

23. Report ITU-R M.2171 “Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace”. International Telecommunication Union. Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2171-2009> (accessed 01 August 2023).
21. Report SM.2486-0 “Use of commercial drones for ITU-R spectrum monitoring tasks”. International Telecommunication Union. Available at: <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2486-2021> (accessed 01 August 2023).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Антипин Борис Маврович – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: boris.antipin@sut.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; к.т.н.; доцент кафедры телевидения и метрологии.

Виноградов Евгений Михайлович – e-mail: vinogradov_em@sut.ru; к.т.н.; доцент; старший научный сотрудник НИЛ «Радиоконтроля и ЭМС».

Симонина Ольга Александровна – e-mail: olga.simonina@sut.ru; к.т.н.; доцент кафедры радиосвязи и вещания.

Федоров Сергей Леонидович – e-mail: sergey.fedorov@sut.ru; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой телевидения и метрологии.

Antipin Boris Mavrovich – Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education the Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications; e-mail: boris.antipin@sut.ru; Saint Petersburg, Russia; cand. of eng. sc.; associate professor of the department of television and metrology.

Vinogradov Evgeniy Mikhaylovich – e-mail: vinogradov_em@sut.ru; cand. of eng. sc.; associate professor senior researcher at the research laboratory «Radio control and electromagnetic compatibility».

Simonina Olga Alexandrovna – e-mail: olga.simonina@sut.ru; cand. of eng. sc.; associate professor of the department of radio communication and broadcasting.

Fedorov Sergey Leonidovich – e-mail: sergey.fedorov@sut.ru; cand. of eng. sc.; associate professor; head of the department of television and metrology.

УДК 621.341.572

DOI 10.18522/2311-3103-2023-5-204-213

В.В. Буллака, С.В. Гулаков, А.Ю. Головин, Д.С. Мироненко

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ДВУНАПРАВЛЕННЫЙ DC-AC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Представлено схемное решение и описание работы двунаправленного DC-AC преобразователя с трансформаторной изоляцией. В основе схемы лежат принципы, применяемые в резонансных LLC преобразователях и двойных активных мостах (DAB, Dual Active Bridge), но в предлагаемой конструкции используется биполярное построение инвертора со стороны переменного напряжения, а также совмещенное частотное и широтно-импульсное управление. Это дает возможность реализовать ряд функций в одном преобразователе, используя небольшое число коммутаций в силовой цепи. Так, возможна работа в режиме источника бесперебойного питания (преобразование постоянного напряжения АКБ в переменное 220 В 50 Гц); инвертора связи с сетью альтернативных источников (солнечных панелей); зарядного устройства (работающего как от сети, так и от солнечных панелей); сварочного инвертора для полуавтоматической сварки (причем сварку можно осуществлять как от сети, так и от АКБ); стабилизатора переменного напряжения; преобразователя постоянного напряжения (для «прикуривания» АКБ с разными напряжениями или степенью заряженности). Устройство с перечисленным набором функций может найти применение, например, в полевых условиях – для организации электропитания различных нагрузок, зарядки аккумуляторов, а также проведения мелких сварочных работ.

Схемное решение преобразователя позволяет при применении соответствующих алгоритмов управления работать с близким к единице коэффициентом мощности на стороне переменного напряжения. Это дает возможность обеспечить работу в «слабой» сети – от автономного генератора, при большой длине сетевого шнура и т.д.

Резонансный преобразователь; двойной активный мост; источник бесперебойного питания; сварочный инвертор; зарядное устройство; двунаправленный преобразователь.

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, A.Y. Golovin, D.S. Mironenko

UNIVERSAL BIDIRECTIONAL DC-AC CONVERTER

The paper presents a schematic solution and a description of the operation of a bidirectional DC-AC converter with transformer isolation. The topology is based on the principles used in resonant LLC converters and dual active bridges (DAB), but the proposed design uses bipolar inverter topology on the AC voltage side, as well as combined frequency and pulse width control. This makes it possible to implement a number of functions in a single converter using a small number of commutations in the power circuit. So, it is possible to implement the following operating modes: an uninterruptible power supply (conversion of a battery DC voltage to a 220 V 50 Hz AC); a grid-tie inverter for alternative sources (solar panels); a battery charger (operating both from the mains and from solar panels); a welding inverter for semi-automatic welding (and welding can be carried out both from mains, and from the battery); an AC voltage regulator; a DC/DC voltage converter (for “cranking up” batteries with different voltages or state-of-charge). A device with the listed set of functions can be used, for example, in the field – for organizing power supply of various loads, charging batteries, as well as performing minor welding operations. The circuit topology of the converter allows, when using appropriate control algorithms, to work with a power factor close to unity on the AC voltage side. This makes it possible to ensure operation in a “weak” grid – from an autonomous generator, with a large length of the power cord, etc.

