

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СИСТЕМА З ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ СТАБІЛІЗОВАНОГО РОЗРЯДНОГО СТРУМУ У ВУГЛЕЦЕВІСНИХ ГАЗАХ

Д.В. Вінниченко*, Н.С. Назарова**

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,

пр. Богоявленський, 43-А, Миколаїв, 54018, Україна. Е-mail: vdvvs@gmail.com

Розроблено комбінований метод частотно-параметричного регулювання стабілізованого розрядного струму електротехнічної системи обробки вуглецевісних газів у міжелектродному проміжку змінної довжини. Забезпечення заданого коефіцієнту стабілізації вихідного струму за таким методом здійснюється автоматичним регулюванням частоти напівпровідникового інвертора напруги з резонансним послідовним інвертором. Для розширення частотного діапазону регулювання необхідного стабілізованого струму у роботі запропоновано використовувати дросель з відпайками, що забезпечує стабілізацію струму до 99% у разі змінення лінійного активного навантаження та 95% – електророзрядного навантаження. Бібл. 12, рис. 3.

Ключові слова: інвертор, резонанс, струм, розряд, стабілізація, частота, регулювання, дросель.

У разі електротермічної обробки струмопровідних металевих виробів зазвичай використовують синусоїдальні безперервні струми [1], а при електророзрядній обробці діелектричних і напівпровідних середовищ – генератори розрядних струмів [2, 3] з накопичувальними конденсаторами [4], які формують розрядні імпульси із тривалими безструмними паузами [5]. У роботі [6] обґрунтовано, що при електророзрядній обробці вуглецевісних газів безперервним високочастотним струмом інтенсивність синтезу нановуглецю може зростати, а питомі втрати енергії зменшуватися. У [7] показано, що напруга на каналі розряду пропорційно залежить від його довжини і не залежить від струму. У роботі [8] експериментально обґрунтовано, що питомі енерговитрати синтезу нановуглецю на одиницю маси W_{Π} (кДж/г) залежать від середньоквадратичного значення вихідного розрядного струму I_{RMS} при фіксованих значеннях довжини каналу розряду і, відповідно, фіксованих значеннях напруги на каналі розряду. Отримані залежності мають явні мінімуми питомих енерговитрат екстремального характеру, які зсуваються в область більших вихідних потужностей і струмів за умови збільшення міжелектродного проміжку. Наявність екстремумів в залежності цільової технологічної характеристики W_{Π} від режимних характеристик високовольтної системи (P_{out} , I_{RMS}) є умовою для визначення енергоефективних режимів електротехнічної системи для отримання нановуглецю. Для реалізації мінімальних питомих енерговитрат при значних відхиленнях частоти інвертора від резонансної в системі необхідно змінювати величину стабілізованого розрядного струму.

У [6-8] визначено вимоги до електротехнічних систем формування високовольтних розрядних імпульсів у вуглецевісних газових середовищах і обґрунтовано, що вони повинні мати вихідні характеристики джерела струму. Показано, що для стабілізації розрядного струму у навантаженні при багатократному змінненні його електричного опору та напруги розрядних імпульсів можливо використати електротехнічні системи на основі напівпровідникового інвертора напруги з резонансним послідовним контуром (рис. 1).

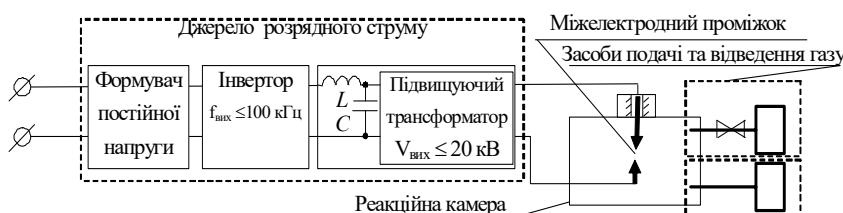


Рис.1

Аналіз сучасних резонансних інверторів [9–11] свідчить, що вони мають достатньо високі значення коефіцієнта корисної дії та рівня електромагнітної сумісності, але їхнє застосування в електророзрядних установках для отримання нановуглецевих матеріалів із газоподібних вуглеводнів вимагає додаткових досліджень через особливості електророзрядного навантаження. Дослідження особливостей стабілізації вихідного струму, запропонованої в [8], проведено в [6]. Математичне моделювання режимів при змінненні резонансної частоти інвертора і регулюванні частоти комутації його ключів показало можливість отримання коефіцієнту стабілізації середньоквадратичного струму в навантаженні до 99% (тобто відхилення не більше 1%).

