

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО СОВМЕСТИМЫЙ ИСТОЧНИК МОЩНОСТИ С РЕЛЕЙНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Ю. П. Самчелев, Г. С. Белоха,

Донбасский государственный технический университет

Аннотация. Показана возможность построения источника питания, реализующего режим $P=\text{const}$ (источник мощности) электромагнитно совместимого с сетью и релейным управлением. Приведены осциллограммы подтверждающие малую чувствительность источника к действию возмущений, выражения для определения частот релейного режима, емкости накопительных конденсаторов, индуктивности входных дросселей.

Ключевые слова: источник мощности, электромагнитная совместимость, релейное управление

Введение

При разработке современных устройств преобразовательной техники одной из важнейших задач является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) с сетью.

В настоящее время в большинстве случаев проблема ЭМС решается путем применения так называемых силовых активных фильтров (САФ) [1,2], обеспечивающих компенсацию гармоник в потребляемых из сети токах. Введение САФ приводит к усложнению силовой части и системы управления преобразователя в целом.

Поскольку именно релейный принцип управления позволяет обеспечить практически мгновенную реакцию на отклонение от задания, авторами предложено улучшать качество электроэнергии не путем компенсации гармоник, а принудительным, наиболее точным приближение действительного тока к величине и форме тока задания. Точность воспроизведения сигнала задания определяется шириной петли гистерезиса релейных регуляторов.

В работах авторов [3-6] показано, что предложенный принцип построения при разработке источников питания, реализующих режим $I=\text{const}$ (источник тока), позволяет достичь не только высокой степени ЭМС, но и малой чувствительностью к действию внешних возмущений при существенном упрощении схемотехники.

Существует ряд потребителей электрической энергии, которые требуют постоянства подводимой к ним мощности при изменении сопротивления нагрузки в широких пределах. В этом случае источник питания должен иметь гиперболическую внешнюю характеристику. На сложность реализации такой характеристики указыва-

ется в [7]. Там же предложены схемотехнические решения, которые позволяют приближенно аппроксимировать гиперболу двумя прямыми линиями.

Авторами предлагается источник питания, реализующий режим источника мощности ($P=\text{const}$) на тех же принципах, что и указанный выше источник тока.

Цель работы – продемонстрировать возможность построения источника мощности электромагнитно совместимого с сетью.

1. Материал исследований

Для реализации режима $P=\text{const}$ обратную связь по току нагрузки заменяют на обратную связь по мощности нагрузки. Сигнал обратной связи по мощности получен путем перемножения сигналов с датчиков напряжения и тока.

Функциональная схема предлагаемого источника мощности представлена на рисунке 1.

Источник мощности состоит из трехфазного активного выпрямителя на IGBT-транзисторах с обратными диодами, обеспечивающего формирование потребляемых токов из сети (US) и реверсора, обеспечивающего формирование заданной мощности в нагрузке (UM), двух накопительных конденсаторов C1 и C2, средняя точка которых соединена с нейтралью сети.

Схема содержит датчики фазных токов U_{Aa} , U_{Ab} , U_{Ac} , датчик тока нагрузки U_A , датчики фазного напряжения U_V и напряжения на конденсаторе U_{Vc} .

Система управления SC обеспечивает формирование потребляемых из сети токов синусоидальной формы и стабилизацию мощности нагрузки во всем диапазоне ее регулирования.

