

УДК 621.314

СИЛОВОЙ МНОГОФАЗНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2019 г. А. Н. Варюхин², М. В. Гордин², В. С. Захарченко², В. Е. Маланичев¹,
М. В. Малашин¹, С. И. Мошкун^{1,*}, С. В. Небогаткин¹,
В. Ю. Хомич¹, Е. А. Шершунова¹

¹Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, Россия
*e-mail: serg-moshkunov@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.11.2019 г.

После доработки 25.11.2019 г.

Принята к публикации 28.11.2019 г.

Разработан и создан импульсный преобразователь постоянного напряжения для гибридной силовой установки мощностью 10 кВт, обеспечивающий контроль тока заряда батареи и стабилизацию выходного напряжения на уровне 150 В в диапазоне входных значений 130–300 В. Преобразователь работает как в режиме повышения, так и на понижения напряжения, что позволяет реализовать оптимальный процесс заряда аккумуляторной батареи в различных условиях полета летательного аппарата с гибридной силовой установкой.

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

DOI: 10.1134/S0002331019060128

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее значение приобретает решение задач создания гибридных летательных аппаратов для «зеленой авиации», принципы которых основаны на уменьшении расхода энергоносителя и снижении вредных выбросов в атмосферу. Существует несколько преимуществ использования электроэнергии по сравнению с энергией, получаемой от сгорания топлива в традиционных летательных аппаратах (ЛА): эффективность, надежность, низкая стоимость, низкое тепловыделение, низкий уровень шума, низкая вибрация и т.д. Электроэнергия может запасаться в аккумуляторных батареях, суперконденсаторах и в топливных элементах.

Топливные элементы из-за своих особенностей должны работать при постоянном энергопотреблении, что может быть эффективно реализовано только в режиме крейсерского полета летательного аппарата (ЛА). При этом тяговая мощность в течение полета изменяется. И в этом случае нужны источники энергии, способные оптимально отвечать на эти изменения.

Наилучшим решением в этом случае выступает использование аккумуляторных батарей, которые не только могут работать на изменяющуюся в широких пределах нагрузку, но и способны заряжаться во время полета. Кроме того, за счет возможности их компоновки в сборки из последовательно-параллельных аккумуляторов возможно увеличение мощности энергоустановки, от чего напрямую также зависит дальность и безопасность полета. Основная сложность в применении этих источни-

ков энергии на борту – их характерная вольтамперная характеристика. Напряжение на аккумуляторной батарее уменьшается по мере снижения уровня ее заряда. Поэтому при росте потребляемого тока из источника электроэнергии возникает проблема стабилизации напряжения на шине постоянного напряжения. Как правило, в авиации для этого применяют мощные импульсные повышающие преобразователи, а проблему сглаживания пульсаций выходного тока решают путем применения конденсаторов. Однако емкостные фильтры существенно увеличивают вес конструкции, что может стать критической проблемой на борту ЛА. В течение последних десятилетий передовые аккумуляторные системы стали центром инновационных решений в области энергосбережения для различных нужд, включая транспортную технику. В развитых странах постоянно идет совершенствование энергетических систем с возможностью планового резервирования. В авиастроении речь идет о “более электрических” самолетах (More Electric Aircraft) и полностью электрических самолетах (All Electric Aircraft) [1–7]. Более того, применение в качестве источников энергии аккумуляторных батарей в перспективе рассматривается и для космических кораблей и аппаратов.

Технологии энергосбережения на основе литиевых аккумуляторов играют важную роль в аэрокосмической технике, в частности, благодаря значительной экономии веса в сочетании с желаемыми эксплуатационными характеристиками и сниженными расходами на техническое обслуживание [8–11]. Кроме того, они позволяют избежать таких проблем как выброс вредных веществ в атмосферу и большой уровень шума, которые сейчас находятся на высоком уровне вследствие огромной транспортной мобильности, обусловленной большим количеством как гражданских, так и промышленных авиаперевозок. Основные преимущества литиевых аккумуляторов связано с тем, что из всех существующих типов электрохимических перезаряжаемых источников тока они имеют самую большую удельную мощность и удельную емкость.

