

УДК 621.314.12
EDN: XCUMDA

PACS: 84.70.+p



Алгоритм управления импульсным силовым понижающим-повышающим преобразователем постоянного напряжения

*А. Н. Варюхин, М. В. Гордин, А. В. Дутов, А. Л. Козлов,
С. И. Мошкунов, С. В. Небогаткин, В. Ю. Хомич, Е. А. Шершунова*

Описан алгоритм управления силовым понижающим-повышающим преобразователем постоянного напряжения. Предложенный алгоритм может найти применение в системах электропитания разных устройств во многих областях техники, например, при организации заряда аккумуляторной батареи с контролируемым током заряда на борту летательного аппарата с гибридной силовой установкой посредством мощных импульсных силовых преобразователей понижающего-повышающего типа, а также при обеспечении вторичного электропитания оборудования и функциональной аппаратуры летательных аппаратов со стабилизированным напряжением и предельным значением тока в нагрузке.

Ключевые слова: преобразователь постоянного напряжения, гибридная силовая установка, заряд аккумуляторной батареи, режим среднего тока.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-109-116

Введение

Решением проблемы повышения уровня загрязнения окружающей среды, шума и вибраций вследствие увеличения количества авиaperевозок [1–3] может стать по аналогии с автомобилями замена традиционных летательных аппаратов с двигателем внутреннего

сгорания на полностью электрические или частично электрические, гибридные летательные аппараты. Среди прочего проблема создания таких летательных аппаратов обусловлена разработкой силовых установок небольшого веса и габаритов с высоким коэффициентом полезного действия (КПД) и оптимальным распределением и использова-

Варюхин Антон Николаевич¹, зам. ген. директора, к.т.н.

Гордин Михаил Валерьевич², ректор, к.т.н.

Дутов Андрей Владимирович³, ген. директор, д.т.н.

Козлов Андрей Львович¹, ген. директор.

Мошкунов Сергей Игоревич⁴, рук. направления, д.т.н., член-корр. РАН.

Небогаткин Сергей Вячеславович⁴, зав. лаб., к.т.н.

Хомич Владислав Юрьевич⁴, научный руководитель, д.ф.-м.н., академик РАН.

Шершунова Екатерина Александровна⁴, зав. лаб., к.т.н.

E-mail: eshershunova@ieeras.ru

¹ ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова».

Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2.

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, улица 2-я Бауманская, 5, к. 1.
E-mail: bauman@bmsu.ru

³ ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского».

Россия, 125319, Москва, ул. Викторенко, 7.
E-mail: info@nrczh.ru

⁴ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.

Статья поступила в редакцию 6.03.2023

Принята к публикации 16.03.2023

© Варюхин А. Н., Гордин М. В., Дутов А. В., Козлов А. Л., Мошкунов С. И., Небогаткин С. В., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А., 2023

нием энергии на борту летательных аппаратов [4, 5].

Энергия, необходимая для полета, может запасаться в суперконденсаторах, топливных элементах и литиевых батареях, которые характеризуются плотностью энергии, удельной мощностью, сроком службы и стоимостью.

Несмотря на высокую удельную мощность, длительный срок службы и высокий КПД [6, 7] использование суперконденсаторов нецелесообразно на борту в силу их большого веса. Их, как правило, применяют там, где необходима работа в широком диапазоне температур, при экстремальных температурах. Кроме того, их стоимость существенно выше, нежели у аккумуляторных батарей. В отличие от аккумуляторной батареи, топливный элемент непрерывно вырабатывает электричество. Топливные элементы могут достигать плотности мощности более 1000 Вт/кг [8]. Использование топливных элементов позволяет перераспределять тягу, что положительно сказывается на аэродинамической эффективности летательных аппаратов. Кроме того, многофункциональная интеграция водородного топливного элемента в летательный аппарат позволяет использовать такие побочные продукты, как вода, тепло или обедненный кислород для обеспечения таких жизненно важных процессов, как борьба с обледенением, кондиционирование, водоснабжение [9]. Однако для функционирования топливных элементов необходимы резервуары для водорода, система для управления отводом тепла, что существенно влияет на массу этого источника энергии, и также сказывается на эффективности его использования на борту летательных аппаратов [10].