Resonant converter; dual active bridge; uninterruptible power supply; welding inverter; battery charger; bidirectional converter.

Введение. В полевых условиях (сельскохозяйственные работы в поле, археологические и другие экспедиции, работа вдали от стационарных источников электрической энергии и т.п.), а также в аварийных ситуациях питание электрических потребителей осуществляется, как правило, от мобильных бензиновых или дизель-генераторов, источников бесперебойного питания (ИБП) с аккумуляторными батареями (АКБ), солнечных панелей, укомплектованных инвертором. Подключение к таким источникам энергии мощных электроприёмников (электроинструмент, сварочное оборудование), которые характеризуются резкими изменениями мощности во время работы, приводит к нарушению их работы.

К недостаткам генератора можно отнести производимый им акустический шум, а также необходимость пополнять запас топлива. ИБП имеет значительно меньший уровень шума, но требует периодической подзарядки АКБ. К тому же зачастую ИБП ограничен по мощности, что затрудняет обеспечение питания относительно мощных электроприёмников. Между тем, при решении задач ремонта, восстановления военной, сельскохозяйственной, другой техники в полевых условиях часто возникает необходимость проведения сварочных работ. При этом далеко не всегда есть возможность обеспечить качественное электрическое питание сварочного оборудования. Известные же технические решения реализации сварочного процесса от АКБ [1–3] отличаются высокой стоимостью и необходимостью применения специализированных АКБ с соответствующим зарядным устройством.

Цель исследования. Разработка и создание универсального DC-AC преобразователя, который позволит работать в различных режимах:

- ◆ ИБП – преобразование напряжения АКБ в 220 В 50 Гц;

- ◆ зарядка АКБ от сети или солнечных панелей; сварка от сети. При этом в режиме работы от сети переменного напряжения должна обеспечиваться гальваническая изоляция выходных низковольтных цепей;
- ◆ инвертор связи солнечных панелей с сетью;
- ◆ стабилизатор переменного напряжения;
- ◆ DC/DC режим – сварка от АКБ; «прикуривание».

Универсальный двунаправленный DC-AC преобразователь. Для реализации цели разработан универсальный преобразователь, с помощью которого можно реализовать сварочные работы с питанием как от электрической сети, так и от бортовых аккумуляторов техники; обеспечить питание электрических нагрузок переменным напряжением 220 В от аккумуляторов; выполнять функции пускозарядного устройства. Продолжительность работ при этом не ограничивается емкостью аккумуляторов – достаточно запустить двигатель, чтобы заработал генератор, компенсирующий их разряд. При этом в режиме работы от сети переменного напряжения обеспечивается гальваническая изоляция выходных низковольтных цепей. Известные решения двунаправленных DC/AC преобразователей [4–6] либо не имеют гальванической развязки, либо содержат два каскада преобразования с промежуточным звеном постоянного тока.

Функция ИБП (формирование напряжения 220 В 50 Гц от АКБ) предлагаемого преобразователя позволит обеспечить бесперебойное питание электроприемников, используя в качестве первичных источников энергии бортовые АКБ техники или другие автономные источники энергии (например, солнечные панели) [7, 8].

Универсальный преобразователь может выполнять функцию пуско-зарядного устройства, что позволит производить зарядку АКБ и облегчать запуск двигателей внутреннего сгорания техники. Причем зарядка АКБ может осуществляться как от переменного напряжения 220 В 50 Гц, так и от другой АКБ (т.е. в режиме «прикуривания», но с контролем тока заряда и напряжения конца заряда). За счет применения соответствующих алгоритмических решений в системе управления предлагаемый универсальный преобразователь может обеспечить близкий к единице коэффициент мощности со стороны входа переменного напряжения, что позволит эффективно работать в слабой электрической сети или от автономного генератора небольшой мощности. Схема силовой части преобразователя представляет собой доработанный вариант решения, опубликованного в работах [9, 10], и представлена на рис. 1.

