

УДК 621.3.08:621.3.089.2:621.311.6

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-9-19>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Энергетические и шумовые характеристики повышающе-понижающего преобразователя SEPIC с униполярным и биполярным выходом

В.П. Бабенко,
В.К. Битюков[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме. Повышающе-понижающий преобразователь, построенный по топологии SEPIC, имеет ряд преимуществ, которые выделяют его среди других конфигураций. Он позволяет из униполярного входного напряжения получить как униполярное, так и биполярное выходное напряжение с хорошей симметричностью между положительным и отрицательным выходными напряжениями, а также обеспечивает экономичность и схемотехническую простоту в униполярной и биполярной топологии за счет использования единственного переключателя, для управления которым возможно использовать существующие интегральные контроллеры повышающих преобразователей. Рассмотрены топологии повышающе-понижающего преобразователя SEPIC, построенного по традиционной схеме (с двумя катушками индуктивности) и по схеме на магнитосвязанных дросселях. Для анализа процессов и факторов, влияющих на эффективность работы преобразователя, выполнено схемотехническое моделирование в среде *Electronics Workbench*. Представлены результаты исследования импульсного преобразователя постоянного входного напряжения, построенного по повышающе-понижающей топологии SEPIC, в униполярное или биполярное выходное напряжение. Схемотехническое моделирование позволило уточнить характеристики коммутационных процессов, оценить уровень пульсаций входного тока и его спектральные характеристики, сформулировать рекомендации по выбору параметров элементов преобразователей и формированию сигналов управления. По результатам моделирования получены нагрузочные, регулировочные и шумовые характеристики преобразователя. Для преобразователя на дискретных и магнитосвязанных дросселях проведено исследование уровня симметричности положительного и отрицательного выходного напряжения. Дана оценка влияния индуктивностей рассеяния в преобразователях с магнитной связью индуктивных элементов. Приведены примеры практической реализации преобразователей, построенных по топологии SEPIC. Установлено, что сопротивление обмоток дросселя менее 0.5 Ом практически не сказывалось на КПД преобразователя, оставаясь порядка 0.9 в широком диапазоне токов нагрузки, а основным источником потерь преобразования являлся пассивный диодный ключ. Синхронные схемы преобразователей ряда производителей обладают большей эффективностью, но требуют более сложных контроллеров управления активными ключами с элементами защиты от сквозных токов.

Ключевые слова: DC/DC-преобразователь, повышающе-понижающий преобразователь, SEPIC, моделирование, схемотехника, униполярное и биполярное выходное напряжение, нагрузочная, регулировочная и шумовая характеристики

• Поступила: 20.01.2021 • Доработана: 26.01.2021 • Принята к опубликованию: 13.03.2021

Для цитирования: Бабенко В.П., Битюков В.К. Энергетические и шумовые характеристики повышающе-понижающего преобразователя SEPIC с униполярным и биполярным выходом. *Российский технологический журнал*. 2021;9(4):9–19. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-9-19>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Energy and noise characteristics of a SEPIC buck-boost converter with unipolar and bipolar output

Valery P. Babenko,
Vladimir K. Bitukov @

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
@ Corresponding author, e-mail: bitukov@mirea.ru

Abstract. Some advantages of the SEPIC buck-boost converter makes it stand out from other configurations. It makes possible to obtain from a unipolar input voltage both unipolar and bipolar output voltage with a good symmetry between positive and negative output voltages. It also provides efficient performance as well as circuit simplicity in unipolar and bipolar topology owing to the use of a single switch which can be operated by available integrated controllers of boost converters. The article considers the topologies of a SEPIC buck-boost converter built according to the traditional scheme (with two inductors) and according to the scheme on magnetically coupled chokes. To analyze the processes and factors affecting the converter operation efficiency, a circuit simulation has been done using the Electronics Workbench. The results of the investigation of a pulsed DC converter of input voltage to unipolar or bipolar output voltage using SEPIC buck-boost topology are presented. The circuit simulation enables to specify the switching process characteristics, to estimate the ripple level of the input current and its spectral characteristics, and to develop recommendations concerning the choice of parameters of converters elements and generation of control signals. Based on the simulation results, the load, control, and noise characteristics of the converter are obtained. The level of symmetry of positive and negative output voltage is investigated for the converter on discrete and magnetically coupled chokes. The assessment of the effect of leakage inductance on converters with magnetic coupling of inductive elements is given. Examples of practical implementation of converters built according to the SEPIC topology are shown. It is found that the resistance of the choke windings, which is less than 0.5 Ohm, has practically no effect on the efficiency of the converter, retaining the factor of about 0.9 in a wide range of load currents, while the main source of conversion losses is a passive diode switch. Synchronous converter circuits of a number of manufacturers are more efficient, but require more complex controllers for active switches with elements for protection against through currents.

Keywords: DC/DC converter, buck-boost converter, SEPIC, simulation, circuitry, unipolar/bipolar output voltage, load, regulation, noise characteristics

• Submitted: 20.01.2021 • Revised: 26.01.2021 • Accepted: 13.03.2021

For citation: Babenko V.P., Bitukov V.K. Energy and noise characteristics of a SEPIC buck-boost converter with unipolar and bipolar output. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(4):9–19 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-9-19>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный преобразователь, построенный по топологии SEPIC (Single Ended Primary Inductance Convert – преобразователь с несимметрично нагруженной первичной индуктивностью), является хорошо известной разновидностью DC/DC преобразователя. В своей стандартной форме он может вырабатывать выходное напряжение той же полярности, как большее входного, так и меньшее или равное ему [1, 2]. Это делает такой преобразователь особенно полезным в приложениях с батарейным питанием, где начальное напряжение выше, а к концу разряда первичного источника электропитания становится ниже требуемого стабилизированного выходного напряжения, когда возникает необходимость обеспечить аналоговые микроэлектронные устройства, датчики, операционные усилители двумя разнополярными напряжениями, близкими по номиналу и небольшими нагрузочными токами [3].