Сегодня все чаще в качестве источника электроэнергии используют литиевые аккумуляторные батареи, которые обладают высокой плотностью энергии, малым весом, могут быть достаточно компактными и эргономичными. Их основным преимуществом по сравнению с топливными элементами является возможность зарядки во время полета. Кроме того, их можно подключать последовательно и параллельно для увеличения рабочего напряжения и/или тока. Однако очень важно правильно управлять работой аккумуляторов и состоянием их заряда на борту электри-

ческого самолета. Особое внимание следует уделять циклам зарядки и разрядки аккумулятора. Неправильная работа аккумуляторных батарей, их перегрузка, повреждение или короткое замыкание могут стать причиной возгорания. Для обеспечения правильных режимов заряда литиевых батарей необходим оптимально работающий силовой преобразователь с точным контролем тока и напряжения заряда в процессе зарядки [9–15].

Известен алгоритм управления преобразователем напряжения, содержащий этапы, на которых дискретизируют входное напряжение, выходное напряжение, входной ток и выходной ток преобразователя напряжения [16]. Управление таким преобразователем основано на отслеживании и сравнении амплитуды входного напряжения и суммы амплитуды выходного и некоего фиксированного напряжения. К недостаткам этого алгоритма управления преобразователем можно отнести большое количество полупроводниковых элементов, которые создают дополнительные потери. Кроме того, подобная схема не обеспечивает быстрое измерение тока в индукторе, что не позволяет использовать современные эффективные методы контроля широтно-импульсной модуляцией, такие как режим пикового тока и режим среднего тока.

Наиболее оптимальным для управления понижающим преобразователем напряжения является алгоритм управления импульсным силовым преобразователем в режиме среднего тока [17, 18]. В [19] этот режим реализован посредством измерения тока в электрической цепи тока нагрузки в импульсном силовом преобразователе, формирования сигнала обратной связи по току, интегрирования сигнала обратной связи по току, формирования сигнала обратной связи по среднему току, контроля режима среднего тока импульсного силового преобразователя принудительным переключением между режимами стабилизации тока и понижающего напряжения посредством мультиплексора, сформированного резистором, операционным усилителем и диодом, сравнение значения сигнала понижающего напряжения, пропорционального току в индукторе, с установленным опорным значением напряжения, полученным в результате контроля режима среднего тока импульсного сило-

вого преобразователя, управление широтно-импульсным модулятором с использованием сигнала среднего тока и переключением в импульсном силовом преобразователе с выхода широтно-импульсного модулятора [19]. Однако представленный в [19] алгоритм управления импульсным понижающим преобразователем не обеспечивает режим повышения напряжения, что требуется в ряде практически важных применений, например, для заряда аккумуляторов, поддержания постоянного напряжения на шине инверторного электродвигателя.

Описанный в статье алгоритм приводит к повышению стабильности процесса зарядки аккумуляторной батареи как по напряжению, так и по току, с повышенной эффективностью в широком диапазоне напряжений, коэффициентов преобразования и уровней мощности импульсного силового преобразователя при улучшении переходной характеристики при резком изменении режима работы.

Предлагаемая схема управления силовым преобразователем

Предлагаемый алгоритм управления импульсным понижающим-повышающим силовым преобразователем основан на управлении импульсным силовым преобразователем в режиме среднего тока посредством использования двух петель обратной связи: внутренней по среднему току и внешней по напряжению, на базе силовых электрических цепей понижающего и повышающего напряжения.

На вход импульсного силового преобразователя приходит постоянное напряжение V_{in} . Управление импульсным силовым преобразователем реализовано через обратную связь по напряжению и току. Датчик тока измеряет ток, который течет через индуктор L (рис. 1). Сигнал тока поступает на усилитель сигнала ошибки по току, включающий первый операционный усилитель ОА1 и первую RC-цепочку частотной коррекции обратной связи по току $R1$, $R2$, $C1$ для обеспечения устойчивой работы системы в целом. Таким образом, на вход первого операционного усилителя ОА1 поступают сигнал напряжения V_{is} , пропорциональный току в индукторе L , и опор-

