R_{\text{н min}}U_{\text{вх max}})}, \quad (2)$$

$$D_{\text{max}} = \frac{\sqrt{-(4U_{C2}^2r_1r_2) + (R_{\text{н min}}^2U_{\text{вх min}}^2 - 4R_{\text{н min}}U_{C2}^2r_1)} - 2U_{C2}r_2 - (2R_{\text{н min}}U_{C2} + R_{\text{н min}}U_{\text{вх min}})}{-2U_{C2}r_2 - 2U_{C2}r_1 - (2R_{\text{н min}}U_{C2} + 2R_{\text{н min}}U_{\text{вх min}})}. \quad (3)$$

Так как метод расчета основан на предельной непрерывной математической модели Zeta-преобразователя, то в соответствии с [15] на границах диапазона коэффициента заполнения D_{min} и D_{max} наблюдается наибольшее несоответствие расчетных значений размахов пульсаций с результатом моделирования. При этом самое высокое соответствие наблюдается в окрестности коэффициента заполнения D , равного 0.5. Поэтому целесообразно проводить расчет номиналов преобразователя именно при $D = 0.5$. Для этого необходимо получить аналитическую зависимость между максимальными пульсациями токов и напряжений преобразователя и их пульсациями при $D = 0.5$. Таким образом, при учете (1)–(3) можно получить формулы для коэффициентов перерасчета k_{L1} , k_{L2} , k_{C1} и k_{C2} . При этом можно заметить, что формулы расчета пульсаций Δi_{L1} и Δi_{L2} совпадают [13], поэтому и коэффициенты k_{L1} и k_{L2} также будут совпадать. В связи с этим далее принято, что $k_{L1} = k_{L2} = k_L$.

$$k_L = \frac{U_{\text{вх max}}D_{\text{min}}T(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_2)}{L_2L_1(k_c - 1)(k_c + 1)} + \frac{U_{\text{вх max}}D_{\text{min}}^3Tr_1(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_2)}{L_2L_1(k_c - 1)(k_c + 1)((D_{\text{min}}^2 - 2D_{\text{min}} + 1)r_2 + D_{\text{min}}^2r_1 + R_{\text{н max}}D_{\text{min}}^2 - 2R_{\text{н max}}D_{\text{min}} + R_{\text{н max}})}, \quad (4)$$

$$= \frac{U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}T(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_2)}{L_2L_1(k_c - 1)(k_c + 1)} + \frac{U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}^3Tr_1(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_2)}{L_2L_1(k_c - 1)(k_c + 1)((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2r_1 + R_{\text{н max}}D_{0.5}^2 - 2R_{\text{н max}}D_{0.5} + R_{\text{н max}})}$$

$$k_{C1} = \frac{-U_{\text{вх min}}D_{\text{max}}^2T(D_{\text{max}} - 1)}{C_1((D_{\text{max}}^2 - 2D_{\text{max}} + 1)r_2 + D_{\text{max}}^2r_1 + R_{\text{н min}}D_{\text{max}}^2 - 2R_{\text{н min}}D_{\text{max}} + R_{\text{н min}})}, \quad (5)$$

$$= \frac{-U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}^2T(D_{0.5} - 1)}{C_1((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2r_1 + R_{\text{н min}}D_{0.5}^2 - 2R_{\text{н min}}D_{0.5} + R_{\text{н min}})}$$

$$k_{C2} = \frac{U_{\text{вх max}}D_{\text{min}}T^2(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_1)}{8C_2L_1L_2(k_c - 1)(k_c + 1)} + \frac{U_{\text{вх max}}D_{\text{min}}^3T^2r_1(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_1)}{8C_2L_1L_2(k_c - 1)(k_c + 1)((D_{\text{min}}^2 - 2D_{\text{min}} + 1)r_2 + D_{\text{min}}^2r_1 + R_{\text{н max}}D_{\text{min}}^2 - 2R_{\text{н max}}D_{\text{min}} + R_{\text{н max}})}, \quad (6)$$

$$= \frac{U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}T^2(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_1)}{8C_2L_1L_2(k_c - 1)(k_c + 1)} + \frac{U_{\text{вх } 0.5}D_{0.5}^3T^2r_1(k_c\sqrt{L_1L_2} + L_1)}{8C_2L_1L_2(k_c - 1)(k_c + 1)((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2r_1 + R_{\text{н max}}D_{0.5}^2 - 2R_{\text{н max}}D_{0.5} + R_{\text{н max}})}$$

