

УДК 62-50:519.216: 621.313.3

СТЕНД ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ КУКА*

Р.И. ЯКИМОВ¹, Е.А. АКСЕНОВ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, инженер Института силовой электроники. E-mail: Roman-NSTU@yandex.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры автоматики. E-mail: efimke54@gmail.com

Импульсные преобразователи постоянного напряжения (ИППН) широко применяются в сетях электропитания. Среди множества схем ИППН можно выделить преобразователь Кука. Данный преобразователь отличается от других схем непрерывностью входного и выходного токов, что значительно снижает уровень помех, генерируемых при работе преобразователя. К выходному напряжению преобразователя предъявляются требования на показатели качества переходных процессов, возможность обеспечения которых в значительной степени зависит от эффективности применяемых алгоритмов управления. Построение систем управления преобразователями исследуется во многих работах, где обычно рассматриваются лишь результаты численного моделирования. Поэтому было решено собрать стенд для проведения экспериментов, результаты которых можно сравнить с результатами численного моделирования. В основу стенда положена схема преобразователя Кука, в которой номиналы основных элементов схемы имеют следующие значения: силовые дроссели $L1 = 456 \text{ мкГн}$ и $L2 = 317 \text{ мкГн}$, конденсаторы $C1 = C1 = 470 \text{ мкФ}$. Силовой ключ – полевой транзистор IRF3808PBF, а силовой диод – STTH2003CG. В качестве системы управления (СУ) используется цифровая СУ, реализованная на микроконтроллере (МК) STM32F107. В рассматриваемом стенде частота дискретизации равна 30 кГц, задействовано 3 канала АЦП (первый канал – считывание значения датчика тока, второй канал – считывание значения датчика напряжения буферного конденсатора, третий канал – считывание значения датчика выходного напряжения). Датчик тока реализован на специальной микросхеме ASC712 и используется для получения значения тока входной индуктивности ($L1$). Датчики напряжения спроектированы с использованием различных включений операционных усилителей (в макете используются ОУ LM358). Они предназначены для измерения напряжения на выходе преобразователя, а также напряжения на буферном конденсаторе ($C1$). Для согласования сигналов между МК и силовым ключом используется специализированный

* Статья получена 11 октября 2016 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-01004-а).

драйвер. На этапе настройки системы управления необходимо обеспечить связь МК и ПК. В качестве интерфейса связи был выбран USART. Безопасность работы стенда обеспечивается гальванической развязкой на отдельной плате (плата состоит из двух микросхем и их обвязки. Микросхема ADUM предназначена для обеспечения гальванической развязки, микросхема FTDI – переходник USB-UART). В работе приведена функциональная схема, показывающая взаимосвязи между основными элементами стенда; дано описание принципиальных схем, раскрывающих схемные реализации всех частей стенда, а также приведены их подробные описания. В целях отладки микропроцессорной части стенда, алгоритмов управления и отслеживания текущего состояния системы используется специальная программа.

Ключевые слова: преобразователи постоянного напряжения, импульсные преобразователи, преобразователь Кука, силовая электроника, широтно-импульсная модуляция, микроконтроллер

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-131-143

ВВЕДЕНИЕ

Важной частью современных приборов и промышленного оборудования является система электропитания, реализуемая средствами силовой электроники. Каждый из существующих в настоящее время электроприборов нуждается в определенных параметрах входного питающего напряжения. Некачественные параметры электроэнергии источников питания приводят к выходу из строя дорогостоящего электронного оборудования. С целью формирования заданных параметров электроэнергии источников питания широко применяются импульсные преобразователи постоянного напряжения. Существует множество различных схем таких преобразователей [1, 2]. В то же время возможность обеспечения заданных требований к параметрам системы электропитания и показателям качества переходных процессов в преобразователях напряжения в значительной степени зависит от эффективности применяемых алгоритмов управления. Вопросы построения систем управления для преобразователей напряжения исследуются во многих работах, где обычно рассматриваются схемотехнические решения и результаты численного моделирования [3–9]. Необходимым элементом исследований в данной области является проверка теоретических результатов и результатов численного моделирования на экспериментальных стендах для преобразователей напряжения для совершенствования методик синтеза систем управления и проверки их эффективности. Примеры экспериментальных стендов для систем управления преобразователями напряжения можно найти, например, в работах [10–12].