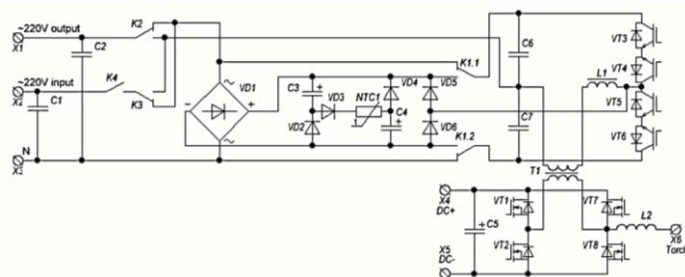


Рис. 1. Схема силовой части разработанного преобразователя

Устройство имеет вход и выход переменного напряжения 220 В с неразрывной нейтралью (клеммы X1 – X3), разъем для подключения АКБ (клеммы X4, X5) и разъем для подключения сварочной горелки в режиме сварки от АКБ (клемма X6).

Для выбора требуемого режима работы преобразователя осуществляют коммутацию элементов схемы с помощью реле K1 – K4, обеспечивающую нужную ее конфигурацию. Перечень режимов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состояние реле				Режим работы
K1	K2	K3	K4	
0	0	0	0	ИБП – преобразование напряжения АКБ в 220 В 50 Гц
1	0	0	1	Зарядка АКБ от сети или солнечных панелей; сварка от сети
0	0	0	1	Инвертор связи солнечных панелей с сетью
0	1	0	1	Стабилизатор переменного напряжения, понижение
0	0	1	1	Стабилизатор переменного напряжения, повышение
0	1	0	0	DC/DC режим – сварка от АКБ; «прикуривание»

Режимы работы устройства. Проанализируем перечисленные режимы работы устройства с приведением соответствующих схемных конфигураций силовой части в соответствии с состояниями реле K1 – K4.

Схема силовой части преобразователя в режиме ИБП приведена на рис. 2.

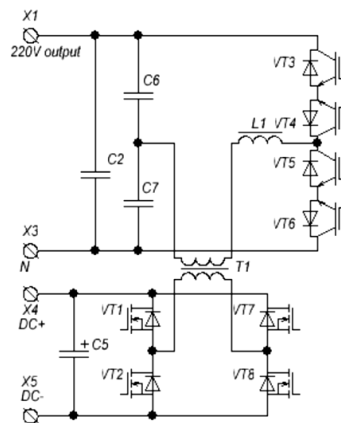


Рис. 2. Силовая часть в режиме ИБП

Следует сразу отметить, что такая же конфигурация используется и в режиме инвертора связи солнечных панелей с сетью – они подключаются к X4, X5 вместо АКБ, а вход 220 В (X2) соединяется с выходом 220 В (X1) за счет включения реле K4.

Напряжение АКБ поступает на мостовой преобразователь VT1VT2VT7VT8 и преобразуется в высокочастотное напряжение прямоугольной формы с изменяемым коэффициентом заполнения, которое подается на низковольтную обмотку силового высокочастотного трансформатора T1.

Высоковольтная часть преобразователя состоит из двуполярного полумоста VT3VT4VT5VT6, нагруженного на последовательно соединенные высоковольтную обмотку T1 и резонансный контур LC6C7. Конденсатор C2 является блокировочным по высокой частоте, снижает уровень высокочастотной составляющей в выходном напряжении и практически устраняет влияние нагрузки на резонансную частоту контура LC6C7 ($C2 \gg C6+C7$). Полумост VT3VT4VT5VT6 работает с фиксированным коэффициентом заполнения 50% и синхронизирован с низковольтным мостом VT1VT2VT7VT8. Эквивалентная схема замещения по высокой частоте может быть представлена так, как показано на рис. 3.