Приведенные уравнения содержат в себе номиналы ЭРЭ L_1 , L_2 , C_1 и C_2 . При помощи функции *simplify* *Mathcad*³ выражения (4)–(6) можно упростить, что позволяет исключить переменные L_1 , L_2 , C_1 и C_2 , тем самым получить уравнения, не зависящие от номиналов дросселей и конденсаторов. Однако итоговые формулы определения коэффициентов k_L , k_{C1} и k_{C2} слишком объемные, поэтому приводить их в статье нецелесообразно.

³ <https://www.mathcad.com/en>. Дата обращения 24.04.2024. / Accessed April 24, 2024.

Используя соотношения (4)–(6), формулы для размахов пульсаций токов и напряжений при коэффициенте заполнения $D = 0.5$ можно записать следующим образом:

$$\Delta i_{L1\ 0.5} = \frac{\Delta u_{L1}}{k_L}, \Delta i_{L2\ 0.5} = \frac{\Delta u_{L2}}{k_L}, \Delta u_{C1\ 0.5} = \frac{\Delta u_{C1}}{k_{C1}}, \Delta u_{C2\ 0.5} = \frac{\Delta u_{C2}}{k_{C2}}. \quad (7)$$

Формулы для расчета номиналов дросселей $L1$, $L2$ и конденсаторов $C1$, $C2$, имеют вид:

$$L_1 = \frac{\left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)k_c r_2 + D_{0.5}^2 k_c r_1 + (R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max})k_c \right) \Delta i_{L2\ 0.5} \sqrt{L_1 L_2} +}{\Delta i_{L1\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)} + \quad (8)$$

$$+ \frac{\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) Tr_2 + \left(R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) T}{\Delta i_{L1\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)},$$

$$L_2 = \frac{\left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)k_c r_2 + D_{0.5}^2 k_c r_1 + (R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max})k_c \right) \Delta i_{L1\ 0.5} \sqrt{L_1 L_2} +}{\Delta i_{L2\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)} + \quad (9)$$

$$+ \frac{\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) Tr_2 + \left(R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + R_{H\max} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) T}{\Delta i_{L2\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)},$$

$$C_1 = \frac{-\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 T (D_{0.5} - 1) \right)}{\Delta u_{C1\ 0.5} \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\min} D_{0.5}^2 - 2R_{H\min} D_{0.5} + R_{H\min} \right)}, \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{-\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 T^2 (D_{0.5} - 1)^2 (r_2 + R_{H\max}) (k_c \sqrt{L_1 L_2} + L_1) \right)}{8 \Delta u_{C2\ 0.5} L_1 L_2 (k_c - 1) (k_c + 1) \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1)r_2 + D_{0.5}^2 r_1 + R_{H\max} D_{0.5}^2 - 2R_{H\max} D_{0.5} + R_{H\max} \right)}. \quad (11)$$

Как видно из формул (8) и (9), при связанных дросселях номиналы ЭРЭ тоже зависят друг от друга. Решение этой системы уравнений в аналитическом виде затруднительно. Поэтому можно принять во внимание, что связанные дроссели обычно имеют равные номиналы, а значит и одинаковые пульсации. Учитывая это, можно записать формулы для определения L_1 и L_2 в виде:

$$L_1 = \frac{\left(-\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 \right) + 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 - U_{Bx\max} D_{0.5} \right) Tr_2}{(1 - k_c) \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1) \Delta i_{L1\ 0.5} r_2 + D_{0.5}^2 \Delta i_{L1\ 0.5} r_1 + (R_{H\min} D_{0.5}^2 - 2R_{H\min} D_{0.5} + R_{H\min}) \Delta i_{L1\ 0.5} \right)} + \quad (12)$$

$$+ \frac{\left((2R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 - R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}) T - 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 Tr_1 \right)}{(1 - k_c) \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1) \Delta i_{L1\ 0.5} r_2 + D_{0.5}^2 \Delta i_{L1\ 0.5} r_1 + (R_{H\min} D_{0.5}^2 - 2R_{H\min} D_{0.5} + R_{H\min}) \Delta i_{L1\ 0.5} \right)},$$