Повышающе-понижающие преобразователи также привлекают внимание специалистов по организации низковольтных микросетей постоянного тока униполярного и биполярного типа для питания электронных устройств с использованием возобновляемых источников электроэнергии, выходное напряжение или частота которых изменяется в широких пределах [4].

Кроме того, повышающе-понижающие топологии находят применение в корректорах коэффициента мощности при разработке компактных и эффективных источников вторичного электропитания, работающих при больших пиковых входных перегрузках [5].

Традиционно понижающие-повышающие преобразователи состоят из двух секций, входной и выходной, отделенных разделительным конденсатором. Схемотехника секций содержит элементы типового понижающего, повышающего и инвертирующего преобразователя. В более простых асинхронных топологиях конверторов используется один активный ключевой элемент – транзистор и один пассивный – диод. В синхронных топологиях оба ключа активные, за счет чего достигаются лучшие характеристики устройства. Однако управление несколькими транзисторными ключами верхнего и нижнего уровня с элементами защиты от сквозных токов усложняет схемотехнику, что, конечно, отражается на стоимости.

Для получения выходного биполярного напряжения из входного униполярного интересным решением, особенно в условиях, когда напряжение питания изменяется в значительных пределах, является комбинация униполярных конверторных преобразователей неинвертирующего SEPIC и

инвертирующего Cuck, у которых входная секция идентична топологии повышающего DC/DC преобразователя [6]. Однако такое решение не единственное. Аналогичными свойствами обладает схема биполярного варианта SEPIC, являющаяся предметом исследования данной статьи.

1. СХЕМОТЕХНИКА УНИПОЛЯРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ SEPIC

Неинвертирующий повышающе-понижающий преобразователь SEPIC, упрощенная схема которого приведена на рис. 1, представляет собой последовательно соединенные две секции, называемые входной и выходной, соответственно. Входная секция – это повышающий DC/DC преобразователь, содержащий дроссель $L1$ и активный ключ $S1$, а выходная секция представляет собой понижающий DC/DC преобразователь, содержащий в асинхронной топологии коммутируемый пассивный ключ $VD1$ (обычно диод Шоттки).

Разделительный («летающий») конденсатор $C1$, включенный между секциями, препятствует прохождению постоянного тока с входа на выход, а также участвует в накоплении энергии и ее перекачке из входной секции в выходную. Процесс преобразования электрической энергии состоит из двух сменяющих друг друга фаз: фазы накопления энергии в дросселе $L1$ входной секции, когда ключ $S1$ замкнут, и фазы перекачки запасенной в дросселе $L1$ энергии в выходную секцию ($L2$, $VD1$, $C_{\text{вых}}$) и нагрузку, когда ключ $S1$ разомкнут [2].

В первой фазе работы преобразователя, когда ключ $S1$ замкнут (положение *a*), к дросселю приложено входное напряжение $U_{\text{вх}}$, которое на интервале времени $t_{\text{вкл}}$ вызывает протекание через обмотку дросселя $L1$ линейно нарастающего тока I_{L1}^a (на рис. 1 показан сплошной линией) и накопление электромагнитной энергии в магнитном поле дросселя $L1$. При этом диод $VD1$ обратно смещен положительным напряжением $U_{\text{вых}}$, приложенным к катоду $VD1$, что поддерживает его в запертом состоянии. «Летающий» конденсатор $C1$, заряженный на предыдущей фазе с полярностью, показанной на рис. 1, 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, когда ключ $S1$ разомкнут (положение *b*), на интервале времени $t_{\text{выкл}}$ ЭДС самоиндукции дросселя $L2$ открывает диод $VD1$. Током I_{L2}^b (пунктирная линия) энергия дросселя $L2$ через открытый диод перекачивается в выходной конденсатор $C_{\text{вых}}$ и заряжает его.

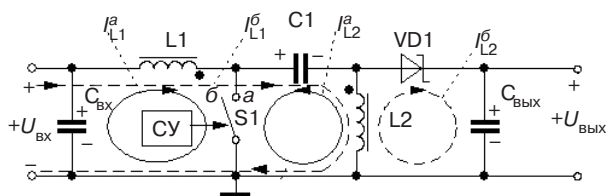


Рис. 1. Топология неинвертирующего повышающе-понижающего преобразователя SEPIC

Управление выходным напряжением и его стабилизацией выполняется схемой управления (СУ), формирующей импульсы управления активным ключом S1 с постоянным периодом T повторения импульсов

$$T = t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}} = 1/f, \quad (1)$$

где f – частота следования импульсов; $t_{\text{вкл}}$ – время, когда ключ замкнут; $t_{\text{выкл}}$ – время, когда ключ разомкнут.

Коэффициент преобразования преобразователя $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ зависит от коэффициента заполнения импульсной последовательности D (Duty ratio) [7]

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{D}{(1-D)}, \quad (2)$$

где

$$D = \frac{t_{\text{вкл}}}{t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}}} = \frac{t_{\text{вкл}}}{T}. \quad (3)$$

Дроссели L1 и L2 в схеме рассматриваемого преобразователя могут быть выполнены как без магнитной связи между собой (рис. 1), так и с магнитной связью, когда магнитный сердечник является общим для двух и более индуктивностей (рис. 2).

Токи в фазах накопления (сплошная линия) и перекачки энергии (пунктирная линия), показанные на рис. 2, поясняют принцип работы преобразователя SEPIC на магнитосвязанных дросселях. В последнее время номенклатура электронных компонент пополнилась дросселями на значительные токи с магнитосвязанными обмотками на едином сердечнике по цене лишь немного выше, чем у сопоставимых одиночных дросселей. Причем, магнитосвязанная катушка индуктивности не только занимает меньшую площадь, но и для получения того же пульсирующего тока через обмотку индуктивности требует вдвое меньше величины индуктивности, требуемой для SEPIC с двумя отдельными дросселями [6]. Обмотки меньшей индуктивности имеют меньшее активное сопротивление, что, в свою очередь, снижает потери мощности при сохранении малых габаритных размеров [8].