ный сигнал напряжения V_{set} . Значение сигнала напряжения V_{set} формируется в зависимости от значения опорного напряжения V_{ref1} , значения опорного напряжения V_{ref2} и текущего значения напряжения V_{out} на выходе импульсного силового преобразователя, формирующегося на нагрузке АВ, в качестве которой может служить аккумуляторная батарея. Напряжение V_{out} после делителя напряжения, содержащего резисторы $R3$ и $R4$, поступает на усилитель ошибки по напряжению, содержащий второй операционный усилитель ОА2 и вторую корректирующую RC-цепочку частотной коррекции $R5$, $C2$, где сравнивается с опорным значением напряжения V_{ref1} . Вторым операционным усилителем ОА2 формируется сигнал ошибки E , который вместе с установленным опорным значением напряжения V_{ref2} поступает на вход мультиплексора принудительного переключения между режимами стабилизации тока и напряжения, содержащего понижающий резистор $R6$, третий операционный усилитель ОА3 и диод $D3$. Если сигнал ошибки E больше значения V_{ref2} , то диод $D3$ открыт, мультиплексор принудительного переключения между режимами стабилизации тока и напряжения работает как повторитель, и сигнал напряжения V_{set} равен сигналу напряжения V_{ref2} . В этом случае импульсный силовой преобразователь работает как стабилизатор тока.

Если сигнал ошибки E меньше значения опорного напряжения V_{ref2} , то диод $D3$ закрыт и сигнал напряжения V_{set} равен E , так как падением напряжения на понижающем резисторе $R6$ можно пренебречь. В этом случае импульсный силовой преобразователь работает как стабилизатор напряжения.

То есть после формирования сигнала обратной связи по среднему току осуществляют его сравнение с полученным установленным опорным значением напряжения V_{set} , которое может принимать значение как V_{ref2} , так и E , в результате принудительного переключения между режимами стабилизации тока и напряжения, тем самым контролируя режим среднего тока.

Формирование сигнала обратной связи по току с выхода первого операционного усилителя V_{eca} одновременно осуществляют на дополнительно введенный второй широтно-

импульсный модулятор ОА4 после вычитания из сигнала обратной связи по току фиксированного напряжения V_d , соизмеримого с разностью между максимальным и минимальным значениями пилообразного сигнала V_{ramp} , посредством дополнительно введенного устройства вычитания напряжения D_i , на выходе которого формируют управляющие импульсы повышающего напряжения нужной скважности посредством силовой электрической цепи повышающего напряжения, образованной дополнительно введенными вторым драйвером $Dr2$, вторым полевым транзистором $Q2$ и вторым силовым диодом $D2$, идентичными силовым элементам в цепи понижения напряжения и выполняющими аналогичные функции. Практически значение напряжение V_d выбирается в диапазоне от 0,95 до 1,05 от значения V_{ramp} .

Сигнал с выхода первого операционного усилителя V_{eca} поступает как на широтно-импульсный модулятор ОА4, так и на второй широтно-импульсный модулятор ОА5 после

вычитания из него фиксированного напряжения V_d . На входе широтно-импульсного модулятора ОА5 сигнал V_{eca} сравнивается с пилообразным сигналом напряжения V_{ramp} . На выходе широтно-импульсного модулятора ОА5 формируются управляющие импульсы понижающего напряжения нужной скважности, которые после драйвера $Dr1$ поступают на затвор полевого транзистора $Q1$, который вместе с силовым диодом $D1$, индуктором L и сглаживающим конденсатором $C3$ формирует силовую электрическую цепь понижающего преобразователя (рис. 1). На выходе второго широтно-импульсного модулятора ОА4 формируются управляющие импульсы повышающего напряжения нужной скважности, которые после второго драйвера $Dr2$ поступают на затвор второго полевого транзистора $Q2$, который вместе со вторым силовым диодом $D2$, индуктором L и сглаживающим конденсатором $C3$ формирует силовую электрическую цепь повышающего напряжения преобразователя (рис. 1).

