

УДК 621.314

## МОЩНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЗАРЯДА АКБ НА БОРТУ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

© 2022 г. А. Н. Варюхин<sup>1</sup>, М. В. Гордин<sup>2</sup>, А. В. Дутов<sup>3</sup>, член-корреспондент РАН С. И. Мошкунов<sup>4</sup>,  
С. В. Небогаткин<sup>4</sup>, академик РАН В. Ю. Хомич<sup>4</sup>, Е. А. Шершунова<sup>4,\*</sup>

Поступило 30.12.2021 г.  
После доработки 30.12.2021 г.  
Принято к публикации 28.01.2022 г.

Был создан импульсный понижающий-повышающий преобразователь напряжения мощностью 20 кВт с дистанционным цифровым управлением выходными значениями тока и напряжения для заряда аккумуляторной батареи в составе гибридной силовой установки летательного аппарата. Преобразователь работает в режиме ограничения тока от 5 до 20 А и напряжения от 800 до 1000 В при изменении напряжения на его входе от 800 до 1300 В. Экспериментально полученный КПД устройства составляет  $98 \pm 0.5\%$ .

*Ключевые слова:* гибридная силовая установка, аккумуляторная батарея, преобразователь постоянного напряжения, летательный аппарат

DOI: 10.31857/S2686740022020110

Год от года растет число грузовых и пассажирских авиаперевозок. В 2019 г. перед пандемией, обусловленной коронавирусом Covid-19, авиационная отрасль перевезла 4.5 млрд человек, что повлекло за собой существенные выбросы углекислого газа в атмосферу – почти 900 млн тонн [1]. Такие цифры, безусловно, оказывают огромное влияние на изменение климата и его негативные последствия. Кроме того, рост стоимости топлива также сказывается на рентабельности и самих авиаперевозок. Решение этих проблем лежит в повышении топливной эффективности, снижении стоимости топлива на одного пассажира.

Термодинамические ограничения, налагаемые циклом Брайтона, означают, что дальнейшее повышение эффективности газотурбинного реактивного двигателя невозможно. Все будущие улучшения должны быть основаны на использовании чисто электрических и гибридных электри-

ческих силовых установок в летательных аппаратах. Начиная с замены гидравлической, пневматической и механических систем в летательных аппаратах, сегодня все больший интерес просыпается к реализации самой тяги с помощью электричества. Ведутся разработки силовых установок мощностью сотни киловатт, мегаватты, среди которых можно выделить три основные: турбоэлектрические (где энергия от электрогенератора идет напрямую в электромотор), гибридные электрические (где помимо турбогенератора энергия черпается от аккумуляторных батарей) и полностью электрические без двигателей внутреннего сгорания (где вся энергия на борту запасается в аккумуляторных батареях или топливных элементах) [2].

Неотъемлемой частью этих установок являются силовые преобразователи постоянного тока, которые уже прочно заняли свою нишу в системе возобновляемых источников энергии, таких как ветро- и фотоэлектростанции. Однако для успешного внедрения на борту летательных аппаратов известные топологии схем силовых преобразователей должны быть построены с учетом отношения мощности к массе, что часто не столь важно при их стационарном наземном исполнении. При сохранении аэродинамических характеристик дальнейшее увеличение эффективности перелетов возможно лишь при увеличении удельной мощности преобразователя. В перспективе для силовой электроники на борту летательных аппаратов согласно Программе DOE/EERE [3] эта величина

