

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.08:621.3.089.2:621.311.6

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ SEPIC/CUCK С БИПОЛЯРНЫМ ВЫХОДОМ

© 2021 г. В. П. Бабенко<sup>а</sup>, В. К. Битюков<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА),  
Просп. Вернадского, 78, Москва, 119454 Россия

\*E-mail: bitukov@mirea.ru

Поступила в редакцию 18.12.2020 г.

После доработки 29.12.2020 г.

Принята к публикации 21.01.2021 г.

Представлены результаты исследования комбинированного импульсного преобразователя постоянного входного напряжения в биполярное выходное по повышающе-понижающей топологии SEPIC-Cuck, особенностей коммутационных процессов в переходных режимах работы. Схемотехническое моделирование позволило уточнить характеристики коммутационных процессов, оценить параметры пульсаций входного тока, сформулировать рекомендации по выбору элементов преобразователей и формированию сигналов управления.

*Ключевые слова:* конвертор, повышающе-понижающий преобразователь, Boost-Buck, SEPIC, Cuck, моделирование, коммутационные процессы, параметры, сигналы управления

**DOI:** 10.31857/S0544126921040025

#### ВВЕДЕНИЕ

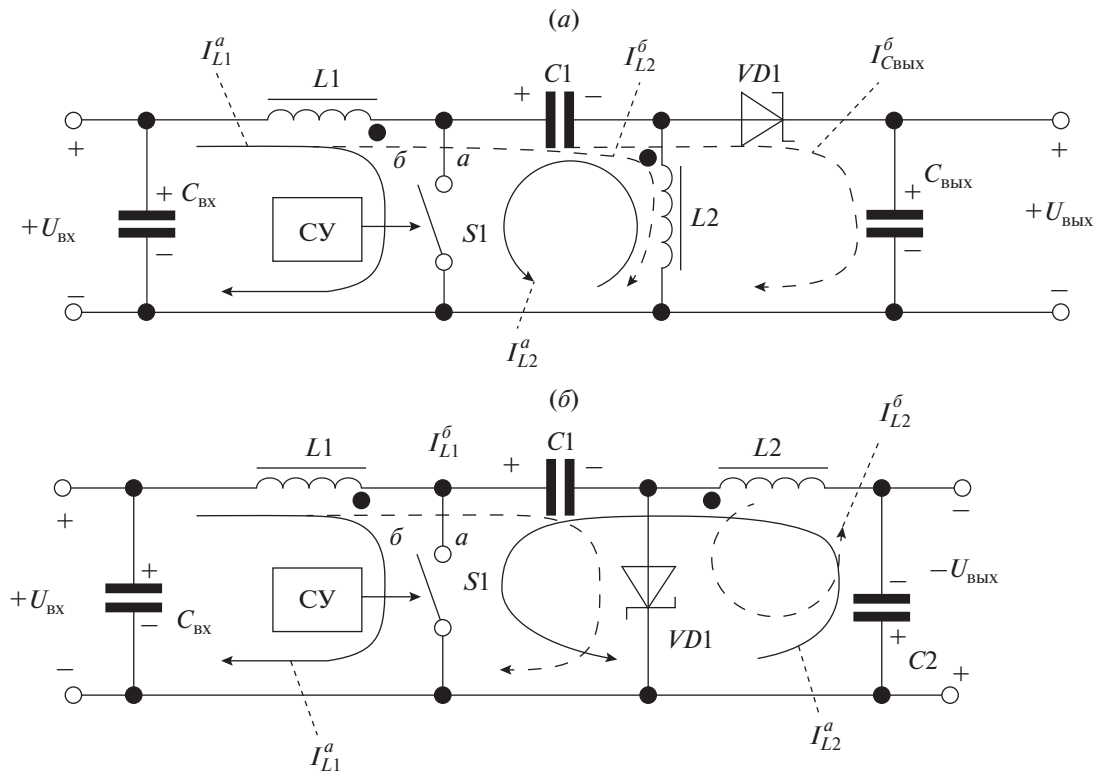
При разработке мобильных устройств с батарейным питанием от однополярного источника часто возникает необходимость обеспечить аналоговые микроэлектронные устройства двумя разнополярными напряжениями, положительным и отрицательным, близкими по номиналу и с небольшими нагрузочными токами. В условиях, когда в процессе работы у источника батарейного питания напряжение изменяется в значительных пределах, используются конверторные (понижающие/повышающие) DC/DC преобразователи, обладающие свойством как повышать, так и понижать выходное напряжение относительно входного [1]. Комбинация преобразователей, построенных по топологиям SEPIC и Cuck, также привлекает внимание разработчиков низковольтной микросети постоянного тока биполярного типа для питания микроэлектронных устройств с использованием возобновляемых источников электроэнергии, выходное напряжение или частота у которых изменяется в широких пределах [2].

