

УДК 621.314

И.М. Журавлев, А.В. Осипов

Резонансный преобразователь энергии солнечной батареи в системе электропитания малого космического аппарата

Исследована работа резонансного преобразователя энергии солнечной батареи в основных режимах работы системы электропитания малого космического аппарата, таких как режим стабилизации тока заряда аккумуляторной батареи и режим стабилизации выходного напряжения. Получены регулировочные характеристики резонансного бестрансформаторного преобразователя. Разработана его имитационная модель с кодово-импульсным регулированием.

Ключевые слова: последовательный резонансный преобразователь, кодово-импульсное регулирование, бестрансформаторная топология, зарядное устройство, аккумуляторная батарея, солнечная батарея.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-81-85

К системе электропитания (СЭП) малых космических аппаратов (МКА) предъявляются высокие требования к тепловыделению и массе теплоотводящей конструкции, поэтому перспективным направлением являются резонансные преобразователи энергии солнечной батареи (СБ). Данный класс преобразователей сравнительно широко освещен в литературе [1–11], при этом исследования в основном сконцентрированы на способах регулирования с непрерывным изменением параметров импульсов: частотном или широтно-импульсном. Учитывая специфику построения структур СЭП МКА, связанную с низкой точностью стабилизации выходных параметров, можно утверждать о возможности эффективного применения импульсных способов регулирования с дискретным изменением параметров импульса [12, 13], в частности, кодово-импульсного, рассмотренного для преобразователей постоянного напряжения в [12–15].

Особенностью структур СЭП МКА с квазирегулируемой шиной АБ является сложность стабилизации напряжения питания на теновом участке орбиты ввиду отсутствия преобразователя, регулирующего разряд АБ. За время питания МКА от АБ напряжение на стабилизированной шине электропитания может снизиться на (1,5...2,0) В относительно стабилизированного значения (27,0±0,5) В, что ранее являлось недопустимым. Однако современные нагрузки для МКА обладают входными стабилизаторами питания, что позволяет значительно расширить диапазон напряжений шины питания с (27,0±0,5) до (28,5±4,5) В. Это делает перспективным применение буферной структуры и структуры с квазирегулируемой шиной АБ.

Таким образом, в данной работе поставлена цель анализа режимов работы резонансного преобразователя с КИР в составе структуры СЭП МКА с квази-регулируемой шиной АБ.

Структура СЭП МКА и режимы ее работы

Структурная схема СЭП с квазирегулируемой шиной АБ приведена на рис. 1. Положение дискретного ключа К1 определяется состоянием АБ: он замкнут при недостатке заряда АБ и разомкнут при

состоянии полного заряда, что позволяет избежать циклирования АБ.

Первичным источником электроэнергии для МКА является СБ, которая конструктивно состоит из параллельных секций, каждая из которых представляет собой последовательно соединенные фотопреобразователи (ФП). Отличительной особенностью ФП являются нелинейные характеристики (рис. 2), имеющие две основные рабочие области: ветвь тока и ветвь напряжения, сопрягаемые точкой максимальной мощности (ММ).

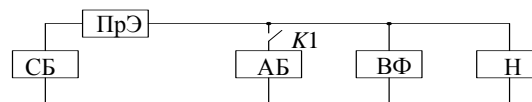


Рис. 1. СЭП с квазирегулируемой шиной АБ:

СБ – батарея солнечная; АБ – аккумуляторная батарея; ПрЭ – преобразователь энергии солнечной батареи; ВФ – выходной фильтр; Н – нагрузка