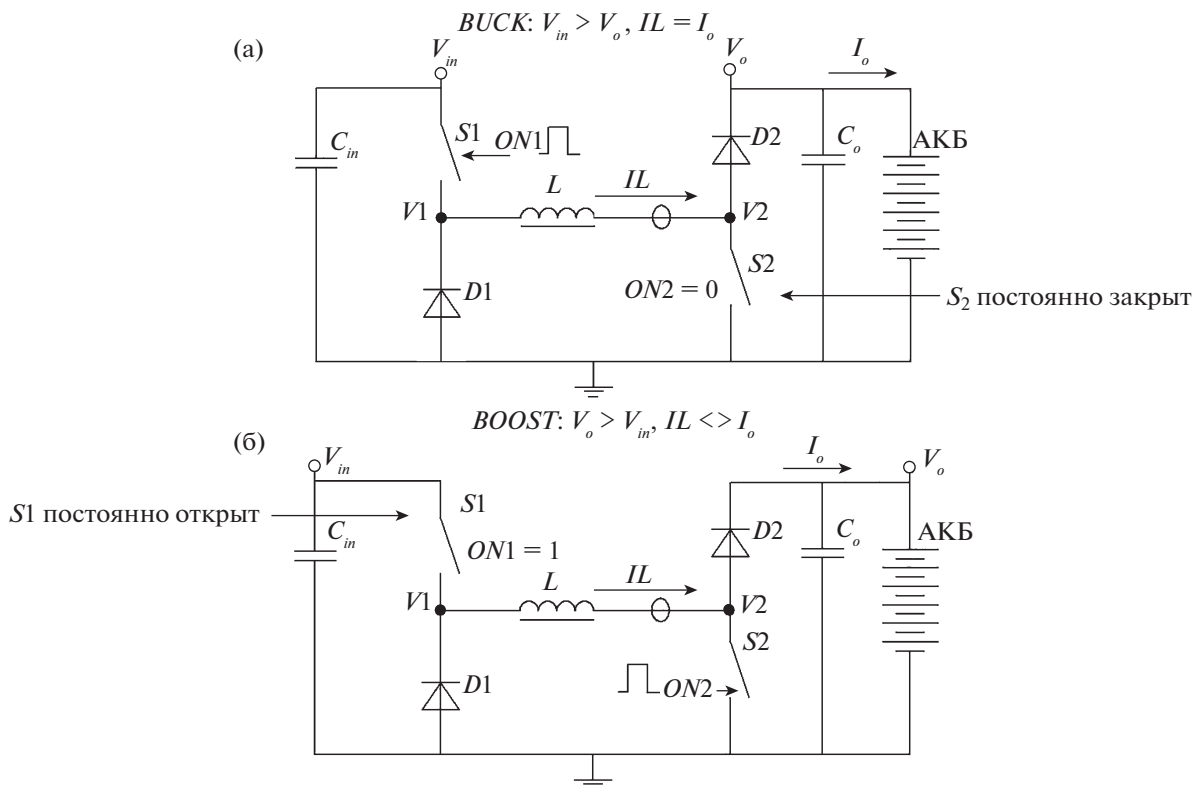
<sup>1</sup>Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр “Институт имени Н.Е. Жуковского”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: eshershunova@ieeras.ru



**Рис. 1.** Схема работы понижающего-повышающего асинхронного преобразователя напряжения для заряда аккумуляторной батареи.

должна составлять десятки кВт/кг. Компонентная база для построения силовых преобразователей напряжения также должна тщательно выбираться, исходя из возможности быстрой и надежной работы в условиях низкого давления и низких температур, которые обычно встречаются в условиях крейсерского полета [4].

Неотъемлемой частью гибридной силовой установки является преобразователь напряжения, который позволяет производить заряд аккумуляторной батареи на борту летательного аппарата во время полета. Как правило, в аэрокосмической отрасли в качестве аккумуляторов используют литиевые батареи, которые позволяют при большой экономии массы достигать желаемых эксплуатационных характеристик [5–7]. Основные преимущества литиевых аккумуляторов связаны с их способностью работать при экстремально низких температурах с высокой плотностью энергии и удельной мощностью. Заряд таких аккумуляторов реализуется в две стадии. Сначала аккумулятор заряжается определенным током, при этом напряжение на нем возрастает, а потом определенным напряжением, при этом ток заряда падает [8].