Традиционно повышающе-понижающие преобразователи состоят из двух секций: входной и выходной, между которыми включен разделительный конденсатор. Схемотехника секций содержит элементы типового понижающего, повышающего и инвертирующего преобразователя. В

более простых асинхронных топологиях конверторов используется один активный (транзистор) и один пассивный (диод) ключевой элемент. Синхронные топологии обладают лучшими характеристиками. Но управление всем многообразием транзисторных ключевых элементов конвертора усложняет его схемотехнику, что конечно отражается и на стоимости. Для получения выходного биполярного напряжения из входного однополярного напряжения интересным решением, особенно в условиях, когда напряжение питания изменяется в значительных пределах, является комбинация однополярных конверторных преобразователей неинвертирующего SEPIC и инвертирующего Cuck, у которых входная секция идентична топологии повышающего DC/DC преобразователя. Это позволяет упростить схемотехнику исследуемого комбинированного преобразователя SEPIC/Cuck.

#### 1. СХЕМОТЕХНИКА

Базовые топологии однополярных повышающе-понижающих преобразователей SEPIC (Single Ended Primary Inductance Converter-преобразователь с несимметрично нагруженной первичной индуктивностью) и Cuck или uc (по имени автора доктора Slobodan Cúuk из Калифорнийского технологического института, в русской



**Рис. 1.** Базовые топологии однополярных повышающе-понижающих преобразователей: *a* – неинвертирующий SEPIC; *б* – инвертирующий Cuck.

транскрипции встречается как Кук или Чук) приведены на рис. 1.

Структурно повышающе-понижающие преобразователи (рис. 1), представляют собой последовательно соединенные секции повышающего (входная секция) преобразователя, коммутируемые активным ключом *S1* (обычно MOSFET транзистор), и выходной секции, понижающей или инвертирующей, коммутируемой в асинхронной топологии диодным ключом *VD1* (диод Шоттки). Разделительный (“летающий”) конденсатор *C1*, включенный между секциями препятствует прохождению постоянного тока со входа на выход, а также участвует в накоплении энергии и ее перекачке из входной секции в выходную. Топологии SEPIC и Cuck отличаются лишь порядком включения дросселя *L2* и диодного ключа *VD1*.

Процессы преобразования электрической энергии в рассматриваемых преобразователях имеют много общего и состоят из двух сменяющих друг друга фаз – фазы накопления энергии в дросселе входной секции *L1* при замкнутом ключе *S1* и фазы перекачки энергии из дросселя *L1* в выходную секцию и нагрузку при разомкнутом ключе *S1*.

В первой фазе работы преобразователя (рис. 1) на интервале времени  $t_{вкл}$ , когда ключ *S1* замкнут (положение *a*), через дроссель *L1* протекает линейно нарастающий ток  $I_{L1}^a$  (показан сплошной

линией), в магнитном поле дросселя *L1* накапливается электромагнитная энергия. При этом диод *VD1* обратнo смещен положительным напряжением  $U_{вых}$ , приложенным к катоду *VD1* (рис. 1*a*), и отрицательным – к аноду (рис. 1*б*), что поддерживает его в запертом состоянии. Конденсатор *C1*, заряженный на предыдущей фазе, разряжается током  $I_{L2}^a$  (сплошная линия) через дроссель *L2* и замкнутый ключ *S1*, вследствие чего энергия, накопленная в конденсаторе *C1*, перекачивается в энергию дросселя *L2*.

Во второй фазе работы преобразователя на интервале времени  $t_{выкл}$ , когда ключ *S1* разомкнут (положение *б*), ЭДС самоиндукции дросселя *L2* открывает диод *VD1* (рис. 1). Токм  $I_{L2}^б$  (пунктирная линия) энергия дросселя *L2* перекачивается в конденсатор  $C_{вых}$ . Причем в случае схемы инвертирующего преобразователя (рис. 1*б*) токи  $I_{L2}^a$  и  $I_{L2}^б$  на обеих фазах работы направлены в одну сторону и дозаряжают выходной конденсатор  $C_{вых}$ , снижая уровень пульсаций выходного напряжения. Напряжение на выходе  $U_{вых}$  имеет полярность положительную в случае SEPIC (рис. 1*a*) и отрицательную – в случае Cuck (рис. 1*б*). Управление значением выходного напряжения и его стабилизацией выполняется контроллером (схемой управ-