Регулювання струму за допомогою змінення частоти комутації транзисторів інвертора є неперервним процесом і дозволяє в режимі реального часу реалізувати оптимальний струм при змінненні довжини газового проміжку. Але при значних відхиленнях частоти комутації інвертора від резонансної його коефіцієнт стабілізації зменшується, і вихідний струм може суттєво відрізнятися від оптимального значення.

Метою роботи є розробка комбінованого методу частотно-параметричного регулювання стабілізованого вихідного струму джерела живлення на основі резонансного інвертора для забезпечення оптимального значення розрядного струму в широкому діапазоні змінення резонансної частоти напівпровідникового інвертора.

Залежність стабілізованого струму джерела живлення на основі резонансного інвертора від його параметрів. Для зменшення питомих втрат на синтез вуглецевих наноматеріалів електротехнічна система повинна забезпечувати оптимальний стабілізований струм, який залежить від напруги на каналі розряду [6], що пропорційно змінюється від його довжини [7, 12]. Тобто при змінній довжині газового каналу розряду система регулювання розрядного струму повинна в режимі реального часу змінювати його ефективне значення.

У [8] показано, що для першої гармоніки вихідного струму відхилення частоти комутації ключів інвертора на 15% викликає похибку визначення коефіцієнту стабілізації $\leq 1\%$. З урахуванням цього отримано залежність струму від частоти комутацій. Введемо позначення: $k=R'_H/\omega L$ – відносне навантаження; R'_H – приведений до первинної обмотки трансформатора опір навантаження, отриманий експериментально; L – індуктивність резонансного кола; $\omega=2\pi f$ – кругова частота. На резонансній частоті $f=1/(2\pi(LC)^{0.5})$ та прямокутній напрузі на вході резонансного LC-кола (рис. 1) в режимі, близькому до режиму короткого замикання на виході ($k<0,2$), вихідний струм має трикутну форму, а його діюче значення дорівнює $I_{RMS}=U_m/(4\cdot 3^{0.5}Lf)$, де U_m – постійна напруга на вході інвертора, f – частота комутації ключів інвертора [6]. Цю залежність вихідного струму інвертору від його частоти та індуктивності резонансного контуру використано для регулювання величини стабілізованого струму в навантаженні. Частотне регулювання стабілізованого струму є неперервним і дозволяє в режимі реального часу забезпечувати оптимальний струм при змінній довжині проміжку, але така можливість обмежена обраним допустимим відхиленням коефіцієнту стабілізації струму.

Обмеження неперервного методу регулювання вихідного розрядного струму джерела живлення.

Для визначення границь застосування неперервного методу регулювання вихідного струму електротехнічної системи використаємо методіку, представлену в [2], і розрахуємо коефіцієнти стабілізації вихідного струму. Для аналізу введено такі позначення: $q=\omega/\omega_0$ – відносна частота, ω – частота перемикавання ключів ін-