Реализовать такую схему заряда можно путем применения понижающего-повышающего им-

пульсного преобразователя напряжения [9], схема которого показана на рис. 1. На рисунке показано два режима работы:

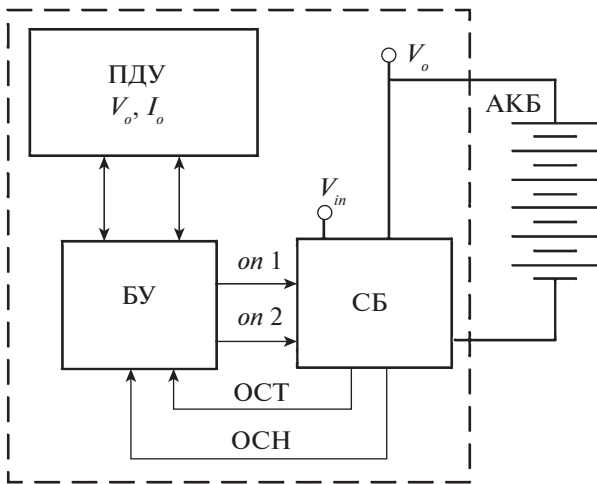
- когда напряжение на шине постоянного напряжения летательного аппарата  $V_{in}$  больше напряжения требуемого для заряда батареи  $V_o$  (рис. 1а),
- когда напряжение на шине постоянного напряжения летательного аппарата  $V_{in}$  меньше напряжения требуемого для заряда батареи  $V_o$  (рис. 1б).

В зависимости от случая схема работает либо в режиме понижения (случай – BUCK) либо в режиме повышения напряжения (случай 2 – BOOST).

В первом случае в работе преобразователя задействованы ключ  $S1$ , диод  $D1$  и диод  $D2$ , поэтому ток через индуктор равен выходному току преобразователя  $I_o$ .

Во втором случае задействованы оба ключа и диод  $D2$ , поэтому ток на выходе не равен току в индукторе.

Для стабильной и эффективной работы преобразователя на основании расчета, проведенного по методике, описанной в [10], были выбраны силовые компоненты преобразователя мощностью 20 кВт, работающего в режиме ограничения тока до 20 А и напряжения до 1000 В: индукторы, конденсаторы, транзисторы и диоды. В качестве си-



**Рис. 2.** Блок-схема силового преобразователя для заряда аккумуляторной батареи: ПДУ – пульт дистанционного управления, БУ – блок управления, СБ – силовой блок, ОСТ и ОСН – обратная связь по току и напряжению соответственно, АКБ – аккумуляторная батарея.

ловых активных элементов выбраны полевые транзисторы и диоды на карбиде кремния с рабочим напряжением 1700 В: C2M0045170D и C5D10170H, отвод тепла от которых был реализован посредством принудительного жидкостного охлаждения.

Сердечник силового дросселя индуктивностью 250 мкГн и током насыщения 37 А был набран из двух соединенных ферритовых магнитопроводов U-образной формы марки Фергохсубе