$$L_2 = \frac{\left(U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + U_{Bx\max} D_{0.5} \right) Tr_2 + \left(R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 - 2R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^2 + R_{H\min} U_{Bx\ 0.5} D_{0.5} \right) Tr_1}{(1 - k_c) \left((D_{0.5}^2 - 2D_{0.5} + 1) \Delta i_{L2\ 0.5} r_2 + D_{0.5}^2 \Delta i_{L2\ 0.5} r_1 + (R_{H\min} D_{0.5}^2 - 2R_{H\min} D_{0.5} + R_{H\min}) \Delta i_{L2\ 0.5} \right)}. \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) отличаются только одним слагаемым $-2U_{Bx\ 0.5} D_{0.5}^3 Tr_1$ в числителе (12), которое зависит от эквивалентного сопротивления дросселя $L1$, поэтому номиналы L_1 и L_2 будут примерно равны.

2. ПРИМЕР РАСЧЕТА НОМИНАЛОВ ЭРЭ ЗЕТА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Исходные параметры для расчета преобразователя: $k_c = -0.99$, $U_{C2} = 12$ В, $U_{Bx\max} = 17.5$ В, $U_{Bx\min} = 6.5$ В, $\Delta i_{L1} = 330$ мА, $\Delta i_{L2} = 330$ мА, $\Delta u_{C1} = 7$ мВ, $\Delta u_{C2} = 1.9$ мВ, $R_{H\min} = 50$ Ом, $R_{H\max} = 100$ Ом.

Рассчитывая по формулам (1)–(3) входное напряжение $U_{Bx\ 0.5}$, минимальный и максимальный коэффициенты заполнения $D_{\min}$ и $D_{\max}$, можно получить $U_{Bx\ 0.5} = 12.005$ В, $D_{\min} = 0.407$ и $D_{\max} = 0.649$.

При помощи приведенных выше параметров и с учетом формулы (7) можно получить $k_L = 1.185$, $k_{C1} = 1.298$, $k_{C2} = 1.186$.

Соответственно, размахи пульсаций при коэффициенте заполнения $D = 0.5$ равны: $\Delta i_{L1\ 0.5} = 278$ мА, $\Delta i_{L2\ 0.5} = 278$ мА, $\Delta u_{C1\ 0.5} = 5$ мВ, $\Delta u_{C2\ 0.5} = 1.6$ мВ.

Рассчитав номиналы элементов по формулам (10)–(13), получаем $L_1 \approx 22$ мкГн, $L_2 \approx 22$ мкГн, $C_1 \approx 44$ мкФ, $C_2 \approx 44$ мкФ.

3. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ MULTISIM⁴

На рис. 2 представлена схема SPICE-моделирования Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями. Здесь T1 – блок связанных дросселей, каждый из которых имеет номинал 22 мкГн. Коэффициент связи дросселей равен -0.99 ,

т.е. дроссели включены встречно друг другу для подавления пульсаций тока. Резисторы r_1 и r_2 имитируют активные сопротивления обмоток связанных дросселей, C1 – «летающий» конденсатор, C2 – сглаживающий выходной конденсатор, VT1 – силовой ключ, обеспечивающий коммутацию силовой части с заданной частотой, V1 и V2 – источники постоянного напряжения и напряжения широтно-импульсной модуляции, VD1 – идеальный диод. Кроме элементов на схеме также присутствуют пробники токов и напряжений, отвечающие за индикацию параметров токов и напряжений.

На рис. 3 представлены результаты моделирования в режиме анализа переходных процессов спустя более 4 мс после начала. Здесь показаны формы токов через обмотки дросселей L1 и L2, а также напряжений C_1 и C_2 на конденсаторах в установившемся режиме работы после завершения переходных процессов. Надо отметить, что максимум и минимум напряжения U_{C2} приходится на середину каждой из фаз накопления и передачи энергии, как и отмечалось в [13].

Для подтверждения правильности проведенных расчетов на рис. 4–7 показаны расчетные и полученные при моделировании передаточные характеристики токов и напряжений преобразователя.

Передаточная характеристика – это зависимость соответствующей физической величины от входного напряжения преобразователя. Расчетные значения были получены при использовании математической модели преобразователя.