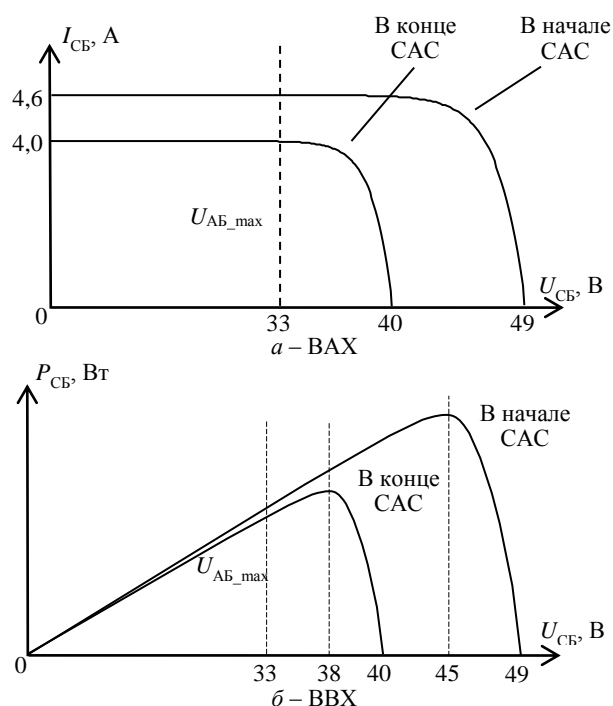


Рис. 2. Характеристики солнечной батареи

Основное влияние на параметры СБ МКА оказывают три фактора: температура ФП, интенсивность падающего излучения и деградации ФП за счет радиационного воздействия. Из-за различных скоростей протекания процессов (скорость изменения освещенности и радиационной деградации значительно ниже скорости изменения температуры) для анализа обычно принимают допущение о постоянной и равномерной освещенности СБ. Кроме того, при рассмотрении удобно сравнивать характеристики СБ в начале и конце срока активного существования (САС).

В связи с существенной сложностью выражений, описывающих ВАХ реальной СБ, применяется упрощенная математическая модель [16], формирующая ВАХ с помощью трех точек:

$$I_{BC} = I_{K3} \left(1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{K3}} \right) \frac{U_{XX} - U_{BC}}{U_{XX} - U_{опт}} \right), \quad (1)$$

где U_{XX} – напряжение холостого хода; I_{K3} – ток короткого замыкания; $I_{опт}$ – ток в точке ММ; $U_{опт}$ – напряжение в точке ММ.

Отличительной особенностью СБ, применяемых в МКА, является выполнение требования

$$U_{опт_min} > U_{AB_max},$$

где $U_{опт_min}$ – напряжение в точке ММ в конце САС; U_{AB_max} – максимальное напряжение АБ.

Данное условие позволяет применять в СЭП МКА преобразователи понижающего характера регулирования.

Моделирование резонансного преобразователя с кодово-импульсным регулированием в режимах стабилизации тока заряда АБ и напряжения нагрузки

Преобразователь энергии СБ может быть выполнен на основе резонансного бестрансформаторного преобразователя с кодово-импульсным регулированием (КИР) (рис. 3, а) [13]. Учитывая, что выходное напряжение определяется напряжением АБ, от преобразователя не требуется высокой точности регулирования, что подтверждает перспективность применения КИР.

Регулирование в преобразователе реализуется по кодово-импульсному принципу, который заключается в изменении интервалов вынужденных $T_{имп}$ и свободных T_0 колебаний на интервале T_M , кратном периоду резонансной частоты [12]. Преобразователь обеспечивает регулирование одной транзисторной диагональю (VT1, VT4), т.е. формирует однополярное КИР. Ток резонансного контура при регулировании показан на рис. 3, б.

Регулировочные характеристики выходных параметров в разных режимах функционирования СЭП МКА можно получить, используя коэффициент передачи преобразователя [13], имеющего линейный характер:

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{1+\gamma}{2}, \quad (2)$$

где $U_{ВЫХ}$ – выходное напряжение; $U_{ВХ}$ – входное напряжение; γ – относительная длительность импульса.

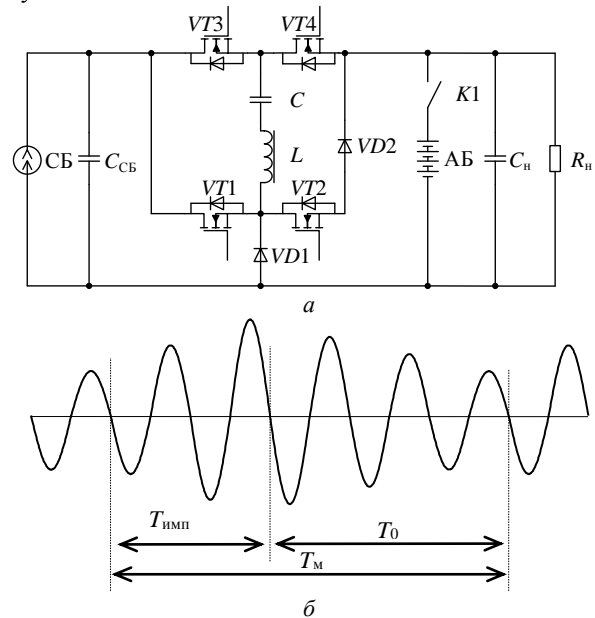


Рис. 3. Бестрансформаторный резонансный преобразователь с однополярным КИР – а; ток резонансного контура при $\gamma = 0,4$ – б

Совместное использование (1) и (2) позволяет получить регулировочные характеристики в разных режимах (рис. 4). Сложная форма ВАХ СБ оказывает влияние на регулировочные характеристики, зарядный ток имеет ярко выраженный экстремум (см. рис. 4, а), как и выходное напряжение (см. рис. 4, б).

