

7. Kuznetsov V.G., Grigogiev E.G., Luty A.P. *Elektromagnitnaia sovместimost'. Nesimmetriia i nesinusoidal'nost' napriazheniia* [Electromagnetic compatibility. Unbalance and nonsinusoidal voltage]. Donetsk: Donbass Publ., 2005. 249 p. (Rus.)
8. Gordeev V.I. *Regulirovanie maksimuma nagruzki promyshlennykh elektricheskikh setei* [Regulation of the maximum of the electric power supply of industrial electrical networks]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 184 p. (Rus.)
9. Avvakumov V.G. *Matematicheskaiia logistika v primerakh i illiustratsiakh* [Mathematical logic in examples and illustrations]. Omsk, GOU VPO Publ., 2008. 299 p. (Rus.)

Рецензент: В.М. Кутін
д-р техн. наук, проф., ВНТУ

Стаття надійшла 15.03.2017

УДК 621.316.727

© Бурлака В.В.¹, Гулаков С.В.², Поднебенная С.К.³, Савенко О.С.⁴

О ВОЗМОЖНОСТЯХ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СО СТОРОНЫ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ С АКТИВНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

В работе предложен способ управления параметрами качества электроэнергии распределительной сети путем модификации алгоритмов управления электроприемниками с активными выпрямителями, питающихся от этой сети. Так, за счет управления реактивной компонентой потребляемого тока таких выпрямителей возможно уменьшение колебаний напряжения в точке общего присоединения (ТОП), причем эффективность такого способа тем выше, чем выше отношение X/R сети. Также возможно снижение коэффициента гармоник напряжения в ТОП за счет интеграции функций параллельных активных фильтров в активные выпрямители. Предложенный способ позволяет ограниченно осуществлять управление потоками неактивной мощности в распределительной сети, что дает возможность повысить качество электроэнергии и снизить требуемую мощность фильтрокомпенсирующих устройств.

Ключевые слова: качество электроэнергии, активный выпрямитель, коррекция коэффициента мощности, колебания напряжения, коэффициент несинусоидальности, неактивная мощность, система управления.

В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.К. Поднебенная, О.С. Савенко. Про можливість управління параметрами якості електроенергії з боку електроприймачів з активними випрямлячами. В роботі запропонований спосіб управління параметрами якості електроенергії в розподільчій мережі шляхом модифікації алгоритмів управління електроприймачами з активними випрямлячами, що живляться від цієї мережі. Так, за рахунок керування реактивною компонентою споживаного струму таких випрямлячів можливе зменшення коливань напруги в точці загального приєднання (ТЗП), причому ефективність такого способу тим вище, чим вище відношення X/R

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, vladimir.v.burlaka@gmail.com

² д-р техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gulakov_s_v@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, podsvet@gmail.com

⁴ спеціаліст, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, savenko.olja@gmail.com

мережі. Також можливе зниження коефіцієнта гармонік напруги в ТЗП за рахунок інтеграції функцій паралельних активних фільтрів в активні випрямлячі. Запропонований спосіб дозволяє обмежено здійснювати управління потоками неактивної потужності в розподільчій мережі, що дає можливість підвищити якість електроенергії і знизити необхідну потужність фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Ключові слова: якість електроенергії, активний випрямляч, корекція коефіцієнта потужності, коливання напруги, коефіцієнт несинусоїдальності, неактивна потужність, система управління.

V.V. Burlaka, S.V. Gulakov, S.K. Podnebennaya, O.S. Savenko. On the possibilities of electric power quality control via electric loads with active rectifiers. The paper proposes a method for controlling the electric power quality parameters in a distribution network by modifying the control algorithms for electric loads equipped with active rectifiers fed from this network. Thus, by controlling the reactive component of the input current of such rectifiers, it is possible to reduce the voltage fluctuations at the point of common connection (PCC), the efficiency of such a method being higher the higher the X/R ratio of the network is. It is also possible to reduce the voltage harmonics in the PCC by integrating the functions of parallel active filters into active rectifiers. The proposed method allows for limited control over the flow of inactive power in the distribution network, which makes it possible to improve the electric power quality and reduce the required power of the filter compensating devices. The proposed algorithm for controlling the active rectifier is tested on the mathematical model of group loads. A group of high power resistance welding machines (RWMs) operating randomly with a normal probability distribution connected to 0,4 kV grid as a non-stationary load is used. The application of the proposed reactive current control method in the RWM power supplies made it possible to reduce the voltage fluctuations in 0,4 kV grid from 12% to 5%.