© Самчелев Ю. П., Белоха Г. С., 2017

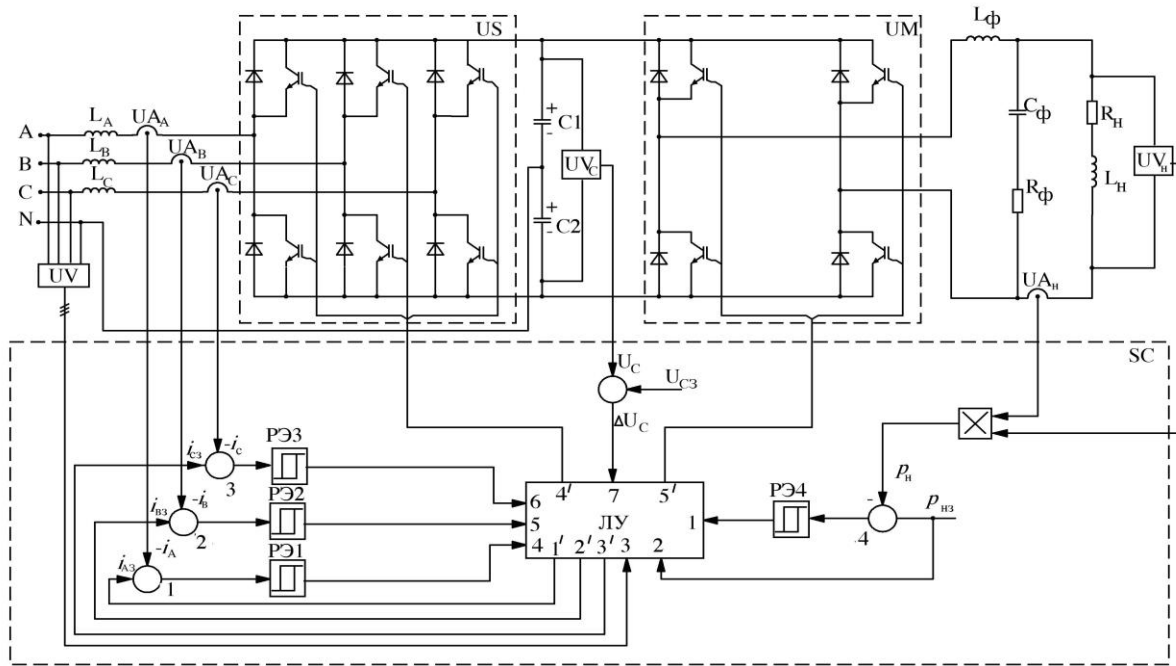


Рис. 1 Функціональна схема джерела потужності

В состав системы управления SC входят регуляторы входного тока РЭ1-РЭ3, регулятор мощности нагрузки РЭ4 и блок вычисления амплитуды входного тока ЛУ.

Так как на выходе реверсора формируются двуполярные прямоугольные импульсы напряжения, то для получения постоянной мощности в нагрузке использован фильтр (C_ϕ , R_ϕ , L_ϕ), который преобразует выходной сигнал реверсора в постоянную мощность с пульсациями в зоне ширины петли гистерезиса.

Процессы в контуре стабилизации мощности нагрузки описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 P_{нз} - P_n &= \Delta P_n, \\
 L_n \frac{di_n}{dt} + i_n R_n &= U_C \\
 -b \leq \Delta i_n \leq b, \frac{di_n}{dt} &> 0, \\
 L_n \frac{du_n}{dt} + U_n &= U_C \\
 -b \leq \Delta U_n \leq b, \frac{dU_n}{dt} &> 0, \\
 L_n \frac{di_n}{dt} + i_n R_n &= -U_C \\
 -b \leq \Delta i_n \leq b, \frac{di_n}{dt} &< 0,
 \end{aligned}$$

$$\frac{L_n}{R_n} \frac{du_n}{dt} + U_n = -U_C$$

$$-b \leq \Delta U_n \leq b, \frac{dU_n}{dt} < 0,$$

где $P_{нз}$, P_n – заданное и действительное значения мощности нагрузки, L_n , R_n – индуктивность и сопротивление нагрузки; i_n – действительное значение тока в нагрузке; U_n – действительное значение напряжения на нагрузке; $2b$ – ширина петли гистерезиса релейного регулятора мощности нагрузки; U_C – напряжение на конденсаторах ($U_C = U_{C1} + U_{C2}$).

