

Ю. П. САМЧЕЛЕЕВ, Г. С. БЕЛОХА

ОДНОФАЗНЫЕ ИСТОЧНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ С РЕЛЕЙНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Показана возможность построения на базе источников тока однофазных источников питания, состоящих из активного выпрямителя и реверсора, с релейным управлением, реализующих режим источников напряжения и мощности электромагнитно совместимых с сетью и малой чувствительностью к действию возмущений. Получены математические модели, описывающие процессы в источниках питания и структурные схемы, а также выражения для определения частот релейного режима.

Ключевые слова: источник напряжения, источник мощности, электромагнитная совместимость, релейное управление.

Ю. П. САМЧЕЛЕЄВ, Г. С. БЕЛОХА

ОДНОФАЗНІ ДЖЕРЕЛА НАПРУГИ І ПОТУЖНОСТІ З РЕЛЕЙНИМ КЕРУВАННЯМ

Показана можливість побудови на базі джерел струму однофазних джерел живлення, що складаються з активного випрямляча і реверсора, з релейним керуванням, що реалізують режим джерел напруги і потужності електромагнітно сумісних з мережею та малою чутливістю до дії збурень. Отримано математичні моделі, які описують процеси в джерелах живлення і структурні схеми, а також вирази для визначення частот релейного режиму.

Ключові слова: джерело напруги, джерело потужності, електромагнітна сумісність, релейне керування.

YU. P. SAMCHELEEV, H. S. BIELOKHA

SINGLE-PHASE VOLTAGE AND POWER SOURCES WITH RELAY CONTROL

The article presents the possibility of building on the basis of current sources single-phase power sources, consisting of an active rectifier and reverser, with relay control, realizing the mode of voltage and power sources electromagnetically compatible with the network and low sensitivity to disturbances, limiting speed in working out the driving and disturbing influences: changes in network voltage and increase in load resistance. Mathematical models describing the processes in power supplies and structural diagrams, as well as expressions for determining the relay mode frequencies, are obtained. The possibility of converting the AC mains voltage into a single-phase AC voltage of various shapes and adjustable frequency and amplitude is shown. The spectrum of phase currents is presented. THD values do not exceed the limits specified by the standard. The possibility of building a universal power source that implements the modes of the current source, voltage and power is shown. The required mode of operation is performed by selecting the type of feedback.

Keywords: voltage source, power source, electromagnetic compatibility, relay control.

Введение. В [1-4] показана возможность построения трехфазных источников питания (ИП) с релейным управлением, обеспечивающих реализацию режимов источника тока ($I = \text{const}$), источника напряжения ($U = \text{const}$) и источника мощности ($P = \text{const}$) при высокой степени электромагнитной совместимости с сетью и малой чувствительностью к действию различных возмущений.

Отсутствие в ряде случаев трехфазной питающей сети не позволяет воспользоваться теми положительными эффектами, которые присущи трехфазным источникам питания с релейным управлением. Возникает естественный вопрос: возможно ли реализовать однофазные источники питания с релейным управлением без потерь качественных показателей, присущих трехфазным источникам? Вопрос этот важен ещё и потому, что традиционные однофазные преобразователи уступают по своим функциональным возможностям и технико-экономическим показателям трехфазным.

При разработке однофазных источников был сохранен принцип объединения релейного управления с принудительным формированием синусоидального тока, потребляемого из сети, при отсутствии фазового сдвига между напряжением и током.

В [5] показана возможность построения однофазного источника питания с релейным управлением, реализующего режим источника тока и имеющего рав-

ные функциональные возможности с трехфазным ИП при высоком качестве потребляемой электроэнергии.

Общепринятым является производство, преобразование, распределение и потребление электрической энергии на основе источников напряжения ($U = \text{const}$). Однако из-за неидеальности их реальной внешней характеристики напряжение на её выходе уменьшается по мере роста тока, что отрицательно влияет на работу потребителей.

Существует ряд потребителей электрической энергии, которые требуют стабильности подведенной к ним мощности при изменении сопротивления нагрузки в широких пределах (установки плазменного нагрева, накопительные конденсаторы и др.).

