

## ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 537.523.9

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.021>**УЗГОДЖЕННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРА КОРОТКИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСІВ НАПРУГИ І КАМЕРИ ДЛЯ ОБРОБКИ ВОДИ ІМПУЛЬСНИМ БАР'ЄРНИМ РОЗРЯДОМ****В.О.Берека\*, І.П. Кондратенко\*\*, чл. кор. НАН України**Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [bereka.v@ukr.net](mailto:bereka.v@ukr.net).

*Наведено приклад розрахунку параметрів магнітного ключа як елемента генератора коротких високовольтних імпульсів напруги з метою узгодження його сумісної роботи з розрядною камерою, призначеною для обробки води уніполярним імпульсним бар'єрним розрядом. Підтверджено доцільність і ефективність використання такого ключа як елемента, який, шунтуючи розрядну камеру, розряджає бар'єр до приходу наступного імпульсу напруги. Доведено, що за прийнятних геометричних розмірів розрядної камери та амплітуди імпульсної напруги за умови наявності магнітного ключа за один розряд існує можливість збільшити корисне використання електроенергії на ~60 за допомогою тієї, що була накопичена в діелектричному бар'єрі та МК. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** імпульсний бар'єрний розряд, обробка води, магнітний ключ.

**Актуальність проблеми очищення та знезараження води.** Наявність питної води – один із ключових факторів можливості існування людства. З кожним роком стан водних ресурсів нашої планети погіршується від постійного й неминучого забруднення внаслідок стрімкого зростання масштабів росту промисловості різних видів (металургійна, хімічна, харчова тощо). Основні проблеми створюють побутові стоки заводів, фабрик та відходи діяльності людини, які неконтрольовано скидаються в каналізаційну систему. Для захисту водоймищ від антропогенного впливу існують очисні споруди, в яких відбуваються процеси приведення води до певних стандартизованих показників [1]. У таких спорудах обробка відбувається здебільшого в три етапи [2]. Перші два етапи полягають у видаленні з води всілякого дрібного сміття, жиру, мулу тощо шляхом фільтрації, процесу відстоювання, біоочищення тощо. Третій етап є завершальним і складається з певного додаткового виду обробки. Найбільш популярним є хлорування. Цей метод, з одного боку, є простим і дешевим. Однак хімічні реагенти, які використовуються, та неперервний вплив на водне середовище відходів від промисловості можуть утворювати у воді низку додаткових шкідливих сполук, для руйнування яких хлорування є недостатньо ефективним через його низьку окислювальну здатність. До того ж як показали дослідження [2], очисні споруди є непридатними для боротьби з деякими забруднювачами, що суттєво впливають на довкілля та здоров'я людини. З огляду на це досить привабливими з погляду ефективності обробки води є електророзрядні технології. Обробка плазмою – екологічно чистий процес, що виключає необхідність застосування хімічних реагентів, і показує позитивний результат із руйнування хімічної структури стійких органічних сполук, включаючи ті, до складу яких входять такі стійкі циклічні утворення, як бензолні кільця [7]. Існує значна кількість видів електророзрядних технологій. Однак, однією з найефективніших є технологія на основі імпульсного бар'єрного розряду (ІБР) у процесі обробки води, що має розвинуту поверхню, а саме відношення площі її поверхні до об'єму ( $\sim 10\text{ м}^2/\text{л}$ ), яка створюється шляхом руху рідини у вигляді плівки товщиною  $\delta \sim 0,15$  мм або у вигляді крапель малого діаметра ( $< 2$  мм) [3]. Для використання такого способу обробки води необхідно мати комплекс, який включатиме принаймні джерело живлення (ДЖ) та розрядну камеру (РК). Однією з основних проблем