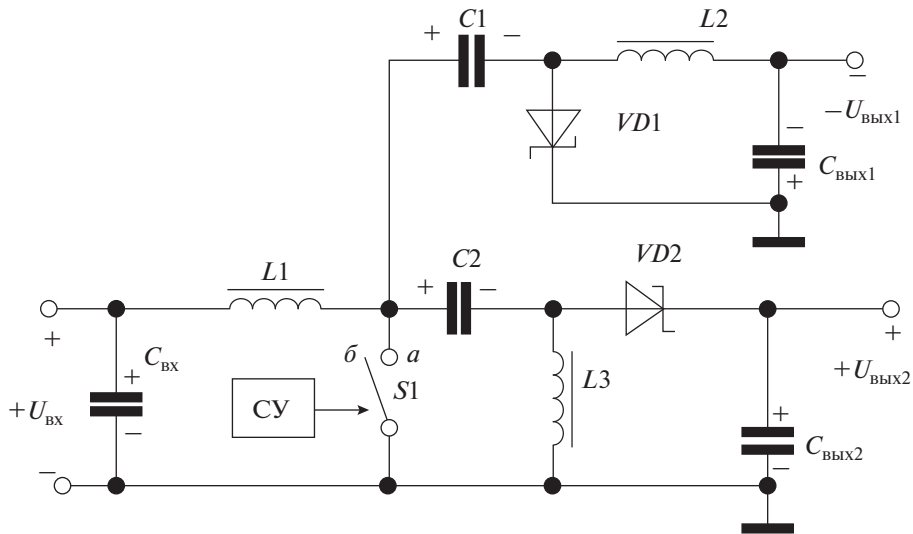


Рис. 2. Схема повышающе-понижающего конвертора SEPIC/Cuck с биполярным выходом.

ления (CY)), формирующим импульсы управления активным ключом с постоянным периодом повторения импульсов  $T = t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}} = 1/F$ , где  $F$  – частота, и регулируемым интервалом времени  $t_{\text{вкл}}$ , когда ключ замкнут. Коэффициент преобразования  $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$  обоих преобразователей зависит от коэффициента заполнения импульсной последовательности  $D$  (Duty ratio) [1]

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{D}{(1-D)},$$

$$\text{где } D = \frac{t_{\text{вкл}}}{t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}}} = \frac{t_{\text{вкл}}}{T}.$$

Поскольку преобразователи SEPIC и Cuck имеют одинаковый мгновенный рабочий цикл  $t_{\text{вкл}}$ , представленная на рис. 2 упрощенная топология конвертора с биполярным выходом на основе объединения обеих конфигураций SEPIC и Cuck, позволяет использовать активный коммутационный узел общим для обоих преобразователей. Входная секция конвертора является общей и выполнена по схеме повышающего DC/DC преобразователя на базе дросселя  $L1$  и активного ключа  $S1$ . Выходные секции конвертора различны для положительного и отрицательного выхода и отделены от входной секции разделительными конденсаторами  $C1$  и  $C2$ . Выходная секция отрицательного выходного напряжения, выполненная на элементах  $L2$  и  $VD1$ , соответствует топологии Cuck, а выходная секция положительного выходного напряжения, выполненная на элементах  $L3$  и  $VD2$ , соответствует топологии SEPIC.

Если полагать, что конверторы SEPIC и Cuck работают без потерь и в режиме непрерывной проводимости, а также величина пульсаций вы-

ходного тока и напряжения мала по сравнению с их соответствующими величинами постоянного тока, то для обоих выходов преобразователей, положительного и отрицательного, преобразование будет идентичное по абсолютной величине в соответствии с уравнением:

$$|U_{\text{вых}}| = |U_{\text{вх}}| \frac{D}{1-D} \quad \text{и} \quad I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} \frac{D}{1-D}.$$

Несомненным достоинством топологии конвертора SEPIC/Cuck (рис. 2) является симметричность обоих каналов преобразования, возможность обойтись единым для обоих каналов активным ключом  $S1$  и, что немаловажно, нижнего уровня [7], что заметно упрощает и удешевляет схему управления. Недостатки комбинации SEPIC/Cuck связаны с использованием пассивных ключей на диодах  $VD1$  и  $VD2$  (обычно диоды Шоттки), являющихся источником потерь в преобразователе и ухудшающими эффективность работы.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕРТОРОВ НА ДРОССЕЛЯХ БЕЗ МАГНИТНОЙ СВЯЗИ