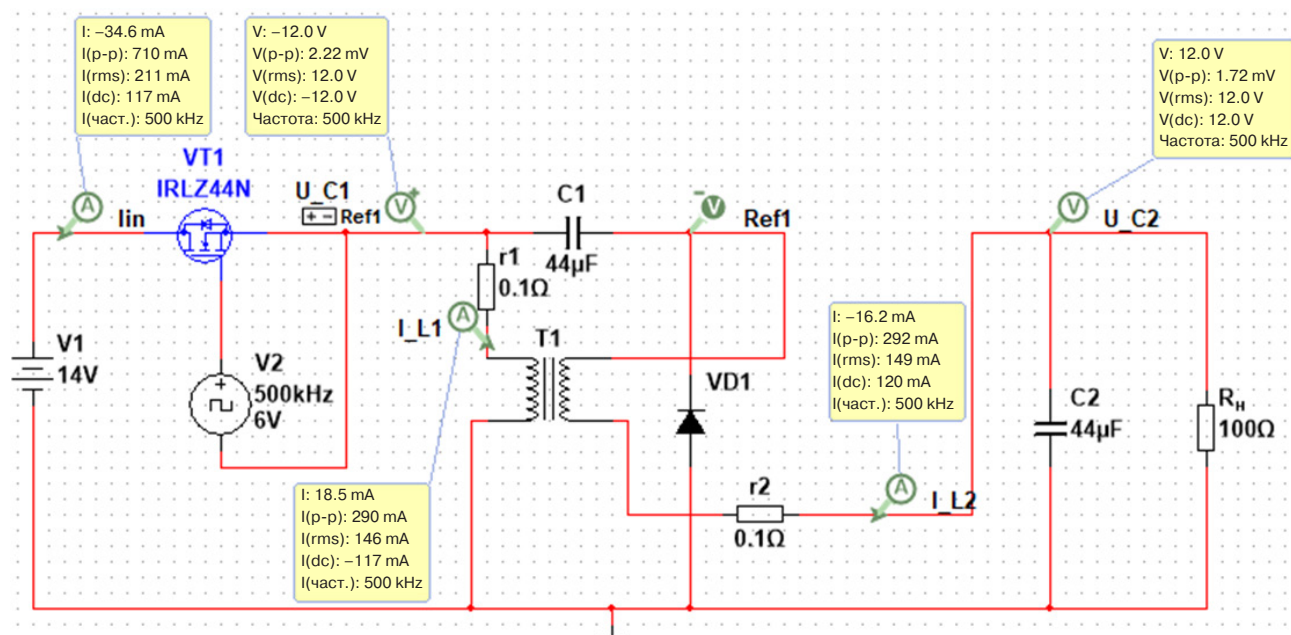


Рис. 2. Схема моделирования Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями

⁴ <https://www.ni.com/en.html>. Дата обращения 24.04.2024. / Accessed April 24, 2024.

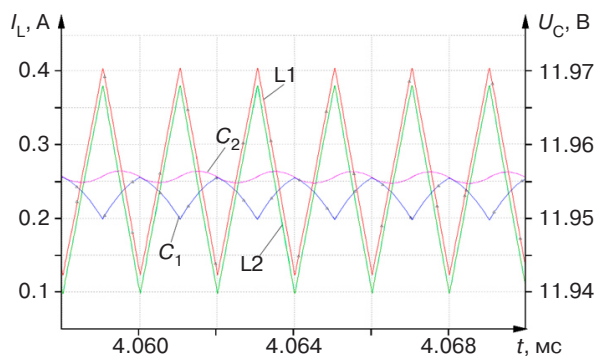


Рис. 3. Графики токов и напряжений Zeta-преобразователя в установившемся режиме

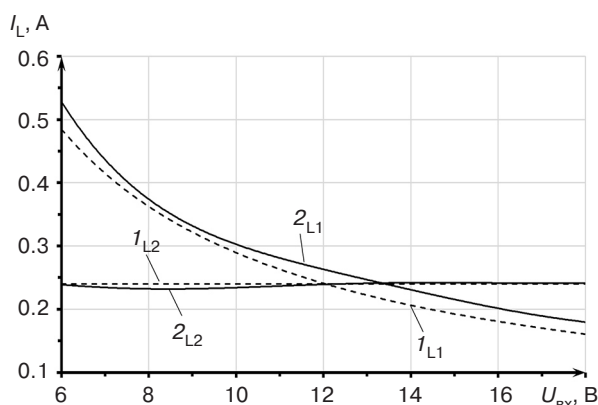


Рис. 4. Передаточные характеристики токов, протекающих через обмотки дросселей L1 и L2 при сопротивлении нагрузки 50 Ом: 1 – расчетное значение; 2 – результат моделирования