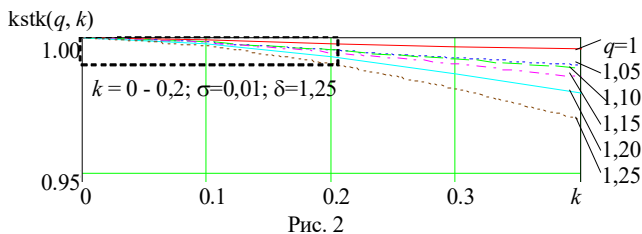


Рис. 2

вертора, ω_0 – власна частота резонансного кола. Розраховано коефіцієнти стабілізації розрядного струму $kstk(q, k)=I_{RMS}(q, k)/I_{RMS}(1, 0)$ для суми 10 перших гармонік напруги й для різних q та k (рис. 2). Типове навантаження не перевищує $k=0,2$. Приймаючи задану допустиму величину відхилення коефіцієнту стабілізації σ на рівні 0,01 або 1% на рис. 2, визначено величину $\delta=q$ відхилення частоти інвертору від власної частоти резонансного контуру, яка відповідає

заданому σ . Через те, що $\sigma \leq 0,01$, для заданих значень δ стабілізований струм практично дорівнює струму $I_{RMS}(1, 0)$. Таким чином, розрахунок середньоквадратичного струму на виході резонансного інвертора можна спростити при $k=0$, тобто в режимі короткого замикання. Тоді залежність між середньоквадратичним струмом та q матиме вигляд $I_{RMS}=U_m/(4\cdot 3^{0.5}Lf_0q)$, де $f_0=\omega_0/(2\pi)$ – власна частота резонансного кола. Цей вираз є законом регулювання розрядного струму, який пов'язує вихідний розрядний струм із керуючими впливами, якими є частота інвертора і індуктивність резонансного контуру.

Для заданого допустимого коефіцієнта стабілізації струму (для наведеного прикладу відхилення $\sigma=0,01$) можна здійснювати неперервне регулювання струму за допомогою змінення частоти у відповідних межах ($\delta=1,25$), а при перевищенні частотою заданої межі ($\delta=1,25$) доцільно змінити вільну частоту коливальних резонансного контуру, наприклад, за допомогою введення в контур додаткових індуктивностей.

Методика розрахунку інтервалів неперервного регулювання та параметрів резонансного кола в цих інтервалах. Розрахунок виконується у відповідності з такими етапами: а) завдання обмежень використання методу неперервного регулювання розрядного струму; б) завдання базових параметрів високовольтного формувача височастотних струмів: максимальної напруги на розрядному проміжку, діапазонів регулювання довжини міжелектродного проміжку і розрядного струму; в) розрахунок діапазонів частоти, розрядного струму і додаткових індуктивностей для областей неперервного регулювання розрядного струму.

Задаємо величину δ відхилення частоти інвертору від власної частоти резонансного контуру, яка визначається із заданої допустимої величини відхилення коефіцієнту стабілізації розрядного струму від розрахованого для заданої величини приведенного навантаження k (рис. 2). Так, для $k=0,2$ (що відповідає експериментальним даним для режиму продуктивного синтезу нановуглецю) і коефіцієнта стабілізації розрядного струму 0,99 відхилення $\delta = 25\%$ (нижня крива на рис. 2), а для коефіцієнта стабілізації розрядного струму 0,995 відхилення $\delta = 15\%$. Для обраної величини δ розраховуються діапазони частоти, розрядного струму і додаткові індуктивності для областей неперервного регулювання розрядного струму.

Базовими параметрами, відносно яких проводиться розрахунок діапазонів, є відносна приведена індуктивність високо частотного трансформатора $L^*=1$, відносна приведена ємність високо частотного трансформатора $C^*=1/(2\pi)^2$, власна відносна частота резонансного контуру на власних параметрах трансформатора $f_{tr}^*=1/(2\pi(L^*C^*)^{1/2})=1$. Напругу U_m (2) оберемо таким чином, щоби струм, який відповідає f_{tr}^* також дорівнював одиниці $I_{RMS_tr}^*=1$, тобто був оптимальним [9]. При незручності такої дії в якості $L^*=1$ задамо сумарну індуктивність, яка складається із власної приведенної індуктивності високовольтного трансформатора і додаткового індуктивного елемента. Відносну максимальну довжину міжелектродного проміжку також оберемо рівною одиниці – $l_{ED}^*=1$.