Keywords: power quality, active rectifier, power factor correction, voltage fluctuations, harmonic distortion, nonactive power, control system.

Постановка проблеми. Обеспечение требуемых параметров качества электроэнергии на сегодняшний день становится все более актуальной задачей. С одной стороны, этому способствует введение стандартов качества электроэнергии (ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004, ДСТУ ІЕС 61000-3-4:2014, ДСТУ EN 61000-3-12:2014), с другой стороны, этого требует технологический процесс, например, процесс контактной сварки, характеризующийся большой потребляемой мощностью, случайным характером включения машин. Наиболее значимыми факторами, снижающими качество изделий при контактной сварке, являются отклонения и колебания напряжения питания [1]. Если отклонение напряжения при контактной точечной сварке превышает 15%, это приводит к 100% браку. Для коррозионностойких сталей к 100% браку приводит отклонение напряжения на величину более 10%. Вместе с этим, работа самих машин контактной сварки (точечной, рельефной) приводит к появлению провалов напряжения до 19% (у многоточечных машин и автоматических сварочных линий) [1]. А по данным, приведенным в работе [2], электросварочное оборудование составляет порядка 65% потенциальных источников электромагнитных помех.

Таким образом, описанную проблему необходимо решать комплексно, обеспечивая как заданные параметры качества электроэнергии в точке общего присоединения (ТОП), так и электромагнитную совместимость (ЭМС) мощных нелинейных электроприемников с питающей сетью.

Анализ последних исследований и публикаций. Известным способом управления параметрами качества электроэнергии является установка фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств (ФКСУ) [3, 4]. Это позволяет обеспечивать требуемый (не всегда единственный) коэффициент мощности (КМ) комплекса «нагрузка – ФКСУ», снижает потери мощности в электрической сети, дает возможность симметрировать потребляемый ток при работе однофазных нагрузок в трехфазной сети [3]. Достоинством такого подхода является сохранение существующих систем питания в технологическом процессе без каких-либо изменений. Основным

недостатком является высокая стоимость ФКСУ.

Другим подходом, позволяющим обеспечить управление качеством электроэнергии в ТОП, является разработка энергоэффективных систем питания для нелинейных нагрузок, в частности, для сварочных источников питания (ИП). На сегодняшний день исследования в области сварочных источников питания направлены на обеспечение высокого коэффициента мощности и ЭМС с сетью. Для большинства вторичных источников электропитания это означает необходимость использования активных выпрямителей или корректоров коэффициента мощности. В работе [5] предложен источник питания на основе модифицированного ZETA-преобразователя, работающего в режиме прерывистого тока, что позволяет повысить коэффициент мощности источника. В работах [6-7] описано применение преобразователей для повышения коэффициента мощности источника питания. Ведутся работы по разработке источников питания с коррекцией коэффициента мощности на базе Canonical Switching Cell [8]. В [9] представлены схемные решения активных выпрямителей с единичным коэффициентом мощности для источников питания с двойным преобразованием энергии. Основным недостатком таких источников – несколько сниженный КПД и высокая техническая сложность используемых систем.

Активные выпрямители средней мощности (от единиц до десятков кВт) выполняются с трехфазным питанием и трехпроводным подключением к сети. Поскольку обычно требуется однонаправленный поток энергии (без возврата в сеть), акцент при проектировании таких выпрямителей делается на уменьшение числа активных управляемых силовых полупроводниковых элементов, что позволяет снизить себестоимость. В результате получили распространение схемы вида VIENNA Rectifier [10-13], Delta Rectifier [14-16], активные выпрямители с токовым выходом [17] и различные гибридные схемы [18-23], [24].