На борту летательного аппарата с электродвигателем очень важно правильным образом управлять работой аккумуляторов и их зарядом, особое внимание при этом следует уделять циклам зарядки/разрядки аккумулятора [12]. Несоблюдение правильной работы батареи, ее перегрузка, повреждение, короткое замыкание и попадание воды может привести к ее возгоранию, что абсолютно недопустимо для ЛА.

С ростом потребляемого тока напряжение на аккумуляторной батарее претерпевает существенную просадку. Такое падение может отрицательно сказаться на работе электромотора, если подавать напряжение с выхода аккумуляторов напрямую на силовую установку. Поэтому при использовании сборки таких аккумуляторов на борту летательного аппарата необходим повышающий преобразователь, который будет выполнять функцию стабилизатора напряжения и поддерживать одну и ту же амплитуду на шине постоянного напряжения.

Кроме того, заряд таких батарей на борту позволит получить большую мощность, а, следовательно, положительно скажется на дальности полета и его безопасности в экстренных случаях. В этом случае необходим преобразователь напряжения, который не только следит за напряжением на выходе, но также и ограничивает ток в цепи заряда.

Очевидно, что мощность аккумуляторов увеличивается за счет компоновки их параллельно-последовательно, что способствует увеличению, в свою очередь, и тока, и напряжения. Подобные сборки аккумуляторов широко используются в существующих электромобилях, например, в Тесле.

Требуемое напряжение на выходе импульсного преобразователя и ток в цепи заряда устанавливаются исходя из сборки подобных аккумуляторов. Нами была поставлена задача разработки и создания многофазного импульсного преобразователя напряжения, отвечающего за процесс зарядки силового аккумулятора гибридного ЛА, со сле-

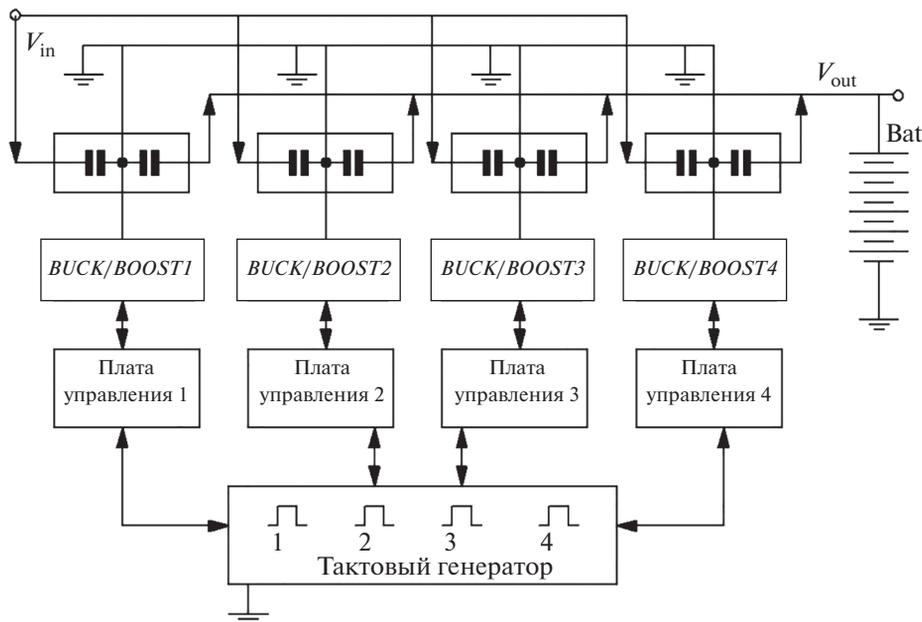


Рис. 1. Блок-схема импульсного преобразователя.

дующими параметрами: стабилизированный ток заряда на уровне 70 А при входных напряжениях в диапазоне от 130 В до 300 В и прекращение заряда при напряжении на выходе более 150 В. Для обеспечения двух режимов работы: заряда аккумуляторов при крейсерском полете и их разряда при наборе высоты необходима разработка мощного повышающего-понижающего преобразователя мощностью 10 кВт.

БЛОК-СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Блок-схема импульсного преобразователя мощностью 10 кВт показана на рис. 1. Он состоит из 4 модулей, по 2,5 кВт каждый. Один модуль способен обеспечивать на выходе постоянный ток до 17,5 А (пиковый до 28 А).

Каждый модуль выполнен в виде сборки из трех плат: платы со сглаживающими керамическими конденсаторами, силовой платы и платы управления.