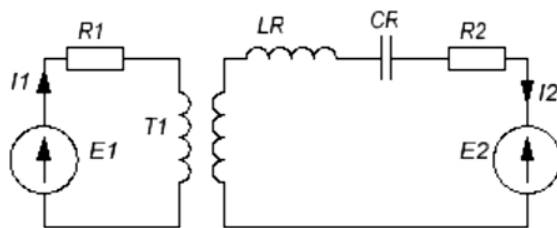


Рис. 3. Схема замещения силовой части преобразователя в режиме ИБП

Здесь E_1 – выходное напряжение моста VT1VT2VT7VT8, E_2 – выходное напряжение полумоста VT3VT4VT5VT6, LR – резонансная индуктивность (L_1 и индуктивность рассеяния T_1), CR – резонансная емкость ($C_6 + C_7$, учитывая, что $C_2 \gg C_6$ и $C_2 \gg C_7$), R1, R2 – суммарные активные сопротивления элементов. Формы напряжений на резонансной цепи показаны на рис. 4.

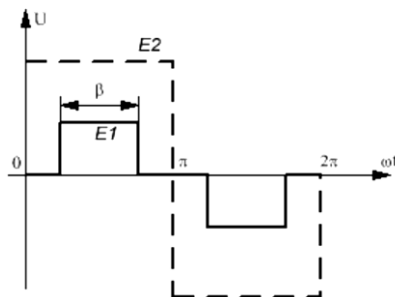


Рис. 4. Формы напряжений при работе в режиме ИБП

Для оценки поведения системы воспользуемся расчетом по основной гармонике, считая, что частота переключения равна резонансной частоте контура LRCR, а добротность контура велика, так что гармониками частоты переключения можно пренебречь.

Амплитуда основной гармоники сигнала E_2 составляет

$$E_{2m} = U_{C2} \cdot \frac{2}{\pi}$$

и зависит только от мгновенного напряжения на C_2 . Амплитуда основной гармоники E_1 зависит от напряжения АКБ U_{DC} и от коэффициента заполнения, представленного на рис. 4 углом β :

$$E_{1m} = U_{DC} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sin \frac{\beta}{2}.$$

Фазы основной гармоники E_1 и E_2 совпадают – это неременное условие корректной работы преобразователя.

Изменяя угол β за счет широтно-импульсного управления мостом VT1VT2VT7VT8, можно управлять амплитудой E_{1m} . Если пренебречь током намагничивания T_1 (что не внесет существенных погрешностей, поскольку он составляет 1 – 3 % рабочего тока), то, учитывая работу на резонансной частоте (полное сопротивление контура LRCR близко к 0), можно утверждать, что источники E_1 и E_2 соединены параллельно посредством T_1 и токи I_1 и I_2

совпадают по фазе с основными гармониками E1 и E2. Амплитуды же токов будут определяться разностью E1 и E2 с учетом коэффициента трансформации K_{T1} трансформатора T1.

Как было сказано выше, амплитуда E2 связана с напряжением на C2. Если $K_{T1} \cdot E_{1m} > E_{2m}$, то E1 будет работать с положительной мощностью (т.е. источником), а E2 – с отрицательной (т.е. приемником). Это приведет к росту напряжения на C2. И наоборот. Это дает возможность, изменяя угол β , получить на C2 переменное напряжение необходимой – синусоидальной формы. Для изменения знака напряжения на C2 меняется знак E1.

Таким образом, в режиме ИБП для получения выходного напряжения амплитудой U_M и угловой частотой Ω система управления изменяет угол β следующим образом:

$$\beta(t) = 2 \sin^{-1} \frac{|U_M \sin(\Omega t)|}{U_{DC} \cdot 2K_{T1}}$$

Для стабилизации выходного напряжения при изменении нагрузки имеется обратная связь по выходному напряжению и программная коррекция величины U_M .

Конфигурация силовой части преобразователя позволяет также обеспечить режим синхронной работы с сетью, т.е. выполнять функции инвертора связи с сетью альтернативных источников электроэнергии, например, солнечных панелей [11–16]. При этом меняется алгоритм управления – инвертор работает с обратной связью по мгновенному току сети и имитирует по отношению к сети отрицательное активное сопротивление. Это позволяет поддерживать высокий коэффициент мощности, близкую к нулю реактивную мощность и низкий уровень высших гармоник сетевого тока [17–21].

На высоковольтной части преобразователя – биполярном полумосте VT3VT4VT5VT6 и дросселе L1 – может быть построен бесступенчатый стабилизатор переменного напряжения. Схема силовой части в этом режиме показана на рис. 5.

