

АВТОНОМНЫЙ ОДНОФАЗНЫЙ ИНВЕРТОР С ВЫСОКИМ КАЧЕСТВОМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Ю.М. Голембиовский¹, Ю.Б. Томашевский¹, А.А. Щербаков²,
Д.Ю. Луков¹, А.В. Старков³

¹ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия,

² ООО «НетКрекер», г. Саратов, Россия,

³ ООО «ЛионСистемс», г. Саратов, Россия

Представлено решение актуальной проблемы повышения качества выходного сигнала автономных инверторов напряжения. В отличие от традиционно используемой для этой цели широтно-импульсной модуляции (ШИМ), предложена топология, содержащая мостовой однофазный инвертор и коммутатор источников постоянного тока на входе, позволяющий формировать на нагрузке восьмиступенчатое напряжение с суммарным коэффициентом гармоник 6,9 %, что удовлетворяет требованиям современного стандарта на качество электроэнергии. Новизна технического решения подтверждена патентом на полезную модель. Оптимизация кривой многоступенчатого, аппроксимирующего синусоиду сигнала по критерию минимума коэффициента гармоник проводилась с помощью эволюционного моделирования (генетического алгоритма). Исследование электромагнитных процессов осуществлялось методом имитационного моделирования. Полученные результаты подтвердили неизменность коэффициента гармоник выходного напряжения инвертора во всем диапазоне изменения коэффициента мощности нагрузки $0 \leq \cos \varphi \leq 1$ и устойчивость системы при мгновенном увеличении и уменьшении нагрузки.

Значимость предложенного и исследованного схемного решения определяется преимуществами ступенчатой модуляции по сравнению с широтно-импульсной:

– низкие динамические потери в ключевых элементах, позволяющие использовать инвертор в широком диапазоне частот;

– независимость коэффициента гармоник от частоты и характера нагрузки;

– уменьшение массогабаритных показателей, вследствие отсутствия необходимости установки фильтра на выходе инвертора, поскольку гарантируемое качество электроэнергии соответствует требованиям стандарта;

– отсутствие по сравнению с методом широтно-импульсной модуляции негативного влияния на характеристики потребителей и сроки их эксплуатации, если не используются фильтры высших гармоник.

Область применения рассмотренной схемы инвертора включает радиоэлектронную технику, аппаратуру связи, электропривод. Наибольшие преимущества предложенного схемотехнического решения проявляются при включении инвертора в систему локального электроснабжения с возобновляемыми источниками электроэнергии (солнечные панели, аккумуляторы), поскольку в этом случае исключается установка гальванически изолированных выпрямителей в качестве источников постоянного тока на входе АИН.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, амплитудно-импульсная модуляция, качество напряжения, коэффициент гармоник.

Введение

Известно, что классическая схема однофазного автономного инвертора напряжения (АИН) не предназначена для потребителей, чувствительных к качеству питающего напряжения, в частности, таких как системы управления и контроля различными технологическими аппаратами и процессами, вычислительные машины, телеметрия, связь и радиотехнические устройства [1].

Несинусоидальность напряжения на конденсаторах вызывает дополнительные потери, что требует увеличения установленной мощности конденсаторов и, следовательно, массо-габаритных показателей установок. Кроме того, несинусоидальность

напряжения повышает потери в обмотках трансформаторов и магнитопроводах [2, 3]. Питание электродвигателей напряжением, содержащим высшие гармоники, приводит не только к дополнительным потерям электроэнергии, но и к ухудшению их рабочих характеристик [4].

Коэффициент гармоник напряжения K_u , генерируемого известными базовыми схемами АИН, значительно превосходит требования стандарта на качество сетевого напряжения, допускающего значение K_u не более 8 % [5].

В последнее десятилетие заметно усилился интерес к созданию локальных интеллектуальных систем электроснабжения на базе возобновляемых

источников электроэнергии (ветрогенераторов, солнечных панелей, аккумуляторных батарей). Основной задачей в таких сетях является организация перетекания энергии между разнотипными источниками, а также между источниками и потребителями с минимизацией возникающих при этом потерь. Главным звеном в этой сложной системе электроснабжения является автономный инвертор напряжения, способный генерировать выходное напряжение с параметрами, удовлетворяющими требованиям ГОСТ 32144–2013.

