

УДК 621.314:681.586.7:004.942

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УНИПОЛЯРНОГО DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, ПОСТРОЕННОГО ПО ТОПОЛОГИИ ZETA

Битюков В.К.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра радиоволновых
процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
bitukov@mirea.ru

Лавренов А.И.
Институт радиоэлектроники и
информатики
Кафедра радиоволновых
процессов и технологий
РТУ МИРЭА
Москва, Россия
lavrenov@mirea.ru

Петров Д.Р.
Сектор разработки
электронных модулей для
встраиваемых вычислительных
систем
Отдел разработки электронных
модулей
Управление разработки
вычислительной техники
АО «НИЦЭВТ»
Москва, Россия
petrov@nicevt.ru

Аннотация – Представлена математическая модель униполярного DC/DC преобразователя, построенного по Zeta топологии. Проведен сравнительный анализ результатов математического моделирования, компьютерного моделирования и эксперимента.

Ключевые слова – понижающе-повышающий преобразователь, Zeta, математическая модель, моделирование, эксперимент, параметры.

ВВЕДЕНИЕ

Характерной чертой развития современного общества является применение разнообразных автономных устройств и систем, например, мобильные средства связи, портативные компьютеры, видекамеры слежения, кардиостимуляторы, беспилотные летающие аппараты, измерительные устройства. Первичным источником электропитания при этом являются литий-ионные батареи или перезаряжаемые аккумуляторы, выходное напряжение которых существенно изменяется во времени. Поэтому в состав источников вторичного электропитания автономных устройств и систем входят DC/DC преобразователи. Помимо обеспечения малых массогабаритных параметров к устройствам, реализующим такие преобразования, предъявляются высокие требования по стабильности выходного напряжения, малым его пульсациям и высоким КПД [1–3].

Современные методы проектирования DC/DC преобразователей основываются на их математических моделях. Созданная предельная непрерывная математическая модель Zeta преобразователя позволяет оценить диапазон изменения токов, протекающих через обмотки дросселей, и напряжений на обкладках конденсаторах, их максимальные и минимальные значения

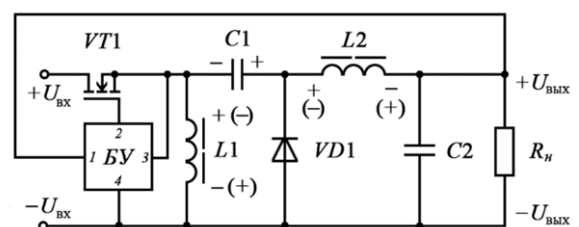
при различных параметрах преобразователя. Полученные результаты позволяют выполнить рациональный подбор электронной компонентной базы.

I. СХЕМОТЕХНИКА

Zeta преобразователь (рис. 1) в составе своей схемы имеет два дросселя $L1$ и $L2$, два конденсатора $C1$ и $C2$, ключ $VT1$, обычно реализован полевым транзистором, диод $VD1$ и блок управления (БУ), задающий режим транзистора [4]. Дроссели $L1$ и $L2$ служат для аккумулирования и передачи энергии. Конденсатор $C1$ выполняет не только гальваническую развязку входа и выхода, но накопление и передачу энергии между секциями преобразователя. Поэтому конденсатор $C1$ называют разделительным конденсатором, а иногда «летающим». Диод $VD1$, дроссель $L2$ и конденсатор $C2$ образуют сглаживающий выходной фильтр.

Топология Zeta отличается от топологий SEPIC и Cuck лишь положением дросселей относительно диодов и транзисторов [5–7].

Рис. 1. Принципиальная электрическая схема DC/DC преобразователя, построенного по Zeta топологии



При анализе принципа действия Zeta преобразователя выделяют две фазы его работы. В первую фазу (фазу накопления энергии) при открытом транзисторе $VT1$

происходит накопление энергии в дросселях $L1$ и $L2$ (полярность ЭДС на обмотках дросселей указана без скобок), а напряжение на конденсаторе $C1$ вместе с входным напряжением $U_{вх}$ формируют выходное напряжение $U_{вых}$ на нагрузке R_n (рис. 1). Во вторую фазу (фазу передачи энергии) при закрытом транзисторе $VT1$ происходит разрядка дросселей (полярность ЭДС на обмотках дросселей указана в скобках). Причем конденсатор $C1$ заряжается током разрядки дросселя $L1$ (рис. 1).

