

*ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА  
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ*

УДК 62

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-197-205

**ШУНТОВОЙ РЕГУЛЯТОР В СОСТАВЕ ТРЕХПОРТОВОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ\***

Д.А. КУРОЧКИН<sup>1</sup>, А.В. ГЕЙСТ<sup>2</sup>, Д.А. ШТЕЙН<sup>3</sup>, Т.Е. ШУЛЬЦ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант второго года кафедры электроники и электротехники. E-mail: denis963258@gmail.com

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники. E-mail: andrey.geist@gmail.com

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники. E-mail: Dmitriy\_Shteyn@mail.ru

<sup>4</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры электроники и электротехники. E-mail: shulcz.2012@corp.nstu.ru

Солнечная батарея является основным источником электрической энергии спутниковых систем связи дистанционного зондирования Земли. В этом классе космических аппаратов в качестве буферного источника электроэнергии используется аккумулятор. Энергопреобразующая аппаратура космического аппарата, обеспечивающая стабилизацию напряжения и управление электропитанием для всех агрегатов космического аппарата, построена на преобразователях постоянного тока. Системы электропитания космических аппаратов реализуют несколько режимов работы энергопреобразующей аппаратуры. Таким режимом является обеспечение питания нагрузки от солнечной батареи. Одним из наиболее важных требований к энергопреобразующей аппаратуре космического аппарата является ее удельная энергоемкость и надежность. Для достижения более высоких показателей удельной энергоемкости была разработана новая схема трехпортового преобразователя, частью которой является схема шунтового стабилизатора с дополнительной индуктивностью. Цель данной работы – изучить особенности использования шунтового стабилизатора на базе повышающего преобразователя с дополнительной индуктивностью в составе трехпортового преобразователя электрической энергии. Результаты физического эксперимента подтверждают работоспособность новой схемы шунтового стабилизатора с дополнительной индуктивностью, а ее удельные энергетические показатели выше, чем у классического шунтового стабилизатора.

---

\* Статья получена 27 сентября 2019 г.

**Ключевые слова:** шунтовой регулятор, многопортовые преобразователи электрической энергии, энергопреобразующая аппаратура космического аппарата, повышающий DC/DC-преобразователь, космический аппарат, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, общая шина

## ВВЕДЕНИЕ

Системы электропитания космических аппаратов отличаются высокими требованиями к энергопреобразующей аппаратуре: массогабаритные показатели, надежность, радиационная стойкость и качество выходного напряжения. В зависимости от предъявляемых требований существует несколько реализаций системы электропитания, одной из которых является использование отдельного преобразователя на каждый режим работы. Данный способ отличается наиболее высокой надежностью и простотой исполнения. Однако вместе с этим увеличиваются массогабаритные параметры системы. При этом выход из строя одного преобразователя не ведет к серьезным последствиям для остальной части схемы. Поскольку такие системы состоят из нескольких однотипных подсистем питания [2] с запасом мощности, то выход из строя одной из них не является критическим, а система электропитания космического аппарата способна это компенсировать.

## 1. СРАВНЕНИЕ ШУНТОВЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ

Режим питания нагрузки от солнечной панели является одним из основных режимов работы энергопреобразующей аппаратуры космического аппарата. Некоторые системы электропитания для реализации этого режима используют отдельный преобразователь, который основан на топологии классического повышающего преобразователя [1]. Данная схема отличается высокой надежностью и простотой. В некоторых случаях применяются более сложные схемы для достижения лучших энергетических показателей [5].

Увеличение количества элементов и усложнение схемы преобразователя увеличивает вероятность выхода из строя всей подсистемы. Однако усложнение схемы позволяет улучшить массогабаритные и удельные энергетические показатели.

Шунтовой стабилизатор (ШС), основанный на топологии повышающего преобразователя с дополнительной индуктивностью [3], на 37 % легче, чем основанный на топологии классического повышающего преобразователя. При этом величина пульсации выходного напряжения у этих преобразователей остается одинаковой.