Поскольку в локальных сетях однофазные потребители занимают доминирующее положение, применение однофазных АИН для решения указанных выше задач требует кардинального улучшения качества выходного напряжения инверторов. Традиционно эта задача решается за счёт использования широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [6, 7], что не всегда является лучшим решением.

Во-первых, применение ШИМ увеличивает потери в силовых ключах АИН, поскольку частота ШИМ в 20–100 раз превосходит частоту первой гармоники выходного напряжения инвертора [8, 9].

Во-вторых, появление большого количества высших гармоник в кривой выходного напряжения АИН при использовании ШИМ отрицательно сказывается на качестве функционирования потребителей и их сроке службы. Для устранения этого недостатка обычно на выходе АИН устанавливают фильтры высших гармоник, что увеличивает массогабаритные параметры и стоимость системы электроснабжения [10].

Эти недостатки не устраняются даже применением завоевывающих все большее внимание многоуровневых инверторов с ШИМ [11–13].

Альтернативным вариантом, позволяющим минимизировать негативные следствия широтно-импульсной модуляции, является применение амплитудно-импульсной модуляции (АИМ), в частности, ступенчатой модуляции (СМ) для формирования выходного напряжения АИН. Вопросами синтеза топологии инверторов с СМ посвящено множество публикаций [14–18], отображающих разные стороны этой проблемы.

Амплитудно-импульсная модуляция

Формирование ступенчатой кривой, аппроксимирующей синусоидальный сигнал, позволяет при достаточном количестве ступеней достигнуть уровня коэффициента гармоник K_u , не превышающего допустимого стандартом значения. Приведенные в работах [17, 18] данные показывают, что уже при 6–7 уровне сигнала можно получить напряжение, несинусоидальность которого не превышает 8 %. При этом частота переключения вентиля в силовой схеме инвертора будет снижена по сравнению с ШИМ на 1–2 порядка, а значит, и величина динамических потерь.

Для наибольшего приближения к форме синусоидального сигнала требуется оптимизировать

одновременно количество ступенек, их амплитуды и длительности [16, 17, 19]. Эта задача решена с помощью эволюционного алгоритма [20–22], обеспечивающего не только синтез топологии схемы АИН, но и получение значений напряжения источников питания E_1, E_2, E_3 , амплитуду и длительности ступенек сигнала, аппроксимирующего синусоиду.

Синтезированная схема однофазного АИН с восьмиступенчатым выходным напряжением, включая ступень нулевого уровня, показана на рис. 1 [23]. Схема содержит однофазный инверторный мост (T_1 – T_6) и коммутатор, включающий три источника питания E_1, E_2, E_3 и ключи T_5 – T_{10} . Напряжения E_3, E_2, E_1 соотносятся как 1:2:3. АИН обеспечивает питание активно-индуктивной нагрузки Z_n . При этом циркуляция реактивной составляющей мощности нагрузки (т. е. возврат отстающих токов нагрузки) источникам питания осуществляется через ключи T_6, T_8, T_{10} на ниспадающем участке синусоиды.

Напряжение на нагрузке и временные диаграммы импульсов управления ключами представлены на рис. 1.

Запасённая в индуктивной составляющей нагрузки энергия на текущей ступени передается на следующем интервале источникам постоянного тока, работающим на этом интервале. Суммарный коэффициент гармоник $K_u = 6,9$ %.

В последующих разделах данной статьи представлены результаты исследования новой схемы однофазного АИН (рис. 2), обеспечивающей допустимую величину суммарного коэффициента гармоник K_u в сетях до 0,38 кВ, которая может быть использована в локальных системах электроснабжения и в других областях, требующих высокого качества напряжения.

Значения отдельных гармонических составляющих представлены в таблице.

Таким образом, генерируемое напряжение удовлетворяет требованиям ГОСТ 32144–2013 по гармоническому составу напряжения для электрических сетей низкого и среднего напряжения без установки выходного фильтра и использования ШИМ.

