

УДК 537.528+621.3.011.74

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).15](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).15)

SYNTHESIS OF ENERGY SOURCES FOR DISCHARGE-PULSE TECHNOLOGIES

СИНТЕЗ ЕНЕРГОДЖЕРЕЛ ДЛЯ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Serhii S. Kozyrev

skozyrev@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8995-131X

С. С. Козирев,

канд. техн. наук, доцент

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv,
Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв,
Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв*

Abstract. The purpose of the research is to develop a synthesis methodology of energy sources for discharge-pulse technologies. Such technologies use high-voltage electric discharge in a condensed medium, by impulse pressure $P(t)$, which is necessary for the implementation of a given technological process.

Method. Synthesis of energy sources, which can provide the pressure pulse $P(t)$, belongs to the class of inverse synthesis problems. Pulse current generators are used in the capacity of such sources. The exhaustive search method was used in order to solve the inverse problem.

Results. The analysis of physical and mathematical models of hydrodynamic and electrodynamic subsystems of high voltage electric discharge in a condensed medium was carried out. The models of interaction between subsystems and the possibility of their use for energy source synthesis were studied. A methodology for the synthesis of a pulse current generator for discharge-pulse technologies was developed. This methodology provides a required power action on a processing object, according to specified technological requirements.

Scientific novelty. The possibility of synthesis of energy sources, which provide required spatiotemporal power action on an object of treatment, was proven. It was done based on analysis of electro-explosive energy conversion patterns and iterative solving the direct problem of high-voltage electric discharge models equations using parameters variation.

Practical significance. Use of the developed synthesis method of energy sources for discharge-pulse technologies allows to optimize energy parameters of the pulse current generator, which allows to reduce power consumption, ensure the necessary power action on the object of treatment and significantly shorten the setting up of the technological processes during adoption of these technologies.

Key words: synthesis of energy sources; pulse current generator; high-voltage electric discharge; discharge-pulse technologies; pressure impulse; inverse synthesis problem; exhaustive search method.

Анотація. Метою дослідження є розробка методики синтезу енергоджерел для розрядно-імпульсних технологій, що використовують високовольтний електричний розряд в конденсованому середовищі, за імпульсом тиску $P(t)$, необхідним для реалізації заданого технологічного процесу.

Методика. Синтез енергоджерел на основі високовольтного електричного розряду, в якості яких використовуються генератори імпульсних струмів, за заданим імпульсом тиску $P(t)$, відноситься до класу зворотних задач синтезу. Для пошуку рішення використано метод розв'язання зворотних задач методом підбору.

Результати. Проведено аналіз фізико-математичних моделей гідродинамічної та електродинамічної підсистем високовольтного електричного розряду в конденсованому середовищі, моделі взаємодії між підсистемами та можливість їх використання для синтезу енергоджерела. Розроблено методику синтезу генератора імпульсних струмів для розрядно-імпульсних технологій, що забезпечує заданий технологічними вимогами силовий вплив на об'єкт обробки.

Наукова новизна. На основі аналізу закономірностей електровибухового перетворення енергії шляхом варіації параметрів енергоджерела та послідовного прямого розв'язання рівнянь моделей підсистем високовольтного електричного розряду в конденсованому середовищі доведена можливість синтезу енергоджерел, що забезпечують необхідний просторово-часовий силовий вплив на об'єкти обробки, за допомогою розв'язання зворотної задачі синтезу методом підбору.

Практична значимість. Використання розробленої методики синтезу енергоджерел для розрядно-імпульсних технологій за заданим імпульсом тиску $P(t)$ дає змогу визначити параметри генератора імпульсних струмів, які дозволять забезпечити необхідний силовий вплив на об'єкт обробки, зменшити енергозатрати та значно скоротити процес налагодження технологічного процесу при впровадженні цих технологій.

Ключові слова: синтез енергоджерел; генератор імпульсних струмів; високовольтний електричний розряд; розрядно-імпульсні технології; імпульс тиску; зворотні задачі синтезу; метод підбору.

ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Розрядно-імпульсні технології (РІТ), що використовують високовольтний електричний розряд (ВЕР) в конденсованому середовищі для генерації хвиль тиску з метою технологічного впливу на об'єкти обробки, набули широкого застосування в різних галузях промисловості для обробки матеріалів, а саме деформування металів у твердому стані (штампування, запресування), диспергування неметалевих матеріалів, руйнування негабаритів (бетонних та залізобетонних будівельних конструкцій різних габаритів, фундаментів та скельних порід), інтенсифікації процесів у водяних, нафтових і газових свердловинах (обробка призабійних зон свердловин), ущільнення й потовщення бурунабивних паль у будівництві та ін. [1–5]. В Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України розроблено понад 300 РІТ, які впроваджено на багатьох підприємствах.