Цель работы – показать возможность построения однофазных ИП с релейным управлением, реализующих режимы источника напряжения и мощности электромагнитно совместимых с сетью и малой чувствительностью к действию возмущений.

Материал и результат исследований. Для получения соответствующего режима работы трехфазного источника питания ($I = \text{const}$, $U = \text{const}$, $P = \text{const}$) достаточно установить соответствующий вид обратной связи – по току, по напряжению или мощности [1]. При этом схемотехника силовой части источника для всех режимов работы остается неизменной.

Этот же принцип используется и в однофазном ИП, реализующим режим $U = \text{const}$ (ИН).

На рис. 1 приведена функциональная схема источника напряжения, в основу которой положена схема источника тока [5] с заменой обратной связи по току нагрузки обратной связью по напряжению.

В состав источника напряжения входит активный выпрямитель US, собранный по однофазной мостовой схеме на IGBT-транзисторах с обратными диодами, к выходу которого подключен накопительный конденсатор C. Вход моста через формирующий дроссель $L_{др}$ и датчик потребляемого из сети тока UA подключен к питающей сети. Нагрузка подключена к конденсатору через реверсор UM, собранный на четырех IGBT-транзисторах, при этом управление транзисторами US и UM раздельное. Напряжения сети, конденсатора и нагрузки контролируются датчиками напряжения UV, UVc, UVn.

Система управления SC обеспечивает формирование потребляемого тока синусоидальной формы при отсутствии фазового сдвига ($\varphi = 0$) между напряжением и током и стабилизацию напряжения на нагрузке во всем диапазоне его регулирования.

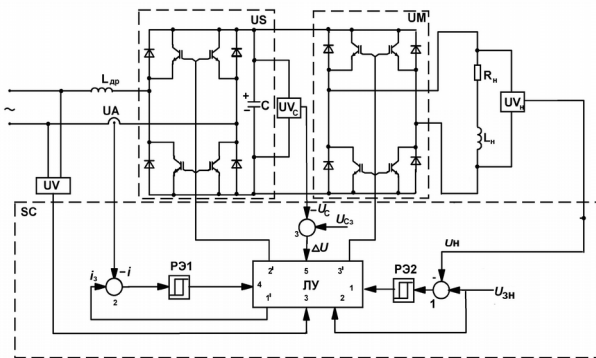


Рис. 1. Функциональная схема ИН1

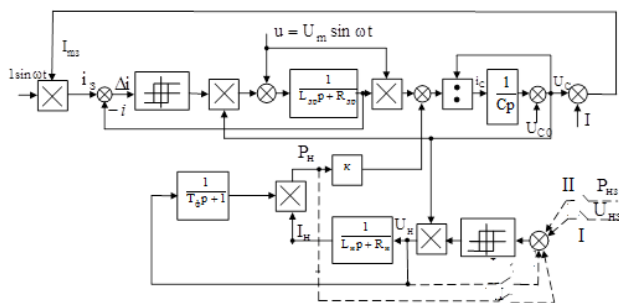


Рис. 2. Структурная схема ИН1 и ИМ1

Предварительное исследование возможностей предлагаемых источников целесообразно провести на математических моделях, полное и окончательное выполнить на цифровых моделях, учитывающих конкретную схемотехнику источников.

Работа контура формирования потребляемого из сети тока описывается выражениями

$$i_3 - i = \Delta i, \quad (1)$$

$$L_{др} \frac{di}{dt} + iR_{др} = u + U_c \quad -a \leq \Delta i \leq a, \frac{di}{dt} > 0,$$

$$L_{др} \frac{di}{dt} + iR_{др} = u - U_c \quad -a \leq \Delta i \leq a, \frac{di}{dt} < 0,$$

где $L_{др}$ – индуктивность входного дросселя; $R_{др}$ – активное сопротивление входного дросселя; $2a$ – ширина петли гистерезиса релейных регуляторов; U_c – напряжение на конденсаторе.

