

**ФОРМУВАННЯ БІПОЛЯРНИХ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ У НАВАНТАЖЕННІ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК**

**А.А. Щерба\***, чл.-кор. НАН України, **Н.І. Супруновська\*\***, докт. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.  
E-mail: [iednat1961@gmail.com](mailto:iednat1961@gmail.com)

*Запропоновано метод стабілізації перехідних процесів розряду ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) електророзрядних установок (ЕРУ) на навантаження, електричний опір якого може змінюватися нелінійно і стохастично. Метод базується на використанні в ЕРУ одного формувача постійної напруги (ФПН), який по чергово здійснює коливальний заряд до необхідної напруги двох ЄНЕ, та введенні в зарядні та розрядні контури цих ЄНЕ напівпровідникових комутаторів і розроблених алгоритмів їхнього включення, за якими у навантаженні ЕРУ по чергово формуються біполярні розрядні струми незалежно від характеру змінення його електричного опору. Частота і тривалість додатних та від'ємних розрядно-імпульсних струмів у навантаженні можуть бути однаковими або різними в залежності від вибраних параметрів елементів розрядних контурів двох ЄНЕ. Використання розробленого методу забезпечує формування уніполярних режимів в конденсаторах кожного ЄНЕ, що дає змогу вибирати їх на менші напруги, збільшувати їхній ресурс і зменшувати вартість. Крім цього, за однакової ємності ЄНЕ загальний електричний заряд, що протікає у навантаженні, практично дорівнює нулю після кожної парної кількості розрядів. Це суттєво зменшує дію у навантаженні електрохімічних процесів, зокрема електрохімічного руйнування аноду технологічного апарату ЕРУ, яке неминує виникає через формування уніполярних імпульсних струмів. Використання біполярних розрядних струмів у навантаженні ЕРУ також підвищує стійкість режимів розрядів в ЕРУ за рахунок обмеження тривалості можливих довгих аперіодичних струмів під час розряду одного ЄНЕ початком зустрічного струму чергового розряду іншого ЄНЕ. Бібл. 10, рис. 3, табл. 1.*

**Ключові слова:** перехідні процеси, заряд і розряд конденсатора, біполярний імпульсний струм, тривалість, частота, стійкість, електророзрядна установка.

Використання ємнісних накопичувачів електроенергії (ЄНЕ) в електророзрядних установках (ЕРУ) забезпечили реалізацію таких сучасних технологій як електрогідравлічна обробка матеріалів [1], фізичне моделювання електромагнітних впливів через удари блискавок і коротких замикань електромереж [2] та отримання іскроерозійних мікропорошків з унікальними експлуатаційними властивостями [3, 4]. ЕРУ, приведені в [1–4], формують уніполярні імпульсні струми, які виникають через розряд їхніх ЄНЕ на низькоомне (менше 0,4 Ом) технологічне навантаження. У роботі [5] приведено розроблену ЕРУ, яка формує біполярні струми, але з меншими швидкостями їхнього наростання та у більш високоомному навантаженні (газовому проміжку між електродами, що має опір у десятки Ом).

Під час розробки установок об'ємного електроіскрового диспергування (ОЕІД) шару металевих гранул у рідинах необхідно вирішувати проблеми інтенсифікації силового впливу імпульсних електророзрядних струмів на отримані електроіскрові порошки, яка підвищує продуктивність ЕРУ [6] та зменшує середні розміри електроіскрових порошків [7]. Для цього підвищують швидкість наростання розрядних струмів у стохастичному навантаженні [8], зменшують втрати електроенергії шляхом регулювання початкових і кінцевих напруг під час заряду й розряду ЄНЕ [9] та примусово обмежують тривалість розрядних імпульсних струмів у навантаженні [10].

В той же час основним шляхом підвищення енергетичної та технологічної ефективності більшості ЕРУ є збільшення частоти їхніх зарядно-розрядних циклів та стабільності параметрів розрядних струмів, не зважаючи на можливе стохастичне змінення електричного опору електроіскрового

навантаження [8]. Проте залишається практична зацікавленість до створення ЕРУ, здатних зменшувати тривалість імпульсного струму у навантаженні, що забезпечує зменшення максимальних розмірів отримуваних електроіскрових порошків [5, 6] та покращення їхніх експлуатаційних властивостей [3–7]. Працездатність ЕРУ неможлива також без обмеження тривалості струму розряду ЄНЕ у навантаженні [10], причому навіть за стохастичного змінення електричного опору навантаження [8] частота зарядно-розрядних циклів накопичувальних конденсаторів [9] повинна залишатися стабільною. В протилежному випадку можуть виникати недопустимі технологічні режими ЕРУ або аварійні відключення.