На графиках передаточных характеристик видно совпадение расчетных значений и результатов, полученных при моделировании, что подтверждает достоверность методики расчета. Отклонения графиков моделирования относительно расчетных достаточно малы, так, например, отклонение тока I_{L1} при моделировании относительно расчетного составило от 3.5% до 12%, аналогично для I_{L2} – от 0% до 3.4%, U_{C1} – от 0% до 0.05%, U_{C2} – от 0.003% до 0.03%, что иллюстрирует достоверность расчетов.

На рис. 8 представлены нагрузочные характеристики преобразователя при входном напряжении равном 6.5, 12 и 17.5 В. В связи с тем, что различие выходных напряжений при расчете и моделировании не превышает сотые доли процента, то графики нагрузочных характеристик преобразователя, полученные расчетом и моделированием, практически полностью совпадают. Нагрузочные характеристики для входного напряжения – 12 и 17.5 В построены в декартовых координатах снизу и слева, а нагрузочная характеристика при входном напряжении – в координатах сверху и справа. Информация, приведенная на рис. 8, иллюстрирует тот факт, что результаты расчетов, выполненных с помощью предложенного

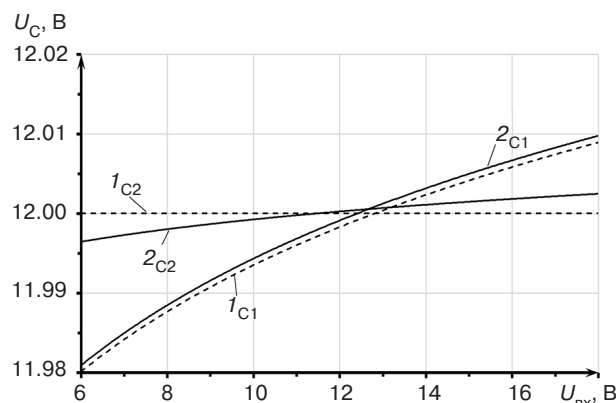


Рис. 5. Передаточные характеристики напряжений на конденсаторах C1 и C2 при сопротивлении нагрузки 50 Ом: 1 – расчетное значение; 2 – результат моделирования

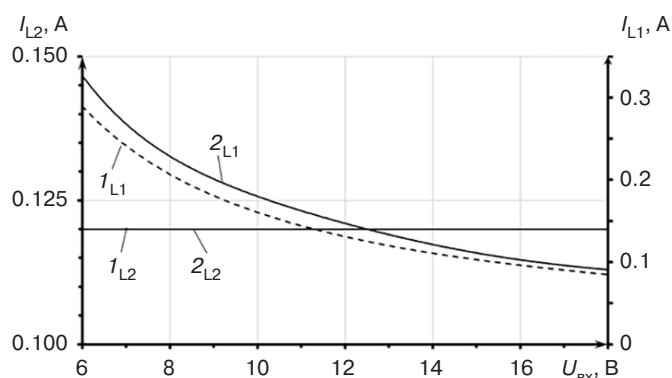


Рис. 6. Передаточные характеристики токов, протекающих через обмотки дросселей L1 и L2 при сопротивлении нагрузки 100 Ом: 1 – расчетное значение; 2 – результат моделирования

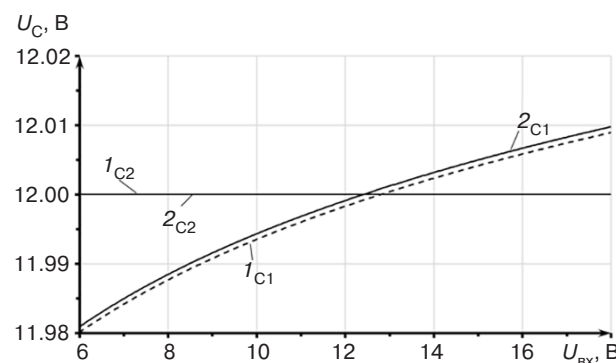


Рис. 7. Передаточные характеристики напряжений на конденсаторах C1 и C2 при сопротивлении нагрузки 100 Ом: 1 – расчетное значение; 2 – результат моделирования