Діапазони частоти, розрядного струму та додаткові індуктивності для інтервалів неперервного регулювання розрядного струму розраховують для i -го діапазону ($i=1,2, \dots$) таким чином: а) струми на початку і в кінці діапазону відповідно $I_{RMS_b\ i}^* = I_{RMS_tr}^* / (1+\delta)^{i-1}$, $I_{RMS_e\ i}^* = I_{RMS_tr}^* / (1+\delta)^i$; б) власні частоти коливального контуру $f_{r\ i}^* = f_{tr}^* / (1+\delta)^i$; в) частота інвертору на початку і в кінці діапазону відповідно $f_{i\ b\ i}^* = f_{tr}^* / (1+\delta)^i$, $f_{i\ e\ i}^* = f_{tr}^* / (1+\delta)^{i+1}$; г) сумарна індуктивність коливального контуру $L_{r\ i}^* = L^* \cdot (1+\delta)^{2i}$.

Граничні діапазони регулювання вихідних характеристик обираються на основі лінеаризованої емпіричної залежності струму [6] від довжини міжелектродного проміжку у відносних одиницях для обраного діапазону $\Lambda = [I_{ED_min}^*, I_{ED_max}^*]$, яка набуває вигляду $I_{RMS_opt}^* = 0,34 + 0,66L_{ED}^*$, звідки границі діапазону регулювання розрядного струму $F = [I_{RMS_min}^*, I_{RMS_max}^*]$. Кількість діапазонів m безперервного регулювання розраховується з умови: $I_{RMS_e\ i}^* \leq I_{RMS_opt}^* < I_{RMS_b\ i}^* \Rightarrow m=i$.

Комбінований метод частотно-параметричного регулювання струму джерела живлення (рис. 3)

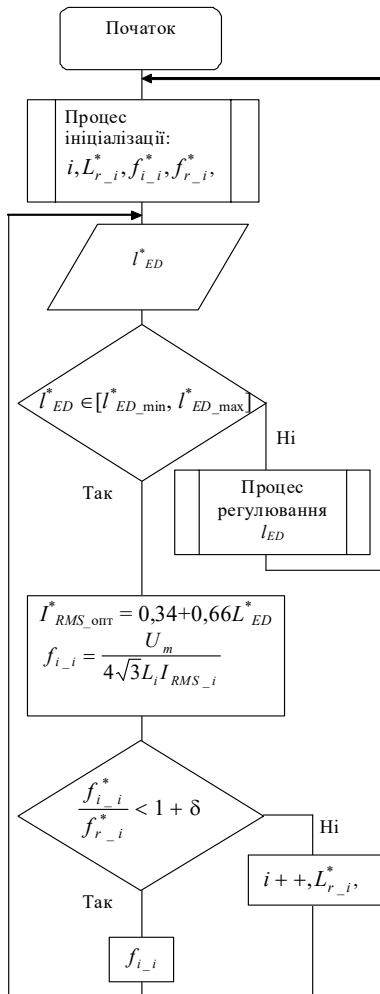


Рис.3

полягає у виборі початкових значень параметрів джерела струму: номеру діапазону регулювання, сумарної індуктивності резонансного кола, частоти інвертору, власної частоти резонансного кола. Поточна довжина міжелектродного проміжку l_{ED}^* визначається за допомогою інформаційної координати, зокрема, струму на вході установки I_{in} [10]. Якщо l_{ED}^* не належить інтервалу Λ , здійснюється його регулювання за допомогою способу, представленому у [8]. В іншому випадку визначається оптимальне значення розрядного струму $I_{RMS_opt}^*$ та встановлюється частота інвертору $f_{i_i}^* = f_{i_b\ i}^*$.

Далі виконується неперервне регулювання вихідного струму шляхом підвищення частоти інвертору $f_{i_i}^*$ відповідно до блок-схеми (рис. 3) в δ -окружності власної частоти резонансного контуру. При досягненні кінця інтервалу неперервного регулювання $f_{i_e\ i}^*$ (при відхиленні частоти інвертору за межі δ -го діапазону частоти) автоматично здійснюється інкремент i та дискретна зміна власної частоти резонансного контуру $L_{r\ i}^*$ шляхом введення додаткових індуктивностей. Потім знову здійснюється неперервне регулювання вихідного струму.