електророзрядних технологій є використання значної електричної енергії. Навантаженням для джерела живлення слугує розрядна камера, де генерується ІБР і проходить обробка води. Оптимальні параметри, яким мають відповідати імпульси напруги, що подаються на електроди РК, детально обґрунтовані в низці робіт [4,5,6]. До основних параметрів відносяться: час тривалості імпульса  $\sim 100$  нс та крутизна фронту – понад  $0,1$  кВ/нс. Крім того, оптимальними величинами амплітуд імпульсів напруги є  $10\text{--}30$  кВ, а частота їхнього повторення –  $10\text{--}300$  Гц [7]. У вже розроблених ДЖ зазвичай застосовуються однополярні імпульси напруги [8], тому після проходження імпульса струму ІБР на діелектричному бар'єрі залишається електричний заряд, який утворює електричне поле, направлене проти поля, створеного зовнішнім джерелом. За час дії імпульса залишковий заряд не встигає зменшитись до величини, що не впливала б на наступний розряд [4,5]. Присутність залишкового заряду на діелектричному бар'єрі збільшує непродуктивні витрати електричної енергії в ІБР та робить його нестійким, що в цілому знижує енергоефективність розряду. Час розряджання бар'єра залежить від електричної схеми ДЖ, матеріалу бар'єра, властивостей середовища в РК тощо. Одним зі способів розв'язання цієї проблеми є шунтування РК магнітним ключем [10] (нелінійною індуктивністю), індуктивний опір якого в насиченому стані зменшується в сотні разів, що дає можливість розрядити діелектричний бар'єр до початку наступного імпульса. Методика розрахунку МК описана в [9] і дає гарні результати у випадку, коли довжина імпульсів напруги не занадто мала ( $\sim 1$  мкс). Для імпульсів наносекундного діапазону під час розрахунку часу включення МК має враховуватись магнітна в'язкість матеріалу його осердя, що відсутнє в [9]. Крім того, необхідно брати до уваги, що включення МК проходить не миттєво, а впродовж деякого часу, який приблизно дорівнює тривалості ІБР ( $\sim 100$  нс).

Тому *метою роботи* є розробка методики виготовлення магнітних ключів для роботи в наносекундному діапазоні тривалості імпульсів, котрі призначені для розряджання діелектричного бар'єра під час уніполярного бар'єрного розряду та підвищення внаслідок цього вкладеної в розряд енергії з високим ККД.

**Експериментальна установка.** Для проведення експериментів використовувалася РК коаксіального типу. Роль діелектричного бар'єра виконувала акрилова труба з товщиною стінок  $1,7$  мм. Величина газового проміжку  $\delta$ , в якому відбувався ІБР, становила  $\approx 3,2$  мм. Висота електродів –  $6$  см.

На рис. 1 наведена схема комплексу для обробки води ІБР, який складається з ДЖ, РК, що представлена еквівалентною схемою, та вимірною технікою.

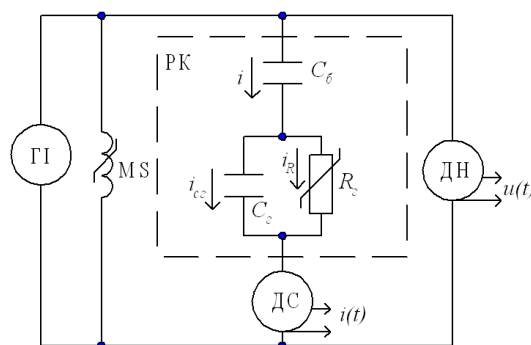


Рис. 1

На цьому рисунку джерело живлення позначено як ГІ (генератор імпульсів). ДН, ДС – відповідно датчики напруги P6015 та струму P6021 цифрового двоканального осцилографа TDS1012 фірми Tektronix зі смугою пропускання  $100$  МГц, MS – магнітний ключ (МК). Низьковольтну частину ГІ побудовано на принципі первинного накопичувача енергії в конденсаторі, котрий надалі комутується тиристором. Отримані за таких умов імпульси подаються на трансформатор і підлягають магнітному стисканню. РК представлена у вигляді схеми заміщення, де  $C_\delta$  – ємність діелектричного бар'єра,  $C_\epsilon$  – ємність газового проміжку,  $R_\epsilon$

– нелінійний опір газу, котрий під час дії ІБР змінюється в часі  $t$ . Ємність діелектричного бар'єра і газового проміжку становлять відповідно:  $C_0 = 600$  пФ,  $C_2 = 60$  пФ.