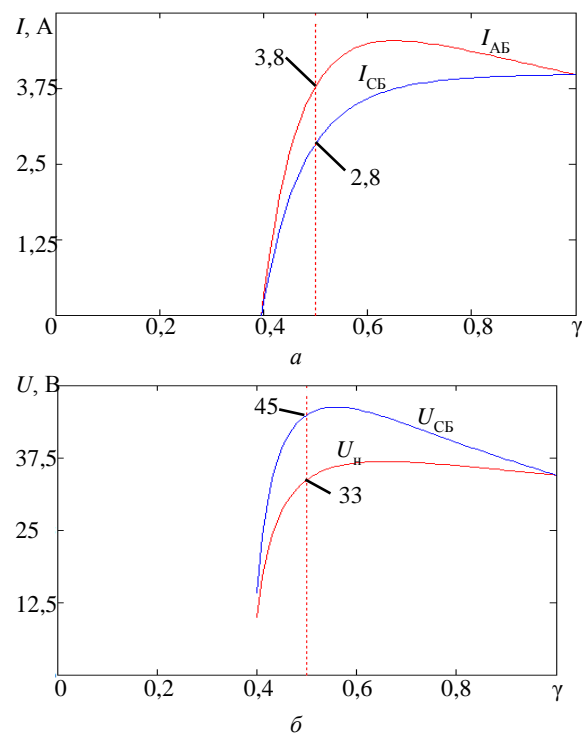


Рис. 4. Регулировочные характеристики преобразователя в конце САС в режиме регулирования: тока заряда при $U_{AB} = 30$ В – а; выходного напряжения при сопротивлении нагрузки 10 Ом – б

В ходе исследования преобразователя была разработана имитационная модель СЭП МКА с квази-регулируемой шиной АБ на основе резонансного преобразователя с кодово-импульсным регулированием в среде Matlab Simulink 2018b. Солнечная батарея реализована с помощью блока «PV Array» со следующими параметрами: $U_{XX} = 42,5 \text{ В}$, $I_{КЗ} = 14,0 \text{ А}$, $U_{\text{ОПТ}} = 38,2 \text{ В}$, $I_{\text{ОПТ}} = 13,5 \text{ А}$, температура СБ равна $25 \text{ }^\circ\text{C}$, удельная мощность 1 кВт/м^2 . К выходу блока подключен конденсатор $C_{\text{СБ}} = 5 \text{ мкФ}$, имитирующий входную емкость преобразователя. Параметры модели ФП используют данные для ФП TJ Solar Cell 3G30C.

Аккумуляторная батарея реализована с помощью блока «Battery» со следующими параметрами: $U_{\text{НОМ}} = 30,0 \text{ В}$, $C_{\text{НОМ}} = 1 \text{ А}\cdot\text{ч}$, уровень заряда батареи равен 90% . Емкость выходного фильтра МКА, представленного на схеме блоком «СН», равна 2200 мкФ . Фильтр собран из 27 конденсаторов, емкость каждого равна 82 мкФ , последовательное эквивалентное сопротивление (ESR) каждого конденсатора равно $0,5 \text{ Ом}$.