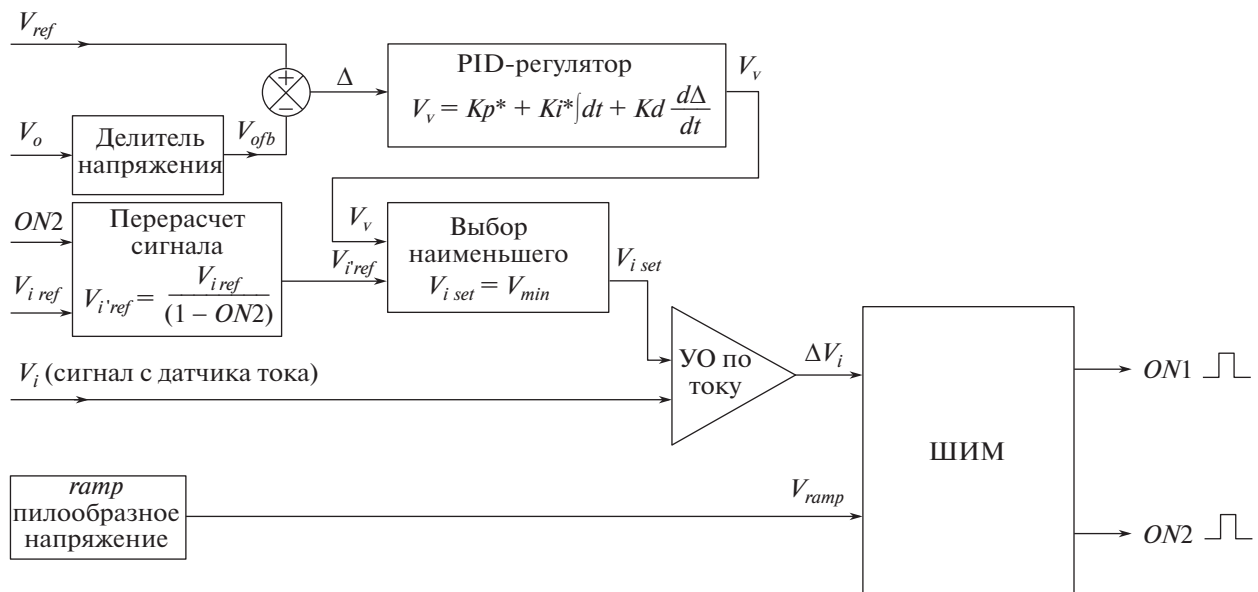
U80-65-32. При такой конструкции обмотка оказывается целиком поверх сердечника, что позволило более эффективно отводить выделяющееся в ней тепло. Сглаживание пульсаций тока было реализовано с помощью керамических конденсаторов поверхностного монтажа суммарной емкостью 2.4 мкФ, размещенных на отдельной плате. Это обеспечило преимущество по массе в 3 раза и по объему в 20 раз по сравнению с использованием традиционно используемых пленочных конденсаторов.

Условно созданный преобразователь можно разделить на несколько блоков (рис. 2): силовой блок (СБ) (где происходит коммутация напряжения), блок управления (где осуществляется формирование сигналов управления коммутаторами) и пульт дистанционного управления (с которого задаются необходимые на выходе преобразователя значения тока и напряжения и происходит запуск устройства). Кроме того, преобразователь включает индуктор, описанный выше, и плату входных и выходных конденсаторов.

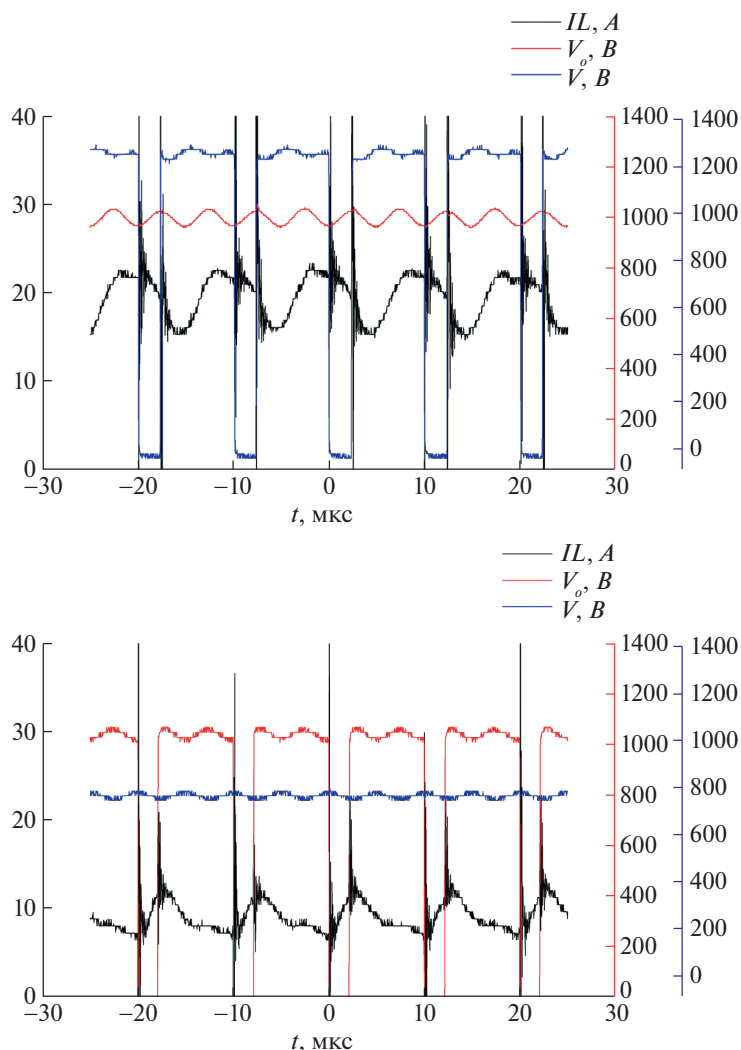
Принцип управления преобразователем удобно также описать с помощью блок-схемы, представленной на рис. 3.