Процессы в контуре формирования напряжения на нагрузке описываются выражениями

$$U_{нз} - U_n = \Delta U_n,$$

$$\frac{L_n}{R_n} \frac{dU_n}{dt} + U_n = U_c \quad -b \leq \Delta U_n \leq b, \frac{dU_n}{dt} > 0, \quad (2)$$

$$\frac{L_n}{R_n} \frac{dU_n}{dt} + U_n = -U_c \quad -b \leq \Delta U_n \leq b, \frac{dU_n}{dt} < 0,$$

где $U_{нз}$, U_n – задающее и действительное значения постоянного напряжения на нагрузке, L_n , R_n – индуктивность и сопротивление нагрузки; $2b$ – ширина петли гистерезиса релейного регулятора напряжения нагрузки.

В основу построения математической модели источника напряжения положены уравнения (1) и (2). Структурная схема математической модели представлена на рис. 2.

На рис. 3 приведена осциллограмма процессов в ИН1 (переключатель в положение I).

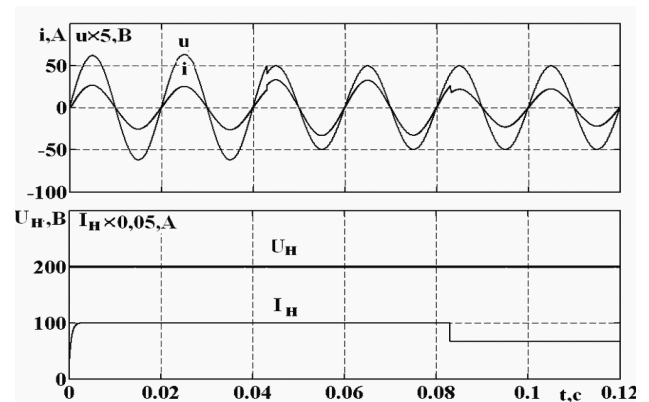


Рис. 3. Реакция источника напряжения на действие возмущений

Из осциллограмм следует, что ИН1 электромагнитно совместим с сетью и инвариантен к действию возмущений в виде изменения напряжения сети на 20% от номинального значения и увеличению сопротивления нагрузки. Математические модели подтвердили работоспособность источника.

Ниже приводятся ряд осциллограмм, демонстрирующих возможности источника полученные на цифровой модели.

На рис. 4 показан процесс стабилизации напряжения нагрузки, реакция на изменение величины задания напряжения (момент времени $t = 0,05$ с), реакции на изменение сопротивления нагрузки (момент времени $t = 0,094$ с) и изменение напряжения сети (момент времени $t = 0,1425$ с).

На рис. 5 а представлен процесс отработки закона вида $u_n = U_m \sin \omega t$ в нагрузке. В момент времени $t = 0,085$ с изменилось задание на амплитудное значение напряжения, входной ток при этом уменьшился для восстановления баланса мощности.

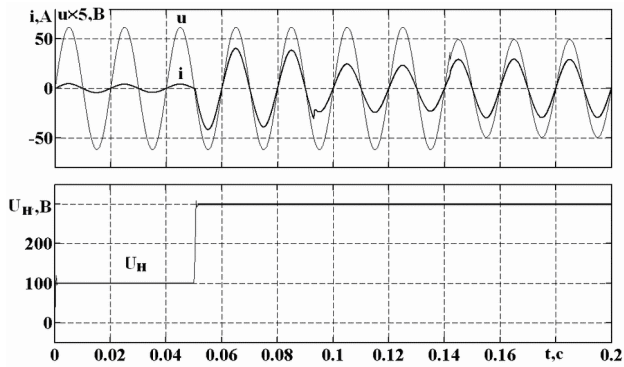
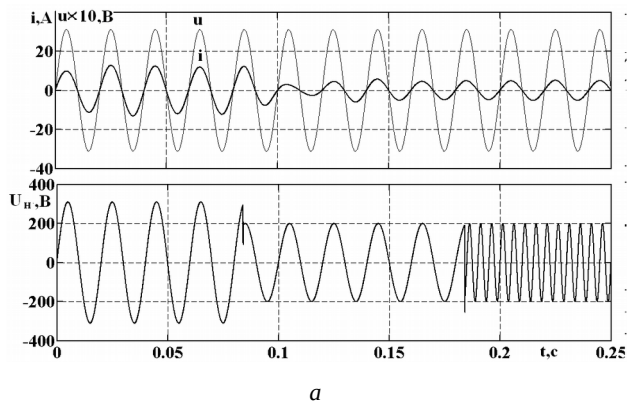