Не зважаючи на те, що РІТ, завдяки ефективності, екологічності та відносно низькій собівартості, давно з успіхом використовуються в різних галузях промисловості, існує необхідність у продовженні роботи з їх вдосконалення, пошуку шляхів підвищення ефективності, розширення меж застосування, зменшення собівартості та масогабаритних показників енергетичного високовольтного обладнання.

Важливим етапом в розробці РІТ є синтез енергоджерела на основі ВЕР, в якості якого використовують генератори імпульсних струмів (ГІС). Розробка методів синтезу енергоджерел, що забезпечують необхідний просторово-часовий силовий та енергетичний вплив на об'єкти обробки для виконання заданих технологічних операцій є актуальним завданням, оскільки дасть змогу забезпечити точність виконання технологічних завдань з обробки матеріалів, оптимізувати енергетичні параметри генератора імпульсних струмів, зменшити енергозатрати, значно скоротити процес налагодження технологічного процесу при впровадженні цих технологій.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Існуючі методи розробки ГІС використовували енергетичні критерії [6], що не завжди забезпечувало необхідний силовий вплив на об'єкти обробки, тому при відпрацюванні технологічного режиму доводилось змінювати параметри ГІС, експериментально визначаючи необхідні значення, що призводило до завищених енергетичних витрат.

Проаналізовані існуючі алгоритми розрахунку енергоджерел на основі високовольтного електричного розряду виходять із заданої повної енергії W_p , яка визначається експериментально технологіями для кожної номенклатури виробів конкретної РІТ, за результатами проведення серії технологічних операцій та є вихідним значенням для подальшого проектування енергоджерела [1, 6, 7]. Такий підхід не дає можливості забезпечити раціональний просторово-часовий силовий вплив на об'єкти обробки, необхідний для досягнення необхідних технологічних результатів.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробка методики синтезу енергоджерел для розрядно-імпульсних технологій, що використовують високовольтний електричний розряд в конденсованому середовищі, за імпульсом тиску $P(t)$, необхідним для реалізації заданого технологічного процесу.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

В якості енергоджерела в РІТ використовується генератор імпульсних струмів (ГІТ) з ємнісним накопичувачем енергії та нелінійним навантаженням у вигляді плазмового каналу розряду в конденсованому середовищі. Ефективність перетворення енергії ГІС в роботу, що здійснюється над об'єктом обробки в РІТ, та створення необхідного силового впливу на об'єкт обробки $P(t)$ визначається параметрами ГІС (зарядна напруга U , ємність C , індуктивність L розрядного контуру, величина міжелектродного проміжку l) та режимом виділення енергії в нелінійному навантаженні, яким є плазмовий канал розряду. Тому при розробці конкретної РІТ виникає завдання розрахунку параметрів ГІС за імпульсом тиску $P(t)$, необхідним для реалізації заданого технологічного процесу.

Така задача відноситься до класу зворотних задач синтезу.

Класичні методи пошуку рішення зворотних задач розбиваються на кілька груп:

- методи зворотного розв'язання, тобто отримання рішення прямої задачі в аналітичному вигляді та його обернення;
- методи обернення прямої моделі, тобто пряме розв'язання рівнянь щодо невідомих вхідних параметрів;
- методи підбору.

Основою для розв'язання зворотних задач є сформульовані на базі вже вивчених закономірностей

фізико-математичні моделі прямих задач. Оскільки для довільного енергоджерела немає фізико-математичної моделі прямої задачі визначення функції тиску в довільній точці заповненого рідиною технологічного об'єму за деякою узагальненою характеристикою імпульсного електророзрядного джерела енергії, то загальну систему розбито на підсистеми: гідродинамічна, електродинамічна та електротехнічна.

Моделі взаємодії між підсистемами будується каскадним чином, щоб вихідні параметри однієї підсистеми були входними для іншої, забезпечуючи зниження числа суттєвих зв'язків між підсистемами.

Таким чином, синтез енергоджерела для РІТ на основі ВЕР можна реалізувати шляхом розв'язання зворотних задач синтезу для окремих підсистем: гідродинамічної, електродинамічної та електротехнічної. Це дає змогу погоджувати режими роботи енергоджерела з конструктивними особливостями технологічного комплексу та об'єкта обробки.