Поскольку ток через обмотку дросселя $L2$ протекает постоянно на выход Zeta преобразователя, то его выходное напряжение имеет меньше пульсаций, чем в преобразователе SEPIC с той же индуктивностью [7].

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На рис. 2 и рис. 3 показаны схемы Zeta преобразователя в фазах накопления и передачи энергии, соответственно, с входным источником напряжения E и с учетом эквивалентной схемы дросселей.

Рис. 2. Контур на схеме DC/DC преобразователя в режиме накопления энергии

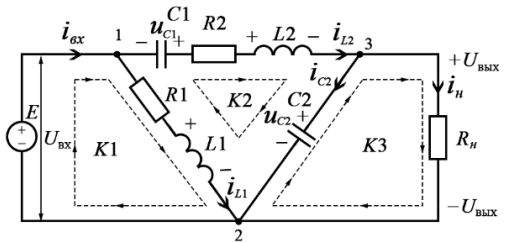
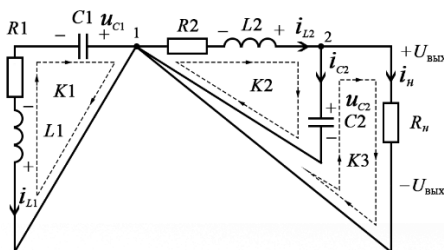


Рис. 3. Контур на схеме DC/DC преобразователя в режиме накопления передачи энергии



На каждой эквивалентной схеме были выделены по три контура $K1$, $K2$ и $K3$, необходимые для записи систем уравнений по правилам Кирхгофа. По правилам Кирхгофа первая фаза работы устройства описывается системой уравнений, состоящей из пяти уравнений, а вторая фаза – системой уравнений, состоящей из четырех уравнений.

Это позволило получить уравнения Коши, объединенные в математическую модель [8]. Решив систему уравнений для постоянных токов и напряжений относительно токов через обмотки дросселей $L1$ и $L2$ и напряжений на конденсаторах $C1$ и $C2$, были получены уравнения

$$I_{L1} = \left| \frac{U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D^2}{(D^2 - 2 \cdot D + 1) \cdot r_2 + D^2 \cdot r_1 + R_i \cdot D^2 - 2 \cdot R_i \cdot D + R_i} \right|, \quad (1)$$

$$I_{L2} = \left| \frac{U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D^2 - U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D}{(D^2 - 2 \cdot D + 1) \cdot r_2 + D^2 \cdot r_1 + R_i \cdot D^2 - 2 \cdot R_i \cdot D + R_i} \right|, \quad (2)$$

$$U_{N1} = \left| \frac{(-U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D^2) + U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D \cdot r_2 + (R_i \cdot U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D - R_i \cdot U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D^2 - U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D^2 \cdot r_1)}{(D^2 - 2 \cdot D + 1) \cdot r_2 + D^2 \cdot r_1 + R_i \cdot D^2 - 2 \cdot R_i \cdot D + R_i} \right|, \quad (3)$$

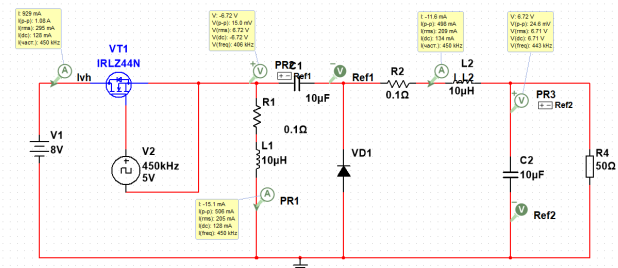
$$U_{N2} = \left| \frac{R_i \cdot U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D^2 - R_i \cdot U_{\dot{a}\dot{o}} \cdot D}{(D^2 - 2 \cdot D + 1) \cdot r_2 + D^2 \cdot r_1 + R_i \cdot D^2 - 2 \cdot R_i \cdot D + R_i} \right|. \quad (4)$$

Для проверки математической модели DC/DC преобразователя, построенного по Zeta топологии, использовалось схемотехническое моделирование в среде Multisim.