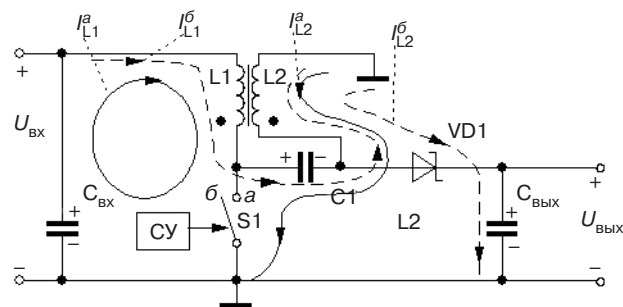


Рис. 2. Топология повышающе-понижающего преобразователя SEPIC на магнитосвязанных дросселях

Многие характеристики повышающе-понижающего преобразователя SEPIC на магнитосвязанных дросселях, например, потери на переключение транзисторов, энергетические, нагрузочные, регулировочные и шумовые характеристики преобразователя требуют дополнительного исследования [9].

Топология SEPIC выделяется рядом других преимуществ по сравнению с традиционными схемами DC/DC преобразователей понижающего и повышающего типа:

- емкостное разделение входа и выхода делает устройство менее чувствительным к короткому замыканию на выходе;
- при разомкнутом ключе S1 напряжение на выходе преобразователя SEPIC уменьшается до нуля;
- в преобразователе SEPIC используется минимальное количество активных компонентов, которые управляются простым контроллером, что удешевляет конструкцию и позволяет сэкономить место на плате;
- топологию SEPIC отличает пониженный шум при высокочастотном переключении, что снижает проблемы с электромагнитными помехами.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ УНИПОЛЯРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ SEPIC

Для анализа процессов и факторов, влияющих на эффективность работы преобразователя, выполнено 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 [10].

В данной работе использованы результаты ранее опубликованных работ по исследованию силовых ключей MOSFET из библиотеки *EWB* [11, 12]

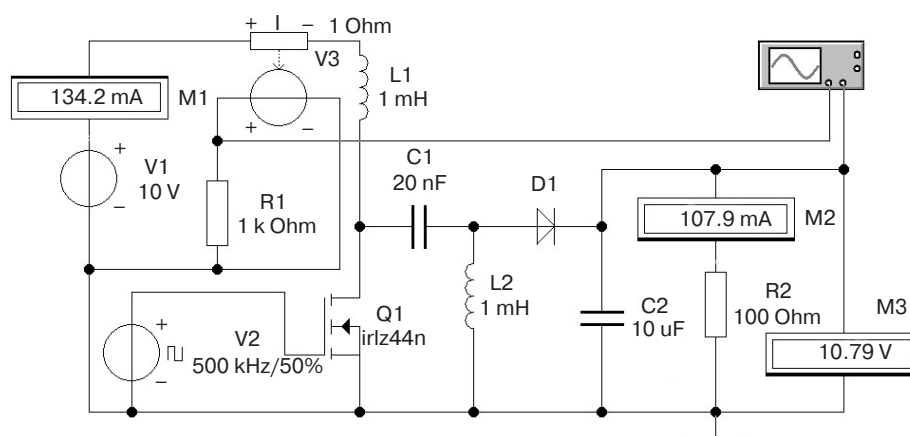


Рис. 3. Схема для моделирования униполярного преобразователя SEPIC на несвязанных дросселях

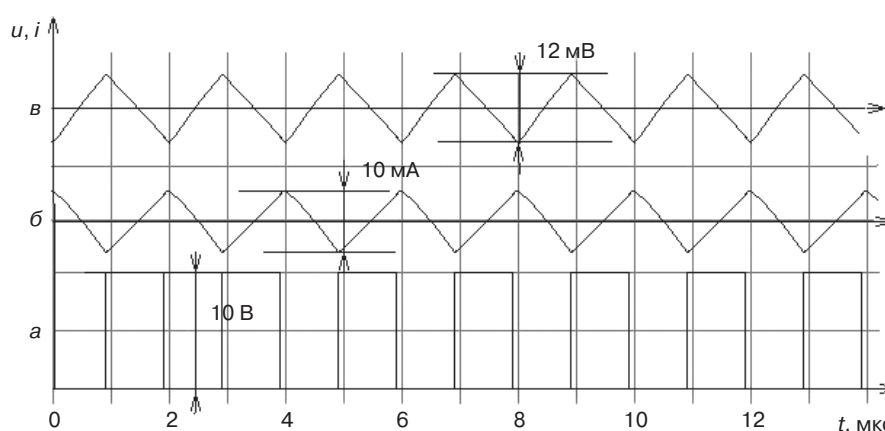


Рис. 4. Временные диаграммы: а – тактовые импульсы; б – пульсации входного тока; в – пульсации выходного напряжения

в статическом и динамическом режимах и сопоставление их с соответствующими данными Datasheet.

Схема для моделирования униполярного конвертора SEPIC на несвязанных дросселях приведена на рис. 3. Ключ Q1 (MOSFET) коммутирует ток входного источника питания V1 с частотой тактовых импульсов, задаваемых генератором V2. Выходная секция преобразователя содержит элементы L2, D1 и нагружена на резистор R2, зашунтированный конденсатором фильтра C2. Измерительными приборами M2 и M3 выполнялся контроль постоянных составляющих выходного тока и напряжения. Измерение 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-напряжение 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 NTRNL (Infineon Technologies) имеет пороговое напряжение на затворе, равное 2 В. Но для полного отпирания транзистора требуется напряжение на затворе порядка 10 В [10], что обеспечивается установкой опций генератора импульсов V2 (рис. 3).