Для анализа процессов и факторов, влияющих на эффективность работы преобразователя, использовалось схемотехническое моделирование в среде Electronics Workbench (EWB), что обусловлено спецификой поставленной задачи. Программа EWB отличается удобным, интуитивно понятным интерфейсом, имеется обширная библиотека аналоговых и цифровых электронных компонентов, в том числе мощных MOSFET транзисторов, что открывает возможность схемотехнического моделирования силовых устройств [3, 4].

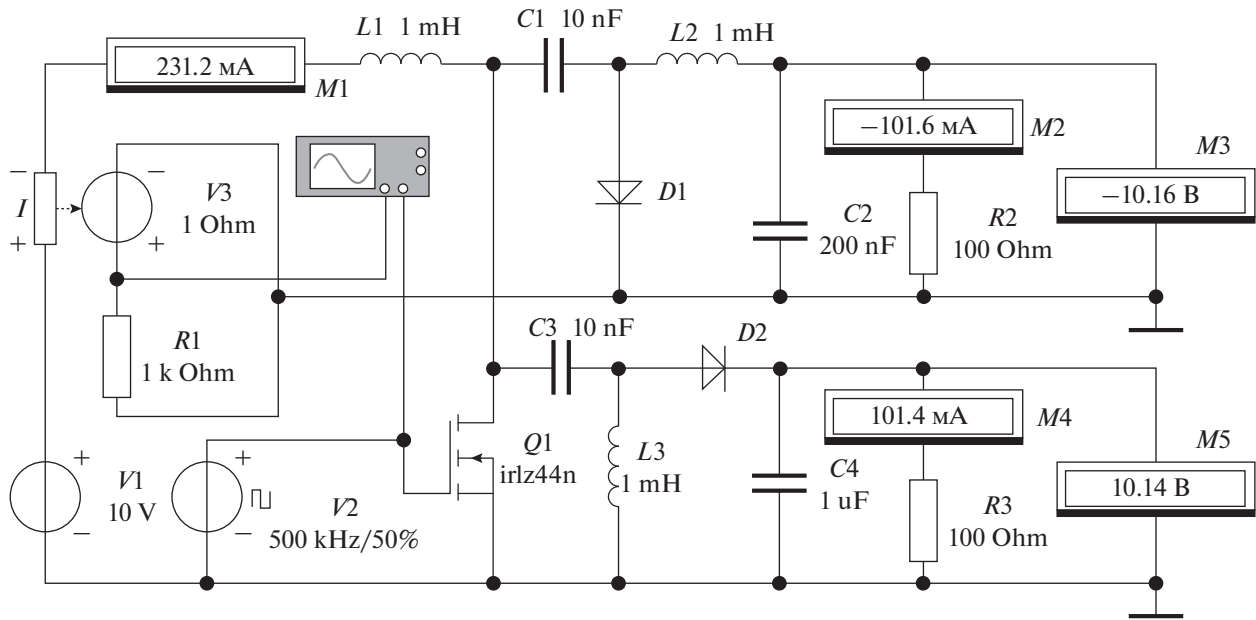


Рис. 3. Электрическая схема моделирования преобразователя SEPIC/Cuck.

В данной работе использованы результаты ранее опубликованных работ по исследованию силовых ключей MOSFET из библиотеки EWB [3, 4] в статическом и динамическом режиме и сопоставление их с соответствующими данными Data-sheet.

Схема для моделирования конвертора SEPIC/Cuck приведена на рис. 3. Ключ  $Q1$  (MOSFET) коммутирует ток входного источника питания  $I1$  с частотой тактовых импульсов, задаваемых генератором  $V2$ . Выходная секция преобразователя Cuck содержит элементы  $L2$ ,  $D1$ , а секция SEPIC –  $L3$ ,  $D2$ . Измерительными приборами  $M2$ – $M5$  выполняется контроль постоянных составляющих выходного тока и напряжения. Измерения пульсаций выходного напряжения проводилось осциллографом.

Входной ток контролировался двумя способами. Постоянная составляющая входного тока измерялась амперметром  $M1$ . Для контроля формы входного тока (пульсаций) использовался преобразователь ток-напряжения  $V3$  (Current Controlled Voltage Source), обеспечивающий преобразование тока, протекающего через датчик тока в напряжение на резисторе  $R1$  относительно “земли”, пропорциональное измеряемому току, которое регистрировалось осциллографом.