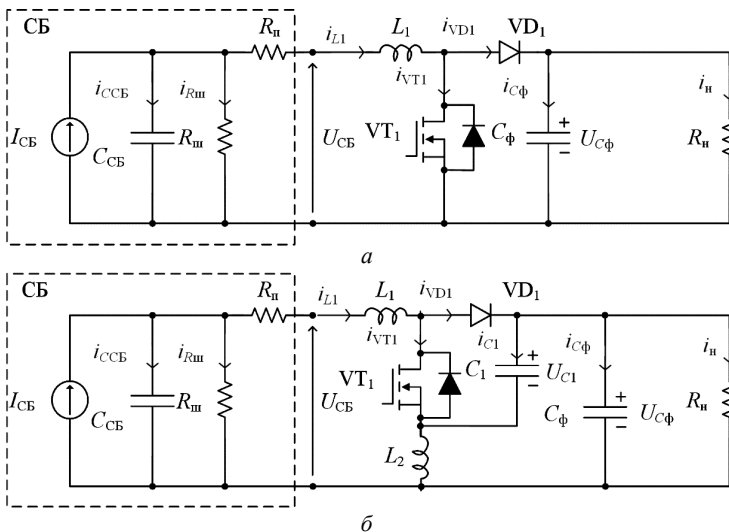


Рис. 1. Шунтовые стабилизаторы:

а – классический, б – с дополнительной индуктивностью

Согласно проведенным теоретическим расчетам удельные энергетические показатели классического ШС с применением исключительно радиационно стойких компонентов составляют 5927,18 Вт/кг и 21,17 Вт/см<sup>2</sup>. Удельные энергетические показатели ШС с дополнительной индуктивностью равны 7470,65 Вт/кг и 31,38 Вт/см<sup>2</sup>. Таким образом, удельные энергетические показатели ШС с дополнительной индуктивностью на 26 % и на 48 % выше, чем у классического ШС.

Такой преобразователь можно использовать в подсистеме для реализации режима питания нагрузки от солнечной панели. Также целесообразно применять повышающий преобразователь с дополнительной индуктивностью для реализации режима питания нагрузки от аккумуляторной батареи [1].

## 2. СРАВНЕНИЕ ТРЕХПОРТОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Для уменьшения массогабаритных параметров системы электропитания космического аппарата отдельные преобразователи, реализующие разные режимы работы энергопреобразующей аппаратуры, объединяют. Подобные схемы называют трехпортовыми преобразователями электрической энергии.

Система электропитания, включающая трехпортовый преобразователь электрической энергии на базе повышающего преобразователя с дополни-

тельной индуктивностью, представлена на рис. 2 [4]. В двух основных режимах работы используется два преобразователя, содержащих конденсатор  $C_1$  и дроссель  $L_3$ . Эти дополнительные элементы, используемые в каждом преобразователе, являются общими в обоих режимах работы. Таким образом, значительно уменьшается масса устройства и улучшаются энергетические характеристики.

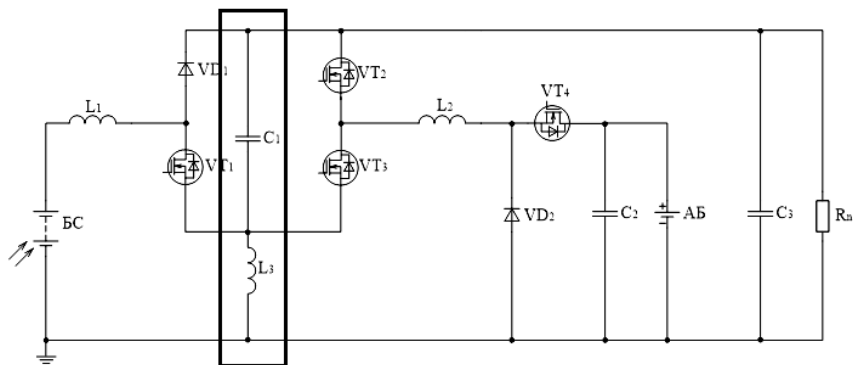


Рис. 2. Схема трехпортового преобразователя.

Проведенные исследования показали, что удельные энергетические показатели трехпортового преобразователя, основанного на топологии классического повышающего преобразователя с применением исключительно радиационно стойких компонентов, составляют 786,12 Вт/кг и 4,88 Вт/см<sup>2</sup>, в то время как те же показатели для трехпортового преобразователя, основанного на топологии повышающего преобразователя с дополнительной индуктивностью, составляют 1882,8 Вт/кг и 11,81 Вт/см<sup>2</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы электропитания космических аппаратов, построенные на трехпортовых преобразователях с дополнительной индуктивностью, отличаются большей эффективностью и компактностью по сравнению с системами на базе классических ШС. Исследование показало, что применение преобразователя с дополнительной индуктивностью увеличивает энергетические показатели системы более чем в два раза с сохранением качества выходного напряжения.