Важнейшим параметром систем с релейным управлением является частота релейного режима, которая определяется в данном случае в соответствии с выражением

$$f_n = \frac{(U_C^2 - P_n R_n) \sqrt{P_n R_n}}{2b L_n U_C}$$

В контуре формирования синусоидального тока, потребляемого из сети, величина тока периодически меняется в пределах полупериода от нуля до I_m и снова до нуля.

Частота релейного режима в контуре формирования тока в фазе А определяется выражением

$$f_A = \frac{U_{C1}^2 - U_m^2 \sin^2 \omega t}{2aL_A U_C}, \quad (1)$$

где U_m – амплитудное значение фазного напряжения сети, I_m – амплитудное значение фазного тока, L_A, L_B, L_C – индуктивности фазных дросселей.

Для фаз В и С частота релейного режима определяется аналогичным образом и соответствующие выражения будут иметь вид:

$$f_B = \frac{U_{C1}^2 - U_m^2 \sin^2 (\omega t - \frac{2\pi}{3})}{2aL_B U_C}, \quad (2)$$

$$f_C = \frac{U_{C1}^2 - U_m^2 \sin^2 (\omega t + \frac{2\pi}{3})}{2aL_C U_C}. \quad (3)$$

Из выражений (1-3) определим максимальное и минимальное значение частоты.

Максимальное значение частоты релейного режима определяется

$$f_{\max} = \frac{U_{C1}^2}{2aLU_C}, \quad (4)$$

где $L = L_A = L_B = L_C$

Минимальное значение частоты релейного режима

$$f_{\min} = \frac{U_{C1}^2 - U_m^2}{2aLU_C}$$

Выражение (4) позволяет определить значение индуктивности входного дросселя, исходя из заданной частоты.

$$L_A = L_B = L_C = \frac{U_{C1}}{4af_{\max}}$$

Изучение электромагнитных процессов, происходящих в цепи накопительных конденсаторов, является обязательным, поскольку для стабильной работы источника мощности в целом необходимо знать поведение напряжения на конденсаторах.

Наличие нейтрального провода позволяет рассматривать процессы, происходящие в каждой фазе независимо друг от друга.

Поведение напряжений на накопительных конденсаторах, при работе фазы А, описываются выражениями

$$\Delta u_{C1(A)} = -\frac{I_m U_{C2}}{\omega C_1 U_C} \cos \omega t - \frac{I_m U_m}{4\omega C_1 U_C} \sin 2\omega t, \quad (5)$$

$$\Delta u_{C2(A)} = \frac{I_m U_{C1}}{\omega C_2 U_C} \cos \omega t - \frac{I_m U_m}{4\omega C_2 U_C} \sin 2\omega t, \quad (6)$$

$$\Delta u_{C(A)} = \Delta u_{C1(A)} + \Delta u_{C2(A)}, \quad (7)$$

где C_1, C_2 – емкости конденсаторов, Δu_C – пульсации напряжения на конденсаторах.

Учитывая, что $U_{C1} \approx U_{C2}$ и $C_1 = C_2$, выражение (7) будет иметь вид

$$\Delta u_{C(A)} = -\frac{I_m U_m}{2\omega C_1 U_C} \sin 2\omega t. \quad (8)$$

Аналогичными выражениями описываются поведение напряжений на конденсаторах при работе фаз В и С.

Суммарные пульсации напряжения на конденсаторах будут определяться:

$$\Delta u_{C1} = \Delta u_{C1(A)} + \Delta u_{C1(B)} + \Delta u_{C1(C)} \quad (9)$$

$$\Delta u_{C2} = \Delta u_{C2(A)} + \Delta u_{C2(B)} + \Delta u_{C2(C)} \quad (10)$$

$$\Delta u_C = \Delta u_{C(A)} + \Delta u_{C(B)} + \Delta u_{C(C)} \quad (11)$$

Подставляя в (10-11) выражения (6-9) получим

$$\Delta u_C \approx 0, \quad \Delta u_{C1} \approx 0, \quad \Delta u_{C2} \approx 0$$

т.е. пульсации напряжений отсутствуют.