В статье приводится описание стенда, на основу которого положена схема преобразователя Кука [13–15]. Стенд предназначен для экспериментальных исследований систем управления, в частности, для апробации новых

алгоритмов управления преобразователем Кука, которые были предложены в работах [16–19]. Предварительно была выполнена проверка работоспособности предложенных алгоритмов управления путем имитационного моделирования в специализированном программном обеспечении PSIM, а также Matlab/Simulink. Алгоритмы управления на стенде реализованы микроконтроллером (МК), что позволяет проводить экспериментальные исследования для различных вариантов построения системы управления.

1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА МАКЕТА

С целью исследования свойств преобразователя Кука с различными алгоритмами управления был реализован макет, функциональная схема которого показана на рис. 1.

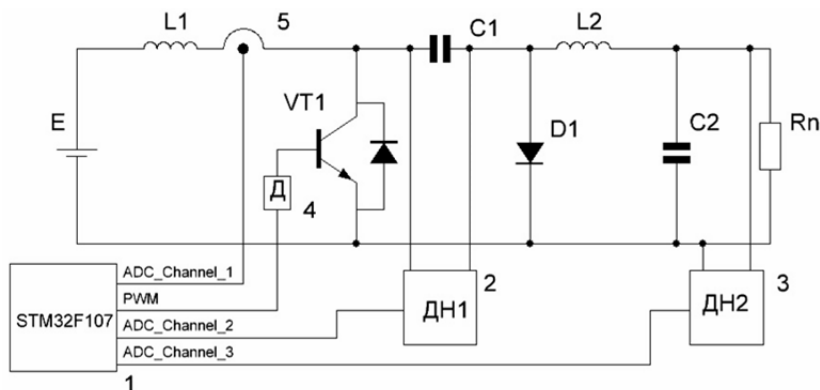


Рис. 1. Функциональная схема макета

На данной функциональной схеме представлена электрическая часть преобразователя совместно с датчиками и микроконтроллером.

Блок 1 на рис. 1 – микроконтроллер STM32F107, используемый для реализации алгоритмов управления. Используемый микроконтроллер обладает необходимыми вычислительными ресурсами (тактовая частота 72 МГц). В его состав входят модуль ШИМ (модуль позволяет формировать импульс управления), два двенадцатититных АЦП. Для работы с АЦП возможно использовать только 15 определенных портов ввода/вывода. К любому из доступных выводов может быть подключен любой модуль АЦП с условием: к одному и тому же порту ввода/вывода одновременно нельзя подключать модули АЦП.

Блоки 2, 3 – датчики напряжения. В основе датчика лежит дифференциальное включение операционного усилителя (LM385). Датчики рассчитаны на диапазон напряжений от нуля до 50 В (существует возможность расширения диапазона измерения путем коррекции коэффициента передачи).

Блок 4 – драйвер, преобразующий импульсы управления МК в коммутационные сигналы для силового ключа.

Блок 5 – датчик тока, выполненный на специализированной микросхеме ASC712 (диапазон измеряемого значения тока от нуля до 30 А), с которой поступает сигнал на АЦП микроконтроллера, пропорциональный значению измеренного тока.

В макете использованы силовые дроссели следующего номинала: $L1 = 456 \text{ мкГн}$, $L2 = 317 \text{ мкГн}$. Значения емкостей конденсаторов равны величине $C1 = C1 = 470 \text{ мкФ}$. В качестве силового ключа использован MOSFET IRF3808PBF, а в качестве силового диода STTH2003CG.

2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА МАКЕТА

Реализация блока 1 (рис. 1) более подробно показана на рис. 2, где изображена микропроцессорная часть, содержащая МК и его вспомогательные элементы, а МК представлен микросхемой DD2.

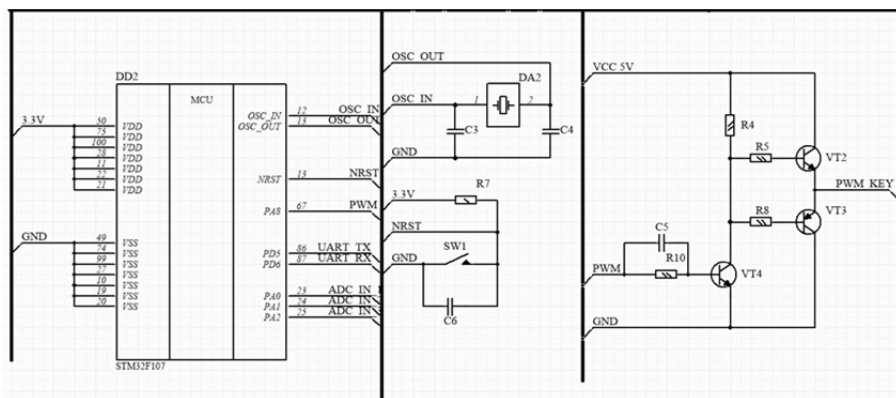


Рис. 2. Микропроцессорная часть

Реализация блоков 2, 3 (рис. 1) показана на рис. 3, где датчики напряжения реализованы с помощью ОУ (элементы DA1A, DA1B).