Аналіз існуючих методів розв'язання зворотних задач показав, що для інженерних задач синтезу енергоджерел для РІТ на основі ВЕР прийнятним є застосування методів підбору, які дозволяють на основі загального аналізу закономірностей шляхом варіації параметрів енергосистеми та послідовного прямого розв'язання рівнянь моделей підсистем ВЕР отримати прийнятну реалізацію енергоджерела для ВЕР, що забезпечує заданий технологічними вимогами силовий вплив на об'єкт обробки.

Задача синтезу методом підбору енергоджерела для РІТ на основі ВЕР в конденсованих середовищах, у ролі якого в РІТ використовується ГІС з ємнісним накопичувачем енергії та нелінійним навантаженням у вигляді плазмового каналу розряду, формулюється наступним чином:

– задати необхідний для деякого розрядно-імпульсного технологічного процесу або класу близьких за способом імпульсної обробки процесів імпульс тиску $P(t)$ в заданій точці $r = r_1$ конденсованого середовища, що заповнює технологічний об'єм;

– визначити параметри ГІС (зарядна напруга U , ємність накопичувача C , індуктивність розрядного контуру L) та довжину міжелектродного проміжку l , які дають змогу генерувати необхідний імпульс тиску.

Правомірність використання методу підбору до розв'язання зворотної задачі в такій постановці підтверджується в [8], де вказано, що необхідною і достатньою умовою існування розв'язку поставленої задачі є компактність множини початково заданих елементів, які залежать від обмеженої кількості параметрів, що змінюються в обмежених проміжках значень.

Основою для розв'язання зворотної задачі методом підбору є сформульовані на базі вже вивчених закономірностей фізико-математичні прямі моделі гідродинамічної та електродинамічної підсистем.

Пряма модель електродинамічної підсистеми ВЕР складається з рівняння балансу напруг в розрядному контурі (1); рівняння балансу енергії (2); рівняння гідродинаміки (3), яке визначає зв'язок тиску в каналі розряду з кінематичними характеристиками; рівняння (4), яке визначає зв'язок між опором каналу розряду та питомою електропровідністю плазми:

$$\frac{d^2 U_n}{dt^2} + \frac{R_k}{L} \frac{dU_n}{dt} + \frac{U_n}{LC} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\gamma - 1} \cdot \frac{d(P_a \cdot \pi \cdot a^2)}{dt} + P_a \cdot \frac{d(\pi \cdot a^2)}{dt} = \frac{N(t)}{l}, \quad (2)$$

$$P_a = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{d^2(\pi \cdot a^2)}{dt^2} \cdot \ln\left(\frac{l}{a}\right) - \frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot (\pi \cdot a^2)} \cdot \left(\frac{d(\pi \cdot a^2)}{dt}\right)^2, \quad (3)$$

$$R_k = \frac{A l (\gamma - 1)}{P_a (\pi \cdot a^2)}, \quad (4)$$

де U_n – напруга пробою розрядного проміжку, В;

R_k – опір каналу розряду, Ом;

L – індуктивність розрядного кола, Гн;

C – ємність конденсаторної батареї, Ф;

$N(t)$ – потужність, яка вводиться в канал розряду, ВА;

P_a – тиск в каналі розряду, Па;

a – радіус каналу розряду, м;

l – довжина розрядного проміжку, м;

$\gamma = 1,26$ – ефективний показник адиабати;

ρ – щільність середовища, кг/м³;

A – іскрова стала, В²·с·м⁻²;

t – час, с.

Моделі гідродинамічної підсистеми ВЕР (процес розповсюдження хвилі тиску в об'ємі рідини) описується одновимірним хвильовим рівнянням (5), що допустимо при обмежених швидкостях до 200 м/с:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad (5)$$

де $\varphi(r, t)$ – потенціал швидкості руху рідини, м²/с;

r – просторова координата заданої точки технологічного об'єму, м;

c_0 – швидкість звуку в конденсованому середовищі технологічного об'єму, м/с.

Початкові умови

$$\varphi(r, 0) = 0,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(r, 0) = 0.$$

Граничні умови

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(r_0, t) = \frac{-P_a(t)}{\rho} + \frac{P_0}{\rho},$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(r_1, t) = 0,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r}(r_1, t) = 0.$$

Якщо в ролі входних даних використовують емпіричну залежність $N(t) = I(t) \cdot U(t)$, то з системи рівнянь (1)–(5) необхідно виключити рівняння (1), (2).