Схема моделирования представлена на рис. 4. Ключ $VT1$ коммутировал ток входного источника питания $V1$ с частотой тактовых импульсов, задаваемых генератором $V2$. Измерительными приборами $M1$ - $M4$ выполнялся контроль средних значений токов, протекающих через обмотку дросселей, и падений напряжений на конденсаторах. Результаты измерения средних значений этих параметров в установившемся режиме работы преобразователя иллюстрируются на (рис. 4).

В качестве элементов были выбраны компоненты из базы данных Multisim. Дроссели представлены эквивалентными схемами. Активное сопротивление дросселей, имеющих индуктивность 10 мкГн, не превышало 1 Ом.

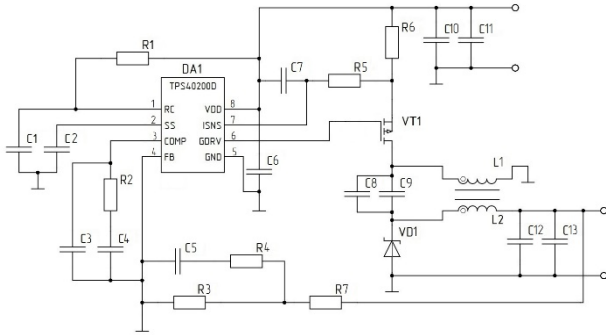
Рис. 4. Схема моделирования DC/DC преобразователя



Средние значения токов и напряжений регистрировались в установившемся режиме. Время переходных процессов работы устройства в зависимости от коэффициента заполнения составляло от 2 до 5 мс. Поэтому регистрация токов и напряжений выполнялась через 10 мс после начала моделирования.

Для сопоставления результатов компьютерного моделирования, математической модели и эксперимента был разработан экспериментальный стенд. Принципиальная электрическая схема стенда DC/DC преобразователя, построенного по топологии Zeta, была создана на основе микросхемы TPS40200 [9] (рис. 5).

Рис. 5. Принципиальная электрическая схема DC/DC преобразователя, построенного по топологии Zeta на микросхеме TPS40200



Для расчета компонентов схемы были использованы данные из Datasheet, для следующих параметров:

$$U_{\text{ВХ}} = 4,5 \dots 22,5 \text{ В}, R_{\text{H}} = 50 \dots 1000 \text{ Ом},$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = 22,5 \text{ В}, f_{\text{КОММ}} = 450 \text{ кГц},$$

В качестве источника входного регулируемого напряжения, был выбран источник питания R&S NGE100 [8]. Для измерения тока, протекающего через обмотки дросселей $L1$ и $L2$, и напряжения на конденсаторе $C2$ был использован цифровой мультиметр R&S HMC 8012 [9].

Используя полученные данные, проведено сравнение передаточных характеристик при входном напряжении $4,5 \dots 22,5 \text{ В}$ с шагом $0,5 \text{ В}$ и фиксированном выходном напряжении $22,5 \text{ В}$.

Рис. 6. Зависимость тока I_{L1} , протекающего через обмотку дросселя $L1$, от входного напряжения: 1 – эксперимент; 2 – расчёт; 3 – моделирование

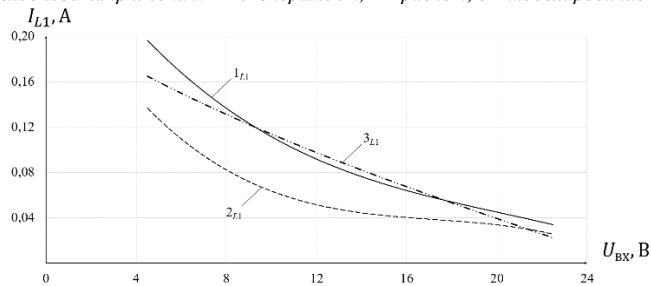


Рис. 7. Зависимость тока I_{L2} , протекающего через обмотку дросселя $L2$, от входного напряжения: 1 – эксперимент; 2 – расчёт; 3 – моделирование