Результаты моделирования

Проведённые с использованием системы имитационного моделирования PSIM исследования схемы АИН с СМ показали, что она обеспечивает сохранение расчётного коэффициента гармоник выходного напряжения на уровне 7 % во всём диапазоне изменения нагрузки от холостого хода до номинального значения. При этом коэффициент несинусоидальности тока нагрузки K_t находился в пределах 1,12–2,58 % при изменении коэффициента мощности $\cos \varphi$ от 0,05 до 0,95.

Такой низкий коэффициент гармоник тока объясняется фильтрующими свойствами индуктивной составляющей нагрузки.

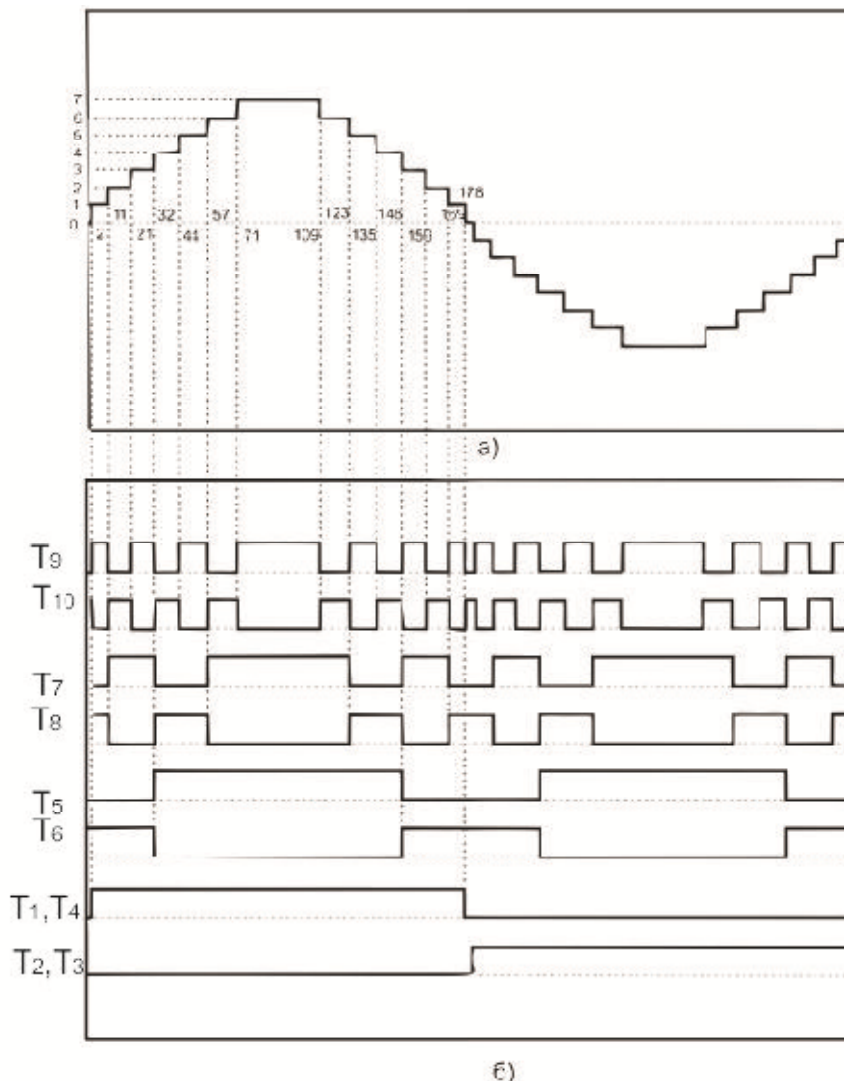


Рис. 1. Временные диаграммы: а – выходное напряжение инвертора;
б – управляющие сигналы силовых ключей