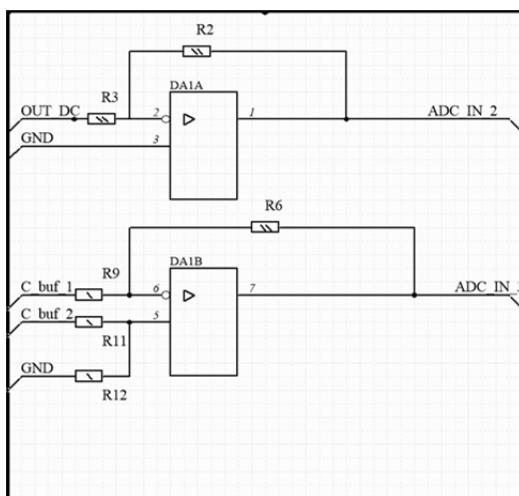


Рис. 3. Датчики напряжения

Схема реализации блока 4 (рис. 1) для управления силовым ключом VT1(рис.1) представлена на рис. 4.

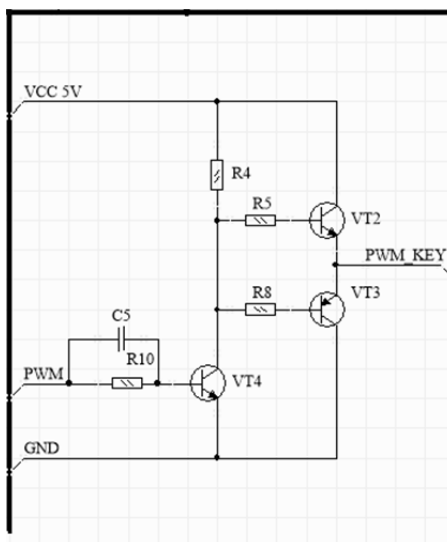


Рис. 4. Драйвер управления силовым ключом

На рис. 5 показаны силовая часть преобразователя Кука и датчик тока (микросхема DD1).

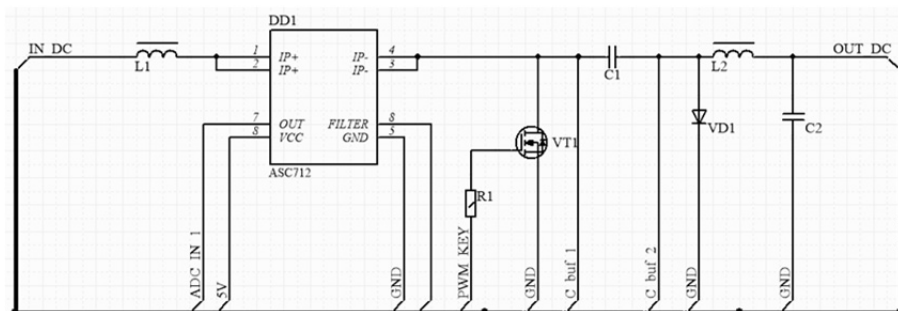


Рис. 5. Силовая часть макета с датчиком тока

Для подключения стенда используются разъемы, представленные на рис. 6:

X1 – вход, через который с внешнего источника питания поступает напряжение 3,3 В, необходимое для питания микроконтроллера;

X2 – разъем, через который поступает питающее напряжение на драйвер;

X3 – разъем для подключения нагрузки;

X4 – разъем питания датчика тока;

X5 – разъем для входного источника напряжения;

X6 – разъем для интерфейса связи UART, используемый для связи с ПК.