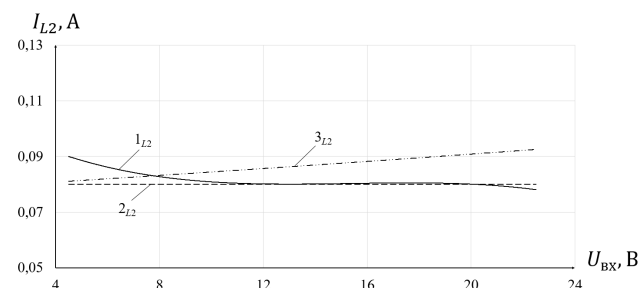


Рис. 6 и рис. 7, как и рис. 8 и рис.9 иллюстрируют достаточно хорошее совпадение результатов компьютерного моделирования с результатами расчетов по математической модели и эксперимента.

Значения тока I_{L1} , полученные при эксперименте, имеют отклонение от расчетного значения и моделирования не превышающее 5 мА , что соответствует процентному значению 10% . Аналогично для тока I_{L2} диапазон изменения значений также составляет 10% , что соответствует 5 мА .

Рис. 8. Влияние входного напряжения на напряжение на обкладках конденсатора $C1$: 1 – расчёт; 2 – моделирование

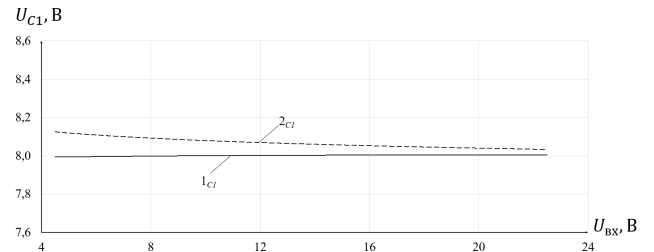
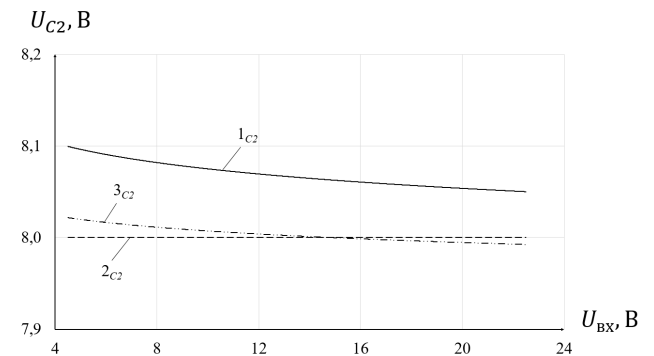
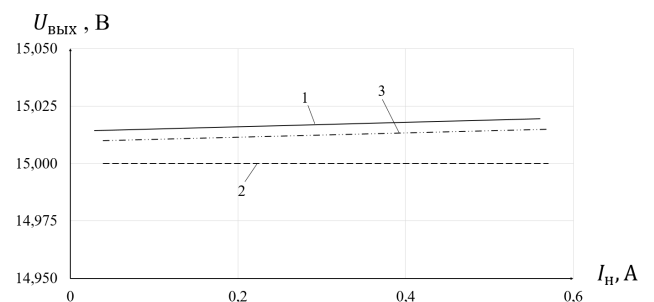


Рис. 9. Влияние входного напряжения на напряжение на обкладках конденсатора $C2$: 1 – эксперимент; 2 – расчёт; 3 – моделирование



На графиках зависимости напряжения на конденсаторах $C1$ и $C2$ от входного напряжения, (рис. 8) и (рис. 9), заметна явная сходимость результатов со средним отклонением в 1% для $C1$, что соответствует 80 мВ , и $1,5 \%$ для $C2$, что соответствует 100 мВ .

Рис. 10. Нагрузочная характеристика: 1 – эксперимент; 2 – расчёт; 3 – моделирование



На нагрузочной характеристике при значениях динамического сопротивления $R_i = 9,8 \text{ МОм}$ для эксперимента и $R_i = 9,3 \text{ МОм}$ для моделирования, видно

явное сходство результатов математической модели с экспериментом и компьютерным моделированием с небольшим отклонением от результатов математической модели в 15 мВ для эксперимента, что соответствует 0,1% и 10 мВ для моделирования, что соответствует 0,06%.