Стабилизация напряжения происходит посредством цифрового управления, стабилизация тока – посредством аналогового.

Для стабилизации напряжения разница опорного сигнала напряжения  $V_{ref}$  и сигнала напряжения обратной связи  $V_{ofb}$ , образованного делителем от выходного напряжения  $V_o$ , поступает на вход PID-регулятора. На выходе PID-регулятора формируется сигнал  $V_v$ , который сравнивается с сиг-



**Рис. 3.** Принцип управления преобразователем.



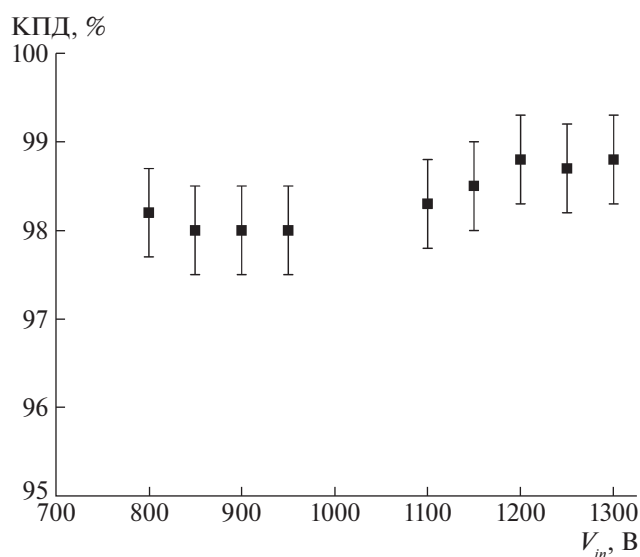
**Рис. 4.** Осциллограммы тока через индуктор  $IL$  и напряжений в средней точке  $V_1, V_2$  при работе преобразователя в режиме: а – понижения напряжения:  $V_{in} = 1300$  В,  $V_o = 1000$  В,  $I_o = 20$  А; б – повышения напряжения:  $V_{in} = 800$  В,  $V_o = 1000$  В,  $I_o = 7.2$  А.

налом  $V_{i_{ref}}$ , который рассчитывается через опорный сигнал тока  $V_{i_{ref}}$  и коэффициент заполнения  $ON2$ . Выбирается наименьшее значение  $V_{i_{set}}$ .