Під час формування уніполярних імпульсних струмів у навантаженні ЕРУ, яким є шар металевих гранул між електродами, неминуче виникають відомі процеси електрохімічного розчинення одного із електродів (аноду), яке збільшує довжину міжелектродного проміжку, зменшуючи стабільність і продуктивність процесів ОЕІД гранул. Використання одних і тих же конденсаторів для формування біполярних імпульсів у навантаженні в декілька разів збільшує їхню вартість і зменшує ресурс.

Тому **метою даної роботи** була розробка методу формування біполярних імпульсних струмів у навантаженні ЕРУ з накопичувальними конденсаторами для ОЕІД металів, який дає змогу стабілізувати тривалість розрядних імпульсних струмів у навантаженні без зменшення інтенсивності силового впливу таких струмів на гранули та отримані порошки, збільшити ресурс ЕРУ за рахунок рівномірного спрацювання їхніх електродів, збільшити ресурс та зменшити вартість конденсаторів.

Було запропоновано метод формування біполярних імпульсних струмів у навантаженні ЕРУ, який базується на використанні двох накопичувальних конденсаторів однакової ємності, що поперемінно заряджаються від формувача постійної напруги (ФПН) і в подальшому розряджаються на електроіскрове навантаження установки. Поперемінний заряд і розряд конденсаторів запропоновано здійснювати за допомогою двох пар зарядних і розрядних напівпровідникових (тиристорних) ключів.

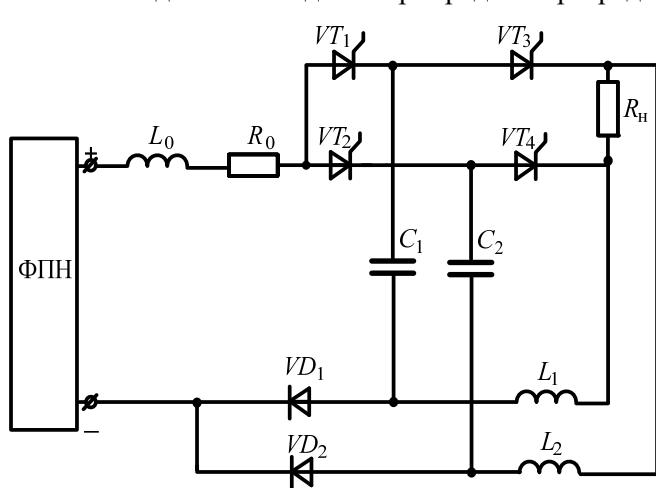


Рис. 1

Для реалізації нового методу було розроблено електричну принципову схему ЕРУ, наведену на рис. 1. До її складу входять два накопичувальні конденсатори  $C_1$  та  $C_2$ , які поперемінно заряджаються від ФПН і розряджаються на навантаження ЕРУ, яке представлено резистором  $R_n$ , за циклічного включення тиристорних комутаторів у послідовності  $VT_1, VT_3, VT_2, VT_4$  і так далі. При цьому у навантаженні  $R_n$  поперемінно виникають біполярні (додатні та від'ємні розрядно-імпульсні струми) однакової тривалості, якщо  $C_1 = C_2, L_1 = L_2$ , а величина  $R_n$  не змінюється з часом. Діоди  $VD_1$  і  $VD_2$  використовуються задля гальванічної розв'язки клем конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$ , підключених до від'ємної клемі ФПН. Індуктивність  $L_0$  та резистор  $R_0$

представляють відповідно індуктивність і активний опір кіл заряду конденсаторів  $C_1$  та  $C_2$ , а індуктивності  $L_1$  та  $L_2$  – відповідно індуктивності їхніх розрядних кіл.

Відзначимо також, що у загальному випадку опір навантаження  $R_n$  ЕРУ ОЕІД шару металевих гранул у рідинах під час розряду накопичувальних конденсаторів стохастично змінюється, а від розряду до розряду його величина збільшується по мірі зменшення розмірів окремих гранул та підвищення шорсткості їхньої поверхні. Тому для аналізу перехідних процесів у розрядному колі ЕРУ було введено найбільше значення активного опору навантаження  $R_n = \text{const}$ , на якому за час одного розрядного імпульсу розсіюється така ж енергія, як і в реальному шарі струмопровідних гранул перед дозавантаженням до нього необхідної порції нових гранул більших розмірів.