Синхронизирующие сигналы управления (задающий импульс) подаются на каждую плату управления отдельно с платы тактового генератора. Импульсы управления сдвинуты по времени друг относительно друга на четверть периода (рис. 2), что позволяет реализовать четырехфазную схему и, тем самым, сгладить пульсации выходного и входного тока преобразователя, а также пульсации соответствующих напряжений [13, 14].

ТАКТОВЫЙ ГЕНЕРАТОР

На эту плату приходит входное напряжение V_{in} . На плате расположен DC/DC преобразователь мощностью 5 Вт, который обеспечивает напряжением питания V_{CC} амплитудой 5 В все низковольтные микросхемы преобразователя. Но основное ее предназначение — формирование управляющих импульсов, сдвинутых относительно друг друга по фазе с частотой повторения 100 кГц.

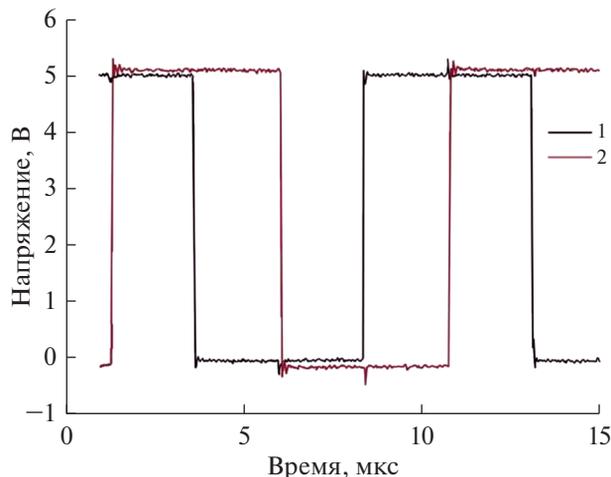


Рис. 2. Сдвинутые по фазе тактовые импульсы (экспериментальная осциллограмма).

Таймер TLC555 работает в качестве задающего генератора. На его выходе генерируются импульсы напряжения амплитудой 5 В с частотой повторения 400 кГц. Эти импульсы поступают на логическую микросхему 74АС74, выходы которой соединены по принципу счетчика Джонсона, основанному на кольцевом соединении D-триггеров, благодаря чему формируются 4 одинаковые последовательности импульсов с частотой повторения 100 кГц, сдвинутые по фазе на одну четвертую периода (2.5 мкс).

Кроме того, на плате расположен усилитель ошибки системы стабилизации напряжения, выполненный на операционном усилителе, на вход которого подается через делитель выходное напряжение мощного преобразователя V_{out} и опорное напряжение V_{ref} . Коэффициент передачи делителя определяется исходя из заданного максимального напряжения заряда аккумулятора. На плате имеется также цепь, точно устанавливающая максимальное напряжение усилителя ошибки, которое может регулироваться благодаря наличию на плате переменного резистора. Таким образом, посредством регулировки опорного напряжения устанавливается значение предельного рабочего тока I_{set} .

УПРАВЛЕНИЕ

Плата управления предназначена для формирования сигналов управления транзисторами на силовой плате.

По сигналу от генератора тактовых импульсов открываются полевые транзисторы на плате управления. Каждый из них формирует свое пилообразное напряжение, в зависимости от напряжения на входе и выходе преобразователя.

“Пила1”, образованная в зависимости от входного напряжения (RAMP1), сравнивается с сигналом, образованном разницей между выходным током преобразователя, измеряемым сенсором на силовой плате, и установленного тока на плате тактового генератора. Формирующийся сигнал на выходе компаратора имеет либо высокий, либо низкий уровень в зависимости от значений напряжений на входе, определяемых токами, тем самым формируя прямоугольные импульсы. Эти импульсы подаются на драйвер управляющий затвором транзистора, отвечающего за понижение напряжения на

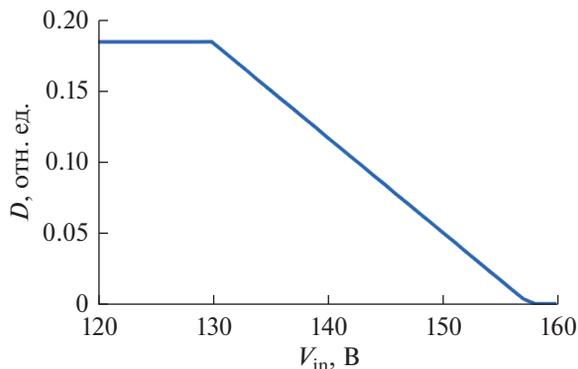


Рис. 3. Зависимость коэффициента заполнения импульсов повышающего звена от напряжения на входе преобразователя.