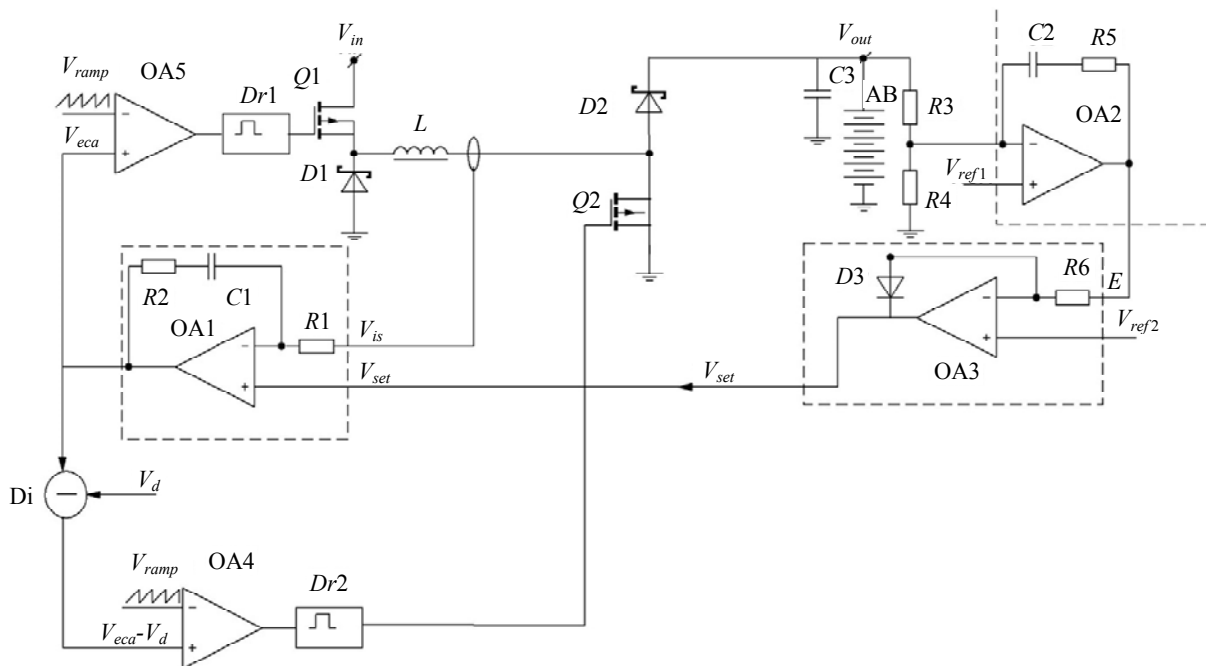


Рис. 1. Схема управления понижающим-повышающим преобразователем постоянного напряжения

Переключение между режимами понижения и повышения напряжения

Переключение между режимами понижения и повышения напряжения происходит автоматически исходя из уровней сигналов V_{eca} , V_d и амплитуды пилообразного сигнала

V_{ramp} . При проектировании возможно заложить один из случаев: 1) когда размах пилы V_{ramp} V_p меньше значения напряжения V_d , и 2) когда $V_p > V_d$.

В первом случае (V_p меньше V_d), представленном на рис. 2, в зависимости от величины сигналов с усилителей ошибки V_{eca}

и $V_{eca}-V_d$ реализуется либо режим прямого преобразования (то есть когда постоянно открыт транзистор $Q1$ пропускает входное напряжение напрямую, а второй полевой транзистор $Q2$ – постоянно закрыт), либо режим понижения, либо режим повышения напряжения, что иллюстрируется соответственно, на рис. 2.

Во втором случае (V_p больше V_d), показанном на рис. 3, можно также реализовать два описанных выше основных режима понижения и повышения напряжения. Но еще существует смешанный режим, когда оба сило-

вых полевых транзистора $Q1, Q2$ находятся в переключательном режиме. С точки зрения потерь лучше реализовать первый случай и задать $V_d > V_p$, поскольку переключательные потери в смешанном режиме удваиваются. Но второй случай имеет преимущество в более плавной регулировке управления режимами благодаря отсутствию мертвой зоны, то есть зоны шириной равной $(V_d - V_p)$ (рис. 2), в которой изменение сигнала ошибки V_{eca} не приводит к изменению скважности импульсов управления полевым транзистором $Q1$ и вторым полевым транзистором $Q2$.