метода проектирования DC/DC-преобразователей и математической модели, полностью повторяют зависимость тока нагрузки от изменения напряжения стабилизации. Это доказывает достоверность описания работы DC/DC-преобразователей, построенных по Zeta-топологии с учетом магнитной связи связанных дросселей, рассмотренными методами.

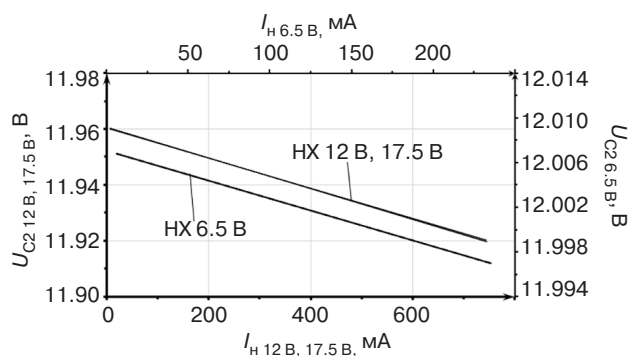


Рис. 8. Нагрузочные характеристики (HX) при 12 В и 17.5 В, а также HX при 6.5 В. I_H – ток нагрузки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен новый метод проектирования DC/DC-преобразователей, построенных по Zeta-топологии, учитывающий магнитную связь связанных дросселей. Метод позволяет рассчитать

номиналы конденсаторов и дросселей силовой части преобразователя, а также учитывать переменные составляющие токов, протекающих через обмотки дросселей, и напряжений на конденсаторах.

С помощью полученных в ходе проектирования номиналов ЭРЭ проведено моделирование в системе автоматизированного проектирования *Multisim* и выполнены расчеты при использовании предельной непрерывной математической модели преобразователя, на которой и основан вышеописанный метод. Полученные передаточные и нагрузочные характеристики показывают высокое совпадение между математическими расчетами и результатами моделирования в *Multisim*.

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

- Одинокоев А.О., Кремзуков Ю.А. Выбор топологии преобразователя постоянного напряжения. SEPIC или Zeta. *Практическая силовая электроника*. 2022;4(88):44–47. <https://www.elibrary.ru/fayaac>
- Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. *Схемотехника электропреобразовательных устройств*. Вологда: Инфра-Инженерия; 2023. 384 с. ISBN 978-5-9729-1439-5
- Erickson R.W., Maksimović D. *Fundamentals of Power Electronics*. NY: Springer; 2020. 1084 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>
- Гутер Л.Р. Перспективы разработки многофункциональных модулей DC/DC для космической техники. *Практическая силовая электроника*. 2023;1(89):37–39. <https://www.elibrary.ru/vcxjlf>
- Васюков И.В., Павленко А.В., Батищев Д.В. Обзор и анализ топологий преобразователей систем электропитания на водородных топливных элементах для беспилотных летательных аппаратов киловаттного класса мощности. *Известия вузов. Электромеханика*. 2022;65(2):19–26.
- Крамм М.Н., Бодин О.Н., Бодин А.Ю., Чыонг Т.Л.Н., Жихарева Г.В. Особенности построения многоэлектродной системы электрокардиологического скрининга. *Медицинская техника*. 2022;5(335):37–41. <https://www.elibrary.ru/camqob>
- Лукин А.В., Шайхутдинов М.В. Ускоренные испытания на надежность импульсных источников питания DC/DC серии СМВ6А. *Практическая силовая электроника*. 2022;3(87):26–33. <https://www.elibrary.ru/lbnupb>
- Белов Г.А., Петров К.И. Исследование динамической модели резонансного преобразователя постоянного напряжения. *Практическая силовая электроника*. 2022;2(86):8–13. <https://www.elibrary.ru/efnqkz>
- Третьяков Н.К., Кузьменко В.П., Солена О.Я. Проектирование источников переменного напряжения с использованием современных решений. *Практическая силовая электроника*. 2024;1(93):40–45. <https://www.elibrary.ru/wqmtyd>
- Белов Г.А. Временной анализ резонансного преобразователя постоянного напряжения типа LLC в режиме прерывистого тока. *Практическая силовая электроника*. 2022;1(85):2–13. <https://www.elibrary.ru/vwnrci>
- Коршунов А.И. Предельная непрерывная модель системы с периодическим высокочастотным изменением структуры. *Силовая электроника*. 2021;5(92):48–51.
- Битюков В.К., Лавренев А.И., Петров Д.Р. Пульсации токов и напряжений Zeta преобразователя с индуктивно связанными дросселями (Часть 1). *Проектирование и технология электронных средств*. 2023;3:36–41. <https://www.elibrary.ru/doawcp>
- Битюков В.К., Лавренев 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/dspqrt>
- Zhu F., Li Q. Coupled Inductors with an Adaptive Coupling Coefficient for Multiphase Voltage Regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2023;38(1):739–749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3203855>
- Битюков В.К., Лавренев А.И., Малицкий Д.А. Анализ пульсаций DC/DC преобразователя, построенного по Zeta топологии, с использованием его предельной непрерывной математической модели. *Russian Technological Journal*. 2023;11(4):36–48. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-36-48>