Цель статьи. Целью настоящей работы является оценка возможностей управления параметрами качества электроэнергии в ТОП за счет применения специальных алгоритмов управления электроприемниками, оснащенными активными выпрямителями.

Изложение основного материала. Рассмотрим случай питания электроприемника от сети, схема замещения которой по основной гармонике может быть представлена в виде эквивалентного генератора с активно-индуктивным характером выходного сопротивления (рис. 1).

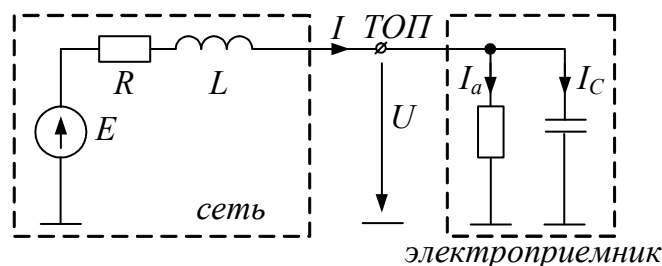


Рис. 1 – Схема замещения электрической сети и электроприемника

Изменение тока I , потребляемого от сети электроприемником (нагрузкой), приведет к изменению напряжения в ТОП (U , рис. 1). В общем виде можно записать:

$$E^2 = (U + \Delta U)^2 + (\delta U)^2,$$

где $\Delta U = I_a R - I_c X$ – продольная составляющая падения напряжения; $\delta U = I_c R + I_a X$ – поперечная составляющая падения напряжения; I_a – активная составляющая тока нагрузки; I_c – реактивная (емкостная) составляющая тока нагрузки.

Поскольку $(\delta U)^2 \ll (U + \Delta U)^2$, наибольшее влияние на потерю напряжения оказывает именно продольная составляющая. Для уменьшения влияния изменения тока нагрузки I на напряжение U обеспечим выполнение требования $\Delta U = 0$:

$$I_a R - I_c X = 0, \text{ откуда } I_c = I_a \frac{R}{X}.$$

Таким образом, если имеется возможность работы электроприемника в режиме потреб-

ления активно-емкостного тока, за счет регулирования реактивной составляющей можно обеспечить стабилизацию напряжения в ТОП. Причем чем больше соотношение X/R для сети, тем меньшая амплитуда реактивной составляющей тока требуется для обеспечения эффекта стабилизации.

Всесторонний анализ режимов работы выпрямителей по схеме VIENNA Rectifier [10-13], Delta Rectifier [14-16], активных выпрямителей с токовым выходом [17], различных гибридных схем [18-23, 24] приводит к обоснованию возможности их работы не только с единичным коэффициентом мощности, но и с углом сдвига фаз между напряжением и током в пределах от -30 до $+30$ эл. градусов. Для VIENNA Rectifier и Delta Rectifier это показано в работе [15], для выпрямителей с токовым выходом – в [17]. Аналогичное обоснование можно сделать и для гибридных выпрямителей.

Возможность работать со сдвигом фазы потребляемого тока до 30 эл. градусов означает, что для такого активного выпрямителя справедливо соотношение $\frac{|I_c|}{I_a} \leq \operatorname{tg} 30^\circ$, т. е. $|I_c| \leq \frac{I_a}{\sqrt{3}}$. Отсюда следует, что для случая $\frac{X}{R} > \sqrt{3}$ всегда возможно выполнение условия $\Delta U = 0$.

Для мощных сетей (например, цеховых) с небольшой длиной эквивалентные параметры сети в основном определяются параметрами трансформатора. Так, для ТМ-630/6 ($R = 2,78$ мОм, $X = 12,68$ мОм) отношение $X/R = 4,56$; для ТМ-250/6 ($R = 8,6$ мОм, $X = 26,2$ мОм) отношение $X/R = 3$. Таким образом, в большинстве случаев возможна компенсация потери напряжения под нагрузкой за счет работы активных выпрямителей с реактивной компонентой тока.