**Розрахунок параметрів магнітного ключа МК.** Зазвичай [9] насамперед проводиться вибір матеріалу осердя, його форми та перерізу, оцінювальний розрахунок числа витків МК. Основною характеристикою МК є час його включення. Оскільки РК являє собою резистивно-ємнісне навантаження, а імпульси напруги, що надходять до РК, є уніполярними, то вкрай важливо, щоб МК переходив до насиченого стану, характерним для якого є різке зниження його опору саме після закінчення прямого імпульса струму. Це пов'язано з тим, що після проходження прямого імпульса струму до моменту включення МК газове середовище починає стрімко змінювати свої властивості, а саме стрімко зростає його опір  $R_z$ , який під час розряду складає десятки Ом. У роботі [10], окрім іншого, досліджувалась залежність  $R_z(t)$ , яка наведена на рис. 2. Слід відзначити, що така залежність є типовою для газових проміжків, в яких проходить ІБР.

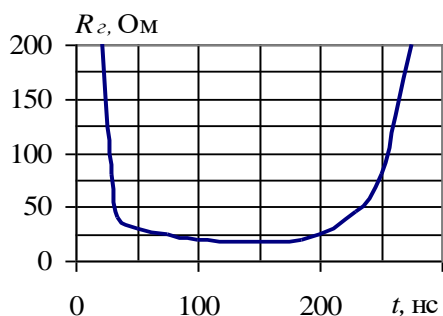


Рис. 2

Частина кривої ( $t = 40 - 200$  нс) відповідає часу від початку іонізації в газовому проміжку до моменту закінчення імпульса струму. Як видно, одразу після закінчення зворотного імпульса струму ( $t = 200$  нс) газ починає деіонізуватися, і його опір за час  $t = 65$  нс зростає в 10 разів ( $R_z = 200$  Ом). Якщо величина напруги на РК, що залишилась після прямого імпульса, буде недостатньою для повторної іонізації внаслідок стрімкого зростання  $R_z$ , то накопичена енергія буде розсіюватись на елементах ДЖ і не встигне зменшитись до величини, яка б не впливала на наступний імпульс.

Напруга на РК складається з напруги на бар'єрі  $U_0$  і напруги на газовому проміжку  $U_z$ .

Зазвичай алгоритм розрахунку магнітних ключів є загальноприйнятим і складається з кількох етапів. Час насичення МК  $\tau_n$  розраховується за формулою для осердя з найбільш прийнятною тороїдною формою [9]:

$$\tau_n = N \Delta B S / (\gamma U_m), \quad (1)$$

де  $\Delta B = B_s - B$  – перепад магнітної індукції в осерді під час переходу від початкового  $B$  до насиченого стану  $B_s$ . Матеріалом осердя було обрано ферит М10000НН на підставі того, що він має за крутих фронтів імпульсів найменші втрати в разі перемагнічування. У розрахунках  $\Delta B$  приймалася за 0,25 Тл.  $U_m$  – амплітудне значення напруги на РК, яке приймалося рівним 25 кВ. Обране амплітудне значення напруги залежить від геометрії РК, матеріалу діелектричного бар'єра, а також величини газового проміжку в електродній системі та визначається експериментально за умови можливості іонізації повітря в газовому проміжку. Напруга прикладається до обмотки на осерді, яка має  $N$  витків,  $S$  – переріз осердя,  $\gamma$  – коефіцієнт форми напруги (оскільки реальна форма імпульсів напруги на їхніх фронтах близька до синусоїдальної, приймається, що  $\gamma = 1,57$  [9]).