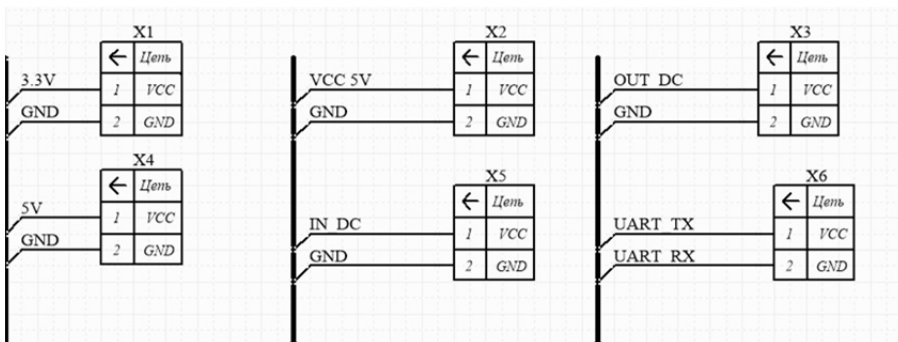


Рис. 6. Разъемы

С целью отладки микропроцессорной части стенда, алгоритмов управления и отслеживания текущего состояния системы используется специальная программа на языке Си#, диалоговое окно которой представлено на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид диалогового окна терминала

Эта программа позволяет считывать необходимые данные с МК, а также осуществлять перенастройку коэффициентов, не меняя прошивки микроконтроллера.

С целью обеспечения гальванической развязки между микропроцессорной частью стенда и ПК используется схема на рис. 8.

Представленный модуль образуют две микросхемы – FTDI и ADUM. Микросхема FTDI образует переходник USB-UART, а ADUM необходима для обеспечения гальванической изоляции сигналов.

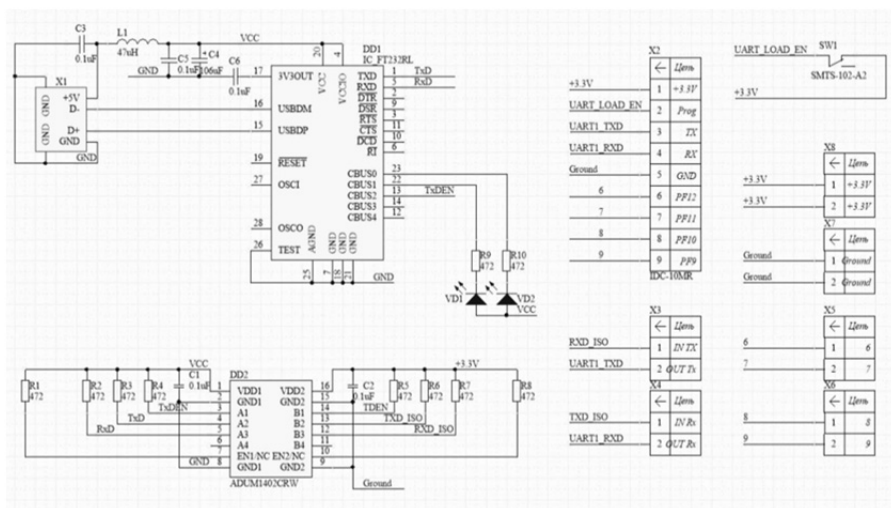


Рис. 8. Принципиальная схема модуля связи с ПК

ВЫВОДЫ

Описанный стенд позволяет проводить широкий спектр экспериментальных исследований для различных структур и алгоритмов управления преобразователем напряжения, выполненного по схеме Кука, на основе которых можно оценить эффективность различных подходов к построению систем управления преобразователями постоянного напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 671 с.
2. Erickson R.W. Fundamentals of power electronics. – [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2013. – 773 p.
3. Ишматов З.Ш. Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами. Полиномиальные методы: монография. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 278 с.
4. Лихошерст В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии с импульсным регулированием. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – 116 с.
5. Сапселев А.В., Харитонов С.А., Алгазин Е.И. Система электроснабжения автономных транспортных объектов // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 249–253.