На рис. 4 приведены осциллограммы сигналов. Согласно Datasheet  $n$ -канальный транзистор  $Q1$  типа irlz44n из библиотеки ntnl (Infineon Technologies) имеет пороговое напряжение на затворе 2 В. Но для полного отпирания транзистора требуется напряжение на затворе порядка 10 В

[3], что обеспечивается установкой опций генератора импульсов  $V2$  (рис. 4а).

Выходное напряжение положительного и отрицательного канала преобразователя содержит постоянную составляющую выходного напряжения, измерение которого выполнялось вольтметрами  $M3$  ( $U_{\text{вых-}}$ ) и  $M5$  ( $U_{\text{вых+}}$ ). Форма пульсаций выходного напряжения (рис. 4в, г), регистрируемая осциллографом, зависела от тока нагрузки и емкости конденсатора выходного фильтра. Уровень пульсаций выходного напряжения на выходе преобразователя Cuck был значительно ниже, чем на выходе преобразователя SEPIC. Это объясняется особенностями функционирования преобразователя Cuck, когда выходной ток протекает непрерывно и одного направления, как на этапе замкнутого ключа, так и разомкнутого. Приблизительно одинаковый уровень пульсаций выходного напряжения порядка 30 мВ (при выходном напряжении  $U_{\text{вых}} = \pm 10$  В) достигался лишь подбором емкости конденсаторов фильтра:  $C2 = 200$  нФ для отрицательного выхода и  $C3 = 1$  мкФ для положительного выхода. Входной ток преобразователя также содержит две компоненты: постоянную составляющую 231 мА (амперметр  $M1$ ) значительно превышающую пульсацию тока около 20 мА (рис. 4б) на частоте тактовых импульсов. Спектр гармоник входного тока, полученный при моделировании в режиме Analysis Fourier, приведенный на рис. 5, показал, что основная шумовая компонента входного тока ( $\sim 8$  мА) сосредоточена в первой гармонике на частоте 500 кГц.

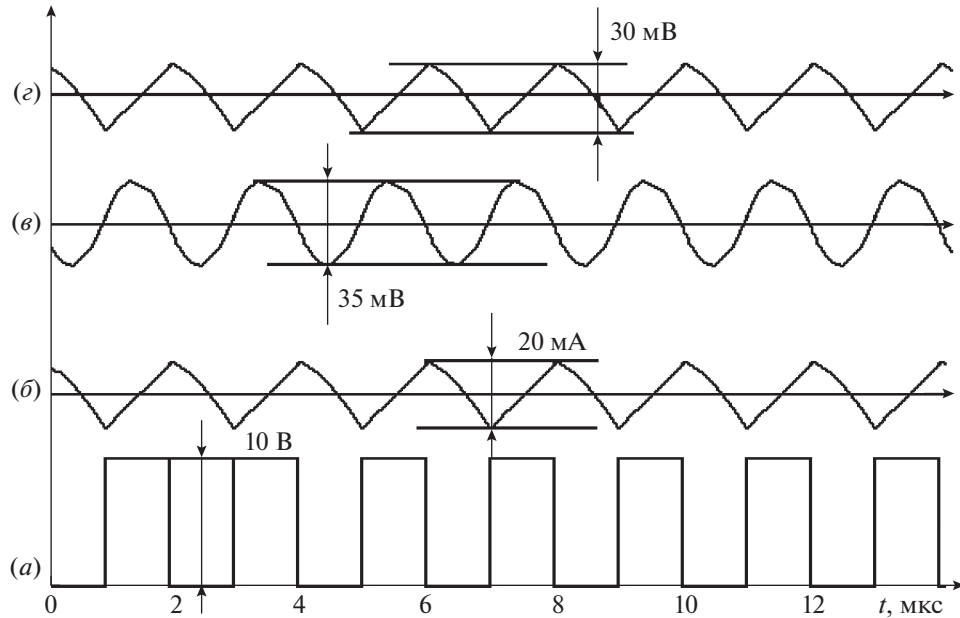


Рис. 4. Временные диаграммы: *a* – тактовые импульсы; *б* – пульсации входного тока. Пульсации выходного напряжения: *в* – канал SEPIC; *г* – канал Cuck.