З осцилограм, знятих під час роботи схеми (рис. 1) без участі МК стало відомо, що час прямого імпульса струму  $t_{il} \sim 70$  нс. Зважаючи на те, що МК має включатись практично одразу після закінчення прямого імпульса струму,  $\tau_n$  має складати  $\sim 75-100$  нс. Отже, у формулі (1) невідомими залишаються лише величини в чисельнику  $N$ ,  $S$ , які обираються методом підбору на основі наближених розрахункових даних. Із практичних міркувань як найбільш прийнятну величину перерізу осердя приймаємо  $S = 7 \text{ см}^2$ . Із формули (1) необхідно наближено розрахувати кількість витків. Так, у прикладі, що розглядається, розрахункова величина  $N$  склала 9 витків. Надалі з метою отримання оптимальних значень  $\tau_n$  були проведені експерименти з більшою й меншою кількістю витків ( $N=7-20$ ). Зрештою експериментальним шляхом були визначені такі оптимальні параметри МК: осердя ключа набрано з 7 феритових кілець М10000НН із розмірами  $55 \times 32 \times 9$ , кількість витків –  $N = 10$ .

Дослідження впливу МК на сумісну роботу ДЖ і РК відбувалося в процесі обробки отриманих осцилограм напруги  $u(t)$  та струму  $i(t)$  через РК на МК. Експерименти проводилися за амплітудного значення напруги  $U_m = 25$  кВ із частотою повторення імпульсів  $f = 100$  Гц. На рис. 3 показано осцилограми напруги та струму через МК, а на рис. 4 – струму й напруги на РК у той самий момент часу. З рисунка 3 видно, що струм  $I_{MS}$  через MS починає