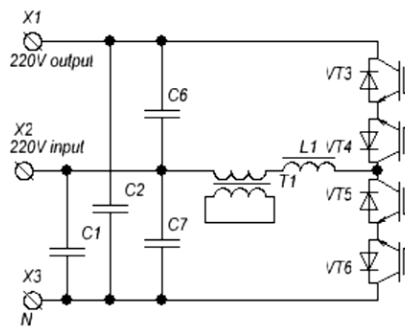


Рис. 5. Силовая часть в режиме стабилизатора переменного напряжения

Низковольтная часть в этом случае не используется, транзисторы VT2, VT8 (рис. 1) постоянно открыты и закорачивают низковольтную обмотку трансформатора T1. Управление коэффициентом передачи осуществляется путем изменения коэффициента заполнения сигналов управления биполярным полумостом. При этом напряжения на клеммах X1 и X2 относительно нейтрали сети X3 связаны соотношением $U_{X2} = U_{X1} \cdot D$, где D – коэффициент заполнения. Блокировочные конденсаторы C1 и C2 предотвращают проникновение компонент тока с частотой переключения в сеть и в цепь нагрузки. Следует отметить, что переключение режимов понижения или повышения напряжения осуществляется

электромеханическим способом – с помощью реле К2 и К3 (рис. 1). При этом функции клемм X1 и X2 меняются местами. Для исключения частых переключений реле при входном напряжении, близком к номинальному, программно введен гистерезис.

Предлагаемый универсальный преобразователь возможно использовать в качестве низковольтного DC/DC преобразователя, что может быть полезным, например, для решения задач сварки в полевых условиях от АКБ или заряда одной АКБ от другой (с разными напряжениями). В DC/DC режиме используется один полумост низковольтной части схемы, как показано на рис. 6.

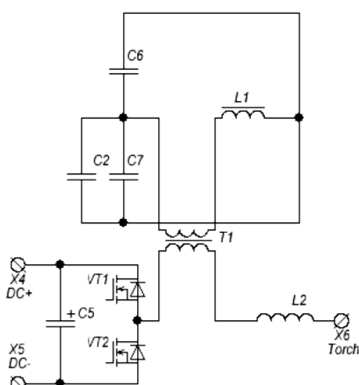


Рис. 6. Силовая часть в режиме сварки от АКБ

Все транзисторы высоковольтной части (VT3–VT6, рис. 1) открыты; трансформатор Т1 при работе находится в глубоком насыщении; АКБ-источник подключается к клеммам X4 и X5. Нагрузка подключается к клеммам X6 и X5. В ее качестве может выступать сварочная горелка для полуавтоматической сварки или другая АКБ (с меньшим напряжением). Следует также отметить, что в режиме «перекачки» заряда между АКБ ток может иметь оба знака, т.е. можно от низковольтной АКБ (подключенной к X6, X5) заряжать другую АКБ с большим напряжением (подключенную к X4, X5).

Как режим сварки, так и режим зарядки АКБ могут быть реализованы и при питании от сети переменного напряжения 220 В. Схема силовой части в этом режиме приведена на рис. 7.

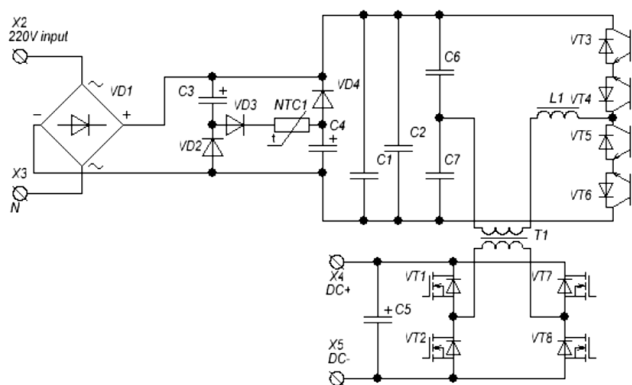


Рис. 7. Силовая часть в режиме сварки от сети, а также в режиме заряда АКБ от сети или солнечных панелей

Поскольку для обеспечения сварочного процесса необходимо постоянно поддерживать ионизацию дугового промежутка, в схеме необходимо предусмотреть накопитель, который обеспечит ток дуги в моменты прохождения сетевого напряжения через ноль. Исходя из этих соображений во входную цепь введен выпрямитель по схеме «valley-fill» [22, 23] на элементах VD1VD2C3VD3NTC1VD4C4. Особенностью этой схемы является то, что большую часть времени (когда модуль мгновенного напряжения сети больше половины амплитуды) нагрузка питается непосредственно от сети через мост VD1. Когда же модуль мгновенного напряжения сети меньше амплитуды, нагрузка питается от параллельно соединенных конденсаторов C3 и C4 через диоды VD2 и VD4. Заряжаются C3 и C4, будучи соединенными последовательно, через цепочку VD3NTC1, когда напряжение сети переходит через максимум. Термистор NTC1 установлен для ограничения тока заряда C3 и C4 при начальном включении преобразователя в сеть.