Основним алгоритмом більшості ЕРУ є поперемінний заряд від ФПН і наступний розряд на  $R_n$  конденсатора  $C_1$ , а потім конденсатора  $C_2$ , створюючи в  $R_n$  імпульсний струм у протилежному напрямку, ніж під час розряду конденсатора  $C_1$ . При цьому напруга і струм кожного із конденсаторів не змінюють свого знаку за повних розрядах конденсаторів на навантаження  $R_n$ .

Через однакові ємності конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  загальний електричний заряд, що протікає у навантаженні  $R_n$ , практично дорівнює нулю після кожної парної кількості розрядів, що суттєво зменшує дію у навантаженні електрохімічних процесів, зокрема електрохімічного руйнування аноду технологічного апарату ЕРУ, яке неминуче виникає під час формування уніполярних імпульсних струмів.

Використання біполярних розрядних струмів у навантаженні ЕРУ також підвищує стійкість режимів розрядів в ЕРУ за рахунок обмеження тривалості можливих довгих аперіодичних струмів через розряд одного з ЄНЕ початком зустрічного струму чергового розряду іншого ЄНЕ.

За необхідності тривалість додатних і від'ємних розрядно-імпульсних струмів може регулюватися зміненням відповідно ємностей  $C_1$  та  $C_2$ . Також може змінюватися частота і шпаруватість як додатних, так і від'ємних розрядно-імпульсних струмів у навантаженні зміненням послідовності включення тиристорних комутаторів  $VT_1, VT_3, VT_2$  і  $VT_4$ .

У роботі розроблено математичну модель для аналізу циклічних перехідних процесів, що відбуваються під час функціонування цієї схеми. Модель реалізовано в пакеті прикладних програм Matlab Simulink. Моделювання здійснювалося за таких параметрів кіл ЕРУ:  $C_1 = C_2 = 50$  мкФ,  $L_0 = 80$  мкГн,  $R_0 = 0,01$  Ом,  $L_1 = L_2 = 3$  мкГн,  $R_n = 0,35$  Ом. Параметри розрядного кола вибиралися такими, щоб перехідний процес розряду конденсаторів мав слабо коливальний характер, близький до критичного режиму, за якого конденсатори майже всю накопичену енергію віддають у навантаження. Добротність розрядного кола при цьому була близькою до  $Q_p = \sqrt{L_1/R_n} \cdot \sqrt{C_1} = \sqrt{L_2/R_n} \cdot \sqrt{C_2} = 0,7$ , що є типовим параметром ЕРУ ОЕІД шару металевих гранул. Напряга ФПН складала 500 В. Період генерування керуючих імпульсів для відкриття всіх тиристорів  $T = 1000$  мкс.

За допомогою цієї математичної моделі було проведено аналіз перехідних процесів у розгалуженому електричному колі змінної структури напівпровідникової електророзрядної установки, що формує у навантаженні біполярні імпульсні струми. Напряга, до якої заряджалися конденсатори, складала 930 В.

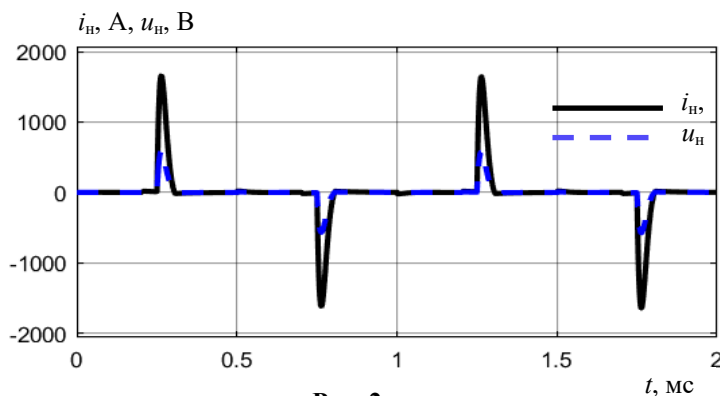


Рис. 2

рахунок виникнення проти-ЕРС  $(L_1 + L_2) \cdot di/dt$ , або просто додаткового реактивного опору  $\omega(L_1 + L_2)$ , де  $\omega$  – кутова частота змінення струму.