Нагрузочные характеристики положительного ( $U_{\text{вых}+}$ ) и отрицательного ( $U_{\text{вых}-}$ ) каналов практически идентичны (рис. 6б). Дифференциальная рассогласованность выходного напряжения не превышала 10 мВ в широком диапазоне изменения тока нагрузки. Нагрузочная характеристика при токах нагрузки в диапазоне от 50 до 500 мА имеет падающий характер, соответствующий динамическому сопротивлению  $R_i = \left| \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_n} \right| \approx 15$  Ом. Изменением коэффициента заполнения импульсов  $D$  регулировалось выходное напряжение по обоим каналам, но и при этом дифференциальная рассогласованность каналов была менее 10 мВ (рис. 5б).

КПД в широком диапазоне выходных токов превышал 0.9 и лишь при малых токах нагрузки (менее 10 мА) снижался до 0.8. Это объясняется тем, что основные потери преобразования связаны с потерями на диодах  $VD1$  и  $VD2$ , точнее с “пяткой” на их ВАХ, величина которой практически не зависит от протекающего тока и при малых токах нагрузки существенно увеличивает потери.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕРТОРОВ НА МАГНИТОСВЯЗАННЫХ ИНДУКТИВНОСТЯХ

В последнее время производители индуктивных элементов расширили номенклатуру магнитосвязанных индуктивностей, намотанных на общий сердечник. Такое решение позволяет улучшить массогабаритные и стоимостные характеристики

преобразователя, а также повысить их КПД [5]. Эффективность конвертора SEPIC/Cuck, выполненного на магнитосвязанных индуктивностях, проверялась по схеме, показанной на рис. 7.

В качестве индуктивного элемента  $T1, T2$  использовался библиотечный компонент Nonlinear Transformer с широкими возможностями настройки параметров. Было выбрано одинаковое количество витков (20) первичной и вторичной обмотки. Особое внимание потребовала настройка индуктивностей рассеяния трансформатора. Недостаточная величина индуктивности рассеяния (менее  $10^{-6}$  Гн) приводила к существенным колебательным процессам на входном токе преобразователя и ошибкам моделирования. В остальных временные диаграммы и характеристики мало отличались от результатов исследования схемы на дискретных индуктивностях (рис. 3).

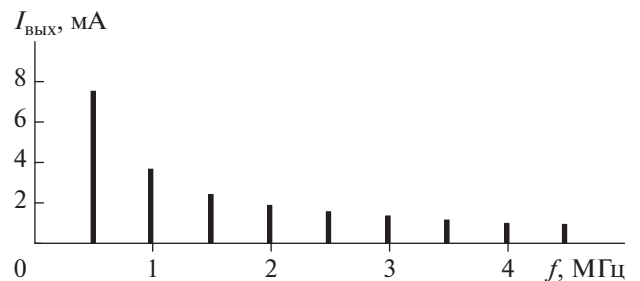
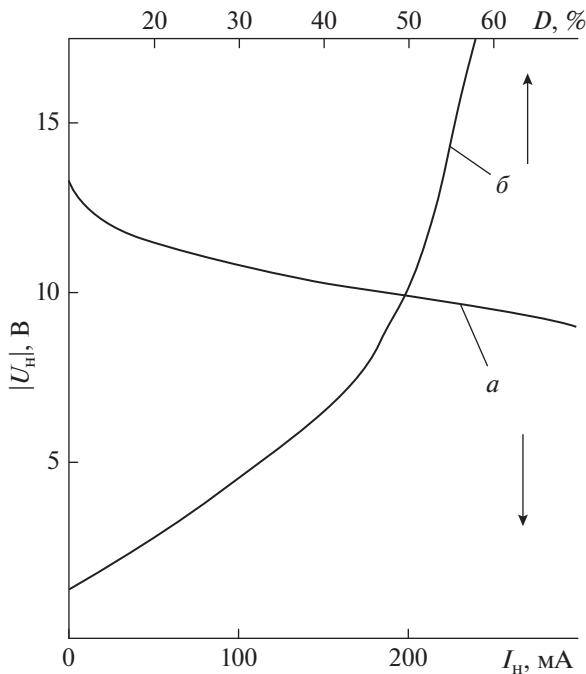


Рис. 5. Спектр гармоник входного тока.



**Рис. 6.** Характеристики конвертора SEPIC/Cuck, идентичные для положительного и отрицательного выхода: *a* – нагрузочная (зависимость выходного напряжения от тока нагрузки); *б* – регулировочная (зависимость выходного напряжения от коэффициента заполнения импульсов *D*).