Осциллограммы, представленные на рисунке 2, подтверждают отсутствие пульсаций напряжений на конденсаторах.

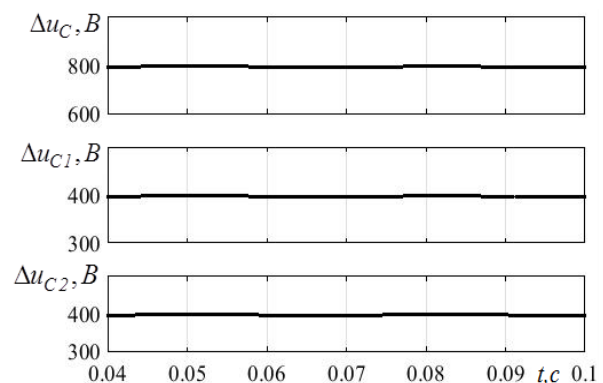


Рис. 2 Пульсации напряжения на конденсаторах С1 и С2

Выражение для определения емкости накопительных конденсаторов

$$C_1 = C_2 = \frac{P_n}{2\omega\Delta U_c U_c}$$

Цифровая модель источника мощности представлена на рисунке 3 (параметры силовой части при моделировании: $L_{др}=5$ мГн, $L_n=5$ мГн, $C=2000$ мкФ, $b=10$ Вт, $U_c=700$ В, $U_m=310$ В, $C_\phi=50$ мкФ, $R_\phi=1$ Ом, $L_\phi=10$ мГн). При цифро-

вом моделировании приняты следующие допущения:

- напряжения сети имеют синусоидальную форму и симметричны;
- силовые ключи идеальны;
- все индуктивности входных дросселей активного выпрямителя одинаковы.

В качестве среды для моделирования выбран пакет MatLab.

Результаты цифрового моделирования представлены на рисунке 4.