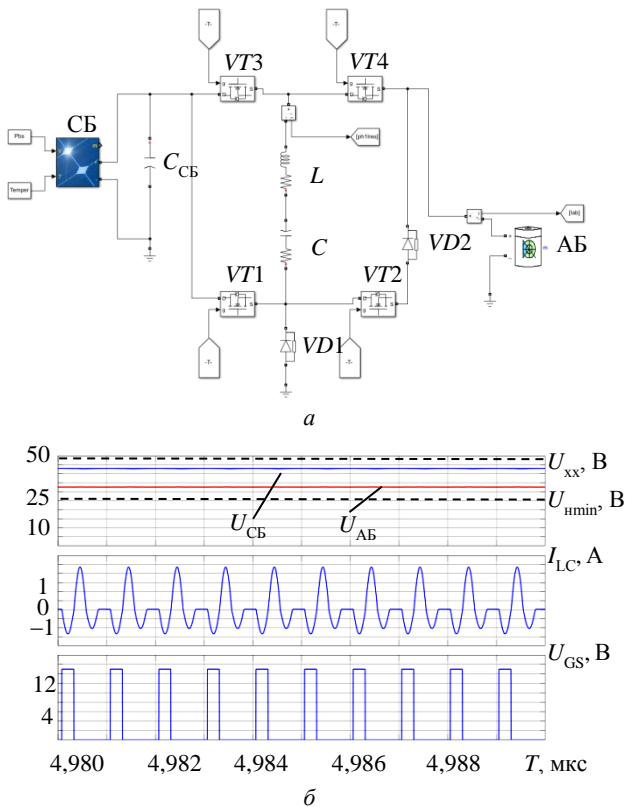


Рис. 5. Имитационная модель при работе в режиме стабилизации тока заряда АБ – а; диаграммы напряжений и токов в конце САС, при $\gamma = 0,5$ – б.

Параметры резонансного контура $L = 30 \text{ мкГн}$, $C = 84 \text{ нФ}$ обеспечивают резонансную частоту колебательного контура $f = 100 \text{ кГц}$ и волновое сопротивление контура $\rho = 20 \text{ Ом}$. ESR резонансного дросселя и конденсатора одинаковы и равны 50 мОм . Сопротивление открытого канала транзисторов $VT1-VT5$ равно 40 мОм , транзистор $VT5$ постоянно замкнут и в модели не учитывается, прямое

падение напряжения на диодах равно 1 В . Сопротивление нагрузки равно 10 Ом .

Диаграммы напряжений и токов резонансного преобразователя в режиме стабилизации тока АБ приведены на рис. 5. Диаграммы напряжений и токов резонансного преобразователя в режиме стабилизации напряжения нагрузки приведены на рис. 6.

Из рис. 5, 6 видно, что независимо от режима работы преобразователь работает на ветви напряжения ВАХ СБ. Погрешность совпадения соотношения напряжений СБ и нагрузки (см. рис. 6, б) с регулировочной характеристикой (см. рис. 4, б) не превышает 5% .

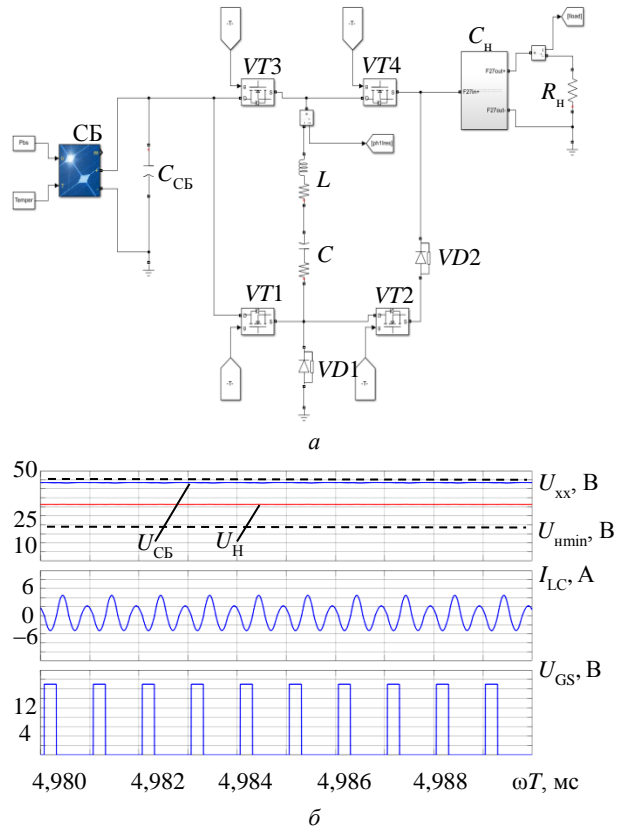


Рис. 6. Имитационная модель при работе в режиме стабилизации напряжения нагрузки – а; диаграммы напряжений и токов в конце САС при $\gamma = 0,5$ – б

Заключение

В ходе работы рассмотрены характеристики резонансного преобразователя с кодово-импульсным регулированием в составе СЭП МКА, работающего в режимах стабилизации тока заряда АБ и стабилизации напряжения нагрузки. Отмечено, что в обоих случаях характеристики имеют экстремум выходной мощности, обусловленный сложной формой ВАХ СБ.