Практическая реализация предложенного метода управления активным выпрямителем заключается в том, что в систему управления вводится контур регулирования реактивного тока с отрицательной обратной связью по напряжению сети. Безусловно, необходимо наличие ограничителя модуля реактивного тока по условию сдвига фазы между первой гармоникой напряжения сети и входным током выпрямителя не более ± 30 эл. градусов. Структурная схема системы формирования задания на реактивный ток может иметь вид, показанный на рис. 2.

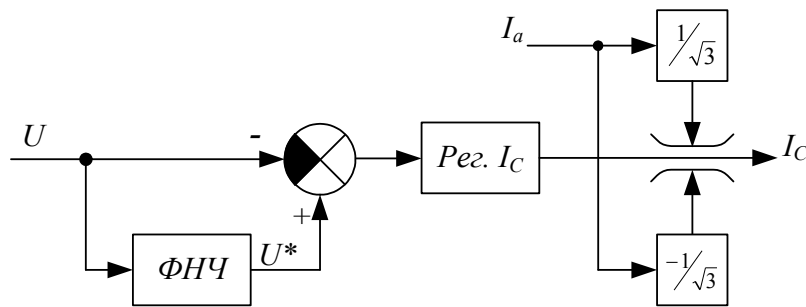


Рис. 2 – Структурная схема системы формирования задания на реактивный ток

Опорный сигнал задания на поддерживаемое напряжение в ТОП (U^* , рис. 2) формируется из сигнала U (это результат измерения напряжения основной гармоники в ТОП) с помощью ФНЧ. Путем выбора передаточной функции ФНЧ можно обеспечить различные режимы работы системы: от подавления фликера до стабилизации напряжения в ТОП.

Сигнал рассогласования по напряжению обрабатывается регулятором реактивного тока (рег. I_c , рис. 2) и поступает на ограничитель, обеспечивающий выполнение условия $\frac{I_a}{\sqrt{3}} < I_c < \frac{I_a}{\sqrt{3}}$. Далее сигнал задания I_c поступает в подсистему формирования задания на мгновенный входной ток активного выпрямителя (на рис. 2 не показана).

Кроме рассмотренного выше метода управления активным выпрямителем авторами в [25-27] предложена методика, позволяющая интегрировать в него функции параллельного активного фильтра. Объединение функций стабилизации напряжения в ТОП и фильтрации высших

гармоник в активном выпрямителе позволяет разгрузить фильтрокомпенсирующие устройства или снизить их требуемую мощность при сохранении или улучшении параметров качества электроэнергии в сети.

Предложенный алгоритм управления эффективно применять в случаях, когда сопротивление сети имеет преимущественно реактивный характер (т. е. в сетях с большим отношением X/R), а мощность потребителей изменяется в больших пределах. Например, группа машин контактной сварки, оснащенных источниками с активной коррекцией коэффициента мощности и питающихся от силового трансформатора 6/0,4 кВ.

Предложенный алгоритм управления активными выпрямителями был проверен на математической модели, основанной на методах теории вероятности и математической статистики для стационарных эргодических процессов [1]. Математическая модель групповой нагрузки сварочных машин включает две составляющие: апериодическую, вызванную работой большого числа случайным образом включаемых машин с небольшим разбросом потребляемого тока, и периодической составляющей, обусловленной мощными сварочными машинами. Колебания напряжения на шинах подстанции создаются колебаниями тока группового графика [1]. В модели реализован предложенный алгоритм управления сварочным током источников с активной коррекцией коэффициента мощности. Моделирование проведено при следующих параметрах: трансформатор ТМ 250/6/0,4; ток, потребляемый группой сварочных источников питания, изменяется по случайному закону с нормальным распределением; эффективное значение тока находится в границах 400-1600 А. На рис. 3, а приведены групповые графики уровней напряжения на шинах 0,4 кВ подстанции, питающей большое количество точечных и многоточечных машин при наличии доминирующей по мощности сварочной машины. Максимальный размах колебания напряжения находится на уровне 12%. На рис. 3, б приведены полученные в результате моделирования групповые графики уровней напряжения на шинах 0,4 кВ подстанции при управлении реактивной компонентой тока источниками питания с активной коррекцией коэффициента мощности. Максимальный размах колебания напряжения не превышает 5%.