Для розв'язання прямої задачі в представленій формі пропонується використовувати пакет прикладних програм MathCAD за допомогою функції *odesolve* з використанням розв'язувача Radau, який використовує алгоритм розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь RADAU5. Метод RADAU5 оснований на тристадійному повністю неявному методі Рунге-Кутта п'ятого порядку точності та використовується у випадках, коли в розв'язанні диференціальних рівнянь є плавно змінювана компонента, а також швидко затухаючі збурення.

Для розв'язання зворотної задачі методом підбору пропонується закон введення електричної потужності в канал розряду моделювати ломаною лінією, яка складається з чотирьох відрізків. Ця лінія визначається координатами п'яти точок. Перша точка знаходиться в початку координат, третя визначається значенням амплітуди потужності N_m і часом її досягнення τ_N , п'ята має координати $t = \tau_1$ і $N = 0$ (τ_1 – тривалість першого напівперіоду часу введення енергії). Для визначення координат другої та четвертої точок було проаналізовано криві потужності, отримані за експериментальними даними. Результати аналізу показали, що можна прийняти для другої точки $t = 0,3 \cdot \tau_N$, $N = 0,15 \cdot N_m$, а для четвертої – $t = 0,85 \cdot \tau_1$, $N = 0,12 \cdot N_m$.

Таким чином, закон введення електричної потужності задається тривалістю першого напівперіоду τ_1 , максимальним значенням потужності N_m і часом його досягнення τ_N . З метою зменшення стохастичності процесу розглядається розряд, ініційований мікропровідником радіусом $a_0 = 0,2$ мм, початкова швидкість розширення каналу $\dot{a}_0 = 0$, початковий тиск в каналі $(P_a)_0 = 6$ МПа.

Величини τ_1 , N_m , τ_N , за якими проводиться апроксимація закону введення електричної енергії в канал розряду, можна виразити через параметри ГПС:

$$\tau_1 = \pi \sqrt{LC},$$

$$N_m = \eta^2 (1 - 0,85\eta) U_0^2 \sqrt{C/L},$$

$$\tau_N = 1,8\eta \sqrt{LC},$$

$$\eta = \left(\frac{\pi A l^2}{U^2 \sqrt{LC}} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Для визначення діапазону змін величин τ_1 , N_m , τ_N , що задають закон введення електричної потужності в канал розряду, та довжини міжелектродного проміжку l (довжина ініціюючого мікропровідника), необхідно встановити діапазони змін параметрів електричного кола U ; C ; L й довжини мікропровідника l .

Для визначення діапазонів змін параметрів електричного кола U ; C ; L та довжини мікропровідника l , було проаналізовано різні розрядно-імпульсні технології та існуючий параметричний ряд генераторів імпульсних струмів [9]. За результатами проведеного аналізу встановлено діапазони змін параметрів ГПС

та величини міжелектродного проміжку (довжини мікропровідника):

$$U_0 = 10; 15; 25; 35; 45 \text{ кВ};$$

$$C = 1; 2; 3; 4; 5 \text{ мкФ};$$

$$L = 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0 \text{ мкГн};$$

$$l = 20; 30; 40; 50; 60 \text{ мм}.$$

За необхідності діапазони змін параметрів ГПС та величини міжелектродного проміжку може бути змінено на вимогу задоволення потреб конкретних розрядно-імпульсних технологій.

Розв'язання зворотної задачі синтезу енергоджерела на основі високовольтного електричного розряду методом підбору відбувається за наступним алгоритмом.

Задається необхідна для виконання технологічних завдань функція тиску $P(t)$ в певній точці $r=r_i$ хвильової зони технологічного об'єму.

Далі для елементів множини можливих рішень зворотної задачі розв'язується пряма задача. Отримані залежності $P(t)$ порівнюються з заданою $P(t)$ в ті ж моменти часу $t_i (1 \leq i \leq n)$, тобто знаходиться відстань між елементами $P(t)$ та $P(t)_i$.

Якщо відстань між кривими $P(t)$ та $P(t)_i$ менше $\varepsilon = 0,1 \cdot P_m$ (P_m – амплітуда заданого тиску), то задані та використані в даному процесі розв'язку прямої задачі параметри ГПС є рішенням зворотної задачі.