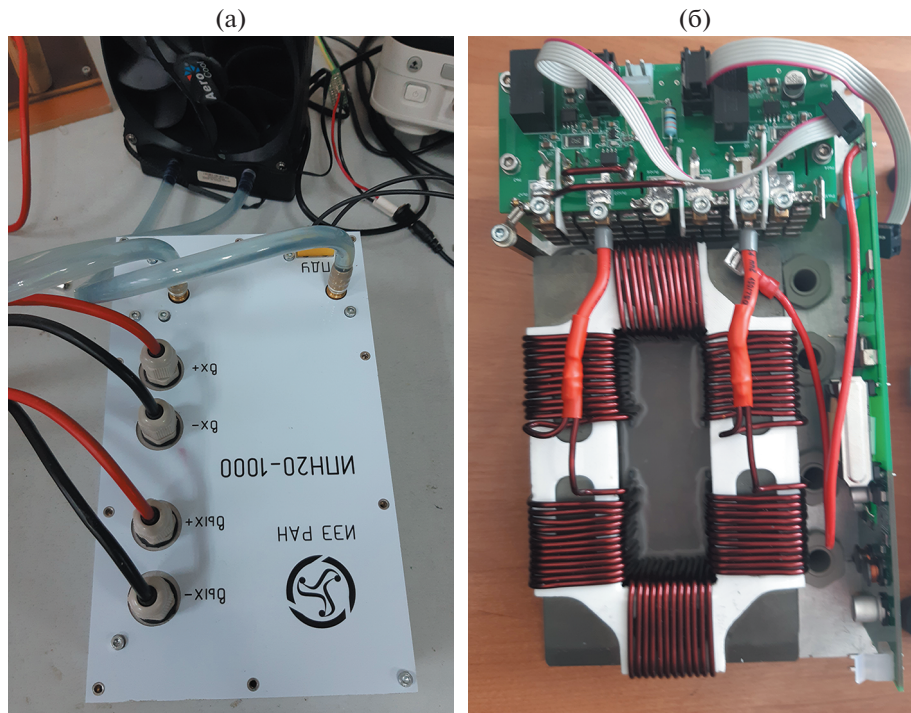
Стабилизация тока реализована посредством усиления ошибки по току между сигналом с датчика тока  $V_i$  и сигналом  $V_{i_{set}}$ .

Формирование сигналов управления транзисторами  $ON1$  и  $ON2$  реализуется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Для дистанционного управления преобразователем был разработан пульт, который позволяет выставлять требуемые выходные значения тока и напряжения для заряда аккумуляторной батареи. Кроме того, на дисплей пульта выводятся измеряемые значения выходных значений тока и напряжения. Во избежание помех измеряемые и референтные значения токов и напряжений передаются в блок управления преобразователем по оптоволокну.



**Рис. 5.** КПД преобразователя (экспериментальные данные).



**Рис. 6.** Фотографии понижающего-повышающего преобразователя постоянного напряжения для заряда АКБ мощностью 20 кВт: а – в корпусе; б – без корпуса.

Были проведены успешные испытания созданного преобразователя на эквивалентную нагрузку. На рис. 4а и рис. 4б показаны типичные осциллограммы напряжений и токов при работе преобразователя в режиме понижения и повышения соответственно.

На основании данных полученных осциллограмм в разных режимах была построена экспериментальная зависимость КПД созданного преобразователя от напряжения на его входе (рис. 5). Как видно, средний КПД во всем диапазоне входных напряжения вне зависимости от режима равен 98%.

При работе преобразователя в режиме повышения, что соответствует входному напряжению  $V_{in}$  меньше 1000 В, КПД прибора несколько меньше, нежели при его работе в режиме понижения напряжения, т.е. при изменении входного напряжения от 1100 до 1300 В. Это объясняется дополнительными потерями на втором коммутаторе  $S_2$  при работе конвертора в режиме BOOST (рис. 1).

Как видно из фотографии (рис. 6), преобразователь для своей мощности достаточно компактен. Его габаритные размеры – 131 × 224 × 85 мм. Масса преобразователя составляет около 2.5 кг.

Таким образом, в результате использования современной полупроводниковой базы и эргономичной конструкции нам удалось достичь удельной мощности устройства, соотношения мощность

на массу почти 10 кВт/кг, что больше в два раза по сравнению с нашей предыдущей разработкой [9] и сравнимо с мировыми аналогами [11, 12].

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при поддержке Минпромторга России и Минобрнауки России.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки “Институте электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Channegowda P. et al.* Megawatt Class Ultra High Density DC-DC Converters for Future Electric Aircraft Systems // 2019 AIAA/IEEE EATS. P. 1–11. <https://doi.org/10.2514/6.2019-4518>
2. *Romeo G., Borello F., Correa G.* ENFICA-FC: Design, realization and flight test of all electric 2-seat aircraft powered by fuel cells // 27th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS2010) // 2010. P. 1–13.
3. *Jansen R. et al.* Overview of NASA electrified aircraft propulsion (EAP) research for large subsonic transports // 53rd AIAA/SAE/ASEE. 2017. P. 4701. <https://doi.org/10.2514/6.2017-4701>
4. *Kaplar R.J. et al.* Generation-After-Next Power Electronics: Ultrawide-bandgap devices, high-temperature packaging, and magnetic nanocomposite materials // IEEE Power Electronics Magazine. 2017. V. 4. № 1.