Рис. 2. Логика управления преобразователем при размахе пилообразного сигнала V_p меньше напряжения V_d



Рис. 3. Логика управления преобразователем при размахе пилообразного сигнала V_p больше напряжения V_d

Управление многофазным импульсным силовым преобразователем

Предложенный алгоритм может быть применен при управлении многофазным импульсным силовым преобразователем, когда импульсный силовой преобразователь служит фазой более мощного понижающего-

повышающего преобразователя (рис. 4). В этом случае сигналы токов V_{is} различны и измеряются в каждой фазе отдельно, а сигнал напряжения на входе первого операционного усилителя V_{set} является общим для всех фаз, что обеспечивает точный баланс токов в разных фазах (каналах) преобразователя. Все фазы подключают к выходу в одной точке.

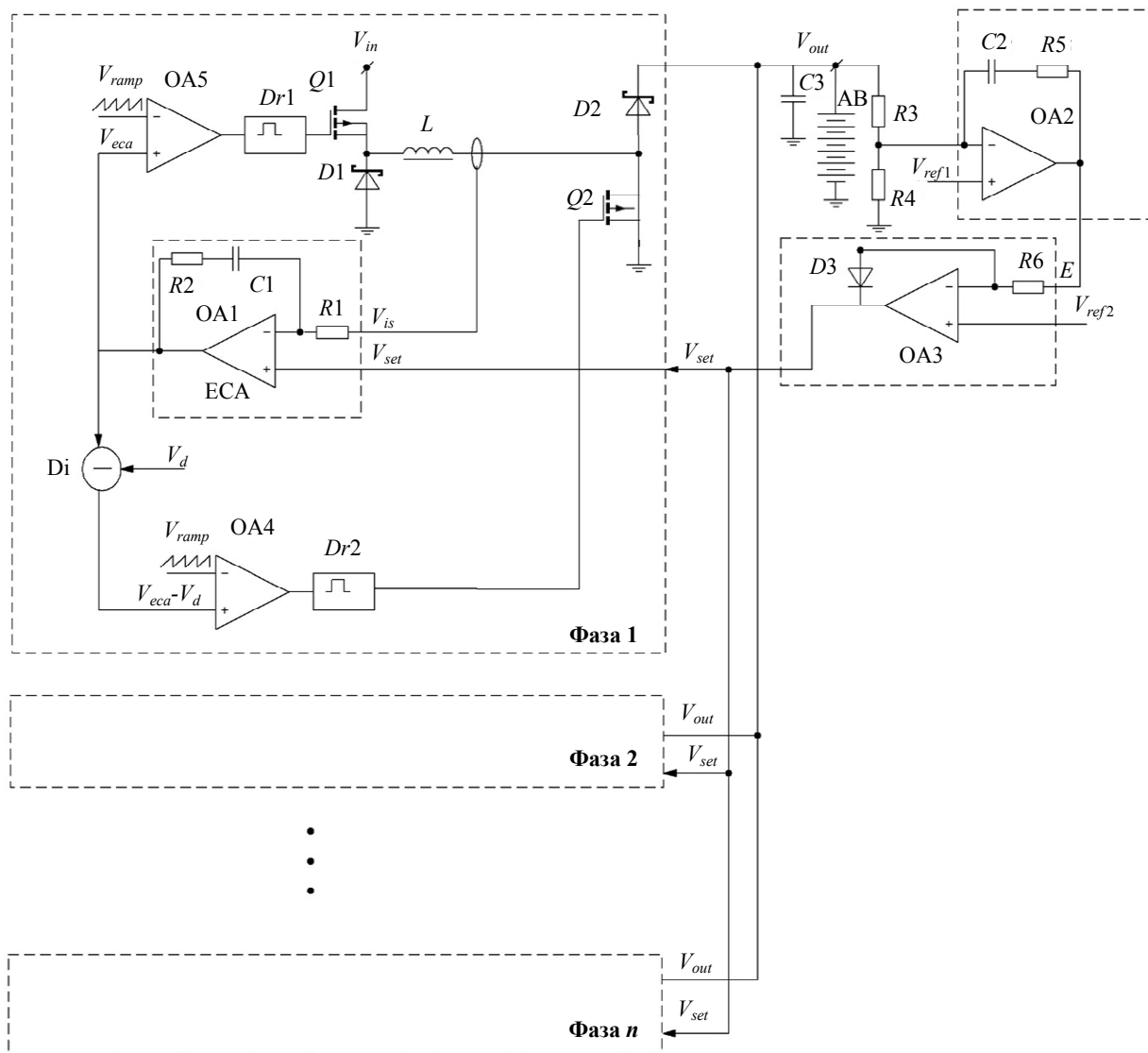


Рис. 4. Схема управления многофазным преобразователем напряжения

Заключение

Таким образом, в статье описан алгоритм управления преобразователем постоянного напряжения понижающего-повышающего типа со стабилизацией выходного тока и напряжения, который подразумевает контроль за работой преобразователя в режиме среднего тока посредством использования двух петель обратной связи: внутренней по среднему току и внешней по напряжению на базе силовых электрических цепей понижающего и повышающего напряжения.