Приклад розв'язання зворотної задачі синтезу енергоджерела на основі високовольтного електричного розряду методом підбору виконано для технологічно необхідної заданої залежності $P(t)$ на відстані $r = 0,2$ м від каналу розряду (див. рис. 1).

За результатами розв'язання зворотної задачі методом підбору з використанням пакету прикладних програм MathCAD визначено необхідні параметри ГПС, а саме: $U = 25 \cdot 10^3$ В; $C = 2 \cdot 10^{-6}$ Ф; $L = 3,5 \cdot 10^{-6}$ Гн; $l = 0,03$ м; $W = 625$ Дж.

Для перевірки коректності отриманих результатів було розв'язано пряму задачу знаходження $P(t)$ на відстані $r = 0,2$ м, в якій визначені за результатами розв'язання зворотної задачі методом підбору параметри ГПС використано як задані (див. рис. 2).

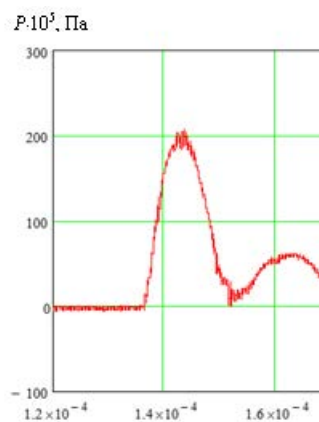


Рис. 1. Імпульс тиску $P(t)$, заданий за технологічними вимогами на відстані від каналу розряду $r = 0,2$ м

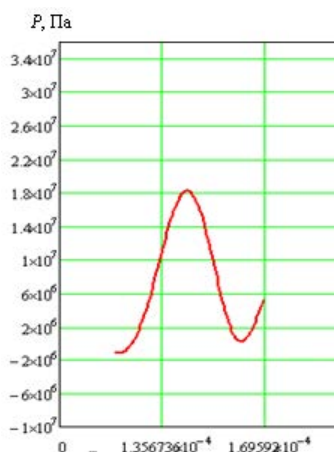


Рис. 2. Імпульс тиску $P(t)$ при $r = 0,2$ м, отриманий в результаті розв'язання прямої задачі (фрагмент MathCAD)

Порівняння отриманої функції тиску $P(t)$, при $r = 0,2$ м (див. рисунок 2.3) в результаті розв'язання прямої задачі, в якій визначені за результатами розв'язання зворотної задачі методом підбору параметри ГІС використано як задані, з заданою функцією тиску $P(t)$ (див. рисунок 2.2) в межах першого напівперіоду показує, що відхилення не перевищує 10%, що доводить коректність отриманих результатів розв'язання задачі синтезу енергоджерела на основі ВЕР методом підбору.

ВИСНОВКИ

За результатами аналізу різноманітних розрядно-імпульсних технологій, які використовують

високовольтний електророзряд в конденсованих середовищах, показано, що важливим етапом в розробці РІТ є синтез енергоджерела на основі ВЕР, в якості якого використовують генератори імпульсних струмів (ГІС).

Проведено аналіз фізико-математичних моделей гідродинамічної та електродинамічної підсистем високовольтного електророзряду в конденсованому середовищі, моделі взаємодії між підсистемами та показано можливість їх використання для синтезу енергоджерела.

На основі аналізу закономірностей електровибухового перетворення енергії шляхом варіації параметрів енергоджерела та послідовного прямого розв'язання рівнянь моделей підсистем високовольтного електророзряду в конденсованому середовищі доведена можливість синтезу енергоджерел, що забезпечують необхідний просторово-часовий силовий вплив на об'єкти обробки, за допомогою розв'язання зворотної задачі синтезу методом підбору.

Розроблено методику синтезу генератора імпульсних струмів для розрядно-імпульсних технологій за імпульсом тиску $P(t)$, що забезпечує заданий технологічними вимогами силовий вплив на об'єкт обробки.

Використання розробленої методики синтезу енергоджерел для розрядно-імпульсних технологій за заданим імпульсом тиску $P(t)$ дає змогу визначити параметри генератора імпульсних струмів, які дозволять забезпечити необхідний силовий вплив на об'єкт обробки, зменшити енергозатрати та значно скоротити процес налагодження технологічного процесу при впровадженні цих технологій.