У роботі було створено електротехнічну систему, експериментальні дослідження режимів якої показали, що використання запропонованого методу забезпечує стабілізацію струму до 99% при активному лінійному навантаженні та 95% – при електророзрядному нелінійному навантаженні, яким є вуглецевмісний газовий міжелектродний проміжок.

Висновки. За умови забезпечення заданого коефіцієнту стабілізації визначено обмеження безперервного частотного методу регулювання вихідного стабілізованого струму електротехнічної системи, виконаної на базі резонансного інвертору, та розроблено методику розрахунку інтервалів безперервного регулювання параметрів резонансного кола інвертору. Розроблено комбінований метод частотно-параметричного регулювання стабілізованого струму джерела живлення для забезпечення оптимального значення розрядного струму при змінненні довжини міжелектродного проміжку в режимі реального часу. Для забезпечення заданого коефіцієнту стабілізації вихідного струму необхідно здійснювати автоматичний перехід від безперервного регулювання струму (шляхом зміни частоти інвертору) до дискретного регулювання власної частоти резонансного кола (шляхом перемикання дроселів). Дослідження характеристик джерела живлення з комбінованим регулюванням вихідного струму показали, що нестабільність струму є меншою ніж 1% при активному лінійному навантаженні та 5% – при електророзрядному навантаженні.

1. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И. Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков. *Технічна електродинаміка*, 2013. № 2. С. 10–18.

2. Kuskova N.I., Dubovenko K.V., Petrichenko S.V., Tsolin P.L., Chaban S.O. Electrodischarge Technology and Equipment to Produce New Carbon Nanomaterials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013. Vol. 49. No 3. Pp. 35–42.

3. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an Electrohydraulic installation. *Surface engineering and applied electrochemistry*. 2015. Vol. 51. No 6. Pp. 581–588.

4. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С., Белецкий О.А. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 3–11.

5. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроскровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке. *Техн. електродинаміка*. 2014. № 5. С. 23–25.

6. Вінниченко Д.В. Вплив електричних параметрів високовольтних електророзрядних установок синтезу нановуглецю на їхню продуктивність і питомі енерговитрати. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 95–97.

7. Богуславський Л.З., Вінниченко Д.В., Назарова Н.С. Установка для одержання вуглецевих наноматеріалів. Патент України 113323, 2017.
8. Вінниченко Д.В., Назарова Н.С. Розробка принципів керування режимними параметрами електротехнічної системи для електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів. *Вісник НТУ ХПИ*. 2015. № 12 (1121). С. 292–297.
9. Pavlov G., Vinnichenko I., Pokrovskiy M. Research of the interrelationship between the frequency converter on the basis of the resonant inverter with nonlinear control power unit parameters and its load. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2017. Pp. 554–559. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100300>.
10. Pavlov G., Obrubov A., Vinnichenko I. The linearized dynamic model of the series resonant converter for small signals. *IEEE 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2016. Pp. 221–225.
11. Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the Linear Modulation in Matrix Converters. *IEEE Trans. On Power Electronics*. 2014. Vol. 29. No 6. Pp. 3166–3178.
12. Nguyen, P.-K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.*. 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1.

УДК 621.314.26

ИСТОЧНИК СТАБИЛИЗИРОВАННОГО РАЗРЯДНОГО ТОКА В УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ГАЗАХ С ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Вінниченко Д.В., Назарова Н.С.