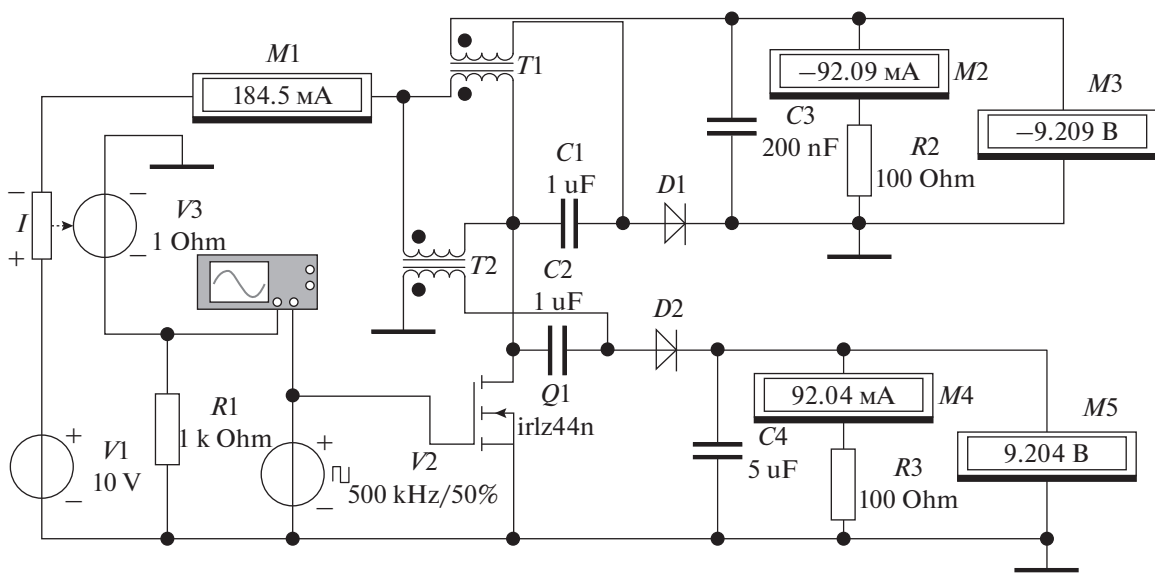
Практически все основные производители преобразовательной электроники предлагают свои схемотехнические решения конверторов SEPIC/Cuck на своей элементной базе, обычно с использованием контроллеров повышающих DC/DC преоб-

разователей [6, 7]. Один из вариантов конвертора с биполярным выходным напряжением SEPIC/Cuck на базе DC/DC контроллера ADP1613 (Analog Device) приведен рис. 8 [8].

Конвертор с биполярным выходным напряжением топологии SEPIC/Cuck представляет собой повышающий импульсный преобразователь постоянного напряжения с ШИМ управлением и внутренним *n*-канальным MOSFET ключом на ток до 2.0 А и внутренним генератором, частота которого задается цепочкой *C2, C3, R1* в диапазоне 300–1000 кГц. Регулировка и стабилизация выходного напряжения выполняется лишь по положительному каналу  $U_{\text{вых+}}$ , уровень которого устанавливается делителем в цепи отрицательной обратной связи *R2, R3*. Но так как отрицательный канал является зеркальной копией положительного, то поддерживается хорошая перекрестная стабилизация обоих выходов. При параметрах, приведенных на рис. 8, тактовая частота преобразования составляла 400 кГц, а выходное напряжение  $\pm 12$  В при выходном токе до 0.4 А.

Для снижения пульсаций выходного напряжения по каналу  $U_{\text{вых-}}$  используется дополнительный низкочастотный фильтр на элементах *L1, C7, C8*. Канал  $U_{\text{вых-}}$  имеет меньший уровень пульсаций по сравнению с каналом  $U_{\text{вых+}}$ , что дает возможность обойтись более простой фильтрацией лишь конденсатором *C6*. Резистор *R4* ограничивает величину входного тока преобразователя и защищает его при нештатных ситуациях.

В контроллере предусмотрена защита от перегрузки по току, отключение при перегреве. Входное напряжение  $U_{\text{вх}} = 2.5\text{--}20$  В.