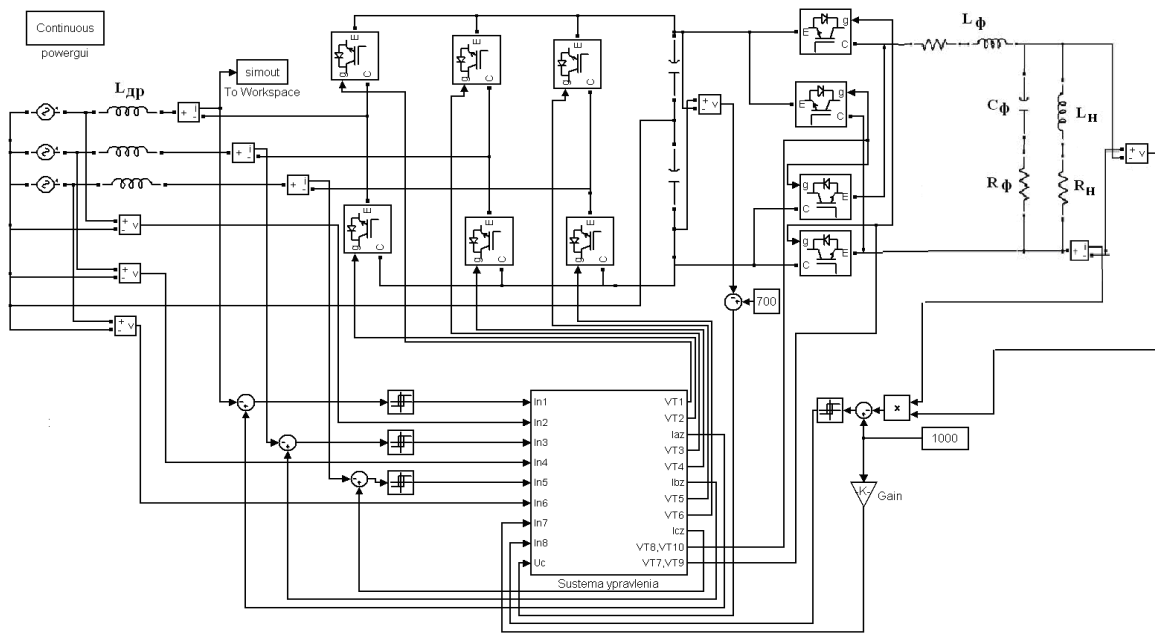


Рис.3 Модель трехфазного источника мощности

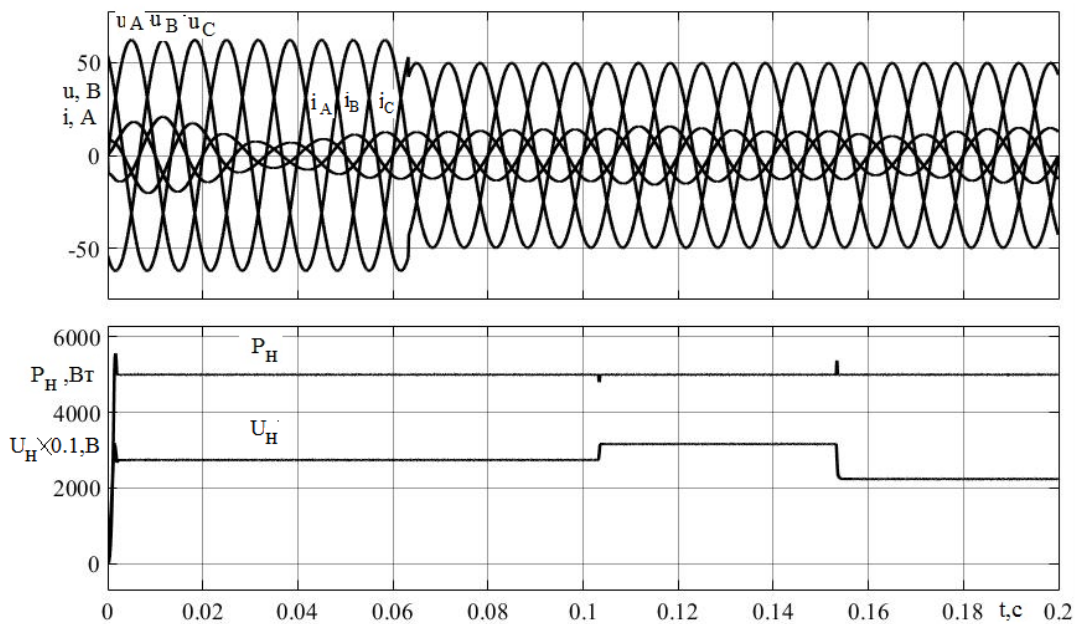


Рис. 4 Реакция источника на действие возмущений

Видно, что в момент времени $t=0,063$ с произошло уменьшение напряжения сети, а в момент времени $t=0,113$ с и $t=0,0153$ произошло изменение сопротивления нагрузки, при этом мощность не изменилась, т.е. источник не чувствителен к действию возмущения. Потребляемые из сети токи остались синусоидальными при $\cos\varphi=1$.

На рисунке 5 представлена реакция на изменение задания мощности в нагрузке в момент времени $t=0,065$ с. При этом токи, потребляемые из сети, также синусоидальны и синфазны с напряжением сети.