Остальная часть схемы представляет собой LLC преобразователь, принцип его работы и управления им были описаны выше при рассмотрении работы в режиме ИБП. Система управления обеспечивает контроль выходного тока и напряжения и управление ими в зависимости от задачи – сварка или заряд АКБ.

Заряд АКБ может быть также осуществлен от источника постоянного тока (например, солнечных панелей). При этом алгоритм управления предусматривает режим поиска точки максимальной мощности (MPPT – Maximum Power Point Tracking) [23] для обеспечения максимальной эффективности использования солнечной энергии. Реализован алгоритм типа PAO (Perturb And Observe), т.е. внесение возмущения и наблюдение с дальнейшим движением в сторону увеличения отбираемой мощности.

Заключение. Исходя из вышесказанного, наличие описанного универсального преобразователя в полевых условиях позволит обеспечить: питание электроприемников от бортовых АКБ транспортных средств; выполнение мелких ремонтных работ, связанных со сваркой; заряд АКБ от генератора или альтернативных источников (при их наличии); стабилизацию напряжения для питания устройств, требовательных к качеству напряжения (например, медицинское оборудование). Следует отметить возможность параллельного соединения нескольких преобразователей для увеличения мощности. При этом преобразователи соединяются между собой последовательной шиной передачи данных, один из них назначается ведущим, остальные – ведомыми.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0008.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Welding with lithium-ion battery technology. Available at: <https://www.lorch.eu/en/solutions/innovations/battery-technology/>.
2. Welding inverter with built-in battery AccuMax 150. Available at: <https://www.castolin.com/ru-RU/product/accumax-150>.
3. Fronius AccuPocket 150 Battery-Powered Stick Welding Machine. Available at: <https://shopweldingsupplies.com/products/froniusaccupocket-battery-powered-150-stick-welding-machine#shopifyproduct-reviews>.
4. Aniket Dhere, Barkha Shete, Tanay Patil, Aranake V.M. Bidirectional AC-DC Power Converter, *VJER-Vishwakarma Journal of Engineering Research*, December 2018, Vol. 2, Issue 4.
5. Weilun Warren Chen. Bidirectional Three-Phase AC-DC Power Conversion Using DC-DC Converters And A Three-Phase Unfolder: A PhD. In *Electrical Engineering diss*. Logan, Utah State University, 2017. DOI: <https://doi.org/10.26076/64f2-457f>.