С уменьшением массы и размеров подсистемы питания появляется возможность установки дополнительного оборудования, а также дополнительных фаз питания, которые помогут снизить нагрузку на остальные фазы, тем самым увеличив их срок службы, и повысят отказоустойчивость всей системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петровичев М.А., Гуртов А.С. Система энергоснабжения бортового комплекса космических аппаратов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 87 с.
2. Brown M. Power supply cookbook. – Burlington, MA: Elsevier, 2001. – 280 p.
3. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
4. Multiple port DC DC converter for spacecraft Power Conditioning Unit / O. Mourra, A. Fernandez, F. Tonicello, S. Landstroem // 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – Orlando, FL, 2012. – P. 1278–1285. – DOI: 10.1109/APEC.2012.6165983.
5. Step-Up DC–DC converters: a comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications / M. Forouzesh, Y.P. Siwakoti, S.A. Gorji, F. Blaabjerg, B. Lehman // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Vol. 32, N 12. – P. 9143–9178. – DOI: 10.1109/TPEL.2017.2652318.
6. Mathematical analysis of the multiport converter operation algorithm / V.E. Sidorov, D.A. Shtein, D.V. Korobkov, I.V. Zaev, M.A. Khoroshev // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, 2018. – P. 612–616. – DOI: 10.1109/EDM.2018.8435045.
7. Mathematical analysis of multiport converter operation modes / V.E. Sidorov, D.A. Shtein, I. Zaev, M.A. Khoroshev // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, 2018. – P. 102–105. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545538.
8. Mourra O., Fernandez A., Tonicello F. Buck Boost Regulator (B2R) for spacecraft Solar Array Power conversion // 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – Palm Springs, CA, 2010. – P. 1313–1319. – DOI: 10.1109/APEC.2010.5433399.
9. DC/DC boost converter with additional inductance for the space power supply system / A.V. Geist, A.V. Sidorov, D.V. Korobkov, A.G. Volkov // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, 2018. – P. 6403–6408. – DOI: 10.1109/EDM.2018.8435084.

10. Development of boost converter mathematical model with an additional inductance (1 C2-2L) / D.A. Kurochkin, A.V. Geist, D.A. Shtein, A.G. Volkov // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, 2018. – P.106–111. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545958.

11. Патент 2677629 Российская Федерация, МПК Н 02 J 7/35 (2006.01). Энергопреобразующая аппаратура для систем электропитания постоянного тока аэрокосмических аппаратов / Д.В. Коробков, С.А. Харитонов, В.Н. Школьный, А.А. Лопатин, Д.А. Штейн, А.В. Гейст, Д.В. Макаров; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО НГТУ. – № 2017144319; заявл. 18.12.17; опубл. 18.01.19, Бюл. № 2. – 10 с.

12. *Suskis P., Galkin I.* Enhanced photovoltaic panel model for MATLAB-simulink environment considering solar cell junction capacitance // IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Vienna, 2013. – P. 1613–1618. – DOI: 10.1109/IECON.2013.6699374.

**Курочкин Денис Анатольевич**, магистрант кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы электропитания космических аппаратов. Имеет 4 публикации. E-mail: denis963258@gmail.com

**Гейст Андрей Викторович**, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы электропитания летательных аппаратов. Имеет 24 публикации. E-mail: andrey.geist@gmail.com

**Штейн Дмитрий Александрович**, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы непрерывного электропитания аэрокосмических аппаратов. Имеет 21 публикацию. E-mail: Dmitriy\_Shteyn@mail.ru

**Шульц Татьяна Евгеньевна**, аспирант кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – преобразователи постоянного тока. Имеет 15 публикаций. E-mail: shulcz.2012@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-197-205

## Shunt regulator in the composition of a 3-port electric energy converter<sup>\*</sup>

D.A. Kurochkin<sup>1</sup>, A.V. Geist<sup>2</sup>, D.A. Shtein<sup>3</sup>, T.E. Shults<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of masters degree of Department Electronics and Electrical Engineering. E-mail: denis963258@gmail.com

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Senior Lecturer of Department Electronics and Electrical Engineering. E-mail: andrey.geist@gmail.com

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Senior Lecturer of Department Electronics and Electrical Engineering. E-mail: Dmitriy\_Shteyn@mail.ru

<sup>4</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, graduate student of Department Electronics and Electrical Engineering. E-mail: shulcz.2012@corp.nstu.ru