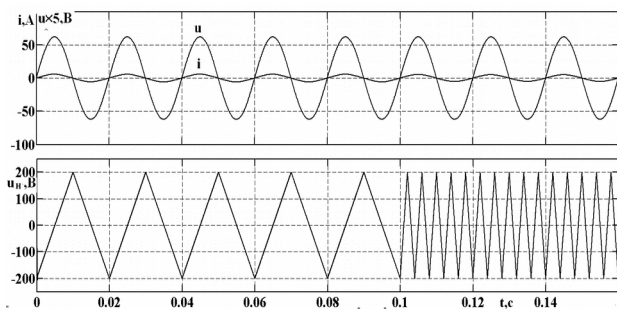
Рис. 4. Реакция ИН на действие возмущений

В момент времени $t=0,185$ с произошло изменение частоты напряжения нагрузки.

На рис. 5 б показано формирование треугольного закона изменения напряжения нагрузки с регулированием его частоты.



а



б

Рис. 5. Обработка законов

а – вида $u_n = U_m \sin \omega t$, б – треугольного закона изменения

Из приведенных осциллограмм следует, что во всех режимах потребляемый из сети ток имеет синусоидальную форму и синфазен с напряжением сети, стабилизация напряжения при действии возмущений не нарушается.

На рис. 6 показана силовая часть другого варианта построения однофазного источника напряжения ИН2. В этом случае несколько упрощается схемотехника за счёт уменьшения количества транзисторов (два вместо четырёх).

Качество работы и функциональные возможности ИН2 не отличаются от ИН1.

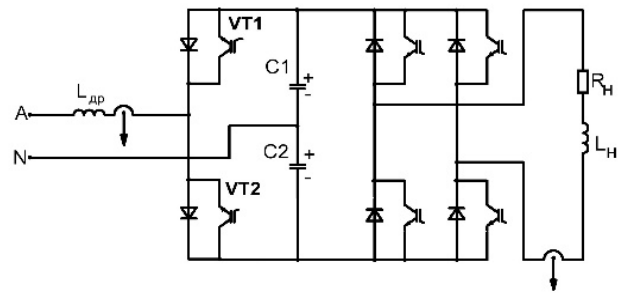
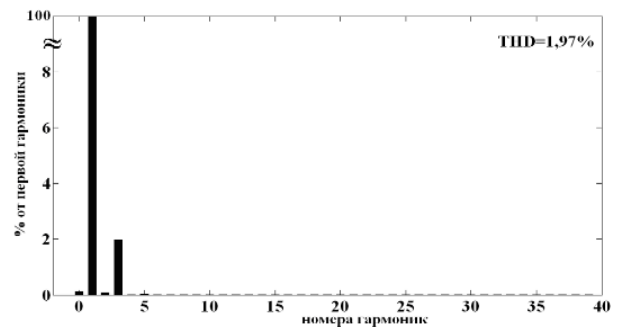


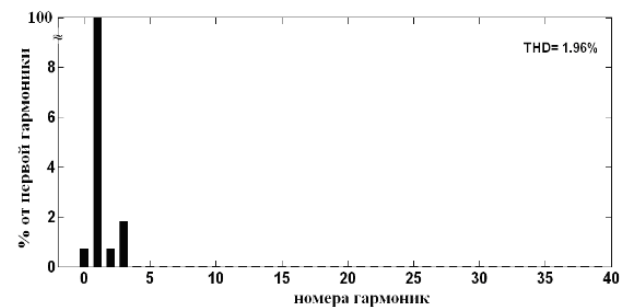
Рис. 6. Силовая часть ИН2

Спектры входных токов ИН1 и ИН2 представлены соответственно на рисунках 7 а и б.