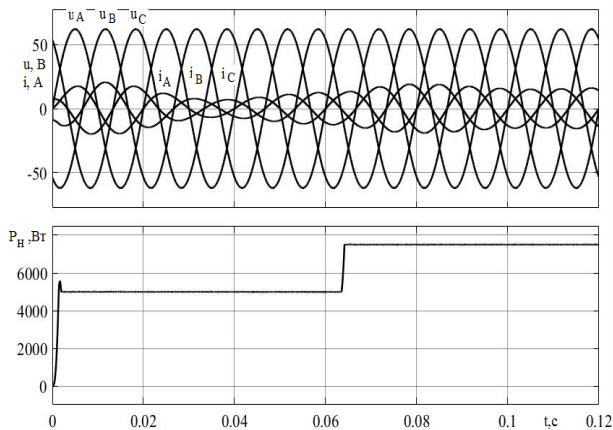


Рис. 5 Реакция источника мощности на изменение задания

Спектр фазного тока представлен на рисунке 6. Значения коэффициента гармонических составляющих $\text{THD}=0,31\%$, что существенно ниже требований международных стандартов [8].

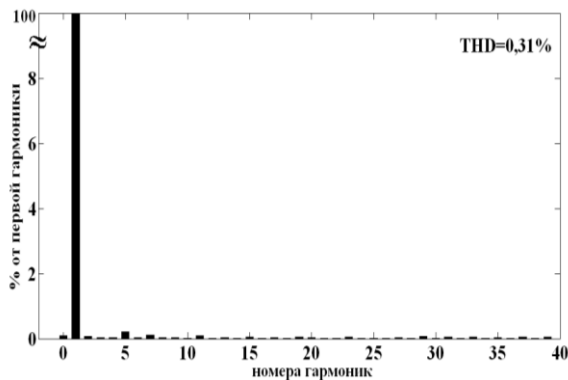


Рис. 6 – Спектр фазного тока

На рис. 7 показана гиперболическая зависимость выходного тока от напряжения на нагрузке в процессе реализации условия $P_n=\text{const}$ при $R_n=\text{var}$.

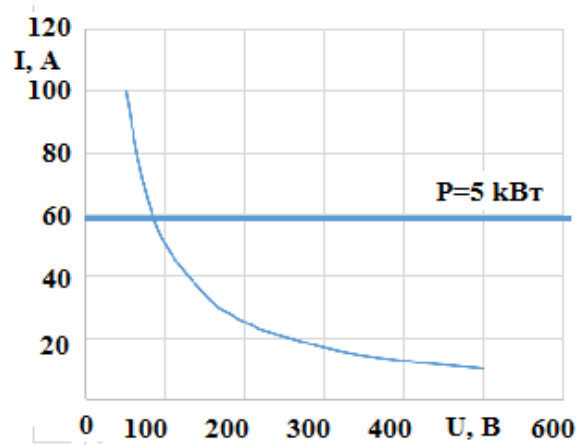


Рис.7 Зависимость выходного тока от напряжения на нагрузке

Выводы

Показана возможность построения источника питания, реализующего режим (источник мощности) с релейным управлением и высокой степенью электромагнитной совместимости.

Результаты цифрового моделирования показали, что источник питания не чувствителен к действию внешних (изменение напряжения питания) и внутренних (изменение сопротивления нагрузки) возмущений.

Электромагнитная совместимость не нарушается при любых режимах работы.

Получены аналитические выражения для расчета частот релейного режима и исследования электромагнитных процессов.

Список использованной литературы

1. Kolar, J. W. The essence of three-phase PFC rectifier systems–Part 1 [Text] / J. W. Kolar, T. Friedli J. Rodriguez P. W. Wheeler // IEEE Trans. Power Electron., 2011. – vol. 58 – P. 4988–5006.

2. Белоха, Г. С. Высокоэффективный источник питания с релейным управлением [Текст] / Г. С. Белоха // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологях. – м. Харків, НТУ«ХП», 2013. – Вип. № 18(991) – С.51–56.