Выходное напряжение содержит постоянную составляющую выходного напряжения около $U_{\text{ВЫХ}} = 10 \text{ В}$, измерение которого выполнялось вольтметром M3. Форма пульсаций выходного напряжения (график в рис. 4), регистрируемая осциллографом, зависела от тока нагрузки и емкости конденсатора выходного фильтра. При параметрах, указанных на схеме, уровень пульсаций выходного напряжения порядка $U_{\text{ВЫХ}} = 12 \text{ мВ}$ (при выходном напряжении около $U_{\text{ВЫХ}} = 10 \text{ В}$). Входной ток преобразователя также содержит две компоненты: постоянную $I_{\text{ВХ}} =$ и пульсирующую $I_{\text{ВХ}} \sim$. Установлено, что постоянная составляющая входного тока $I_{\text{ВХ}} =$, измеряемая амперметром M1, равна 134 мА, а пульсирующая составляющая входного тока $I_{\text{ВХ}} \sim$ на частоте тактовых импульсов не превышала 10 мА (график б рис. 4).

Спектр гармоник входного тока I_{BX} , полученный при моделировании в режиме Analysis Fourier, приведен на рис. 5. Результаты моделирования показали, что амплитуда первой гармоники пульсирующего входного тока относительно невелика (3.5 мА) по сравнению с постоянной составляющей входного тока (134 мА).

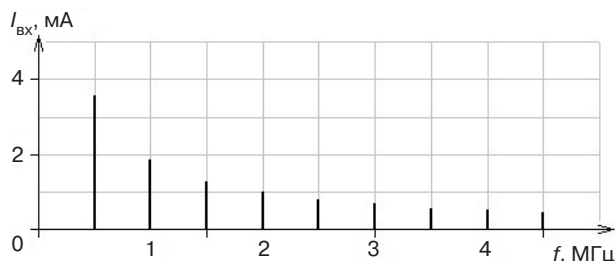


Рис. 5. Спектр гармоник входного тока

Основная шумовая компонента входного тока сосредоточена в первой гармонике (рис. 5) на частоте коммутации $f = 500$ кГц, что упрощает требования к входному фильтру.

К сожалению, рассмотренный DC/DC преобразователь, построенный по топологии SEPIC, требует наличия двух катушек индуктивности, что увеличивает массогабаритные параметры источника вторичного электропитания.

Эффективность униполярного SEPIC с магнитосвязанными дросселями исследовалась на схеме, приведенной на рис. 6.

При моделировании магнитосвязанных индуктивностей L1 и L2 использован компонент EWB – T1 Nonlinear Transformer, позволяющий оптимизировать индуктивности рассеивания обмоток. Количество витков обмоток выбрано одинаковое и равное 10. В остальном схема похожа на предыдущую, показанную на рис. 3. При сильной связи между обмотками, когда в опциях индуктивность

рассеивания каждой обмотки выбиралась менее 1 мкГн, на входном токе преобразователя по сигналу с преобразователя ток-напряжение V3, контролируемому осциллографом, наблюдались короткие импульсы входного тока значительной амплитуды, указывающие на колебательные переходные процессы при переключении. При индуктивности рассеивания более 5 мкГн импульсные пульсации входного тока исчезали и форма тока I_{BX} приобретала вид, показанный на графике б рис. 4. Остальные осциллограммы также соответствовали ранее рассмотренным диаграммам (рис. 4).

Нагрузочная характеристика, представляющая зависимость выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ от силы тока нагрузки I_H , показана на кривой а рис. 7. Видно, что при токах нагрузки в диапазоне от 50 до 500 мА она имеет падающий характер, соответствующий выходному (динамическому) сопротивлению преоб-

$$R_i = \left| \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta I_H} \right| \approx 15 \text{ Ом.}$$

Регулировочная характеристика (зависимость выходного напряжения от коэффициента заполнения импульсов D), приведенная на кривой б рис. 7, получена вариацией параметра Duty Cycle генератора импульсов V2, соответствует с достаточной точностью выражению (2).

3. СХЕМОТЕХНИКА БИПОЛЯРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ SEPIC

Используя свойства магнитосвязанных дросселей, схему импульсного преобразователя напряжения с топологией SEPIC путем добавления нескольких пассивных компонентов можно преобразовать в схему биполярного симметричного источника напряжения, упрощенная схема которого показана на рис. 8.

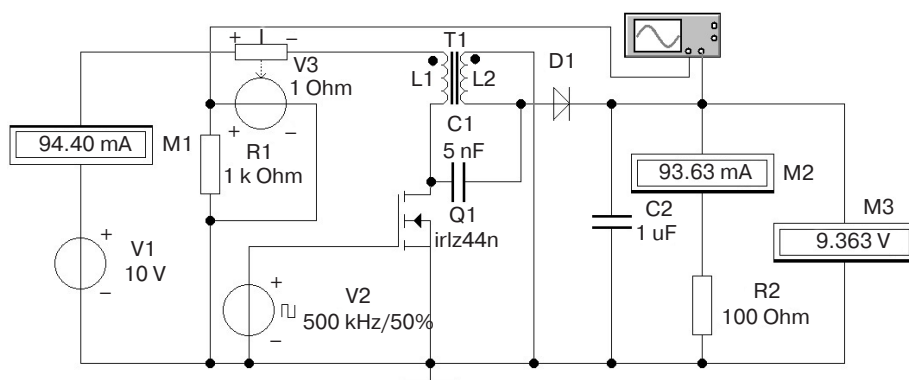


Рис. 6. Схема моделирования униполярного преобразователя SEPIC на магнитосвязанных индуктивностях