силовой плате. Предотвращению повторному формированию импульсов между периодами “пилы” способствует применение RS-триггера. Принцип работы подробно описан в статье [15].

“Пила2” (RAMP2) с периодом T , образованная в зависимости от выходного напряжения подается на компаратор, куда также приходит сигнал после сравнения входного и выходного напряжения преобразователя. В зависимости от уровня этих сигналов на выходе формируются импульсы. Длительность импульсов t устанавливается согласно правилу широтно-импульсного регулирования и связана с коэффициентом заполнения импульсов $D = t/T$, определяемым, исходя из разницы между входными сигналами на входах компаратора $D = (V_{out} - V_{in})/V_{out} + 0.05$. Так, длительность максимальна при максимальной разнице выходного и входного напряжений, и, наоборот, соответственно (рис. 3). Из зависимости, представленной на рис. 3, можно легко рассчитать, что D может изменяться примерно от 1.8 мкс практически до нуля.

Сформированные таким образом импульсы подаются на драйвер затвора транзистора, отвечающего за повышение напряжения на силовой плате (режим BOOST).

ПОНИЖАЮЩИЙ И ПОВЫШАЮЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

На силовой плате собрана интегрированная схема, работающая по принципу понижающего и повышающего импульсных преобразователей (рис. 4). Импульсы определенной длительности, в зависимости от тока через дроссель I_{out} или напряжения на выходе V_{out} с платы управления, поступают на вход гальванически развязанного драйвера управления транзисторами G. Питание этого драйвера реализовано посредством гальванически развязанного источника на +15 В, также расположенного на этой плате. В результате на выходе драйверов формируются импульсы напряжения амплитудой 15 В, которые и управляют силовыми транзисторами.

При открытом транзисторе Q2 срабатывает BOOST: открывается транзистор и ток течет через дроссель, тем самым накапливая в нем энергию. После размыкания ключа напряжение на выходе увеличивается до требуемого уровня и запасается в конденсаторах, отдельной плате, которая конструктивно находится под силовой. При открытом транзисторе Q1 напряжение на выходе уменьшается. Схема работает в режиме BUCK.

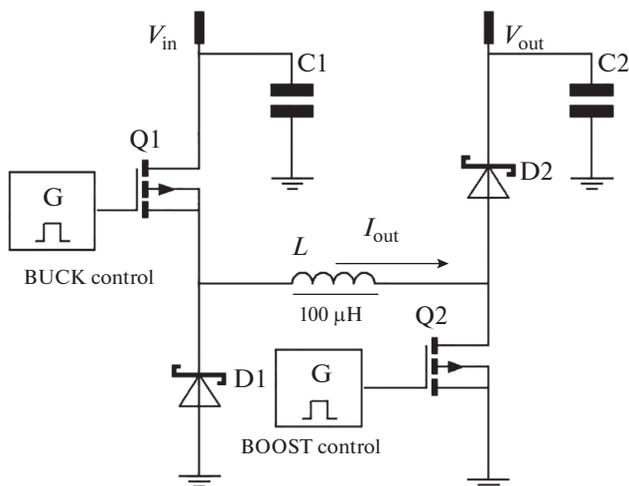


Рис. 4. Схема силовой части одного модуля преобразователя, работающая по принципу понижающего и повышающего преобразователя (BUCK/BOOST).

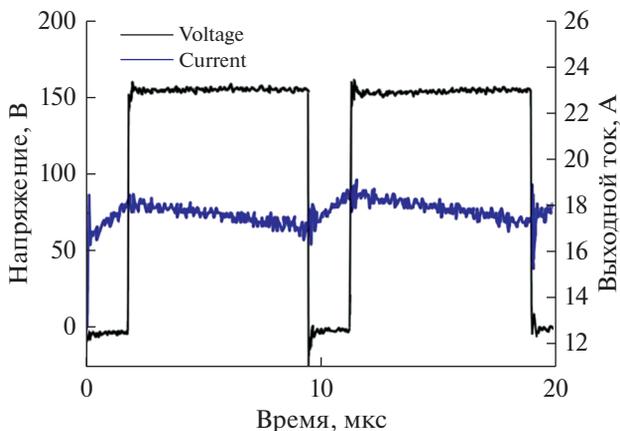


Рис. 5. Осциллограммы напряжения в средней точке и тока для одного модуля при входных параметрах $V_{in} = 130$ В, $I_{in} = 20$ А.