Характеристики, полученные при измерениях, демонстрируют достоверность математической модели, а также, показывают высокий уровень стабилизации выходного напряжения DC/DC преобразователя, построенного по топологии Zeta.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты анализа эквивалентных схем рассматриваемого преобразователя для обеих фаз работы. С использованием правил Кирхгофа получены дифференциальные уравнения токов и напряжений для обеих фаз работы. Выполнено сопоставление результатов расчетов при использовании предельной непрерывной математической модели, компьютерного моделирования и экспериментального стенда преобразователя.

Список литературы

- [1] Jozwik J.J., Kazimierzczuk M.K. Dual Sepic PWM Switching-Mode DC/DC Power Converter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1989. V. 36. I. 1. С. 64-70.
- [2] Битюков, В. К. Физика и схемотехника источников электропитания радиотехнических устройств: Учебник / В. К. Битюков, Д. С. Симачков, В. П. Бабенко. – Вологда: Издательство «Инфра-Инженерия», 2024. – 336 с. – ISBN 978-5-9729-2033-4. – EDN YMIUMT.
- [3] Erickson R.W., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics. — NY.: Springer New York. 2020. 1084 с.
- [4] Бабенко В.П., Битюков В.К. Высокоэффективный повышающе-понижающий DC/DC преобразователь ZETA/Cuk с симметрично-разнополярным выходным напряжением (Часть 2) // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 3. С. 2330.
- [5] Одигов, А. О. Выбор топологии преобразователя постоянного напряжения. SEPIC или Zeta / А. О. Одигов, Ю. А. Кремзуков // Практическая силовая электроника. – 2022. – № 4(88). – С. 44-47. – EDN FAYAAC.
- [6] Битюков, В. К. Математическая модель Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями (Часть 1) / В. К. Битюков, А. И. Лавренов, Д. Р. Петров // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2023. – Т. 194, № 3. – С. 49-54. – EDN WMCEXF.
- [7] Битюков, В. К. Математическая модель Zeta-преобразователя с индуктивно связанными дросселями (часть 2) / В. К. Битюков, А. И. Лавренов, Д. Р. Петров // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2023. – Т. 195, № 4. – С. 48-52. – EDN MNUSIK.
- [8] Источники питания серии R&S®NGE100 Reduced to the max [Электронный ресурс]: технические данные по изделию – М., 2017. – Режим доступа : https://scdn.rohdeschwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/service_support_30/NGE100_bro_ru_5214-8748-18_y0100_96dpi.pdf
- [9] TPS40200 Datasheet (HTML) //URL:https://www.solidworks.com/дата_обращения:08.11.2024,<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/345505/TI/TPS40200.html>
- [10] Техническая документация цифрового мультиметра R&S®HMC8012 [Электронный ресурс] : технические данные по изделию – М., 2008. – Режим доступа: <https://rohdeschwarz.su/UFiles/bukl/HMC8012.pdf>

MATHEMATICAL MODEL OF A UNIPOLAR DC/DC CONVERTER BUILT ACCORDING TO ZETA TOPOLOGY

Bitjukov V.K.
Institute of Radio Electronics and
Informatics
Department of Radio Wave
Processes and Technologies
RTU-MIREA
Moscow, Russia
bitukov@mirea.ru

Lavrenov A.I.
Institute of Radio Electronics and
Informatics
Department of Radio Wave
Processes and Technologies
RTU-MIREA
Moscow, Russia
lavrenov@mirea.ru

Petrov D.R.
Sector for the development of
electronic modules for embedded
computing systems
Electronic modules development
department, computer technology
development department
JSC "NICEVT"
petrov@nicevt.ru

Abstract – A mathematical model of a unipolar DC/DC converter built using the Zeta topology is presented. A comparative analysis of the results of mathematical modeling, computer modeling and experiment was carried out.

Keywords – buck-boost converter, Zeta, mathematical model, modeling, parameters.