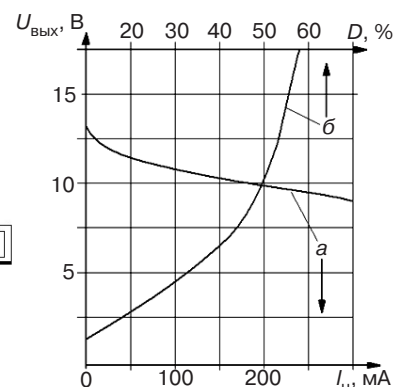


Рис. 7. Характеристики униполярного преобразователя SEPIC: а – нагрузочная; б – регулировочная

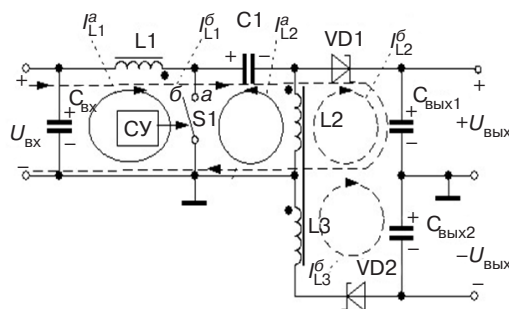


Рис. 8. Топология биполярного преобразователя SEPIC

Как и в схеме униполярного SEPIC, в рассматриваемой схеме при замыкании ключа S1 током I_{L1}^a электромагнитная энергия накапливается в дросселе L1. При этом конденсатор C1 разряжается через замкнутый ключ S1 и перекачивает энергию в дроссели L2 и L3, выполненные на общем магнитном сердечнике. В этой фазе диоды VD1 и VD2 обратны смещены напряжением на выходных конденсаторах $C_{ВЫХ1}$ и $C_{ВЫХ2}$. Как и в предыдущих схемах, токи обозначены: при замкнутом ключе S1 – сплошной линией, а при разомкнутом – пунктиром.

При размыкании ключа энергия, запасенная в дросселях L2 и L3, через диодные ключи VD1 и VD2 перекачивается в биполярную нагрузку и конденсаторы $C_{ВЫХ1}$ и $C_{ВЫХ2}$ выходных фильтров.

Основным преимуществом рассматриваемой конфигурации является возможность реализовать биполярный канал постоянного тока только с одним управляемым переключателем и, что немаловажно, нижнего уровня. Это упрощает и удешевляет реализацию его схемы управления, позволяя использовать богатый ассортимент микросхем управления повышающих DC/DC преобразователей, выпускаемыми фирмами Texas Instruments¹, National

¹ URL: www.ti.com, дата обращения 11.01.2021. [URL: www.ti.com. Accessed January 11, 2021.]

Semiconductor², Maxim-Dallas³, Linear Technology⁴ и On Semiconductor⁵.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ SEPIC

Схема моделирования биполярного повышающе-понижающего DC/DC преобразователя, построенного по топологии SEPIC, приведена на рис. 9.

Дроссели L2 и L3 являются магнитосвязанными и выполнены на базе компонента EWB Nonlinear Transformer T1 с одинаковыми обмотками с количеством витков, равным 10. При моделировании в опциях трансформатора можно варьировать сопротивление обмоток, причем величина сопротивления менее 0.5 Ом не влияла на выходное напряжение. Нагрузкой неинвертирующего выхода является резистор R2 с измерительными приборами M2 и M3, а инвертирующего – R3 с измерительными приборами M4 и M5. Ключ Q1 (n-канальный MOSFET) коммутирует ток входного источника питания V1 с частотой тактовых импульсов 500 кГц, задаваемых генератором V2. Входная секция включает транзисторный ключ Q1 и дроссель L1. Выходная секция положительного канала $U_{ВЫХ+}$ выполнена на элементах L2, D1, C2. Выходная секция отрицательного канала $U_{ВЫХ-}$ – на элементах L3, D2, C3. Входная секция отделена по постоянному току от выходных секций разделительным конденсатором C1. Измерительными приборами M2...M5 выполняется контроль постоянных составляющих выходного тока и напряжения. Форма пульсаций входного

² URL: www.national.com, дата обращения 11.01.2021. [URL: www.national.com. Accessed January 11, 2021.]

³ URL: www.maxim-ic.com, дата обращения 11.01.2021. [URL: www.maxim-ic.com. Accessed January 11, 2021.]

⁴ URL: www.linear.com, дата обращения 11.01.2021. [URL: www.linear.com. Accessed January 11, 2021.]

⁵ URL: www.onsemi.com, дата обращения 11.01.2021. [URL: www.onsemi.com. Accessed January 11, 2021.]

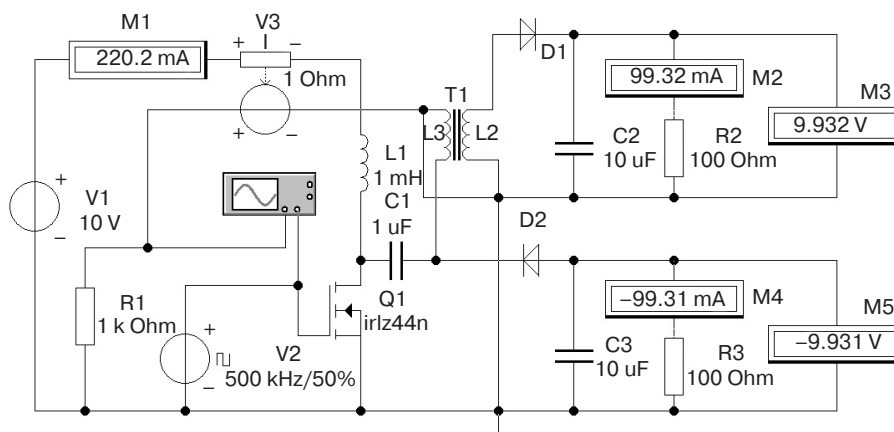


Рис. 9. Схема моделирования биполярного преобразователя SEPIC на магнитосвязанных индуктивностях