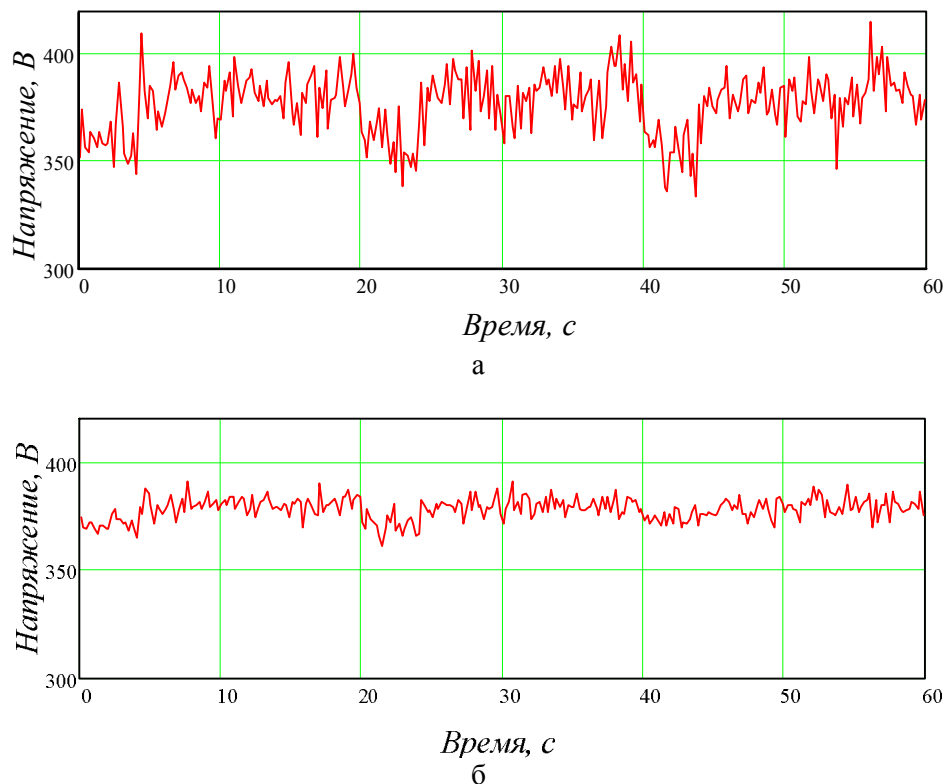


Рис. 3 – Графики уровней напряжения на шинах 0,4 кВ при работе группы машин контактной сварки : а – при работе группы машин контактной сварки с классическим источником питания; б – при работе группы машин контактной сварки с использованием предложенного алгоритма

В этом случае использование описанного алгоритма управления позволит значительно снизить колебания напряжения на стороне 0,4 кВ, тем самым уменьшить дозу фликера и улучшить стабильность работы прочего оборудования, питающегося от того же трансформатора.

Выводы

Показано, что за счет использования специальных алгоритмов управления активными выпрямителями возможно улучшение параметров качества электроэнергии в ТОП, в частности, снижение амплитуды колебаний напряжения и снижение коэффициента гармоник. Применение описанных алгоритмов управления активными выпрямителями позволяет (с некоторыми ограничениями) управлять перетоками неактивной мощности в распределительной сети. Это позволяет снизить требуемую мощность фильтрокомпенсирующих устройств, используемых для улучшения параметров качества электроэнергии.

Список использованных источников:

1. Вагин Г.Я. Режимы электросварочных машин / Г.Я. Вагин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 192 с.
2. Гальперин В. Обеспечение электромагнитной совместимости промышленного технологического оборудования / В. Гальперин, Д. Колесник // Электрооборудование и ремонт. – М. : ИД «Панорама», 2008. – № 7. – С. 8-12.
3. Podnebennaya S.K. On the problem of providing electromagnetic compatibility of power sources of resistance welding machines with electric mains / S.K. Podnebennaya, V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // The Paton Welding Journal. – № 12. – Pp. 50-54.
4. Podnebennaya S.K. A power parallel active filter with higher efficiency / S.K. Podnebennaya, V.V. Burlaka, S.V. Gulakov // Russian Electrical Engineering. – June 2013. – Vol. 84, Issue 6. – Pp. 308-313.
5. Narula S. Power Factor Corrected Welding Power Supply Using Modified Zeta Converter / S. Narula, B. Singh, G. Bhuvanewari // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2016. – Vol. 4, Issue 2. – Pp. 617-625. doi: 10.1109/JESTPE.2015.2500610.
6. Narula S. Bridgeless Single-Ended Primary Inductance Converter with Improved Power Quality for Welding Power Supplies / S. Narula, B. Singh, G. Bhuvanewari // IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE). – 2014. – 6 p. doi: 10.1109/IICPE.2014.7115808.
7. Mishima T. A Novel Bridgeless Boost Half-Bridge ZVS-PWM Single-Stage Utility Frequency AC-High Frequency AC Resonant Converter for Domestic Induction Heaters / T. Mishima, Y. Nakagawa, M. Nakaoka // International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 – ECCE ASIA). – 2014. – Pp. 2533-2540. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869946.
8. Narula S. Improved Power Quality Based Welding Power Supply with Over-Current Handling Capability / S. Narula, B. Singh, G. Bhuvanewari // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – 9 p. doi: 10.1109/TPEL.2015.2454994.
9. New boundary mode sinusoidal input current control of the VIENNA rectifier / M. Leibl [et al.] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – 2015. – Pp. 201-209. doi: 10.1109/ECCE.2015.7309689.
10. Kolar J.W. A Novel Three-Phase Three-Switch Three-Level PWM Rectifier / J.W. Kolar, F.C. Zach // Proceedings of the 28th Power Conversion Conference. – Nurnberg, 1994. – Pp. 125-138.
11. Kolar J.W. Space vector-based analytical analysis of the input current distortion of a three-phase discontinuous-mode boost rectifier system / J.W. Kolar, H. Ertl, F.C. Zach // Proceedings of the 24th IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'93. – 1993. – Pp. 696-703.
12. Zhao Y. Force commutated three level boost type rectifier / Y. Zhao, Y. Li, T.A. Lipo // Proceedings of the 28th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IAS '93. – 1993. – Pp. 771-777.
13. Heldwein M.L. Three-phase multilevel PWM rectifiers based on conventional bidirectional converters / M.L. Heldwein, S.A. Mussa, I. Barbi // IEEE Trans. Power Electron. – 2010. – Vol. 25, № 3. – Pp. 545-549.
14. Kolar J.W. Realization consideration for unidirectional three-phase PWM rectifier systems with low effects on the mains / J.W. Kolar, J. Ertl, F.C. Zach // Proceedings of the 6th Europ. Power Electronics Motion Control Conference PEMC'1990. – 1990. – Vol. 2. – Pp. 560-565.