Предложенный алгоритм управления преобразователем может успешно применяться для управления напряжением и током в мощных преобразователях напряжения для заряда аккумуляторной батареи, что успешно было реализовано на примере управления

преобразователем мощностью 20 кВт [20]. Благодаря предложенной схеме управления удалось не только получить высокий КПД и стабильные характеристики, но и хорошие показатели отношения мощности устройства к его массе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tarrasón L., Jonson J. E., Berntsen T. K., Rypdaz K. Study on air quality impacts of non-LTO emissions from aviation. Final report to the European Commission under contract B4-3040/2002/343093/MAR/C1. Norwegian Meteorological Institute. 2004.
2. Ritchie H., Roser M., Rosado P. CO₂ and greenhouse gas emissions / Our world in data. – 2020.
3. Миягашева В. А., Иншаков Д. Р., Пономарёв А. В., Бойко О. Г. / Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. № 12. С. 808–810.

4. Swaminathan N., Cao Y. / IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2020. Vol. 6. № 4. P. 1740–1754.
5. Channegowda P., Du Z. S., Dwari S., Kshirsagar P. / AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium. – Indianapolis, 2019. P. 1–11.
6. Zhang Y. et al. / IEEE Int. Conf. on Electrical Machines and Systems. – Wuhan, 2008. P. 2695–2697.
7. Lu Y., Hess H. L., Edwards D. B. / IEEE Int. Electric Machines & Drives Conf. – Antalya. 2007. Vol. 1. P. 129–133.
8. Bradley T. H. et al. / SAE Technical Paper. 2006. P. 01–3092.
9. Sharpe J. E. et al. / Microporous and Mesoporous Materials. 2015. Vol. 209. P. 135–140.
10. Verstraete D. / International Journal of Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38. № 34. P. 14824–14831.
11. Gohardani A. S., Dunn R., Millecam N. / 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. – San Diego, 2016. P. 0865.
12. Варюхин А. Н., Гордин М. В., Дутов А. В., Мошкунев С. И., Хомич В. Ю., Шериунова Е. А. / Электричество. 2021. № 8. С. 4–12.
13. Шериунова Е. А., Мошкунев С. И., Варюхин А. Н., Гордин М. В. / Тезисы 19-й Межд. конф. «Авиация и Космонавтика». – Москва, 2020. С. 232–233.
14. Мошкунев С. И., Хомич В. Ю., Шериунова Е. А. / Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46. № 15. С. 22–24.
15. Kreuzer O., Gerner M., Billmann M., Maer M. / IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. – Long Beach, 2018. P. 220.
16. Чэнь Ч., Сюй Ц., Ван Х., Чжоу Ч. Преобразователь напряжения с отдельными схемами комбинированного преобразования. Патент на изобретение № 2617991 (РФ). 2017.
17. Dixon L. Average current mode control of switching power supplies, Unitrode Power Supply Design Handbook. P. 5.1.
18. Варюхин А. Н. и др. Способ управления импульсным силовым понижающим преобразователем в режиме среднего тока. Патент на изобретение № 2767050 С1 (РФ). 2022.
19. Варюхин А. Н., Гордин М. В., Дутов А. В., Мошкунев С. И., Хомич В. Ю., Шериунова Е. А. / Прикладная физика. 2021. № 1. С. 75–81.
20. Варюхин А. Н., Гордин М. В., Дутов А. В., Мошкунев С. И., Небогаткин С. В., Хомич В. Ю., Шериунова Е. А. / Доклады РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 503. № 1. С. 63–68.