Значения THD не выходят за пределы допустимых значений, установленных ГОСТ [6].



а



б

Рис. 7. Спектры сетевых токов а - ИН1, б - ИН2

Источник мощности $P = \text{const}$ может быть получен путём замены обратной связи по напряжению нагрузки (рис. 1), обратной связью по мощности. Схема источника мощности ИМ1 представлена на рис. 8.

Второй вариант ИМ2 выполнен, как и ИН2, по схеме, представленной на рис. 6.

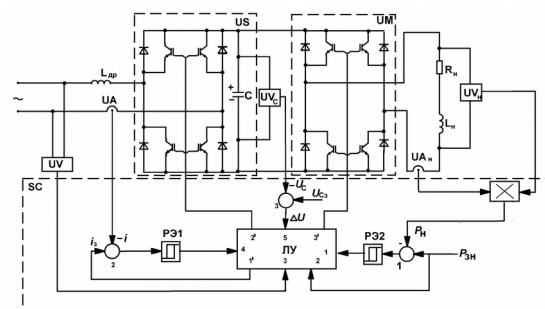


Рис. 8. Функциональная схема ИМ1

Уравнения, описывающие процессы в контуре формирования потребляемого тока, соответствует уравнениям (1).

Процессы в контуре формирования мощности нагрузки описываются уравнениями

$$P_{нз} - P_{н} = \Delta P_{н},$$

$$\begin{aligned} L_{н} \frac{di_{н}}{dt} + i_{н} R_{н} &= U_{с} & -b \leq \Delta i_{н} \leq b, & \frac{di_{н}}{dt} > 0, \\ \frac{L_{н}}{R_{н}} \frac{du_{н}}{dt} + U_{н} &= U_{с} & -b \leq \Delta U_{н} \leq b, & \frac{dU_{н}}{dt} > 0, \\ L_{н} \frac{di_{н}}{dt} + i_{н} R_{н} &= -U_{с} & -b \leq \Delta i_{н} \leq b, & \frac{di_{н}}{dt} < 0, \\ \frac{L_{н}}{R_{н}} \frac{du_{н}}{dt} + U_{н} &= -U_{с} & -b \leq \Delta U_{н} \leq b, & \frac{dU_{н}}{dt} < 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_{нз}$, $P_{н}$ – заданные и действительное значения мощности нагрузки.

Выбор режима осуществляется замыканием ключа в положение (рис. 2). На рис. 9 показан процесс стабилизации мощности нагрузки и реакция ИМ1 на действие возмущений (уменьшение напряжения сети и изменение сопротивления нагрузки).

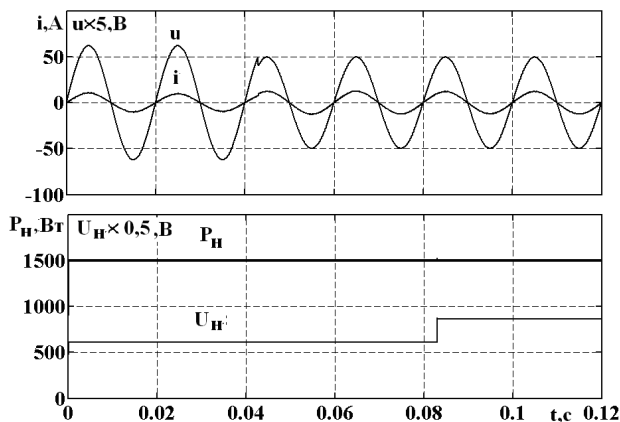


Рис. 9 Реакция ИМ1 на действие возмущений

Спектр тока потребляемого из сети представлен на рис. 10.