Применение дискретного регулирования для СЭП МКА является перспективным направлением за счет сочетания нескольких условий – низких требований к точности стабилизации выходного напряжения и зарядного тока в СЭП МКА, высокой рабочей частоты преобразователя и произвольного изменения периода регулирования. Это позволяет добиться значительного упрощения схемы и конструк-

ции при практической реализации преобразователя энергии СБ.

Литература

1. Вольтодобавочный последовательный резонансный преобразователь с изменяемой структурой для систем электропитания / А.В. Осипов, Е.В. Ярославцев, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 3. – С. 27–37.

2. Последовательный резонансный преобразователь для систем электропитания от аккумуляторов / А.В. Осипов, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков, Е.В. Ярославцев, И.С. Шемолин // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 103–110.

3. Запольский С.А. Анализ способов реализации мягкого переключения транзисторных ключей повышающего преобразователя для энергосистемы космического аппарата / С.А. Запольский, Е.В. Загородских, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 90–93.

4. Power assessment indices of solar arrays under MPPT and DET methods for spacecraft / Zhang Xuan, Kang Qing, Yu Wentao, Xing Jie, Li Feng, You Xiangnan // European Space Power Conference. – 2019. – P. 321–325.

5. Методика оценки энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры систем электропитания космических аппаратов / М.В. Нестеришин, В.Г. Букреев, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 112–118.

6. Multiport energy router for satellite based on high-frequency transformer / Kang Qing, Zhang Xuan, Xing Ji, Li Feng, Shi Haiping // European Space Power Conference. – 2019. – P. 305–308.

7. Modeling and power management of a leo small satellite eps / E. Mostacciolo, L. Iannelli, S. Sagnelli, F. Vasca, R. Luisi, V. Stanzone // European Control Conference. – 2018. – P. 2738–2743.

8. Bidirectional dual active bridge series resonant converter with pulse modulation / Z. Pavlovic, J. Oliver, P. Alou, O. Garcia, J. Cobos // 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. – 2012. – P. 503–508.

9. Hillers A. Design of a highly efficient bidirectional isolated LLC resonant converter / A. Hillers, D. Christen, J. Biela // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference. – 2012. – Vol. 13. – P. 1–8.

10. An AC-link bidirectional DC-DC converter with synchronous rectifier / H. Toshiro, N. Keisuke, K. Takayuki, M. Hirofumi // 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – 2010. – P. 351–357.

11. Романенко А.С. Энергобаланс в автономной системе электроснабжения с регулятором мощности на основе матричного преобразователя тока солнечной батареи / А.С. Романенко, А.В. Кобзев, В.Д. Семенов // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 4(30). – С. 115–119.

12. Сандырев О.Е. Установка высокочастотного индукционного нагрева с кодово-импульсным регулированием для плавки металлов: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 147 с.

13. Журавлев И.М. Резонансные преобразователи постоянного напряжения с кодово-импульсным регулированием / И.М. Журавлев, А.В. Осипов // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 97–102.

14. Нестеришин М.В. Сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с параллельным и последовательным регулятором мощности солнечной батареи / М.В. Нестеришин,

Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 98–102.

15. Резонансные конвертеры постоянного тока на основе структур с переключаемыми конденсаторами для автономных систем / Л.Г. Зотов, А.Д. Мехтиев, В.В. Югай, А.Н. Коновалова // Актуальные проблемы современности. – 2015. – Т. 3. – С. 88–91.

16. Шиняков Ю.А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов // Вестник Самар. гос. ун-та. – 2007. – № 1. – С. 123–129.

Журавлев Иван Михайлович

Аспирант каф. ПрЭ ТУСУР
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-908-021-37-24
Эл. почта: iv_zhuravlev@mail.ru

Осипов Александр Владимирович

Канд. техн. наук, зав. лаб. каф. промышленной электроники (ПрЭ) Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-44-75
Эл. почта: ossan@mail.ru

Zhuravlev I.M., Osipov A.V.

Resonant solar cell energy converter in the power supply system for small spacecraft

The operation of a solar cell resonant converter at operating modes in the power supply system of a small spacecraft is investigated. The resonant converter with pulse-code regulation simulation model has been developed, and the operation point by stabilizing charge current mode and stabilizing output voltage mode is considered. The converter regulating characteristics in various operating modes are obtained.