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,

пр. Богоявленський, 43-А, Николаєв, 54018, Україна. Е-mail: vdvvyvs@gmail.com

Разработан комбинированный метод частотно-параметрического регулирования стабилизированного тока источника питания на основе резонансного инвертора для обеспечения оптимального значения разрядного тока при изменении длины межэлектродного промежутка в режиме реального времени. По этому методу для обеспечения заданного коэффициента стабилизации выходного тока осуществляется автоматический переход от непрерывного регулирования тока посредством изменения частоты инвертора к дискретному регулированию собственной частоты резонансного контура с помощью переключения дросселей. Использование метода обеспечивает стабилизацию тока до 99% при активной линейной нагрузке и 95% – при электроразрядной нагрузке. Библ. 12, рис. 3.

Ключевые слова: инвертор, резонанс, ток, разряд стабилизация, частота, регулирование, дроссель.

SOURCE OF THE STABILIZED DISCHARGE CURRENT IN CARBON-CONTAINING GASES WITH FREQUENCY-PARAMETRIC REGULATION

D.V. Vinnichenko, N.S. Nazarova

Institute of Pulse Processes and Technologies, Bogoyavlensky, 43 A, Mykolaiv, 54018, Ukraine. E-mail: vdvvyvs@gmail.com

The combined method of frequency-parametric regulation of the stabilized current of the power source is developed on the basis of the resonant inverter for real-time providing of the optimal value of the discharge current during the change of the length of the inter-electrode gap. According to this method, to provide a given output current stabilization factor, an automatic transition from the continuous current control is performed by changing the frequency of the inverter to the discrete regulation of the natural frequency of the resonant circle due to the switching of the inductors. The usage of this method ensures current stabilization up to 99% in the case of the active linear load and 95% in the case of the electro-discharge load. References 12, figures 3.

Keywords: power supply, stabilized current, frequency-parametric regulation, resonant inverter, optimal discharge current.

1. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M., Ushakov V.I. Computer Modeling of Electrothermal Processes and Thermomechanical Stress at Induction Heating of Moving Copper Ingots. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 2. Pp. 10–18. (Rus)
2. Kuskova N.I., Dubovenko K.V., Petrichenko S.V., Tsolin P.L., Chaban S.O. Electrodischarge Technology and Equipment to Produce New Carbon Nanomaterials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2013. Vol. 49. No 3. Pp. 35–42.
3. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an Electrohydraulic installation. *Surface engineering and applied electrochemistry*. 2015. Vol. 51. No. 6. Pp. 581–588.
4. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivaschenko D.S., Beletsky O.A. Processes of energy exchange between nonlinear and linear links of electric equivalent circuit of supercapacitors. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2015. No 5. Pp. 3–11. (Rus).
5. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivaschenko D.S. Modeling of Nonlinear Resistance of Electro-Spark Load Taking into Account its Changes During Discharge Current Flowing in the Load and et Zero Current in it. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2014. No 5. Pp. 23–25. (Rus).
6. Vinnichenko D.V. Influence of electrical parameters of high-voltage electrical discharge installations of nanocarbon synthesis on their productivity and specific energy consumption. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016. No 4. Pp. 95-97. (Ukr).
7. Boguslavskiy L.Z., Vinnichenko D.V., Nazarova N.S. Installation for obtaining carbon nanomaterials. Patent of Ukraine 113323, 2017 (Ukr).
8. Vinnichenko D.V., Nazarova N.S. Development of control principles of regime parameters of the electrical system for electro-discharge synthesis of carbon nanomaterials. *Visnyk NTU KhPI*. 2015. No12(1121). Pp. 292–297. (Ukr).
9. Pavlov G., Vinnichenko I., Pokrovskiy M. Research of the interrelationship between the frequency converter on the basis of the resonant inverter with nonlinear control power unit parameters and its load. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017. Pp. 554–559. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100300>.
10. Pavlov G., Obrubov A., Vinnichenko I. The linearized dynamic model of the series resonant converter for small signals. *IEEE 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2016. Pp. 221–225.
11. Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the Linear Modulation in Matrix Converters. *IEEE Trans. On Power Electronics*. 2014. Vol. 29. No 6. Pp. 3166–3178.
12. Nguyen, P.-K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1.

Надійшла 02.03.2018
Остаточний варіант 11.05.2018