Результаты тестирования преобразователя напряжения. На рисунке 5 показаны типичные осциллограммы напряжения в средней точке и тока через дроссель для 1 модуля при входном напряжении $V_{in} = 130$ В и потребляемом токе $I_{in} = 20$ А.

Исходя из показаний приборов, для 1 модуля средний выходной ток при входном напряжении 130 В составил значение 16,9 А, а амплитуда напряжения на выходе 150 В. Таким образом, КПД преобразователя на 2,5 кВт (1 модуля) в этом случае составил 97,5%.

В зависимости от напряжения на входе преобразователя при разной потребляемой мощности была проведена оценка КПД преобразователя напряжения. На основании

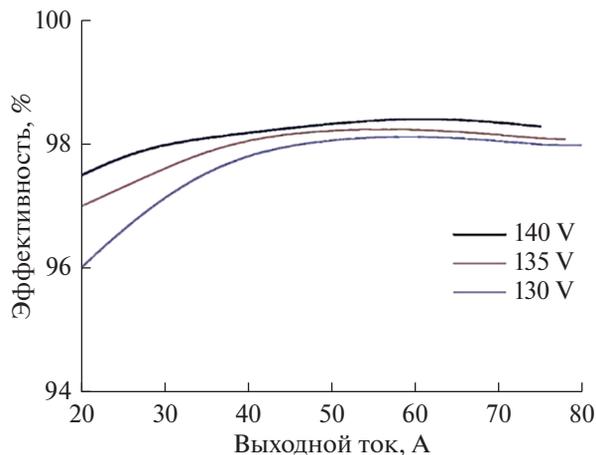


Рис. 6. Зависимость КПД преобразователя, работающего в повышающем режиме от потребляемого тока I_{in} при разных значениях входного напряжения $V_{in} = 130$ В, 135 В и 140 В.

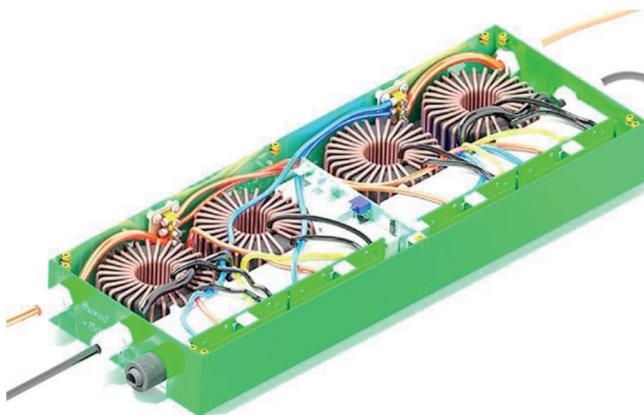


Рис. 7. Вид преобразователя в сборе (без верхней крышки).

снятых осциллограмм для трех напряжений 130 В, 135 В и 140 В были получены зависимости коэффициента полезного действия от потребляемого тока. Построенные зависимости представлены на рис. 6.

Необходимо отметить, что КПД устройства с использованием многофазной схемы включения несколько выше, чем для однофазного преобразователя благодаря уменьшению пульсаций выходного напряжения и снижению потерь в сглаживающих конденсаторах [13, 14]. Тестовые испытания однофазового преобразователя (1 модуля на 2,5 кВт) показали высокий КПД 97,5%, в то время как КПД многофазного преобразователя на 10 кВт при полной нагрузке составил 98,2%.