15. Hartmann M. A three-phase delta switch rectifier for more electric aircraft applications employing a novel PWM current control concept / M. Hartmann, J. Miniboeck, J.W. Kolar // Proceedings of the 24th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC'09. – 2009. – Pp. 1633-1640.
16. Hartmann M. Ultra-compact and ultra-efficient three-phase PWM rectifier systems for more electric aircraft : dissertation for the degree of Doctor of sciences : no. 19755 / M. Hartmann. – Zurich, 2011. – 423 p.
17. Kolar J.W. The essence of three-phase PFC rectifier systems. Part 1 / J.W. Kolar, T. Friedli // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28, № 1. – Pp. 176-198.
18. Soeiro Thiago B. Analysis of High-Efficiency Three-Phase Two- and Three-Level Unidirectional Hybrid Rectifiers / Thiago B. Soeiro, Johann W. Kolar // IEEE Transactions On Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60, № 9. – Pp. 3589-3601.
19. Nammalvar P. A Novel Three Phase Hybrid Unidirectional Rectifier for High Power Factor Applications / P. Nammalvar, P. Meganathan // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2014. – Vol. 8, № 9. – Pp. 1409-1415.
20. Alves R.L. Analysis and Implementation of a Hybrid High-Power-Factor Three-Phase Unidirectional Rectifier / R.L. Alves, I. Barbi // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, № 3. – Pp. 632-640.
21. Biradar A. Implementation of a Hybrid High Power Factor Three-Phase Unidirectional Rectifier / A. Biradar, N. Patil // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2013. – Vol. 2, Issue 4. – Pp. 203-206.
22. Alves R.L. A New Hybrid High Power Factor Three-Phase Unidirectional Rectifier / R.L. Alves, I. Barbi // IEEE ISIE 2006. – 2006. – Pp. 1046-1051.
23. European patent application 2590310, Int. Cl. H 02 M 7/217. Hybrid rectifier and method of operating a hybrid rectifier / T.B. Soeiro, J.W. Kolar, P. Ranstad, J. Linner. – № 12176840.2; filed 18.07.12; publication 08.05.13, Bul. № 2013/19. – 21 p.
24. Пат. 105081 Україна, МПК Н 02 М 7/00; Н 02 М 7/155. Гібридний підвищуючий трифазний випрямляч / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков. – № а201208274; заявл. 06.07.12; опубл. 10.04.14. – Бюл. № 7. – 4 с.
25. Пат. 100449 Україна. МПК Н 02 М 7/02. Спосіб керування активним коректором коефіцієнта потужності / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков. – № а201105378; заявл. 27.04.11; опубл. 25.12.12. – Бюл. № 24. – 5 с.
26. Бурлака В.В. Метод управління коректором коефіцієнта потужності з інтегрованими функціями активного фільтра / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков, С.А. Федоровская // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки : Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 226-231.
27. Бурлака В.В. Современная схемотехника импульсных источников питания с активной коррекцией коэффициента мощности : монография / В.В. Бурлака, С.В. Гулаков. – Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2013. – 123 с.

References:

1. Vagin G.Ia. *Rezhimy elektrosvarochnykh mashin* [Electrowelding machine modes]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 192 p. (Rus.)
2. Gal'perin V., Kolesnik D. Obespechenie elektromagnitnoi sovmestimosti promyshlennogo tekhnologicheskogo oborudovaniia [Provision of electromagnetic compatibility of industrial process equipment]. *Elektrooborudovanie i remont – Electrical equipment and repair*, 2008, no. 7, pp. 8-12. (Eng.)
3. Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. On the problem of providing electromagnetic compatibility of power sources of resistance welding machines with electric mains. *The Paton Welding Journal*, 2016, no. 12, pp. 50-54. (Eng.)
4. Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. A power parallel active filter with higher efficiency. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, iss. 6, pp. 308-313. (Eng.)
5. Narula S., Singh B., Bhuvanewari G. Power Factor Corrected Welding Power Supply Using Modified Zeta Converter. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, vol. 4, Iss. 2, pp. 617-625. doi: 10.1109/JESTPE.2015.2500610. (Eng.)