The solar array is the main source of electrical energy for satellite communication systems, remote sensing of the Earth and geodesy. In this class of spacecraft, a battery is used as a buffer source of electricity. The energy-converting equipment of the spacecraft, which provides voltage stabilization and power management for all units of the spacecraft, is built on DC / DC converters. Spacecraft power systems implement several modes of operation of energy converting equipment. One of these modes is to provide power to the load from the solar array. One of the most important requirements for the energy-converting equipment of a spacecraft is its specific energy consumption and reliability. To achieve higher specific energy consumption indicators, a new three-port converter circuit was developed, part of which is a shunt regulator circuit with additional inductance. The purpose of this work is to study the features of using a shunt regulator based on a boost converter with an additional inductance as part of three port electric energy converters. The results of a physical experiment confirm the operability of the new shunt stabilizer circuit with additional inductance, and its specific energy indicators are higher than that of the classic shunt regulator circuit.

**Keywords:** shunt regulator, multiport electric energy converter, spacecraft power conversion equipment, step-up DC / DC converter, spacecraft, solar battery, rechargeable battery, common bus

## REFERENCES

1. Petrovichev M.A., Gurtov A.S. *Sistema energosnabzheniya bortovogo kompleksa kosmicheskikh apparatov* [Energy system of the onboard of spacecrafts]. Samara, Samara State Aerospace University Publ., 2007. 87 p.
2. Brown M. *Power supply cookbook*. Burlington, MA, Elsevier, 2001. 280 p.

---

<sup>\*</sup> Received 27 September 2019.

3. Moin V.S. *Stabilizirovannye tranzistornye preobrazovateli* [Controllable transistor converters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 376 p.
4. Mourra O., Fernandez A., Tonicello F., Landstroem S. Multiple port DC DC converter for spacecraft Power Conditioning Unit. *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Orlando, FL, 2012, pp. 1278–1285. DOI: 10.1109/APEC.2012.6165983.
5. Forouzesh M., Siwakoti Y.P., Gorji S.A., Blaabjerg F., Lehman B. Step-Up DC–DC converters: a comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2652318.
6. Sidorov V.E., Shtein D.A., Korobkov D.V., Zaev I.V., Khoroshev M.A. Mathematical analysis of the multiport converter operation algorithm. *2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, 2018, pp. 612–616. DOI: 10.1109/EDM.2018.8435045.
7. Sidorov V.E., Shtein D.A., Zaev I., Khoroshev M.A. Mathematical analysis of multiport converter operation modes. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, 2018, pp. 102–105. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545538.
8. Mourra O., Fernandez A., Tonicello F. Buck Boost Regulator (B2R) for spacecraft Solar Array Power conversion. *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Palm Springs, CA, 2010, pp. 1313–1319. DOI: 10.1109/APEC.2010.5433399.
9. Geist A.V., Sidorov A.V., Korobkov D.V., Volkov A.G. DC/DC boost converter with additional inductance for the space power supply system. *2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, 2018, pp. 6403–6408. DOI: 10.1109/EDM.2018.8435084.
10. Kurochkin D.A., Geist A.V., Shtein D.A., Volkov A.G. Development of boost converter mathematical model with an additional inductance (1 C2-2L). *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, 2018, pp. 106–111. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545958.
11. Korobkov D.V., Kharitonov S.A., Shkol'nyi V.N., Lopatin A.A., Shtein D.A., Geist A.V., Makarov D.V. *Energopreobrazuyushchaya apparatura dlya sistem elektropitaniya postoyannogo toka aerokosmicheskikh apparatov* [Energy-conversion equipment for power supply systems for aerospace devices]. Patent RF, no. 2677629, 2019.
12. Suskis P., Galkin I. Enhanced photovoltaic panel model for MATLAB-simulink environment considering solar cell junction capacitance. *IECON 2013* –



39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, 2013, pp. 1613–1618. DOI: 10.1109/IECON.2013.6699374.

Для цитирования:

Шунтовой регулятор в составе трехпортового преобразователя электрической энергии / Д.А. Курочкин, А.В. Гейст, Д.А. Штейн, Т.Е. Шульц // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019 – № 3–4 (96). – С. 197–205. – DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-197-205.

For citation:

Kurochkin D.A., Geist A.V., Shtein D.A., Shults T.E. Shuntovoi regulyator v sostave trekhportovogo preobrazovatelya elektricheskoi energii [Shunt regulator in the composition of a 3-port electric energy converter]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 197–205. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-197-205.