- P. 36–42.  
<https://doi.org/10.1109/MPEL.2016.2643098>
5. Flynn M.C. et al. A fault management-oriented early-design framework for electrical propulsion aircraft // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2019. V. 5. № 2. P. 465–478.  
<https://doi.org/10.1109/TTE.2019.2913274>
  6. Scrosati B. et al. Lithium batteries: advanced technologies and applications. John Wiley & Sons. 2013. V. 58.
  7. Gohardani A.S., Dunn R., Millecam N. Green Aerospace Engineering: A Focus on the Technical and Economical Hurdles of Next Generation Lithium-Ion Batteries // 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2016. P. 0865.  
<https://doi.org/10.2514/6.2016-0865>
  8. Wang X. Managing End-of-Life Lithium-ion Batteries: An Environmental and Economic Assessment, Ph.D. Thesis. Rochester Institute of Technology, 2014.
  9. Шершунова Е.А., Мошкунов С.И., Варюхин А.Н., Гордин М.В. Четырехфазный импульсный преобразователь постоянного напряжения для применения в составе гибридных и электрических силовых установок летательных аппаратов // Тезисы докладов Междунар. конф. “Авиация и космонавтика”. 23–27 ноября 2020. М., МАИ. С. 232–233.
  10. Варюхин А.Н. др. Силовой многофазный импульсный преобразователь для гибридных летательных аппаратов // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 6. С. 121–129.  
<https://doi.org/10.1134/S0002331019060128>
  11. Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. Повышающе-понижающий преобразователь напряжения для заряда аккумуляторной батареи на борту электрического самолета // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 15.  
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.15.49743.18139>
  12. Варюхин А.Н. и др. Мощный импульсный преобразователь постоянного тока на карбид-кремниевых транзисторах // Прикладная физика. 2021. № 1. С. 75–81.  
<https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-1-75-81>
  13. Kreuzer O., Billmann M., Maerz M. A passively cooled 15 kW, 800 V DCDC converter with a peak efficiency of 99.7% // IEEE AFRICON. 2017. P. 1390–1396.  
<https://doi.org/10.1109/AFRCON.2017.8095685>
  14. Kreuzer O. et al. Non-isolating DC/DC converter for a fuel cell powered aircraft // ESARS-ITEC. 2016. P. 1–6.  
<https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841372>

## POWERFUL DC/DC VOLTAGE CONVERTER FOR BATTERY CHARGING ON BOARD AIRCRAFT WITH A HYBRID POWER PLANT

A. N. Varyukhin<sup>a</sup>, M. V. Gordin<sup>b</sup>, A. V. Dutov<sup>c</sup>, Corresponding Member of the RAS S. I. Moshkunov<sup>d</sup>, S. V. Nebogatkin<sup>d</sup>, Academician of the RAS V. Yu. Khomich<sup>d</sup>, and E. A. Shershunova<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Central Institute for Aviation Motor Development named after P.I. Baranov, Moscow, Russia

<sup>b</sup>National Research Center “Institute named after N. E. Zhukovsky”, Moscow, Russia

<sup>c</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>d</sup>Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

A 20 kW pulsed buck-boost voltage converter with remote digital control of the output current and voltage was created for charging the battery as a part of a hybrid power plant of an aircraft. The converter operates in the mode of current limitation from 5 to 20 A and at voltage from 800 to 1000 V when the voltage at its input changes from 800 to 1300 V. Experimentally obtained efficiency of the device is  $98 \pm 0.5\%$ .

*Keywords:* hybrid power plant, storage battery, DC/DC voltage converter, aircraft