REFERENCES

- [1] Zhixiang, Cai, Hui, Zhang, Kerou, Liu, Yufei, Chen & Qing, Yu. (2020) Experimental Investigation and Mechanism Analysis on Rock Damage by High Voltage Spark Discharge in Water: Effect of Electrical Conductivity. *Energies*, 13, 5432-5439. doi:10.3390/en13205432 [in English].
- [2] Kyoung-Jae, Chung, Seok-geun, Lee, Hwang, Y.S. & Kim, C.Y. (2015). Modeling of Pulsed Spark Discharge in Water and Its Application to Well Cleaning. *Current Applied Physics*, 15(9), 977-982. doi:10.1016/j.cap.2015.05.010 [in English].
- [3] Kern, Lee, Kyoung-Jae, Chung, Hwang, Y. S. & Kim, C. Y. (2017). Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells. *Journal of Applied Physics*, 121, 243302-243309. doi:10.1063/1.4986634 [in English].
- [4] Titova, Y.V., Stokozenko, V.G. & Maximov A.I. (2010). Application of Underwater Discharge for Modification of Cellulose Materials. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38 (4), 933-941. doi:10.1109/TPS.2010.2042181 [in English].
- [5] Rizun, A. R., Denisyuk, T.D. & Domershchikova, A.O. (2017). Electric discharge in the process for recovering the wastes of printed circuit boards. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53 (6), 592-596. doi:10.3103/S1068375517060096 [in English].
- [6] Tertilov, R. V. (2012). Synthesis of generators of pulsed currents with parametric variation of the resistance of the discharge circuit. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 48, 284-288. doi:10.3103/S1068375512030106 [in English].
- [7] Vodchenko, O. I., Demydenko, I. Y. Ovchinnikova, L.E. & Kozyrev, S.S. (2022). High Voltage Electrochemical Explosion in Discharge-Pulse Technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 58 (6), 731-738. doi:10.3103/S106837552206014X [in English].
- [8] Barbashova, G.A. (2010). Restoration of the characteristics of the cavity formed upon explosion of a microconductor according to the specified two pulse temperature dependence of the pressure at a point in a liquid. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 46(1), 53-56. doi:10.3103/S1068375510010096 [in English].
- [9] Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Pulse current generators. (2021). Retrieved from <http://www.ipt.com.ua/> [in English].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Zhixiang, Cai, Hui, Zhang, Kerou, Liu, Yufei, Chen & Qing, Yu. (2020) Experimental Investigation and Mechanism Analysis on Rock Damage by High Voltage Spark Discharge in Water: Effect of Electrical Conductivity. *Energies*, 13, 5432-5439. doi:10.3390/en13205432 [in English].
- [2] Kyoung-Jae, Chung, Seok-geun, Lee, Hwang, Y.S. & Kim, C.Y. (2015). Modeling of Pulsed Spark Discharge in Water and Its Application to Well Cleaning. *Current Applied Physics*, 15(9), 977-982. doi:10.1016/j.cap.2015.05.010 [in English].
- [3] Kern, Lee, Kyoung-Jae, Chung, Hwang, Y. S. & Kim, C. Y. (2017). Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells. *Journal of Applied Physics*, 121, 243302-243309. doi:10.1063/1.4986634 [in English].
- [4] Titova, Y.V., Stokozenko, V.G. & Maximov A.I. (2010). Application of Underwater Discharge for Modification of Cellulose Materials. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38 (4), 933-941. doi:10.1109/TPS.2010.2042181 [in English].
- [5] Rizun, A. R., Denisyuk, T.D. & Domershchikova, A.O. (2017). Electric discharge in the process for recovering the wastes of printed circuit boards. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53 (6), 592-596. doi:10.3103/S1068375517060096 [in English].
- [6] Tertilov, R. V. (2012). Synthesis of generators of pulsed currents with parametric variation of the resistance of the discharge circuit. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 48, 284-288. doi:10.3103/S1068375512030106 [in English].
- [7] Vodchenko, O. I., Demydenko, I. Y. Ovchinnikova, L.E. & Kozyrev, S.S. (2022). High Voltage Electrochemical Explosion in Discharge-Pulse Technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 58 (6), 731-738. doi:10.3103/S106837552206014X [in English].
- [8] Barbashova, G.A. (2010). Restoration of the characteristics of the cavity formed upon explosion of a micro conductor according to the specified two pulse temperature dependence of the pressure at a point in a liquid. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 46(1), 53-56. doi:10.3103/S1068375510010096 [in English].
- [9] Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine. Pulse current generators. (2021). URL: <http://www.iip.com.ua/> [in English].

© Козирев С. С.

Дата надходження статті до редакції: 27.10.2023

Дата затвердження статті до друку: 04.11.2023