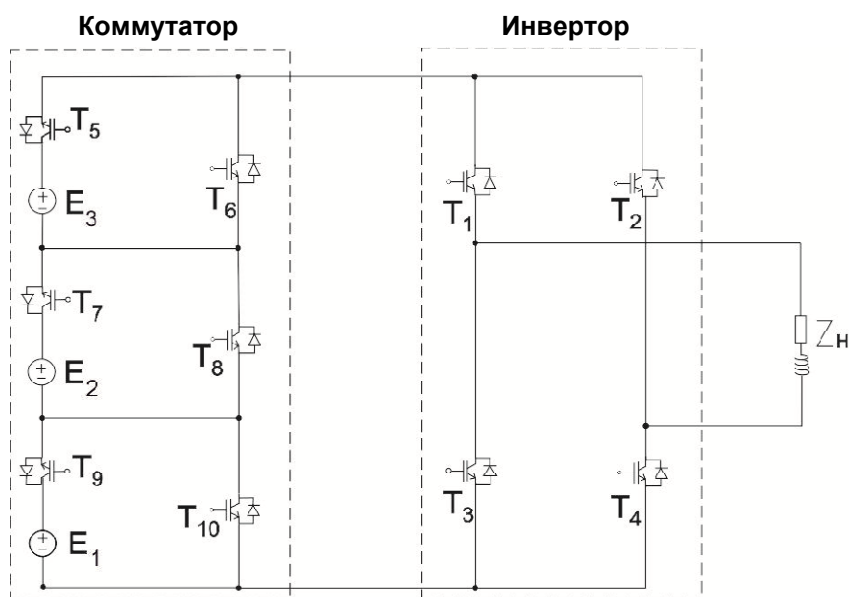


Рис. 2. Схема инвертора напряжения с восьмиступенчатым выходным напряжением

Гармонические составляющие выходного напряжения инвертора

Порядок гармонической составляющей	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Значение гармонической составляющей, %	1,9	3,2	0,8	0,4	1,1	0,2	0,3	0,3	0,9	0,2

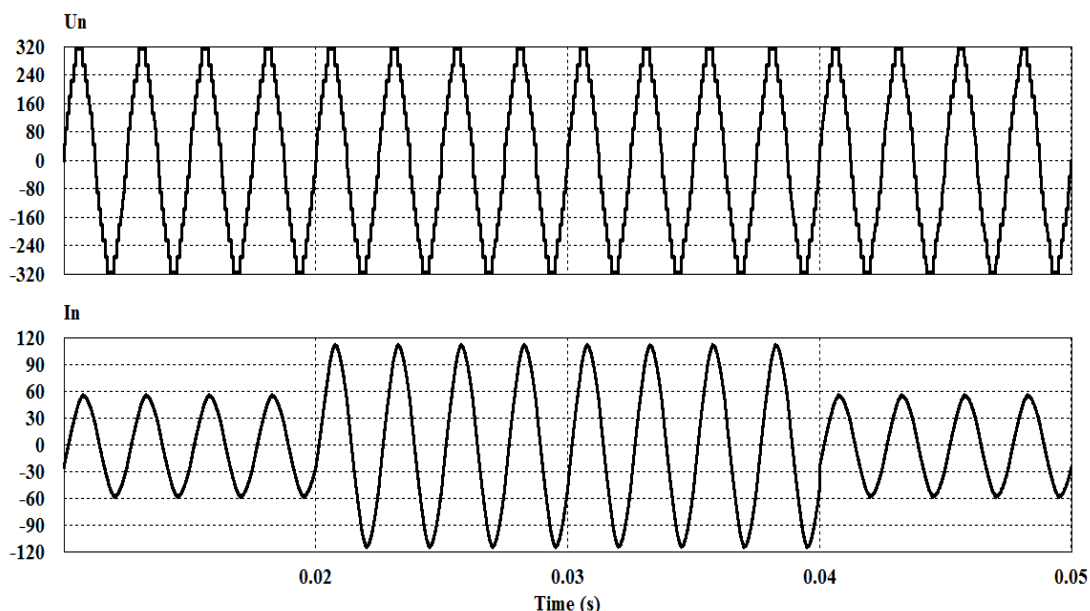


Рис. 3. Диаграммы напряжения и тока нагрузки

На рис. 3 представлены кривые мгновенных значений выходного напряжения и тока АИН с СМ при коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,8$ и мгновенном двукратном увеличении и уменьшении нагрузки. Из приведенных кривых следует, что даже такая высокая динамика потребляемой мощности не отражается на качестве напряжения и тока нагрузки и не вызывает неблагоприятных переходных процессов.