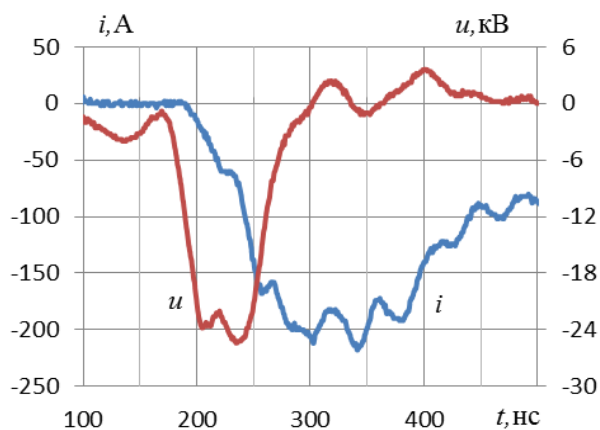


Рис. 3

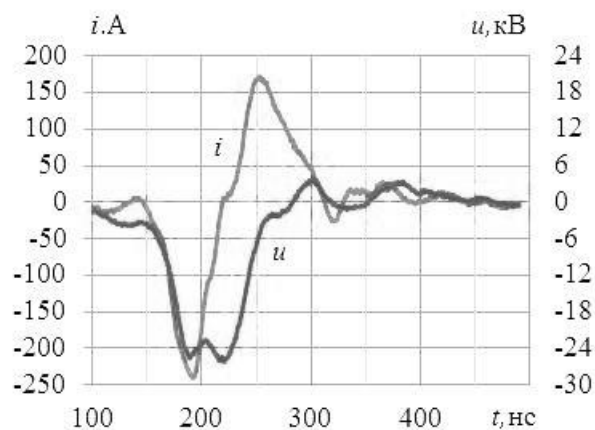


Рис. 4

стрімко наростати практично одночасно з поданням напруги на РК. Водночас відбувається швидке зниження опору ключа, і струм стрімко наростає до свого амплітудного значення 215 А. Індуктивність МК у ненасиченому стані  $L_\mu \approx 0,65$  мГн, а в насиченому –  $L_\mu \approx 1,3$  мкГн. Тобто, у момент насичення індуктивність МК зменшується в  $\approx 500$  разів. Це відбувається через  $\sim 100$  нс після подання напруги на РК і протікання через неї прямого струму  $I_{PK1}$ , що відповідає попереднім теоретичним міркуванням. Це також підтверджує крива струму  $I_{PK}$  на рис. 4, яка складається з двох частин: прямого і зворотного струмів. Зворотний струм починає протікати фактично одразу після закінчення прямого струму, що підтверджує те, що в МК йде процес насичення, який завершується через  $\sim 25$  нс (відбувається включення МК). Завдяки своєчасному включенню МК вдалося отримати досить великий зворотний струм  $I_{PK2} = 170$  А.

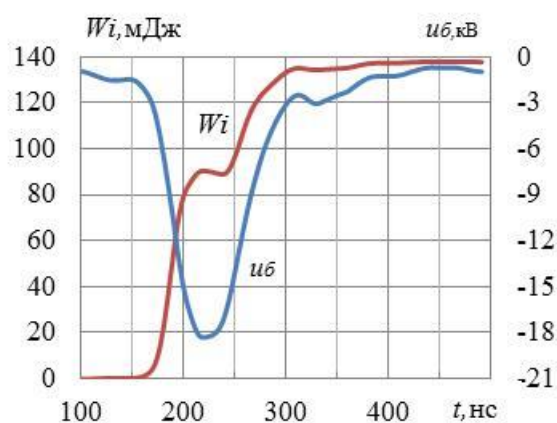


Рис. 5

На рис. 5 наведено залежності від часу напруги на бар'єрі  $u_6$  та енергії  $W_i$ , що виділяється в РК за один імпульс.

За час дії прямого струму  $i_{PK1}$  (70 нс) в РК виділяється  $\sim 87$  мДж енергії. Далі, як видно з рис.5, за час дії зворотного струму  $i_{PK2}$  виділяється ще додатково 53 мДж енергії, що становить 60 % від енергії прямого імпульса струму. Зростання енергії, що виділяється в РК, є доцільним, бо призводить до інтенсифікації генерації окиснювачів, що сприяють обробці води. Також з рисунка видно, що за час дії прямого й зворотного імпульсів струму напруга на діелектричному бар'єрі  $u_6$  спадає майже до нуля.

Це означає, що залишковий заряд на бар'єрі не буде перешкоджати наступному імпульсу.  $W_i$  та  $u_6$  визначалась на основі методики, викладеної в [10].

**Висновки.** Спираючись на отримані результати, можна зробити декілька ключових висновків. По-перше, розроблено магнітний ключ, час включення якого узгоджено з моментом закінчення прямого імпульса струму. У такий спосіб показано шлях виготовлення магнітних ключів для імпульсів наносекундного діапазону тривалості. По-друге, шунтування розрядної камери шляхом додавання в схему джерела живлення магнітного ключа, а також точний підбір його параметрів на основі викладеного алгоритму дає змогу створити умови для безперешкодного слідування розрядних імпульсів шляхом розрядження діелектричного

бар'єра, на якому накопичується електричний заряд. По-третє, завдяки енергії, що була накопичена в діелектричному бар'єрі під час протікання прямого імпульса струму, на 60 % підвищується величина енергії, що виділяється в розрядній камері під час дії імпульсного бар'єрного розряду.

Фінансується на кошт держбюджетної теми «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електрофізичної обробки електропровідних середовищ» (шифр «Бар'єр 2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України 04.07.2017, протокол № 2. Державний реєстраційний номер 0117U007714. КПКВК 6541030.