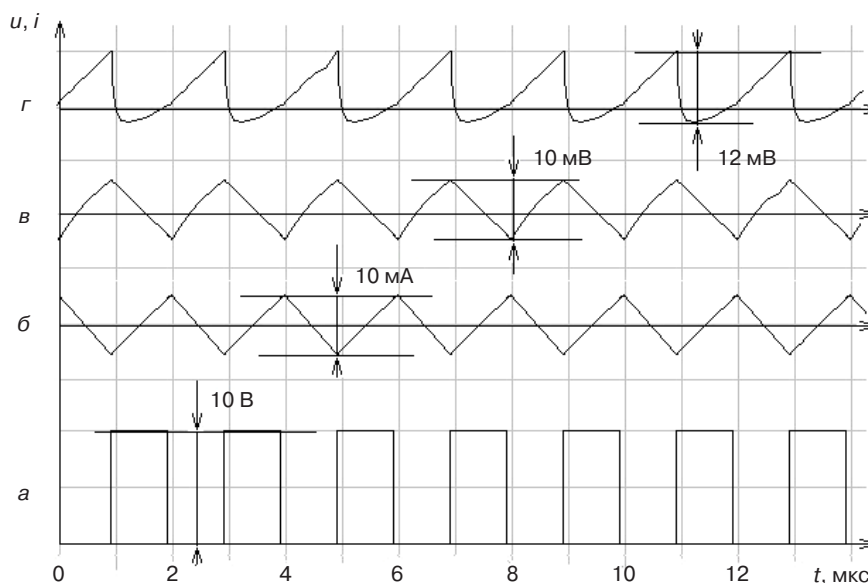


Рис. 10. Осциллограммы биполярного преобразователя SEPIC:

а – тактовые импульсы; б – пульсации входного тока; в – пульсации выходного напряжения положительного канала $+U_{\text{Вых}}$; г – пульсации выходного напряжения отрицательного канала $-U_{\text{Вых}}$

тока, как и в предыдущей схеме, контролировалась осциллографом с помощью преобразователя ток-напряжение V3.

На рис. 10 показаны осциллограммы тока и напряжений, иллюстрирующие работу биполярного преобразователя SEPIC на магнитосвязанных индуктивностях. Уровень пульсаций входного тока $I_{\text{ВХ} \sim}$ (график б рис. 10) в значительной степени зависел от индуктивности дросселя L1.

При небольшой индуктивности дросселя L1 ($L1 = 0.1$ мГн) величина пульсаций входного тока составляла $I_{\text{ВХ} \sim} = 100$ мА, что является заметной частью постоянной составляющей входного тока $I_{\text{ВХ}} = 220$ мА (вольтметр M1). Но при увеличении индуктивности дросселя L1 в десять раз (до $L1 = 1$ мГн) пульсации входного тока снижались также в десять раз до $I_{\text{ВХ} \sim} = 10$ мА. При этом оставались неизменными как входной ток $I_{\text{ВХ}}$, так и выходное напряжение положительного и отрицательного канала. Уровень пульсаций выходного напряжения (рис. 10, графики в, г) определялся сопротивлениями резисторов нагрузки R2 и R3 и емкостью выходных фильтров C2 и C3.

Нагрузочная и регулировочная характеристики биполярного преобразователя полностью соответствовали характеристикам униполярного преобразователя, приведенным на рис. 7.

Биполярная схема преобразователя SEPIC (рис. 9) при изменении силы тока нагрузки в широких пределах имеет хорошую симметричность между двумя выходными напряжениями $+U_{\text{ВХ}}$ и $-U_{\text{ВХ}}$. Разность абсолютных значений выходного напряжения не превышала 0.01 В, что соответствовало относительной симметричности 0.01%. Следует учитывать, что обе индуктивности L2 и L3 должны иметь хорошую

магнитную связь и малую индуктивность рассеивания, чтобы избежать «звона» на обмотках трансформатора T1.

Эффективность биполярного преобразователя в значительной степени определялась потерями на диодах VD1 и VD2. В широком диапазоне выходных токов КПД составлял около 90%, несколько понижаясь до 80% с уменьшением токов нагрузки менее 10 мА. Сопротивление обмоток трансформатора менее 0.5 Ом практически не сказывалось на величине КПД преобразователя.

5. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ SEPIC

Преобразователи SEPIC, как и обычные понижающие-повышающие аналоги, поставляются рядом фирм-поставщиков электронных компонент на основе модульных микросхем управления питанием. Эти модули объединяют ключевые компоненты импульсного стабилизатора в одну микросхему, что упрощает инженерное проектирование схем. Обычно такие модули не включают в себя катушки индуктивности и конденсаторы. Поэтому при проектировании устройств с SEPIC целесообразно выполнять в полном объеме указания производителя по применению соответствующих внешних компонент.

Для конфигураций униполярного преобразователя SEPIC (рис. 11) Linear Technology рекомендует модуль маломощного повышающего DC/DC преобразователя LT3467, который обеспечивает преобразование входного напряжения $U_{\text{ВХ}} = 2.4 \dots 16.0$ В в выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = 3 \dots 40$ В при максимальном токе 1.1 А и КПД около 90% [13].