6. Narula S., Singh B., Bhuvanewari G. Bridgeless Single-Ended Primary Inductance Converter with Improved Power Quality for Welding Power Supplies. *IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 2014, 6 p. doi: 10.1109/IICPE.2014.7115808. (Eng.)
7. Mishima T., Nakagawa Y., Nakaoka M. A Novel Bridgeless Boost Half-Bridge ZVS-PWM Single-Stage Utility Frequency AC-High Frequency AC Resonant Converter for Domestic Induction Heaters. *International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 – ECCE ASIA)*, 2014, pp. 2533-2540. doi: 10.1109/IPEC.2014.6869946. (Eng.)
8. Narula S., Singh B., Bhuvanewari G. Improved Power Quality Based Welding Power Supply with Over-Current Handling Capability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 9 p. doi: 10.1109/TPEL.2015.2454994. (Eng.)
9. Leibl M., Darani M., Kolar J.W., Deuringer J. New boundary mode sinusoidal input current control of the VIENNA rectifier. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2015, pp. 201-209. doi: 10.1109/ECCE.2015.7309689. (Eng.)
10. Kolar J.W., Zach F.C. A Novel Three-Phase Three-Switch Three-Level PWM Rectifier. *Proceedings of the 28th Power Conversion Conference*, 1994, pp. 125-138. (Eng.)
11. Kolar J.W., Ertl H., Zach F.C. Space vector-based analytical analysis of the input current distortion of a three-phase discontinuous-mode boost rectifier system. *Proceedings of the 24th IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC'93*, 1993, pp. 696-703. (Eng.)
12. Zhao Y. Force commutated three level boost type rectifier / Y. Zhao, Y. Li, T.A. Lipo // *Proceedings of the 28th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IAS '93*, 1993, pp. 771-777. (Eng.)
13. Heldwein M.L., Li Y., Lipo T.A. Three-phase multilevel PWM rectifiers based on conventional bidirectional converters. *IEEE Trans. Power Electron*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 545-549. (Eng.)
14. Kolar J.W., Ertl J., Zach F.C. Realization consideration for unidirectional three-phase PWM rectifier systems with low effects on the mains. *Proceedings of the 6th Europ. Power Electronics Motion Control Conference PEMC'1990*, 1990, vol. 2, pp. 560-565. (Eng.)
15. Hartmann M., Miniboeck J., Kolar J.W. A three-phase delta switch rectifier for more electric aircraft applications employing a novel PWM current control concept. *Proceedings of the 24th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC'09*, 2009, pp. 1633-1640. (Eng.)
16. Hartmann M. Ultra-compact and ultra-efficient three-phase PWM rectifier systems for more electric aircraft. *Doct. of sci. diss. Zurich*, 2011. 423 p. (Eng.)
17. Kolar J.W., Friedli T. The essence of three-phase PFC rectifier systems. Part 1. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28, no. 1, pp. 176-198. (Eng.)
18. Soeiro Thiago B., Kolar Johann W. Analysis of High-Efficiency Three-Phase Two- and Three-Level Unidirectional Hybrid Rectifiers. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, no. 9, pp. 3589-3601. (Eng.)
19. Nammalvar P., Meganathan P. A Novel Three Phase Hybrid Unidirectional Rectifier for High Power Factor Applications. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2014, vol. 8, no. 9, pp. 1409-1415. (Eng.)
20. Alves R.L., Barbi I. Analysis and Implementation of a Hybrid High-Power-Factor Three-Phase Unidirectional Rectifier. *Transactions On Power Electronics*, 2009, vol. 24, no. 3, pp. 632-640.
21. Biradar A., Patil N. Implementation of a Hybrid High Power Factor Three-Phase Unidirectional Rectifier. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2013, vol. 2, iss. 4, pp. 203-206. (Eng.)
22. Alves R.L., Barbi I. A New Hybrid High Power Factor Three-Phase Unidirectional Rectifier. *IEEE ISIE 2006*, 2006, pp. 1046-1051. (Eng.)
23. Soeiro T.B., Kolar J.W., Ranstad P., Jorgen L. *Hybrid rectifier and method of operating a hybrid rectifier*. European Patent, no. EP 2590310, 2013. (Eng.)
24. Burlaka V.V., Gulakov S.V. *Gibridnii pidvishchuiuchii trifaznii vipriamliach* [Hybrid three-phase boost-type rectifier]. Patent UA, no. 105081, 2014. (Ukr.)
25. Burlaka V.V., Gulakov S.V. *Sposib keruvannia aktivnim korektorom koeffitsienta potuzhnosti* [Method of controlling an active power factor corrector]. Patent UA, no. 100449, 2011. (Ukr.)
26. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Fedorovskaia S.A. *Metod upravleniia korrektorom koeffitsienta moshchnosti s integrirovannymi funktsiiami aktivnogo fil'tra* [Control method for power factor corrector with integrated active power filter functionality]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo*

tekhnichnogo universitetu. Ser.: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences, 2011, no. 22, pp. 226-231. (Rus.)

27. Burlaka V.V., Gulakov S.V. *Sovremennaia skhemotekhnika impul'snykh istochnikov pitaniia s aktivnoi korrektsiei koeffitsienta moshchnosti: monografiia* [Modern circuitry of switching power supplies with active power factor correction: monograph]. Mariupol, SHEE «PSTU» Publ., 2013. 123 p. (Rus.)

Рецензент: А.Д. Размышляев
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 27.03.2017