На рисунке 7 представлено изображение разработанного преобразователя напряжения на 10 кВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена разработка и создание силового многофазного импульсного преобразователя напряжения для энергетических систем гибридных летательных аппаратов. Размеры корпуса преобразователя составили $45 \times 135 \times 410$ мм, площадь поперечного сечения подводящих и отводящих силовых кабелей – 10 мм^2 (диаметр 6 мм), подключение системы охлаждения осуществляется трубкой 10/13 мм. Полная масса преобразователя напряжения и его приведенная мощность составляют 2.65 кг и 3.8 кВт/кг соответственно.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН № 7 “Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gohardani A.S., Doulgeris G., Singh R.* Challenges of future aircraft propulsion: A review of distributed propulsion technology and its potential application for the all electric commercial aircraft // *Progress in Aerospace Sciences*. 2011. Т. 47. № 5. С. 369–391.
2. *Gohardani A.S.* A synergistic glance at the prospects of distributed propulsion technology and the electric aircraft concept for future unmanned air vehicles and commercial/military aviation // *Progress in Aerospace Sciences*. 2013. Т. 57. С. 25–70.
3. *Gohardani A.S. et al.* ELECTERA – a step towards the development of a techno economic risk analysis scheme for future electric aircraft // *ISABE 2011 Proceedings, American Institute of Aeronautics and Astronautics, ISABE-2011-1407*. 2011.
4. *Jones R.I.* The more electric aircraft—assessing the benefits // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: J. Aerospace Engineering*. 2002. Т. 216. № 5. С. 259–269.
5. *Гордин М.В.* Исследование и разработка авиационной гибридной вспомогательной силовой установки на топливных элементах. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / МЭИ. М., 2019.
6. *Cloyd J.S.* A status of the United States Air Force’s more electric aircraft initiative // *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203)*. IEEE, 1997. Т. 1. С. 681–686.
7. *Homeyer W.G. et al.* Advanced power converters for more electric aircraft applications // *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203)*. IEEE, 1997. Т. 1. С. 591–596.
8. *Van Schalkwijk W., Scrosati B. (Eds.)*. Application of Lithium-Ion Batteries, Kluwer Academic Publishers, N.Y., 2002.
9. *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. С. 0865.
10. *Wang X.* Managing End-of-Life Lithium-ion Batteries: An Environmental and Economic Assessment, Ph.D. Thesis. Rochester Institute of Technology, 2014.
11. *Wakihara M., Yamamoto O. (Eds.)* Lithium Ion Batteries- Fundamentals and Performance, Kodansha Ltd and Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 1998.
12. *Мошкунев С.И., Шершунова Е.А., Небогаткин С.В., Маланичев В.Е.* Разработка демонстратора импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения для гибридной силовой установки // Отчет о НИР № М-101019-01, 2019.
13. *Мошкунев С.И., Маланичев В.Е., Малашин М.В., Миколуцкий С.И., Небогаткин С.В., Ребров И.Е., Шершунова Е.А.* Исследования по формированию архитектуры и параметров электрических силовых элементов применительно к системам управления гибридных/электрических силовых установок // Отчет о НИР № М-240518-01, 2018.
14. *Варюхин А.Н., Малашин М.В., Мошкунев С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А.* Об использовании многофазных повышающих преобразователей в составе силовых установок для зеленой авиации // Тезисы докладов научно-практической конференции ученых России и Хорватии: Сборник – М.: НИТУ “МИСиС”, 2019, С. 192–194.
15. *Dixon L.* Average current mode control of switching power supplies // *Unitrode Power Supply Design Seminar Handbook*. – Unitrode Corporation, 1990. С. 5.1–5.14.

Power Multi-Phase Pulse Converter for Hybrid Aircraft

**A. N. Varyukhin^b, M. V. Gordin^b, V. S. Zakharchenko^b, V. E. Malanichev^a, M. V. Malashin^a,
S. I. Moshkunov^{a, *}, S. V. Nebogatkin^a, V. Yu. Khomich^a, and E. A. Shershunova^a**

^aInstitute for Electrophysics and Electric Power RAS, Saint Petersburg, Russia

^bBaranov Central Institute of Aviation Motor Development, Moscow, Russia

**e-mail: serg-moshkunov@yandex.ru*

A pulsed DC-DC converter for a hybrid power installation with a capacity of 10 kW was developed and created, which provides control of the battery charge current and stabilization of the output voltage at 150 V in the range of input values of 130–300 V. The converter works both in the mode of increasing and decreasing the voltage, that allows you to implement the optimal process of charging the battery in various flight conditions of an aircraft with a hybrid power installation.

Keywords: hybrid electric power installation, storage battery, DC-DC converter, aircraft