3. Бекбаев, А. Б. Система стабилизации тока, электромагнитно совместимая с сетью. [Текст] / А. Б. Бекбаев, Ю. П. Самчелев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха, Е. А. Серсанбаев // Вестник КазНТУ, Алматы. – 2014. - № 1(101). – с. 93–100.

4. Самчелев, Ю. П. Высокоэффективные источники электропитания: Монография [Текст] / Ю. П. Самчелев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха, Н. И. Андреева.– Алчевск: ДонГТУ, 2013.– 219 с.

5. Пат. 87224, МПК H02M 7/00. Регульоване джерело живлення / Белоха Г. С. Дрючин В. Г., Самчелев Ю. П., Шевченко И. С.; заявник та патентовласник Донбаський державний техніч-

ний університет. – № U201310643; заявл. 03.09.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 24.

6. Пат. 63609, МПК H02M 7/12. Регульоване джерело живлення / Белоха Г. С. Дрючин В. Г., Самчелеєв Ю. П., Шевченко І. С.; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет. – № U201103998; заявл. 04.04.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.

7. Милях, А. Н. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей [Текст] / А. Н. Милях, И. В. Волков. – К.: Наук. думка, 1974. – 216 с.

8. Електромагнітна сумісність. Частина 3–12. Норми. Норми на гармоніки струму, створені обладнанням із номінальним вхідним струмом силою понад 16 А та до 75 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності (IEC 61000-3-12:2004, IDT): ДСТУ IEC 61000-3-12:2009 : – [Действительный 01.04.2012]. – Киев, 2012. – 38с.

References

1. Kolar, J. W., Friedli, J., Rodriguez, P. W. (2011), The essence of three-phase PFC rectifier systems–Part 1. IEEE Trans. Power Electron., vol. 58., 4988–5006 pp.

2. Beloha, G. S. (2013), Highly efficient power supply with relay control [Vysokoeffektivnyy istochnik pitaniya s releynym upravleniem] Visnik NTU «HPI». SerIya: NovI rishennya v suchasnih tehnologiyah, Harkiv, NTU HPI», Vol. 18(991), 51–56 pp.

3. Bekbaev, A. B., Samchelev, Yu. P., Dryuchin, V. G., Beloha, G. S., Sersanbaev, E. A. (2014), Current stabilization system, electromagnetically compatible with the network [Sistema stabilizatsii toka, elektromagnitno sovместimaya s setyu.] Vestnik KazNTU, Almaty., № 1(101). 93–100 pp.

4. Samchelev, Ju. P., Drjuchin, V. G., Beloha, G. S., Andreeva, N. I. (2013), High Efficiency Power Supply [Vysokoeffektivnye istochniki jelektropitanija] Publ Alchevsk: DonGTU., 219 p.

5. Pat. 87224 Ukraine, МПК H02M 7/00. Regulated power supply / Beloha G.S. Drjuchyn V. G., Samcheljejev Ju. P., Shevchenko Y. S.,; заявник та патентовласник Donbas'kyj derzhavnyj tehnicnyj universytet. – №U201310643; заявл. 03.09.2013; opubl. 03.09.2013, Bjul. № 24 [Beloha G.S. Drjuchyn V. G., Samcheljejev Ju. P., Shevchenko Y. S. Pat. 87224 Ukraine Int. Cl. H02M 7/00. Regulated power supply] Patent Applicant and Owner is Donbas State Technical University. Appl. No. U201310643 03.09.2013 Published from Bull. 27.01.2014, No 24 (In Ukrainian).

6. Pat. 63609 Ukraine, МПК H02M 7/00. Regulated power supply / Beloha G. S. Drjuchyn V. G., Samcheljejev Ju. P., Shevchenko Y. S.,; заявник та патентовласник Donbas'kyj derzhavnyj tehnicnyj universytet. – №U201103998; заявл. 04.04.2011; opubl. 10.10.2011, Bjul. № 19 [Beloha G. S. Drjuchyn V. G., Samcheljejev Ju. P., Shevchenko Y. S. Pat. 63609 Ukraine Int. Cl. H02M 7/00. Regulated power supply] Patent Applicant and Owner is Donbas State Technical University. Appl. No. U201103998 04.04.2011 Published from Bull. 10.10.2011, No 19 (In Ukrainian).