Недостатком рассмотренной схемы является необходимость иметь три независимых источника постоянного напряжения для питания АИН. Минимизировать затраты можно использованием трансформатора с тремя вторичными обмотками, нагруженными на гальванически развязанные выпрямители. Что касается локальных систем электроснабжения, содержащих солнечные панели и аккумуляторные батареи, то организация трёх источников постоянного напряжения на входе АИН вообще не является проблемой.

Литература

1. Розанов, Ю.К. Основы силовой преобразовательной техники / Ю.К. Розанов. – М.: Энергия, 1979. – 385 с.
2. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
3. Жежеленко, И.В. Показатели качества

электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М.: Энергия, 1977. – 127 с.

4. Мэрфи, Д. Тиристорное управление двигателями переменного тока. – М.: Энергия, 1979. – 254 с.

5. ГОСТ 32144–2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества эклектической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

6. Глазенко, Т.А. Полупроводниковые преобразователи частоты в электроприводах / Т.А. Глазенко, Р.Б. Гончаренко. – Л.: Энергия, 1969. – 184 с.

7. Карлов, Б. Современные преобразователи частоты: методы управления и аппаратная реализация / Б. Карлов, Е. Есин // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – С. 50–54.

8. Monmasson, E. Power Electronic Converters: PWM Strategies and Current Control Techniques. – Wiley-ISTE Publ., 2011. – 608 p. DOI: 10.1002/9781118621196

9. Linear Circuit Design Handbook / Edited by Hank Zumbahlen. – News/Elsevier, 2008. (Also published as Basic Linear Design, Analog Devices, 2007. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8703-4.00008-0)

10. Захаров, А. Расчет выходного фильтра ШИМ-инвертора на заданный коэффициент гармоник напряжения на нагрузке / А. Захаров // Силовая электроника. – 2005. – № 1. – С. 46–49.

11. Derakhshanfar, M. *Analysis of different topologies of multilevel inverters: master of science thesis*. – Goteborg, Sweden, 2010. – 39 p.
12. The age of multilevel converters arrives / L.G. Franqelo, O Rodrigues, J. Leon et al. // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. – 2008. – P. 28–39. DOI: 10.1109/MIE.2008.923519
13. Stemmler, H. *Configurations of High-Power Voltage Source Inverter Drivers* / H. Sremmler, P. Guggenbach // *Proc. EPE Conf.*, 1993.
14. Моин, В.С. *Стабилизированные транзисторные преобразователи* / В.С. Моин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
15. Мыцык, Г.С. *Основы теории структурно-алгоритмического синтеза источников вторичного электропитания* / Г.С. Мыцык. – М.: МЭИ, 1989. – 108 с.
16. Анисимова, Т.В. *Способы повышения качества выходного напряжения инверторов со ступенчатым выходным напряжением* / Т.В. Анисимова, А.Н. Данилина, В.В. Крючков // *Вестник МАИ*. – 2010. – Т. 17, № 1. – С. 103–112.
17. Колдаев, Р.В. *Оптимизация гармонического состава выходного напряжения статических преобразователей частоты* / Ю.М. Голембиовский, Р.В. Колдаев // *Технічна електродинаміка*. – Киев: 2000. – Темат. випуск, ч. 8. – С. 51–54.
18. Тонкаль, В.Е. *Синтез автономных инверторов модуляционного типа* / В.Е. Тонкаль. – Киев: Наукова думка, 1979. – 207 с.
19. *Об оптимальном синтезировании амплитудно-модулированного напряжения* / В.И. Сенько, В.С. Руденко, В.М. Скобченко, В.С. Смирнов // *Оптимизация полупроводниковых устройств энергетической электроники*. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 20–30.
20. Рутковская, Д. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И.Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пулинский, Л. Рутковский*. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2004. – 452 с.
21. Clement, R.P. *Genetic Algorithms and Bus-Driver Scheduling* / R.P. Clement, A. Wren // *6th International Conference for Computer-Aided Transport Scheduling, Lisbon, Portugal*. – 1993. – Vol. 9.
22. Thompson, A. *Temperature in natural and artificial systems* // *Fourth International Conference on Artificial Life*. – 1997. – P. 388–397.
23. *Патент на полезную модель 130159 Российская Федерация, МПК Н 02 М7/48 (2007.01). Однофазный инвертор со ступенчатым выходным напряжением* / А.А. Щербаков, Ю.М. Голембиовский; заявитель и патентообладатель Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. – № 2013100721/07; заявл. 09.01.13; опубл. 10.07.13.