У вітці з діодом  $VD_1$  така протидія відсутня, тому практично весь струм заряду  $C_1$  буде протікати тільки через неї. Практично опір  $VD_1$  у відкритому стані настільки малий, що вітку з ним можна розглядати як "закоротку" по відношенню до струму у вітці з  $L_1, R_n, L_2, VD_2$ . У разі розряду конденсатора  $C_2$  можна привести аналогічні міркування. Такі висновки підтверджуються осцилограмою струму на рис. 2, на якому між біполярними імпульсними струмами порядку +1600 та -1600 А струм у навантаженні практично нульовий.

Характеристика Момент часу $t$ , мкс	Максимальний імпульсний струм $I_{\max}$ , А	Максимальна імпульсна напруга $U_{\max}$ , В
264	1658	580
764	-1620	-567
1264	1643	575
1764	-1644	-575

має уніполярний характер, тобто його перезаряд не відбувається. Під час розряду конденсатора  $C_2$  осцилограми мають аналогічний характер, тільки струм та напруга на навантаженні змінюють свою полярність.

На рис. 2 відображено осцилограми біполярних імпульсних струмів  $i_n(t)$  та напруг  $u_n(t)$  фіксованої тривалості у навантаженні ЕРУ з електричним опором  $R_n = 0,35$  Ом.

Треба відзначити, що під час заряду конденсатора  $C_1$  падіння напруги на  $VD_1$  зазвичай менше 1 В. Така напруга не може створити помітний струм у навантаженні ЕРУ (через розгалуження  $L_1 - R_n - L_2 - VD_2$ ). Наявність індуктивностей  $L_1$  і  $L_2$  у вітці з діодом  $VD_2$  буде суттєво обмежувати зростання в ній струму за

У таблиці наведено результати аналізу цих осцилограм: максимальні значення струму та напруги у навантаженні та моменти часу їх досягнення. Тривалість розрядних імпульсів у навантаженні була стабільною і складала 56,4 мкс.

На рис. 3 наведено осцилограми напруг  $u_{C1}(t)$  на конденсаторі  $C_1$  та  $u_n(t)$  на навантаженні (рис. 3, а) та струму на навантаженні  $i_n(t)$  (рис. 3, б) впродовж одного розрядного імпульсу. Як видно з осцилограм напруга на конденсаторі

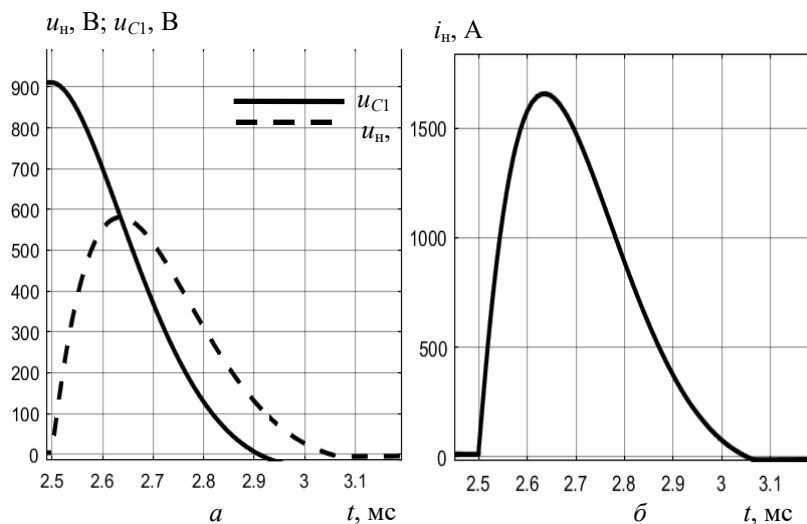


Рис. 3

електрохімічних процесів руйнування одного із електродів (аноду) технологічного апарату ОЕІД шару струмопровідних гранул, яке зазвичай виникає під час формування уніполярних імпульсних струмів.

3. Новий метод формування біполярних імпульсних струмів у навантаженні ЕРУ підвищує їхню стійкість до процесів стохастичного збільшення електричного опору навантаження і забезпечує підвищення частоти розрядних імпульсів у навантаженні та інтенсифікації силових впливів на отримані електроіскрові порошки і металеві гранули під час їхнього об'ємного електроіскрового диспергування.

Роботу виконано за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (шифр "ЕЛКАБ"), КПКВК 6541030.

1. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2010. № 4. С. 118–124.

2. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии. *Електротехніка і електромеханіка*. 2007. № 6. С. 70–75.

3. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>Te<sub>3</sub> Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>.

4. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>.

5. Вінниченко Д.В., Назарова Н.С. Електротехнічна система з частотно-параметричним регулюванням стабілізованого розрядного струму у вуглецевмісних газах. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.025>.

6. Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.

7. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекося А.Е., Залуцкий В.П., Козырский В.В., Лопатко К.Г. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 6. № 5(60). С. 66–72.

8. Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing probabilistic properties of electrical characteristics in the circuits containing stochastic load. 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, Ukraine, 7-11 June 2016. Pp. 45–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521887>.

9. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.

## Висновки.

1. Розроблено новий метод формування біполярних імпульсних струмів у навантаженні ЕРУ з двома накопичувальними конденсаторами, зарядні напруги і струми в яких залишаються уніполярними, що суттєво збільшує ресурс таких конденсаторів та зменшує їхню вартість.

2. За однакової ємності конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$  у приведеній біполярній ЕРУ і почерговому їхньому заряді і розряді на навантаження  $R_n$  загальний електричний заряд, що протікає у навантаженні, практично дорівнює нулю, що суттєво зменшує дію

10. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Синицин В.Е., Иващенко Д.С. Аперiodические и колебательные процессы разряда конденсатора при принудительном ограничении длительности тока в нагрузке. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 9–10.

## FORMATION OF BIPOLAR PULSE CURRENTS IN THE LOAD OF CAPACITIVE ENERGY STORAGES OF ELECTRIC DISCHARGE INSTALLATIONS

A.A. Shcherba, N.I. Suprunovska

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

e-mail: [iednat1961@gmail.com](mailto:iednat1961@gmail.com)

*A method is proposed for stabilizing the transient discharge processes of capacitive energy storages (CESs) of electric discharge installations (EDIs) to a load whose electrical resistance can vary non-linearly and stochastically. The method is based on the use of one direct voltage generator (DVG) in the EDI, which carries out alternately an oscillatory charge of two CESs to the required voltage, as well as on the introduction of semiconductor switches into the charge circuit and discharge one of these CESs and the developed algorithms for switching them on, according to which bipolar discharge currents are formed alternately in the EDI load, regardless of the nature of the change in its electrical resistance. The frequency and duration of positive and negative discharge-pulse currents in the load can be the same or different, depending on the selected parameters of the elements of discharge circuits of the two CESs. The use of the developed method provides the formation of unipolar modes in the capacitors of each CES, which allows you to choose them for lower voltages, increase their life and reduce cost. In addition, with the same capacitance of the CESs, the total electric charge flowing in the load is practically zero after each even number of discharges. This significantly reduces the effect of electrochemical processes in the load, in particular the electrochemical destruction of the anode of the technological apparatus of the EDI, which inevitably occurs during the formation of unipolar pulse currents. The use of bipolar discharge currents in the EDI load also increases the stability of the discharge modes in the EDI due to the limitation of the duration of possible long aperiodic currents during the discharge of one of the CESs by the beginning of the counter current of the next discharge of the other CES. References 10, figures 3, table 1.*

**Key words:** transients, capacitor charge and discharge, bipolar pulse current, duration, frequency, stability, electric discharge installation.

1. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of capacitive non-linear- parametrical energy sources for discharge-pulse technologies. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannya*. 2010. No 4. Pp. 118–124. (Rus)
2. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test device with capacitive energy storage. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2007. No 6. Pp. 70–75. (Rus)
3. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>Te<sub>3</sub> Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>
4. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>.
5. Vynnychenko D.V., Nazarova N.S. Source of the stabilized discharge current in carbon-containing gases with frequency-parametric regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.025>. (Ukr.)
6. Nguyen, P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
7. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.Ye., Zalytsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G. Influence of duration of discharge pulses in a layer of iron granules on the sizes and a structurally-phase state of its electro-eroded particles. *Vostochno-Evropeiskiy Zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2012. Vol. 6. No 5(60). Pp. 66–72. (Rus).
8. Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing probabilistic properties of electrical characteristics in the circuits containing stochastic load. 2nd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, Ukraine, 7-11 June 2016. Pp. 45–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521887>
9. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.
10. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Sinitin V.K., Ivashchenko D.S. Aperiodic and oscillatory processes of capacitor discharge at forced limitation of current duration in load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 9–10. (Rus).

Надійшла 20.06.2022

Остаточний варіант 29.06.2022