Keywords: serial resonant converter, pulse-code regulation, transformerless topology, charger devices, storage battery, solar battery.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-3-81-85

References

1. Osipov A.V., Yaroslavtsev E.V., Burkin E.Y., Sviridov V.V. [Booster series resonant transformer with variable structure for power supply system's]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Assets Engineering*. 2018, vol. 329, no 2, pp. 27–37 (in Russ.).

2. Osipov A.V., Shcolnyi V.N., Shinyakov Y.A., Yaroslavtsev E.V., Shemolin I.S. [Serial resonance converter for discharge of batteries space vehicles power system]. *Proceedings of TUSUR University*. 2017, vol. 20, no 2, pp. 103–110 (in Russ.).

3. Zapolskiy S.A., Zagorodskikh E.V., Shkolnyi V.N., Shinyakov Yu.A. [Analysis of soft-switching boost-converters for the space-craft's power system]. *Proceedings of TUSUR University*. 2016, vol. 19, no 2, pp. 90–93 (in Russ.).

4. Xuan Zhang, Qing Kang, Wentao Yu, Jie Xing, Feng Li, Xiangnan You. Power assessment indices of solar arrays under MPPT and DET methods for spacecraft. *European Space Power Conference*. 2019, pp. 321–325.

5. Nesterishin M.V., Bukreev V.G., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. [Method to estimate the energy efficiency of Power

Conditioning Units in Spacecrafts Electric Power Systems]. *Proceedings of TUSUR University*. 2018, vol. 21, no 1, pp. 112–118 (in Russ.).

6. Qing Kang, Xuan Zhang, Ji Xing, Feng Li, Haiping Shi. Multiport energy router for satellite based on high-frequency transformer. *European Space Power Conference*. 2019, pp. 305–308.

7. Mostacciolo E., Iannelli L., Sagnelli S., Vasca F., Luisi R., Stanzione V. Modeling and power management of a leo small satellite eps. *European Control Conference*. 2018, pp. 2738–2743.

8. Pavlovic Z., Oliver J., Alou P., Garcia O., Cobos J. Bidirectional dual active bridge series resonant converter with pulse modulation. *2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*. 2012, pp. 503–508.

9. Hillers A., Christen D., Biela J. Design of a highly efficient bidirectional isolated LLC resonant converter. *15th International Power Electronics and Motion Control Conference*. 2012, vol. 13, pp. 1–8.

10. Toshiro H., Keisuke N., Takayuki K., Hirofumi M. An AC-link bidirectional DC-DC converter with synchronous rectifier. *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. 2010, pp. 351–357.

11. Romanenko A.S., Kobzev A.V., Semenov V.D. [Energy balance in autonomous power supply system based on solar battery current matrix converter]. *Proceedings of TUSUR University*. 2013, vol. 30, no 4, pp. 115–119 (in Russ.).

12. Sandyrev O.E. *Ustanovka vysokochastotnogo indukcionnogo nagreva s kodovo-impulsnym regulirovaniem dlya plavki metallov. Dissertacia ... kand. nauk* [High-frequency converter for metal induction heating with code-pulse regulation. Cand. Diss.] Tomsk, 2007. 147 p. (in Russ.).

13. Zhuravlev I.M., Osipov A.V. [Resonant DC-DC Converter with Code-pulse control]. *Proceedings of TUSUR University*. 2020, vol. 23, no 2, pp. 97–102 (in Russ.).

14. Nesterishin M.V., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. [Comparative analysis of energy efficiency of power conditioning units with parallel and serial Solar Array power regulators]. *Proceedings of TUSUR University*. 2018, vol. 21, no 3, pp. 98–102 (in Russ.).

15. Zotov L.G., Mehtiev A.D., Yugay V.V., Konovalova A.N. [Resonant converters DC structure-based switched-capacitor for autonomous systems]. *Actual modern issue*. 2015, vol. 3, pp. 88–91 (in Russ.).

16. Shinaykov Yu.A. [Extremal regulation of automatic space vehiclesolar battery power]. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2007, no 1, pp. 123–129 (in Russ.).

Ivan M. Zhuravlev

Postgraduate Student, TUSUR
40, Lenin pr., 634050, Tomsk, Russia
Phone: +7-908-021-37-24
Email: iv_zhuravlev@mail.ru

Aleksandr V. Osipov

Candidate of Engineering Sciences, Head of Laboratory,
Tomsk State University of Control System
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., 634050, Tomsk, Russia
Phone: +7 (382-2) 41-44-75
Email: ossan@mail.ru