Голембиовский Юрий Мичиславович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Системотехника», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов; urmg_37@mail.ru.

Томашевский Юрий Болеславович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Системотехника», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов; urytomash@mail.ru.

Щербаков Андрей Александрович, канд. техн. наук, ведущий инженер-программист, ООО «НетКрекер», г. Саратов; shcherband88@gmail.com.

Луков Дмитрий Юрьевич, аспирант кафедры «Системотехника», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов; Lukov-d@yandex.ru.

Старков Андрей Владимирович, инженер-конструктор, ООО «ЛионСистемс», г. Саратов; andreuha94@gmail.com.

Поступила в редакцию 16 марта 2018 г.

AUTONOMOUS SINGLE-PHASE INVERTER WITH HIGH QUALITY OF OUTPUT VOLTAGE

Yu.M. Golembiovsky¹, *yrmg_37@mail.ru*,
Yu.B. Tomashevsky¹, *yurytomash@mail.ru*,
A.A. Scherbakov², *shcherband88@gmail.com*,
D.Yu. Lukov¹, *Lukov-d@yandex.ru*,
A.V. Starkov³, *andreuha94@gmail.com*

¹ Yury Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation,

² Netcracker LLC, Saratov, Russian Federation,

³ Lyonsystems LLC, Saratov, Russian Federation

The solution of the relevant problem of improving the quality of the output signal of autonomous voltage inverters is presented. In contrast to the pulse width modulation (PWM) traditionally used for this purpose, a topology containing a single-phase bridge inverter and a direct-current source switch at the input is proposed, which makes it possible to form an eight-step voltage with a total harmonic coefficient of 6.9% on the load, which meets the requirements of modern standard on the quality of electricity. The novelty of the technical solution is confirmed by the utility model patent. The optimization of the curve of the multistage signal approximating the sinusoid, using the minimum harmonic coefficient criterion, was carried out with the help of evolutionary modeling (genetic algorithm). The study of electromagnetic processes was carried out by the method of simulation.

The received results confirmed the invariance of the harmonic coefficient of the inverter output voltage throughout the range of the load power factor variation $0 \leq \cos \varphi \leq 1$ and the stability of the system with instantaneous increase and decrease of the load. The importance of the proposed and investigated circuit solution is determined by the advantages of step modulation in comparison with the pulse-width modulation:

- low dynamic losses in key elements, allowing the inverter to be used in a wide frequency range;
- independence of the harmonic coefficient on the frequency and nature of the load;
- reduction of mass-dimensional parameters, due to the lack of the need to install a filter at the output of the inverter, because the guaranteed quality of electricity meets the requirements of the standard;
- in comparison with the method of pulse-width modulation, absence of a negative influence on the characteristics of consumers and the terms of their operation, if no higher-harmonic filters are used.

The scope of the above inverter circuit includes radioelectronic equipment, communication equipment, electric drives. The greatest advantages of the proposed circuit solution are manifested when the inverter is connected to the local power supply system with renewable energy sources (solar panels, batteries), since in this case the installation of galvanically isolated rectifiers as the sources of direct current at the input of the AIN is not necessary.

Keywords: autonomous voltage inverter, amplitude-pulse modulation, voltage quality, harmonic coefficient.

References

1. Rozanov Yu.K. *Osnovy silovoy preobrazovatel'noy tekhniki* [Basics of Power Conversion Technology]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 385 p.
2. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher Harmonics in Power Supply Systems for Industrial Enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 160 p.
3. Zhezhelenko I.V. *Pokazateli kachestva elektroenergii na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Power Supply Indicators in Industrial Enterprises]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 127 p.
4. Murphy J. *Thyristor control of A.C. motors*. Oxford, Pergamon Publ, 1973. 202 p.
5. GOST 32144-2013 *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva eklekticheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [GOST 32144-2013 Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Norms for the Quality of Eclectic Energy in General-purpose Power Supply Systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 16 p.
6. Glazenko T.A., Goncharenko R.B. *Poluprovodnikovyye preobrazovateli chastoty v elektroprivodakh* [Semiconductor Frequency Converters in Electric Drives]. Leningrad, Energiya Publ., 1969. 184 p.
7. Karlov B., Esin E. [Modern Frequency Converters: Control Methods and Hardware Implementation]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2004, no. 1, pp. 50–54. (in Russ.)
8. Monmasson E. *Power Electronic Converters: PWM Strategies and Current Control Techniques*. Wiley-ISTE Publ, 2011. 608 p. DOI: 10.1002/9781118621196