PACS: 84.70.+p

Control algorithm for a pulsed power buck-boost DC/DC voltage converter

A. N. Varyukhin¹, M. V. Gordin², A. V. Dutov³, A. L. Kozlov¹, S. I. Moshkunov⁴,
S. V. Nebogatkin⁴, V. Yu. Khomich⁴ and E. A. Shershunova⁴

¹ FSUE “CIAM named after P. I. Baranov”
2 Aviamotornaya st., Moscow, 111116, Russia

² Moscow Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Bauman Moscow State Technical University”
5/1 Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

³ National research center «Institute named after N.E. Zhukovsky»
7 Viktorenko st., Moscow, 125319, Russia

⁴ Institute for Electrophysics and Electric Power RAS
18 Dvortsovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: eshershunova@ieeras.ru

Received 6.03.2023; accepted 16.03.2023

The paper describes an algorithm of Buck/Boost DC/DC power converter control. The proposed technique can be used in methods of organizing power supply for various devices in many areas of technology, for example, in methods of organizing a battery charge on board an aircraft with a hybrid power plant by means of powerful Buck/Boost pulsed power converters

for controlled voltage and current, as well as in organizing secondary power supply of equipment and functional equipment of aircraft with stabilized voltage and current limit value in the load.

Keywords: DC/DC voltage converter, hybrid power plant, battery charging, average current mode.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-109-116

REFERENCES

1. Tarrasón L., Jonson J. E., Berntsen T. K. and Rypdaz K., Study on air quality impacts of non-LTO emissions from aviation. Final report to the European Commission under contract B4-3040/2002/343093/MAR/C1. Norwegian Meteorological Institute, 2004.
2. Ritchie H., Roser M. and Rosado P. CO₂ and greenhouse gas emissions. Our world in data, 2020.
3. Miyagasheva V. A., Inshakov D. R., Ponomarev A. V. and Boyko O. G., Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki **1** (12), 808–810 (2016) [in Russian].
4. Swaminathan N. and Cao Y., IEEE Transactions on Transportation Electrification **6** (4), 1740–1754 (2020).
5. Channegowda P., Du Z. S., Dwari S. and Kshirsagar P. AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium. Indianapolis, 2019, p. 1–11.
6. Zhang Y. et al. IEEE Int. Conf. on Electrical Machines and Systems. Wuhan, 2008, pp. 2695–2697.
7. Lu Y., Hess H. L. and Edwards D. B. IEEE Int. Electric Machines & Drives Conf. Antalya, 2007, pp. 129–133.
8. Bradley T. H. et al. SAE Technical Paper, 01–3092 (2006).
9. Sharpe J. E. et al., Microporous and Mesoporous Materials **209**, 135–140 (2015).
10. Verstraete D., International Journal of Hydrogen Energy **38** (34), 14824–14831 (2013).
11. Gohardani A. S. Dunn R. and Millicam N. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, 2016, p. 08652016.
12. Varyukhin A. N., Gordin M. V., Dutov A. V., Moshkunov S. I., Khomich V. Yu. and Shershunova E. A., Elektrichestvo, № 8, 4–12 (2021) [in Russian].
13. Shershunova E. A., Moshkunov S. I., Varyukhin A. N. and Gordin M. V. 19th International Conference «Aviation and Cosmonautics». Moscow, 2020, pp. 232–233.
14. Moshkunov S. I., Khomich V. Yu. and Shershunova E. A., Letters to the Journal of Technical Physics **46** (15), 22–24 (2020) [in Russian].
15. Kreutzer O., Gerner M., Billmann M. and Maer M. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. Long Beach, 2018, p. 220.
16. Cheng Ch., Suey Tc., Van Kh. and Zhou Ch. Voltage converter with separate combined conversion circuits. Patent for invention № 2617991 (RF). 2017.
17. Dixon L. Average current mode control of switching power supplies, Unitrode Power Supply Design Handbook. P. 5.1.
18. Varyukhin A. N. et al. A method of control of a pulse power reducer in the mode of average current. Patent for invention 2767050 C1 (RF). 2022.
19. Varyukhin A. N., Gordin M. V., Dutov A. V., Moshkunov S. I., Khomich V. Yu. and Shershunova E. A., Applied Physics, № 1, 75–81 (2021) [in Russian].
20. Varyukhin A. N., Gordin M. V., Dutov A. V., Moshkunov S. I., Nebogatkin S. V., Khomich V. Yu. and Shershunova E. A., Doklady Physics **66** (4), 114–118 (2022) [in Russian].