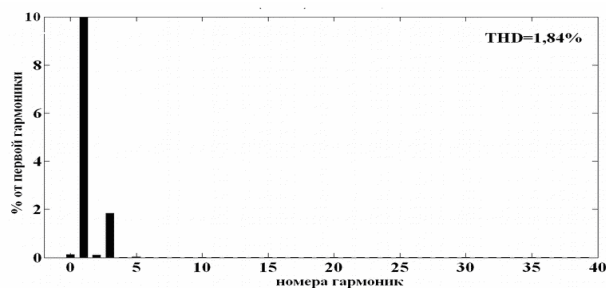


Рис. 10 Спектр сетевого тока ИМ1

Из рисунков 9÷10 следует, что источник мощности, также, как и источник напряжения, не чувствителен к действию возмущений при высокой степени электромагнитной совместимости.

Важнейшим параметром ИП с релейным управлением является частота релейного режима, определяющая качество работы ИП (предельное быст-

родействие, малая чувствительность к действию возмущений).

Частота релейного режима при формировании синусоидального тока, потребляемого из сети ИН1:

$$f = \frac{U_{с}^2 - (U_{м} - I_{м} R_{др})^2 \sin^2 \omega t}{4a U_{с} L_{др}}, \quad (4)$$

где $U_{м}$ – амплитудное значение фазного напряжения сети.

Из выражения 4 следует, что частота релейного режима меняется в процессе формирования потребляемого из сети тока.

Максимальная и минимальные значения частот определяется, согласно

$$f_{max} = \frac{U_{с}}{4a L_{др}}, \quad (5)$$

$$f_{min} = \frac{U_{с}^2 - (U_{м} - I_{м} R_{др})^2}{4a U_{с} L_{др}}. \quad (6)$$

Частота релейного режима в контуре нагрузки с учетом (2) будет определяться согласно выражению

$$f_{н} = \frac{(U_{с}^2 - U_{н}^2) R_{н}}{4b L_{н} U_{с}}. \quad (7)$$

В источнике ИМ1 частота релейного режима в контуре формирования потребляемого тока определяется (4÷6), а в контуре нагрузки выражением

$$f_{н} = \frac{(U_{с}^2 - P_{н} R_{н}) \sqrt{P_{н} R_{н}}}{2b L_{н} U_{с}}. \quad (8)$$

Выражения (4-8) позволяют определить параметры, влияющие на частоту релейного режима, и их величины, обеспечивающие заданную частоту.

Сравнивая схемотехнику ИТ, ИН, ИМ, видно, что силовая часть источника останется неизменной, система управления отличается практически лишь видом вводимой обратной связи. Появляется возможность без изменения схемотехники реализовать универсальный источник питания, в котором путем выбора вида обратной связи устанавливается необходимый режим работы ИТ, ИН, ИМ.

Схема универсального источника питания ИП, реализующего режим ИТ, ИМ и ИН, представлена на рис. 11.

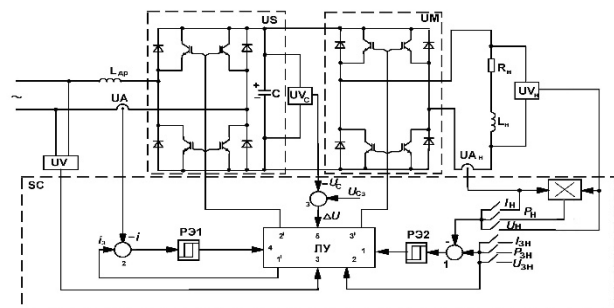


Рис.11 Схема универсального источника питания

Выводы: Предложенные однофазные источники напряжения и мощности обладают высокой степенью электромагнитной совместимости с сетью во всех режимах работы, малой чувствительностью к действию возмущений, предельным быстродействием в отработке задающих и возмущающих воздействий.

Источник напряжения обладает широкими функциональными возможностями (такими же, как и трехфазные), реализуя следующие режимы работы:

– преобразование переменного напряжения сети неизменной частоты и амплитуды в постоянное напряжение с возможностью регулирования его величины и стабилизации на заданном уровне;

– преобразование переменного напряжения сети в однофазное переменное напряжение различной формы и регулируемой частоты и амплитуды.