9. *Linear Circuit Design Handbook*. Hank Zumbahlen (Ed.). News/Elsevier Publ., 2008 (Also published as Basic Linear Design, Analog Devices, 2007). DOI: 10.1016/B978-0-7506-8703-4.00008-0
10. Zakharov A. [Calculation of the Output Filter of the PWM Inverter for a Specified Voltage Harmonics on the Load]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2005, no. 1, pp. 46–49. (in Russ.)
11. Derakhshanfar M. *Analysis of Different Topologies of Multilevel Inverters: Master of Science Thesis*. Goteborg, Sweden, 2010. 39 p.
12. Franquelo L.G., Rodrigues O., Leon J., Kouro S., Portillo R. The Age of Multilevel Converters Arrives. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2008, pp. 28–39. DOI: 10.1109/MIE.2008.923519
13. Stemmler H., Guggenbach P. Configurations of High-Power Voltage Source Inverter Drivers. Proc. EPE Conf., 1993.
14. Moin V.S. *Stabilizirovannyye tranzistornyye preobrazovateli* [Stabilized Transistor Transducers]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 376 p.
15. Mycyk G.S. *Osnovy teorii strukturno-algoritmicheskogo sinteza istochnikov vtorichnogo elektropitaniya* [Fundamentals of the Theory of Structural-Algorithmic Synthesis of Secondary Power Sources]. Moscow, MJEI Publ., 1989. 108 p.
16. Anisimova T.V., Danilina A.N., Kryuchkov V.V. [Methods for Improving the Quality of the Output Voltage of Inverters with Stepped Output Voltage]. *Vestnik MAI* [Messenger of MAI], 2010, vol. 17, no. 1, pp. 103–112. (in Russ.)
17. Koldaev R.V., Golembiovskiy Yu.M. [Optimization of the Harmonic Composition of the Output Voltage of Static Frequency Converters]. *Tekhnichna elektrodinamika* [The Technical Electrodynamics.], 2000, vol. 8, pp. 51–54. (in Russ.)
18. Tonkal' V.E. *Sintez avtonomnykh inverterov modulyatsionnogo tipa* [Synthesis of Autonomous Inverters of Modulation Type]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1979. 207 p.
19. Sen'ko V.I., Rudenko V.S., Skobchenko V.M., Smirnov V.S. [On the Optimal Synthesis of Amplitude-modulated Voltage]. *Optimizatsiya poluprovodnikovyykh ustroystv energeticheskoy elektroniki* [Optimization of Semiconductor Devices of Power Electronics]. Kiev, Naukova dumka Publ, 1980, pp. 20–30. (in Russ.)
20. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnyye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2004. 452 p.
21. Clement R.P., Wren A. Genetic Algorithms and Bus-Driver Scheduling. *6th International Conference for Computer-Aided Transport Scheduling*, Lisbon, Portugal, 1993, vol. 9.
22. Thompson A. Temperature in Natural and Artificial Systems. *Fourth International Conference on Artificial Life*, 1997, pp. 388–397.
23. Shherbakov A.A., Golembiovskiy Yu.M. *Odnofaznyy inverter so stupenchatym vyhodnym napryazheniem* [Single-Phase Inverter with Stepped Output Voltage]. Patent RF, no. 130159, 2007.

Received 16 March 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Автономный однофазный инвертор с высоким качеством выходного напряжения / Ю.М. Голембиовский, Ю.Б. Томашевский, А.А. Щербаков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 75–81. DOI: 10.14529/power180110

FOR CITATION

Golembiovsky Yu.M., Tomashevsky Yu.B., Scherbakov A.A., Lukov D.Yu., Starkov A.V. Autonomous Single-Phase Inverter with High Quality of Output Voltage. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 75–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180110