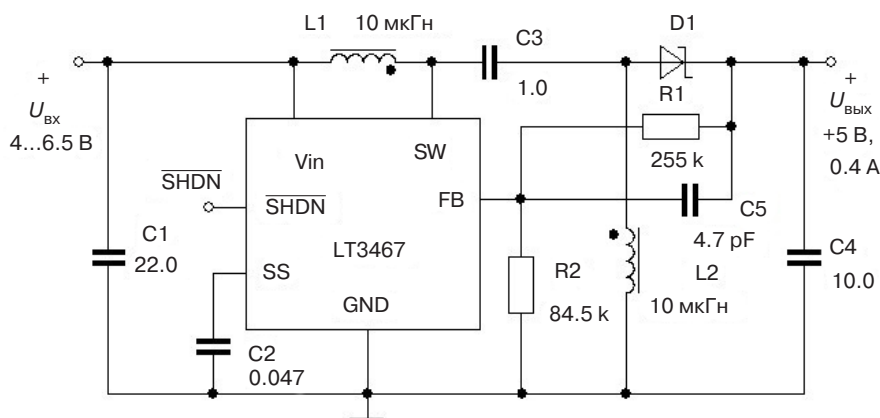


Рис. 11. Практическая реализация униполярного повышающе-понижающего преобразователя SEPIC

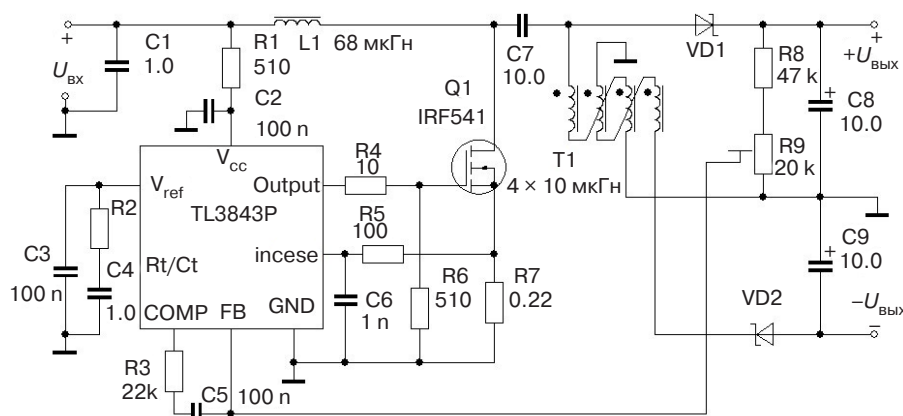


Рис. 12. Практическая реализация биполярного преобразователя SEPIC

Выходное напряжение регулируется выбором коэффициента деления резистивного делителя R1R2 в цепи отрицательной обратной связи. Устойчивая работа преобразователя во всем диапазоне выходных напряжений поддерживается корректирующим конденсатором C5.

Аналогичное решение построения униполярного SEPIC предлагает Texas Instruments на базе контроллера TPS61170 [6, 14]. Этот модуль имеет похожий диапазон выходного напряжения от 3 до 38 В при входном напряжении от 3 до 18 В. Устройство работает на фиксированной частоте 1.2 МГц и может обеспечить на выходе ток до 1.2 А при КПД около 90%.

В работе [15] рассмотрен вариант построения биполярного преобразователя с топологией SEPIC на базе ШИМ контроллера повышающего преобразователя TL3843P (Texas Instruments), схема включения которого приведена на рис. 12.

Внешний ключевой транзистор Q1 имеет токовое управление за счет сигнала протекания тока стока через резистор R7. Стабилизация и регулировка выходного напряжения по обоим каналам осуществляется за счет отрицательной обратной связи с резистивного делителя R8R9 выходного напряжения $+U_{\text{ВЫХ}}$. Несмотря на то, что стабилизация

реализована только в положительном канале, в обоих каналах в широком диапазоне выходных токов обеспечивается хорошая перекрестная стабилизация обоих выходных напряжений. Несимметрия выходных напряжений не превышала 0.1%. В качестве магнитосвязанных индуктивностей использован типовой четырехобмоточный трансформатор T1 с индуктивностью каждой обмотки 10 мкГн.

ВЫВОДЫ

Среди многообразия преобразователей для устройств с батарейным питанием повышающе-понижающий преобразователь SEPIC имеет ряд преимуществ, которые выделяют его среди других конфигураций:

- позволяет из униполярного входного напряжения получить как униполярное, так и биполярное выходное напряжение с хорошей симметричностью между положительным и отрицательным выходными напряжениями. Разность абсолютных значений выходного напряжения при выходном токе до 300 мА не превышала 0.01 В, что соответствовало относительной симметричности положительного и отрицательного выходов 0.01%;

- обеспечивает экономичность и простоту в униполярной и биполярной топологии за счет использования единственного переключателя, для управления которым можно использовать существующие интегральные контроллеры повышающих преобразователей;
- проведенное моделирование позволило уточнить влияние параметров на нагрузочную, регулировочную и шумовую характеристики преобразователей. Измеренное выходное сопротивление каждого канала преобразователя составляло 15 Ом при изменении тока нагрузки до 0.3 А;
- низкий уровень пульсаций входного тока, который является основным источником шумов и помех, составляет порядка 10 мА при входном токе 220 мА, из них лишь 3.5 мА приходится на первую гармонику частоты коммутации. Это упрощает задачу входной фильтрации, снижает величину емкости входного фильтра;

- характеристики униполярного и биполярного преобразователя практически идентичны при реализации на дросселях многообмоточных магнитосвязанных и однообмоточных без магнитной связи;
- моделирование показало, что сопротивление обмоток дросселя менее 0.5 Ом практически не сказывалось на величине КПД преобразователя, оставаясь порядка 0.9 в широком диапазоне токов нагрузки, а основным источником потерь преобразования являлся пассивный диодный ключ. Синхронные схемы преобразователей ряда производителей обладают большей эффективностью, но требуют более сложных контроллеров управления активными ключами с элементами защиты от сквозных токов.