1. СанПіН 4630-88 Правила, Норми. Санітарні правила і норми охорони поверхневих вод від забруднення. СРСР, 1988.
2. Vanraes Patrick, Nikiforov Anton Y. and Leys Christophe. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. *Plasma science and technology*. 2016. Chapter 15. Pp. 429–478. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830> .
3. Берека В.О., Кондратенко І.П., Електророзрядні технології обробки води та критерії доцільності їх використання. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. No 58. С. 90–100. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090>
4. Celestin S., Bonaventura Z., Guaitella O. Influence of surface charges on the structure of a dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: experiment and modeling . *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 47. Pp. 22810 (p1 – p6). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2009078>
5. Gibalov V.I., Pietsch G.J. The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000. Vol. 33. Pp. 2618–2636. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/20/315>
6. Malik Muhammad Arif. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? *Plasma chemistry and plasma processes*. 2010. No 30. Pp. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>
7. Божко І.В., Кондратенко І.П., Ефективність обробки водного розчину метиленової сині імпульсним бар'єрним розрядом на його поверхню. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.089>
8. Волков И.В., Зозулев В.И., Спирин В.М., Шолох Д.А. Особенности формирования импульсов в согласующих узлах магнитно-полупроводниковых генераторов. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 73–74.
9. Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов М.: Советское радио, 1968. 476 с.
10. Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П., Чарний Д.В. Розробка комплексу для обробки води імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С.80–87. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.080>

#### **MATCHING OF COMPATIBLE WORK OF SHORT HIGH-VOLTAGE PULSES OF TENSION GENERATOR AND WATER TREATMENT CHAMBER BY DINT OF PULSE BARRIER DISCHARGE** **V.O.Bereka , I.P.Kondratenko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine  
e-mail: [bereka.v@ukr.net](mailto:bereka.v@ukr.net).

*A technique for calculating the parameters of a magnetic switch as an element of a generator of short high-voltage pulses of tension to coordinate its compatible work with a water treatment chamber by dint of pulse barrier discharge is shown. The expediency and efficiency of using such a switch as an element that, by shunting, the discharge chamber, discharges the barrier to the arrival of the next voltage pulse has been confirmed. It is proved that with the accepted geometrical dimensions of the discharge chamber and the amplitude of the pulse voltage, provided that the magnetic switch is present that it is possible to increase the practical use of electricity by ~ 40% due to that which was accumulated in the dielectric barrier in one discharge. Ref.10, fig. 5.*

**Keywords:** pulse barrier discharge, water treatment, magnetic switch.

1. SanPin 4630-88 Pravyla, Normy. *Sanitarni pravyla i normy ohorony poverkhnevyykh vod vid zabrudnenia*. SRSR, 1988. (Ukr)
2. Vanraes Patrick, Nikiforov Anton Y. and Leys Christophe. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. *Plasma science and technology*. 2016. Chapter 15. Pp. 429–478. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830> .
3. Bereka V., Kondratenko I. Electric discharge water treatment technologies and criteria of expediency of their use. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2021. No 58. Pp. 90–100. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090> (Ukr)
4. Celestin S., Bonaventura Z., Guaitella O. Influence of surface charges on the structure of a dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: experiment and modeling. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 47. Pp. 22810 (p1 – p6). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2009078>
5. Gibalov V.I., Pietsch G.J. The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2000. Vol. 33. Pp. 2618–2636. DOI:<https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/20/315>
6. Malik Muhammad Arif. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? *Plasma chemistry and plasma processes*. 2010. No 30. Pp. 21–31. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>
7. Bozhko I., Kondratenko I., The efficiency of treatment of an aqueous solution of methylene blue by a pulsed barrier discharge on its surface. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.089> (Ukr)
8. Volkov I., Zozuliov V., Spirin V., Sholokh D. Features of formation pulses in matching nodes of magnetic semiconductor generators // *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 2. Pp. 73–74. (Rus)
9. Mieierovich L., Vatin I., Zaitsev E., Kandykin V. Magnitnyie generator impulsov M.: *Sovetskoie radio*, 1968. 476 p. (Rus)
10. Bozhko I., Karlov O., Kondratenko I., Charnyi D., Rozrobka kompleksu dlia obrobky vody impulsnym bariernym rozriadom, *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 80-87. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.080> (Ukr)

Надійшла: 18.08.2021  
Received: 18.08.2021