REFERENCES

1. Odinkov A.O., Kremzakov Yu.A. Selecting DC converter topology. SEPIC or Zeta. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2022;4(88):44–47 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/fayaac>
2. Bitukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Skhemy elektropreobrazovatel'nykh ustroystv (Circuitry of Electrical Converter Devices)*. Vologda: Infra-Inzheneriya; 2023. 384 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9729-1439-5
3. Erickson R.W., Maksimović D. *Fundamentals of Power Electronics*. NY: Springer; 2020. 1084 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>
4. Guter R.L. Prospects of multi-functional DC/DC modules development for Space engineering. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2023;1(89):37–39 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vcxjlf>
5. Vasyukov I.V., Pavlenko A.V., Batishchev D.V. Review and Analysis of Topologies of Converters of Power Supply Systems on Hydrogen Fuel Cells for Unmanned Aerial Vehicles of Kilowatt Power Class. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian Electromechanics*. 2022;65(2):19–26 (in Russ.).
6. Kramm M.N., Bodin O.N., Bodin A.Y., et al. Constructional Features of a Multielectrode Electrocardiology Screening System. *Biomed. Eng.* 2023;56(5):345–352. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10233-7>
[Original Russian Text: Kramm M.N., Bodin O.N., Bodin A.Y., Truong T.L.N., Zhikhareva G.V. Constructional Features of a Multielectrode Electrocardiology Screening System. *Meditsinskaya Tekhnika*. 2022;5(335):37–41 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/camqob>]
7. Lukin A.V., Shaikhutdinov M.V. Accelerated reliability tests of DC/DC switched mode power supplies of the CMB6A series. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2022;3(87):26–33 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/lbnupb>
8. Belov G.A., Petrov K.I. Studying dynamic model of resonant DC-DC voltage converter. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2022;2(86):8–13 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/efnqkz>
9. Tretiakov N.K., Kuzmenko V.P., Solenaya O.Ya. AC voltage sources design employing state-of-the-art solutions. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2024;1(93):40–45 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/wqmytd>
10. Belov G.A. Time domain analysis of an LLC type DC-DC voltage converter in discontinuous conduction mode. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical Power Electronics*. 2022;1(85):2–13 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/vwnrci>
11. 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.).
12. Bitukov V.K., Lavrenov A.I., Petrov D.R. Current and voltage pulsations of Zeta converter with inductively coupled inductors (Part 1). *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*. 2023;3:36–41 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/doawcn>
13. 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>
14. Zhu F., Li Q. Coupled Inductors with an Adaptive Coupling Coefficient for Multiphase Voltage Regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2023;38(1):739–749. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3203855>
15. Bitukov V.K., Lavrenov A.I., Malitskiy D.A. Analysis of the DC/DC Zeta topology converter ripples by applying its limiting continuous mathematical model. *Russian Technological Journal*. 2023;11(4):36–48 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-36-48>

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>

About the authors

Vladimir K. Bitukov, 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>