**Рис. 7.** Схема моделирования гибридного конвертора SEPIC/Cuck на магнитосвязанных индуктивностях.



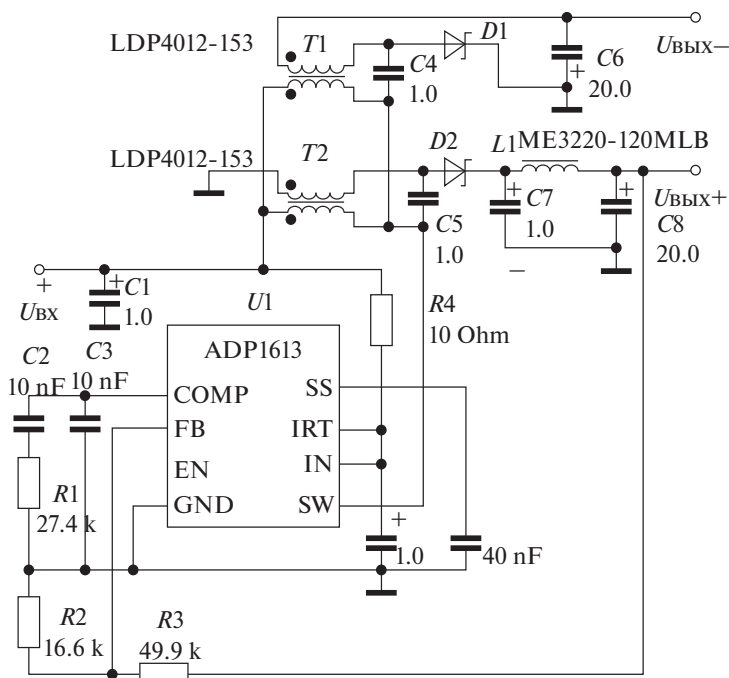


Рис. 8. Схема конвертора SEPIC/Cuck с биполярным выходным напряжением на контроллере ADP1613.

## ВЫВОДЫ

Моделирование энергетических характеристик (нагрузочных, регулировочных) и шумовых (спектр пульсаций входного тока) повышающе-понижающего преобразователя, построенного по топологии SEPIC/Cuck, подтвердило хорошую идентичность каналов положительного и отрицательного выходного напряжения. Дифференциальное различие напряжений обоих выходов при изменении тока нагрузки и коэффициента заполнения импульсов не превышало 0.1%. Входной ток практически постоянный с небольшим уровнем пульсаций (менее 2.5%) без коротких бросков тока, характерных для импульсных устройств. Основная энергия шума сосредоточена в первой гармонике на частоте преобразования и сравнительно просто ослабляется входным конденсатором фильтра. Моделирование нагрузочных и регулировочных характеристик не выявило заметного влияния схемотехники конвертора на дросселях без магнитной связи и с магнитной связью. Но при использовании магнитосвязанных индуктивностей недопустимо использовать трансформаторы с сильной магнитной связью между обмотками, у которых коэффициент связи между обмотками может достигать 0.99. Высокую эффективность преобразования, при низком уровне пульсаций входного тока, можно обеспечить лишь при использовании специальных магнитосвязанных индуктивностей с малым коэффициентом связи (индуктивность рассеивания не менее 1 мкГн).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П.* Источники вторичного электропитания. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 376 с.
2. *Ferrera M.B., Litrán Salvador P., Duran E., Marquez Jose Manuel Andujar.* A SEPIC-Cuk Converter Combination for Bipolar DC Microgrid Applications // Conference: March 2015, IEEE International Conference on Industrial Technology At: Seville Volume: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). P. 884–889.
3. *Бабенко В.П., Битюков В.К.* Имитационное моделирование процессов переключения силовых полевых транзисторов в программе Electronics Workbench // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 2. С. 199–205.
4. *Бабенко В.П., Битюков В.К., Кузнецов В.В., Симачков Д.С.* Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключках // Российский технологический журн. 2018. Т. 6. № 1. С. 20–39.
5. *Макаренко В.* О применении связанных катушек индуктивности в DC/DC-преобразователях, часть 1 // Электронные компоненты и системы. 2013. № 8. С. 24–29.
6. *Plasoianu Gheorghe.* SEPIC/Cuk converter sprouts second output // EDN Notes. May 1. 2017. <https://www.edn.com/sepic-cuk-converter-sprouts-second-output/>
7. *Designing a Boost-Buck(Cuk) Converter with the HV9930/AT9933* // Supertex Inc. AN-H51, 1–15 pp. <http://supertex-i.ru/doc/AT9933.pdf>
8. *Томпсетт Кевин.* Улучшенная топология для формирования биполярного питания из одного входного напряжения // Электронные компоненты. 2012. № 3. С. 67–73.