6. Yurkevich V.D. Design of controller for buck-boost converter // Proceedings of 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS-2005, Novosibirsk, Russia, 26 June – 2 July 2005. – Novosibirsk, 2005. – P. 741–745.
7. Yurkevich V.D. PWM controller design based on singular perturbation technique: a case study of buck-boost DC-DC converter // Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, 28 August – 2 September 2011. – Milan, 2011. – P. 9739–9744. – doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.00963.
8. Yurkevich V.D., Zinoviev G.S., Gordeev A.A. PWM current controller design for multi-level DC-DC converter via singular perturbation technique // The 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2011), Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2011. – Novosibirsk, 2011. – P. 390–398.
9. Ryvkin S., Himmelstoss F.A. Control problem of a novel low-voltage DC converter // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2012. – Vol. 32, iss. 1. – P. 220–232.
10. Романов А.В. Экспериментальное исследование устойчивости импульсного преобразователя постоянного напряжения // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – № 1. – С. 52–53.
11. Numerical and experimental study of the region of period-one operation of a PWM boost converter / E. Toribio, A. El Aroudi, G. Olivar, L. Benadero // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – N 15 (6). – P. 1163–1171.
12. Experimental results of laboratory tests of electrical starting system powered by a DC source / M.A. Zharkov, P.A. Bachurin, S.A. Kharitonov, D.V. Korobkov, R.Yu. Sarakhanova, V.S. Simin // Proceedings of 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2016), Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk, 2016. – P. 623–627.
13. Cuk S., Middlebrook R.D. A new optimum topology switching DC-to-DC converter // Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'77, 14–16 June 1977, Palo Alto, California. – New York: IEEE, 1977. – P. 160–179.
14. Cuk S. A new zero-ripple switching DC-to-DC converter and integrated magnetics // Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'80, Atlanta, Georgia, 16–20 June 1980. – New York: IEEE, 1980. – P. 12–32.
15. Chen Z. PI and sliding mode control of a Cuk converter // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2012. – Vol. 27, iss. 8. – P. 3695–3703.
16. Aksenov E.A., Yurkevich V.D. Control system design based on sliding mode control and singular perturbation technique for a Cuk converter // Proceedings of the 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016), Novosibirsk, Russia, 3–6 October 2016. – Novosibirsk, 2016. – Vol. 1, pt. 3. – P. 77–82.

17. *Aksenov E.A., Yurkevich V.D.* Sliding mode and time-scales in control system design for a Cuk converter // Proceedings of 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2016), Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk, 2016. – P. 401–406.

18. *Аксенов Е.А., Юркевич В.Д.* Синтез каскадной системы управления для преобразователя Кука // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – Вып. 3 (81). – С. 7–20.

19. *Aksenov E.A., Yurkevich V.D.* Cascaded control system design for a Cuk converter via singular perturbation approach // Proceedings of 16th Annual International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2015), Altai, Erlagol, 29 June – 3 July, 2015. – Novosibirsk, 2015. – P. 534–541.

Якимов Роман Игоревич, инженер Института силовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – силовая электроника, импульсные преобразователи напряжения. E-mail: RomanNSTU@yandex.ru

Аксенов Ефим Андреевич, магистрант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление в технических системах, импульсные преобразователи напряжения, силовая электроника. Имеет 9 публикации. E-mail: efimke54@gmail.com

Testbed for Experimental Study of Cuk Converter Control Systems*

R.I. Jukimov¹, E.A. Aksenov²

¹ *Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Engineer. E-mail: RomanNSTU@yandex.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Master student, Automation department. E-mail: efimke54@gmail.com*

Switching power converters are widely used in order to provide output voltage stabilization of direct current off-line supply sources. There is huge set of DC-DC pulse converters, particularly, Cuk converters are frequently used. The distinctive feature of Cuk converters is the low level of high frequency noise which is generated by converter due to its switching operation. However, transient performance insides are imposed upon the output voltage and its satisfaction highly depends on effectiveness of applied control algorithms. Control system design for voltage converters is studied in plenty of works, but the discussed results are only numerical simulations. Therefore was decided to implement a testbed for performing experiments, which

* Received 11 October 2016.

results can be compared with simulated ones. It is based on Cuk scheme with following elements values: power conductors $L1 = 0.456$ mH and $L2 = 0.317$ mH, capacitors $C1 = C1 = 0.470$ mF, power switch – MOSFET IRF3808PBF, power diode – STTH2003CG. As control system is used digital one, realized on microcontroller (MC) STM32F107. Discussed testbed has a sampling rate as 30 kHz, uses 3 ADC channels (the first one for receiving data from current sensor, the second – from sensor of voltage on buffer capacitor, the third – from output voltage sensor). Sensing element of input current, realized on special shunt ASC712, is used for measurement of current through input conductor ($L1$). Voltage sensors are constructed based on various connection layouts of operational amplifier (chip LM358) and intended for measurement of voltage on buffer capacitor ($C1$) and converter output. Special driver provides signal conditioning between power switch and MC. During a setup a connection between personal computer (PC) and MC is required. USART was chosen as communication interface. Testbed reliability is ensured by electrical isolation realized on certain circuit board (it contains two chips with required electrical elements. Chip ADUM provides electrical isolation and chip FTDI is USB-UART adapter). Presented functional scheme shows the mutual interactions between main components. Schematic circuit and its description are also presented. In order to debug microcontroller part of the testbed and control algorithms, monitor current system state special program is used.