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. Лукин А.В., Кастров М.Ю., Малышков Г.М. и др. *Преобразователи напряжения силовой электроники*. М.: Радио и связь; 2004. 416 с. ISBN 5-256-01680-6
2. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. *Источники вторичного электропитания*: 4-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра-Инженерия; 2020. 376 с.
3. Иоффе Д. Разработка импульсного преобразователя напряжения с топологией SEPIC. *Компоненты и технологии*. 2006;9(62):126–132.
4. Ferrera M.B., Duran E., Marques J.M.A., Litran S.P. A SEPIC-Cuk combination converter for bipolar DC microgrid applications. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2015, p. 884–889. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125209>
5. Кастров М.Ю., Соловьев И.Н. Трехфазный выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности на основе преобразователя SEPIC, работающего в режиме непрерывных токов. *Практическая силовая электроника*. 2010;4(40):5–12.
6. Falin J. Designing DC/DC converters based on SEPIC topology. *Analog Applications Journal*. 2008;4Q:18–21. URL: <https://www.ti.com/lit/an/slyt309/slyt309.pdf>
7. Томсетт К. Улучшенная топология для формирования биполярного питания из одного входного напряжения. *Электронные компоненты*. 2012;3:67–73.
8. Макаренко В. О применении связанных катушек индуктивности в DC/DC-преобразователях. *Электронные компоненты и системы*. 2013;8:24–29. URL: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/8_2013/Inductors_in_rising_DC-DC_part1_EKIS_8_2013-3.pdf
9. Беттен Д. Преимущества DC/DC-преобразователей топологии SEPIC со связанными индуктивностями. *Журнал по применению аналоговых компонентов*. 2011;2Q:14–17. URL: <https://www.ti.com/lit/an/rust018/rust018.pdf>

REFERENCES

1. Lukin A.V., Kastrov M.Yu., Malyshkov G.M., et al. *Preobrazovateli napryazheniya silovoi elektroniki (Power electronics voltage converters)*. Moscow: Radio i Svyaz'; 2004. 416 p. (in Russ.). ISBN 5-256-01680-6
2. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Istochniki vtorichnogo elektropitaniya (Secondary power supply sources)*: 4th ed. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2020. 376 p. (in Russ.).
3. Ioffe D. Development of a ripple voltage converter using SEPIC topology. *Komponenty i Tekhnologii = Components & Technologies*. 2006;9(62):126–132 (in Russ.).
4. Ferrera M.B., Duran E., Marques J.M.A., Litran S.P. A SEPIC-Cuk combination converter for bipolar DC microgrid applications. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2015, p. 884–889. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125209>
5. Kastrov M.Yu., Solov'ev I.N. Three-phase rectifier with power factor correction based on SEPIC converter operating in continuous current mode. *Prakticheskaya Silovaya Elektronika = Practical Power Electronics*. 2010;4(40):5–12 (in Russ.).
6. Falin J. Designing DC/DC converters based on SEPIC topology. *Analog Applications Journal*. 2008;4Q:18–21. Available from URL: <https://www.ti.com/lit/an/slyt309/slyt309.pdf>
7. Tomsett K. Improved topology to generate bipolar power from a single output voltage. *Elektronnye Komponenty = Electronic Components*. 2012;3:67–73 (in Russ.).
8. Makarenko V. Application of related inductors in the DC/DC converters. *Elektronnye Komponenty i Sistemy = Electronic Components and Systems*. 2013;8:24–29 (in Russ.). Available from URL: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/8_2013/Inductors_in_rising_DC-DC_part1_EKIS_8_2013-3.pdf
9. Betten J. Benefits of a coupled-inductor SEPIC converter. *Zhurnal po primeneniyu analogovykh komponentov = Analog Applications Journal*. 2011;2Q:14–17 (in Russ.). Available from URL: <https://www.ti.com/lit/an/rust018/rust018.pdf>

10. Бабенко В.П., Битюков В.К. Имитационное моделирование процессов переключения силовых полевых транзисторов в программе Electronics Workbench. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(2):199–205. <https://doi.org/10.1134/S0033849419020025>
11. Бабенко В.П., Битюков В.К., Кузнецов В.В., Симачков Д.С. Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключках. *Российский технологический журнал*. 2018;6(1):20–39. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39>
12. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Схемотехническое моделирование DC/DC-преобразователей. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2016;14(11):69–82.
13. Keeping S. The SEPIC option for battery-power management. Digi-Key Electronics. URL: <https://www.digikey.gr/en/articles/the-sepic-option-for-battery-power-management>
14. Raghavendra K., Zeb K., Muthusamy A., et al. A comprehensive review of DC–DC converter topologies and modulation strategies with recent advances in solar photovoltaic systems. *Electronics*. 2020;9(1):31. <https://doi.org/10.3390/electronics9010031>
15. Plasoianu Gh. Два варианта преобразователя SEPIC. *Радиолоцман*. 2019;96:64–66.
10. Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of switching of high-power FETs using the Electronics Workbench Software. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(2):176–181. <https://doi.org/10.1134/S1064226919020025> [Babenko V.P., Bityukov V.K. Imitatsionnoe modelirovanie protsessov pereklyucheniya silovykh polevykh tranzistorov v programme Electronics Workbench. *Radiotekhnika i elektronika = Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(2):199–205 (in Russ.).]
11. Babenko V.P., Bityukov V.K., Kuznetsov V.V., Simachkov D.S. Simulation of static and dynamic losses in MOSFET switches. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(1):20–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39>
12. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. Circuit simulation of DC/DC converters. *Informatsionno-Izmeritel'nye i Upravlyayushchie Sistemy = Information-measuring and Control Systems*. 2016;14(11):69–82 (in Russ.).
13. Keeping S. The SEPIC option for battery-power management. Digi-Key Electronics. Available from URL: <https://www.digikey.gr/en/articles/the-sepic-option-for-battery-power-management>
14. Raghavendra K., Zeb K., Muthusamy A., et al. A comprehensive review of DC–DC converter topologies and modulation strategies with recent advances in solar photovoltaic systems. *Electronics*. 2020;9(1):31. <https://doi.org/10.3390/electronics9010031>
15. Plasoianu Gh. Two variations on the SEPIC converter. *Radiolotsman = Radio Locman*. 2019;96:64–66 (in Russ.).

Об авторах

Бабенко Валерий Павлович, к.т.н., доцент, кафедра радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vbabenko16091940@gmail.com.

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

About the authors

Valery P. Babenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Wave Processes and Technology, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vbabenko16091940@gmail.com.

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