Источник мощности при необходимости также может реализовать различные законы изменения мощности в нагрузке.

Показана возможность построения универсального источника питания, реализующего режимы источника тока, напряжения и мощности.

Список литературы

1. Самчелев Ю. П., Белоха Г. С. Универсальный источник питания с релейным управлением для электроприводов постоянного и переменного тока. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017, Вип. 27 (1249). С. 264 – 267.
2. Бекбаев А. Б., Самчелев Ю. П., Дрючин В. Г., Белоха Г. С., Серсанбаев Е. А. Система стабилизации тока, электромагнитно совместимая с сетью. *Вестник Казахского Национального технического университета им. К. И. Сатпаева*. Алматы: КазНТУ им. К.И. Сатпаева. 2014. №1 (101). С. 93 – 100.
3. Bielokha H. Samchelev Yu. Electromagnetic compliant of voltage source with relay control. *IEEE Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*. Kremen-chuk, 2017. pp. 32 – 36.
4. Самчелев Ю. П., Белоха Г. С. Электромагнитно совместимый источник мощности с релейным управлением. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Одеса: Астропринт. 2017, № 25 (101). С. 139 – 145.
5. Дрючин В. Г., Самчелев Ю. П., Белоха Г. С., Шевченко И. С. Однофазный высокоэффективный источник питания для электропривода постоянного тока. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ. 2013, № 2 (22). С. 109 – 117.
6. IEEE-519-2014. *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. New York: Transmission and Distribution Committee, 2014. 29 p. (Standart of Transmission and Distribution Committee).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Самчелєєв Юрій Павлович (Самчелев Юрий Павлович, Samchelev Yuri Pavlovich) – кандидат технічних наук, доцент, Донбаський державний технічний університет, доцент кафедри автоматизованого електропривода; м. Алчевськ, Україна; e-mail: y.sam1904@gmail.com

Белоха Галина Сергіївна (Белоха Галина Сергеевна, Bielokha Halyna Sergeevna) – кандидат технічних наук, доцент, Східноукраїнський університет ім. В. Даля, доцент кафедри електричної інженерії; м. Сєверодонецьк, Україна; e-mail: pointage13@gmail.com

References (transliterated)

1. Samchelev YU. P., Beloha G. S. Universal'nyj istochnik pitaniya s relejnym upravleniem dlya elektroprivodov postoyannogo i peremennogo toka [Universal power supply with relay control for AC and DC drives]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, Vyp. 27 (1249). pp. 264 – 267.
2. Bekbaev A. B., Samchelev YU. P., Dryuchin V. G., Beloha G. S., Sersanbaev E. A. Sistema stabilizacii toka, elektromagnitno sovme-stimaya s set'yu [Current stabilization system, electromagnetically compatible with the network]. *Vestnik Kazahskogo Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta im. K. I. Satpaeva* [Bulletin of the Satbayev University]. Almaty: KazNTU im. K.I. Satpaeva. 2014, № 1 (101). pp. 93 – 100.
3. Bielokha H. Samchelev Yu. Electromagnetic compliant of voltage source with relay control. *IEEE Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*. Kremen-chuk, 2017. pp. 32 – 36.
4. Samchelev YU. P., Beloha G. S. Elektromagnitno sovme-stimyyj istochnik moshchnosti s relejnym upravleniem [Electromagnetically compatible power source with relay control]. *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy* [Electrotechnic and computer systems]. Odessa: Astroprint. 2017, № 25 (101). pp. 139 – 145.
5. Dryuchin V. G., Samchelev YU. P., Beloha G. S., Shevchenko I. S. Odnofaznyj vysokoeffektivnyj istochnik pitaniya dlya elektroprivoda postoyannogo toka [Single-phase high-efficiency power source for a DC drive]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy* [Electromechanical and energy saving systems]. Kremen-chuk: KrNU. 2013. № 2 (22). pp. 109 – 117.
6. IEEE-519-2014. *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. New York: Transmission and Distribution Committee, 2014. 29 p. (Standart of Transmission and Distribution Committee).

Поступила 30.04.2019