Keywords: DC-DC converters, switching converter, Cuk converter, power electronics, pulse-width modulation, microcontroller

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-131-143

REFERENCES

1. Zinov'ev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2009. 671 p.
2. Erickson R.W. *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media, 2013. 773 p.
3. Ishmatov Z.Sh. *Mikroprotsessornoe upravlenie elektroprivodami i tekhnologicheskimi ob'ektami. Polinomial'nye metody* [Microprocessor control by electric drives and technological objects]. Ekaterinburg, UGTU-UI Publ., 2007. 278 p.
4. Likhoshester V.I. *Poluprovodnikovye preobrazovateli elektricheskoi energii s impul'snym regulirovaniem* [Semiconductor transformers of electrical energy with impulse regulation]. Ekaterinburg, UGTU-UI Publ., 2000. 116 p.
5. Sapsalev A.V., Kharitonov S.A., Algazin E.I. Sistema elektrosnabzheniya avtonomnykh transportnykh ob'ektov [Power supply system for autonomous transport applications]. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2 (120), pp. 249–253.
6. Yurkevich V.D. Design of controller for buck-boost converter. *Proceedings of 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS-2005*, Novosibirsk, Russia, 26 June – 2 July 2005, pp. 741–745.
7. Yurkevich V.D. PWM controller design based on singular perturbation technique: a case study of buck-boost DC-DC converter. *Proceedings of the 18th IFAC*

World Congress, Milan, Italy, 28 August – 2 September 2011, pp. 9739–9744. doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.00963

8. Yurkevich V.D., Zinoviev G.S., Gordeev A.A. PWM current controller design for multi-level DC-DC converter via singular perturbation technique. *The 12th Annual International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2011*, Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2011, pp. 390–398.

9. Ryvkin S., Himmelstoss F.A. Control problem of a novel low-voltage DC converter. *COMPEL. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2012, vol. 32, iss. 1, pp. 220–232.

10. Romanov A.V. Eksperimental'noe issledovanie ustoichivosti impul'snogo preobrazovatelya postoyannogo napryazheniya [Experimental study of the stability for DC pulse converter]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya – Electrotechnical Systems and Complexes*, 2008, no. 1, pp. 52–53.

11. Toribio E., El Aroudi A., Olivar G., Benadero L. Numerical and experimental study of the region of period-one operation of a PWM boost converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, no. 15 (6), pp. 1163–1171.

12. Zharkov M.A., Bachurin P.A., Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Sarakhanova R.Yu., Simin V.S. Experimental results of laboratory tests of electrical starting system powered by a DC source. *Proceedings of 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2016)*, Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2016, pp. 623–627.

13. Cuk S., Middlebrook R.D. A new optimum topology switching DC-to-DC converter. *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'77*, Palo Alto, California, 14–16 June 1977, pp. 160–179.

14. Cuk S. A new zero-ripple switching DC-to-DC converter and integrated magnetics. *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'80*, Atlanta, Georgia, 16–20 June 1980, pp. 12–32.

15. Chen Z. PI and sliding mode control of a Cuk converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, iss. 8, pp. 3695–3703.

16. Aksekov E.A., Yurkevich V.D. Control system design based on sliding mode control and singular perturbation technique for a Cuk converter. *Proceedings of the 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2016)*, Novosibirsk, Russia, 3–6 October 2016, vol. 1, pt. 3, pp. 77–82.

17. Aksekov E.A., Yurkevich V.D. Sliding mode and time-scales in control system design for a Cuk converter. *Proceedings of 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2016)*, Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2016, pp. 401–406.

18. Aksenov E.A., Yurkevich V.D. Sintez kaskadnoi sistemy upravleniya dlya preobrazovatelya Kuka [Design of cascaded control system for a Cuk converter]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, iss. 3 (81), pp. 7–20.

19. Aksenov E.A., Yurkevich V.D. Cascaded control system design for a Cuk converter via singular perturbation approach. *Proceedings of 16th Annual International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2015)*, Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2015, pp. 534–541.