6. *Balaji Veerasamy*. Bidirectional AC/DC Converter with Improved Power Factor and Reduced DC Ripple for Battery and Photovoltaic Applications: Doctoral Thesis, Nagoya Institute of Technology. – 2015.
7. *Arau J., et al.* A Novel Uninterruptible Power Supply System With Active Power Factor Correction, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, May 2002, Vol.17, No. 3, pp. 405-412. DOI: 10.1109/TPEL.2002.1004248.
8. *Burlaka V.V., Podnebennaya S.K., and Gulakov S.V.* Residential Uninterruptible Power Supply System with Renewable Energy Sources and Battery Pack, in *Proc. IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2018, pp. 125-128. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559498.
9. *Burlaka V., Gulakov S., Podnebennaya S., Kudinova E., Savenko O.* Bidirectional single stage isolated DC-AC converter, In *proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week), Kharkiv, 05-10 October 2020*. Kharkiv: National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2020, pp. 343-346. DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250107
10. *Burlaka V., Gulakov S., Podnebennaya S., Kudinova E., Plakhtii O., Nerubatskyi V.* An Universal Bidirectional Three-Port DC/DC/AC Converter With Isolated AC Port, In *proceedings of 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, 26-28 August 2021*. IEEE Catalog Number: CFP21K03-USB, pp. 367-372. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575381.
11. *Abdel-Rahim O. and Abdelhameed E.* Ultimate transformerless boost DC-DC converter for renewable energy applications, *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*, 2021, Vol. 2, No. 2, pp. 63-69.
12. *Subramaniam U., Vavilapalli S., Padmanaban S., Blaabjerg F., Holm-Nielsen J.B., and Almakhles D.* A hybrid PV-battery system for ON-grid and OFF-grid applications-controller-in-loop simulation validation, *Energies*, 2020, Vol. 13, No. 3, p. 755. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13030755>.
13. *Omar M.A. and Mahmoud M.M.* Design and simulation of a PV system operating in grid-connected and stand-alone modes for areas of daily grid blackouts, *International Journal of Photoenergy*, 2019, Vol. 2019, Article ID 5216583, 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/5216583>.
14. *Jadhav S., Devdas N., Nisar S., and Bajpai V.* Bidirectional DC-DC converter in solar PV system for battery charging application, in *Proceedings of the 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET)*, IEEE, Mumbai, India, 2018, January, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICSCET.2018.8537391.
15. *Baharudin N.H., Mansur T.M.N.T., Hamid F.A., Ali R., and Misrun M.I.* Topologies of DC-DC converter in solar PV applications, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2017, Vol. 8, No. 2, p. 36. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v8.i2.pp368-374>.
16. *Burlaka V., Gulakov S. and Podnebennaya S.* Low-Cost Transformerless Grid-Tie Inverter For Photovoltaic System, *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 334-338. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764200.
17. *Gowtham Raj T. and Saranya S.K.* Harmonic reduction using L-Z source inverter and voltage source inverter for distributed generation system, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 2018, No. 1, pp. 280-283.
18. *Patel N., Kumar A. and Gupta N.* Three-Phase Single-Stage VSC Controlled Solar Photovoltaic System with Harmonic Filtering Capability Applied to DG, *2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*. Singapore, 2019, pp. 238-242. DOI: 10.1109/ICPEA.2019.8818509.
19. *Behera M.P., Ray P.K. and Beng G.H.* Single-phase grid-tied photovoltaic inverter to control active and reactive power with battery energy storage device, *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. Singapore, 2016, pp. 1900-1904. DOI: 10.1109/TENCON.2016.7848352.
20. *Tao Peng, Peng Yang, Hanbing Dan, Hui Wang, Hua Han, Jian Yang, Hao Wang, Hui Dong, Patrick Wheeler.* A Single-Phase Bidirectional AC/DC Converter for V2G Applications, *Energies*, 2017, 10, 881. DOI: 10.3390/en10070881.
21. *Liven Pan, Chengning Zhang.* An Integrated Multifunctional Bidirectional AC/DC and DC/DC Converter for Electric Vehicles Applications, *Energies*, 2016, 9, 493. DOI: 10.3390/en9070493.

22. *Turchi J., Dalal D., Wang P., Jenck L.* Power Factor Correction (PFC). Handbook. Rev. 5. Semiconductor, Apr. 2014. Doc. HBD853/D.
23. *Rashid M.H.* Power Electronics. Handbook. 4th ed. Elsevier, 2018, 1510 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Бурлака Владимир Владимирович – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497048603; кафедра автоматизации электро- и теплоэнергетических комплексов; зав. кафедрой; д.т.н.; доцент.

Гулаков Сергей Владимирович – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; тел.: +79497298638; кафедра автоматизации электро- и теплоэнергетических комплексов; д.т.н.; профессор.

Головин Андрей Юрьевич – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; тел.: +79497128054; кафедра автоматизации электро- и теплоэнергетических комплексов; м.н.с.

Мироненко Дмитрий Сергеевич – e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; тел.: +79496094732; кафедра информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

Burlaka Vladimir Vladimirovich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497048603; the department of automation of electrical and thermal power complexes; head of the department; dr. of eng. sc.; associate professor.

Gulakov Sergey Vladimirovich – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; phone: +79497298638; the department of automation of electrical and thermal power complexes; dr. of eng. sc.; professor.

Golovin Andrey Yurievich – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; phone: +79497128054; the department of automation of electrical and thermal power complexes; research associate.

Mironenko Dmitrii Sergeevich – e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; phone: +79496094732; the department of information systems, technologies and automation in construction; head of the department; cand. of eng. sc.; associate professor.