7. Milyah, A. N. (1974), Systems of constant current on the basis of inductive capacitive converters [Sistemyi neizmennogo toka na osnove induktivno-емkostnyih преобразователей], Kiev, Nauk. dumka, 216 p.

8. Electromagnetic compatibility. Part 3–12. Norms. Standards for current harmonics created by equipment with a nominal input current of more than 16 A and 75 A inclusive for the phase connected to low-voltage general-purpose electrical supply (2012) [systemsElektromagnitna sumisnist. Chastina 3–12. Normi. Normi na гармоніки струму, створені обладнанням із номінальним вхідним струмом силою понад 16 А та до 75 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності](IEC 61000-3-12:2004, IDT): DSTU IEC 61000-3-12:2009, [Deystvitelnyy 01.04.2012], Kiev, 38p

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY POWER SOURCE WITH RELAY CONTROL

Yu. P. Samchelev, H. S Bielokha
Donbass State Technical University

Abstract. In the development of modern devices of converter technology, one of the most important tasks is to ensure electromagnetic compatibility with the network. Power sources are classified on voltage source, current sources and power sources. The quality of their work is determined by accurate implementation of these conditions. The main aim of the research work is the creation of power source with relay control and analysis of its operation modes. The power source is built on the principle of forced sinewave current rise, which is consumed from the circuit and from the relay control. The suggested principle solves the problem of

electromagnetic compatibility and terminal processing speed. Power source has two circuits, two looped circuits. The first one secures looping courses of sine-shaped current, which is consumed from the circuit. The second one is used for power stabilization on load. The following research presents the analytical data for relay mode frequency identification while mains current and power on load formation, The expression for capacitance is the capacitor. Thus, the system of invariant stabilization towards the disturbance influence of THD is much lower acceptable value specified by the State Standard. Under this conditions the voltage consumed preserves the sinewave form, where $\cos\varphi=1$.

Key words: Power source, electromagnetic compatibility, relay control

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ДЖЕРЕЛА ПОТУЖНОСТІ З РЕЛЕЙНИМ УПРАВЛІННЯМ

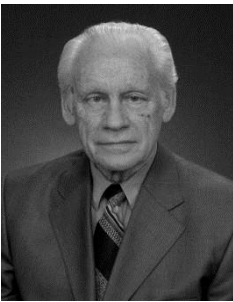
Ю. П. Самчелєєв, Г. С. Белоха

Донбаський державний технічний університет

Анотація. Показана можливість побудови джерела живлення, що реалізує режим $P = const$ (джерело потужності) електромагнітно сумісного з мережею і релейним керуванням. Наведено осцилограми які підтверджують малу чутливість джерела до дії збурень, вирази для визначення частот релейного режиму, ємності накопичувальних конденсаторів, індуктивності вхідних дроселів.

Ключові слова: джерело потужності, електромагнітна сумісність, релейне управління

Получено 15.04.2017



Самчелєєв Юрій Павлович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем Донбаського державного технічного університету Просп. Перемоги, 84, Лисичанськ, Україна,

Yuriu Samcheleev, PhD. of Science, assistant professor of the Department automation and electromechanical systems, Dondas State Technical University, Peremogu ave., 84, Lisichansk, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-4855-7089



Белоха Галина Сергєєвна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем Донбаського державного технічного університету Просп. Перемоги, 84, Лисичанськ, Україна,
E-mail: galin.1303@mail.ru

Halyna Bielokha, PhD. of Science, assistant professor of the Department automation and electromechanical systems, Dondas State Technical University, Peremogu ave., 84, Lisichansk, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-4277-367X