

Керування високовольтним імпульсним розрядом в екзотермічному середовищі

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2021.41>

Сергій Козирев

Кафедра комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки Національного університету
кораблебудування
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України
Миколаїв, 54000, Україна

Анотація— Проведено дослідження високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі як об'єкта керування. Запропоновано правила знаходження початкових умов алгоритму керування. Проведено кореляційний аналіз взаємозв'язку електродинамічних і гідродинамічних характеристик і визначено інформаційні координати. Розроблено алгоритм керування високовольтним імпульсним розрядом в екзотермічному середовищі

Ключові слова — алгоритм керування; інформаційні координати; високовольтний імпульсний розряд; екзотермічне середовище.

I. ВСТУП

У технологіях розрядно-імпульсного руйнування природних і штучних негабаритів, розпушування міцних донних ґрунтів широко використовують високовольтний імпульсний електричний розряд в хімічно активних конденсованих середовищах, здатних до екзотермічних перетворень в режимі вибухового горіння під дією високих температур і тисків, створюваних в каналі розряду електро-розрядною плазмою. Енергія, що вивільняється при екзотермічних перетвореннях хімічно активного середовища, підсумовується з електричною енергією розряду, накопиченою на обкладках конденсаторних батарей генератора імпульсних струмів (ГІС). В результаті такого підсумовування енергія руйнування зростає в кілька разів без збільшення накопиченої енергії в батареї конденсаторів [1–3].

Важливою перевагою розрядно-імпульсних технологій, що використовують високовольтний розряд в екзотермічному середовищі для руйнування негабаритів, є керуваність, на відміну від технологій, які використовують вибухові речовини. Тому розробка систем керування режимом високовольтного імпульсного розряду в хімічно активних конденсованих середовищах є актуальним завданням, розв'язання якого потребує вивчення високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі як об'єкта керування, визначення інформаційних координат та початкових умов, розробки алгоритму керування, що забезпечує енергетичну ефективність екзотермічного перетворення енергії в каналі розряду.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Проведені раніше дослідження показали, що використання високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі дозволяє розширити сферу застосування технологій імпульсної обробки матеріалів. Обумовлено це тим, що при ідентичних характеристиках генераторів імпульсних струмів, які застосовуються в розрядно-імпульсних технологіях, при використанні розряду в хімічно активних конденсованих середовищах, здатних до екзотермічних перетворень, зростають амплітуда і тривалість генерованого імпульсу тиску. В роботі [4] аналізуються профілі тиску, отримані з урахуванням випромінювання, викликаного реакцією екзотермічних добавок.

Важливим при технологічному використанні розряду в екзотермічному середовищі є забезпечення енергетичної ефективності. В роботах [5, 6] досліджується одноімпульсний режим введення енергії в канал розряду, при якому реакція горіння екзотермічної суміші припиняється протягом декількох десятків мікросекунд, що призводить до неповного згорання використовуваних екзотермічних сумішей та втрати потенційної хімічної енергії. Це обумовлює не достатню ефективність одноімпульсного введення енергії через короткочасність імпульсу тиску, що генерується високовольтним розрядом.

Аналіз результатів по дослідженню введення електричної енергії в канал іскрового розряду в конденсованих середовищах [7–10] показав, що на базі багатоконтурних генераторів імпульсних струмів можна формувати імпульси тиску з декількома послідовними пульсаціями, число яких дорівнює числу пульсацій електричної потужності. Кожен імпульс забезпечує збільшення амплітуди і тривалості імпульсу тиску. Проаналізовані літературні джерела аргументовано показують переваги багатоімпульсного введення енергії в канал розряду.

Проведений аналіз літературних джерел показує, що залишається відкритим питання керування подачею послідовних розрядних імпульсів для забезпечення ефективності екзотермічних перетворень при кожній реалізації високовольтного

багатоімпульсного розряду в екзотермічному середовищі.

III. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є аналіз високовольтного багатоімпульсного розряду в конденсованих екзотермічних середовищах як об'єкта керування, визначення інформаційних координат та початкових умов, розробка алгоритму керування, що забезпечує енергетичну ефективність екзотермічного перетворення енергії в каналі розряду.

Для досягнення поставленої мети були виконані такі завдання:

- дослідити вплив режимів керованого введення електричної енергії в канал розряду на ефективність екзотермічного перетворення енергії з метою визначення початкових умов алгоритму керування ;

- дослідити взаємозв'язок електродинамічних і гідродинамічних характеристик розряду з керованим введенням електричної енергії з метою визначення інформаційних координат;

- розробити алгоритм керування режимом високовольтного імпульсного розряду в конденсованих екзотермічних середовищах, що дозволяє забезпечувати задані технологічні режими і максимальну ефективність екзотермічного перетворення енергії при кожній реалізації розряду.

IV. ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Метою керування процесом високовольтного імпульсного розряду в конденсованих екзотермічних середовищах є підвищення ефективності екзотермічного перетворення енергії при кожній реалізації, що визначає ефективність технологічної дії на об'єкти обробки. Ефективність екзотермічного перетворення енергії визначається повнотою згорання маси екзотермічної суміші. При повному згоранні величина хімічної енергії, що вивільняється, має бути близькою до потенційної енергії екзотермічної суміші. Проте при некерованому одноімпульсному введенні енергії в канал розряду в реакцію вступає біля 20% загальної кількості екзотермічної суміші, введеної в розрядний проміжок. Головною причиною цього є припинення самопідтримної екзотермічної реакції, із-за різкого зниження тиску в каналі розряду від сотень МПа до менш ніж $P_{\min}=23$ МПа – мінімального рівня тиску, необхідного для протікання самопідтримної екзотермічної реакції.

З метою підвищення ефективності вивільнення хімічної енергії потрібна підтримка рівня тиску в каналі розряду вищим за мінімальний більш тривалий час. Пропонується метод підвищення ефективності екзотермічних перетворень при кожній реалізації розряду, що ґрунтується на послідовному порційному введенні електричної енергії в канал розряду по заданому алгоритму, з поточним непрямым контролем рівня тиску в каналі розряду з метою не допущення згасання самопідтримної екзотермічної реакції. Реалізація цього методу вимагає розробки відповідного алгоритму керування

процесом введення електричної енергії в канал розряду.

При керованому двоімпульсному введенні електричної енергії в канал розряду необхідно визначити початковий розподіл електричної енергії, між першим і другим імпульсами, що забезпечує максимальну питому енергетичну ефективність екзотермічного перетворення μ . Повна енергія W_p , необхідна для здійснення заданих технологічних операцій, складається з електричної енергії $W_\tau=W_1+W_2$ і теплової енергії ΔW_x , що вивільняється при окисленні екзотермічної суміші. Були проведені дослідження впливу співвідношення енергій другого і першого імпульсів на ефективність виділення потенційної хімічної енергії екзотермічної суміші і отримана залежність $\mu=f(W_2/W_1)$, яка має максимум і дозволяє визначити оптимальне співвідношення W_2/W_1 (Рис. 1).

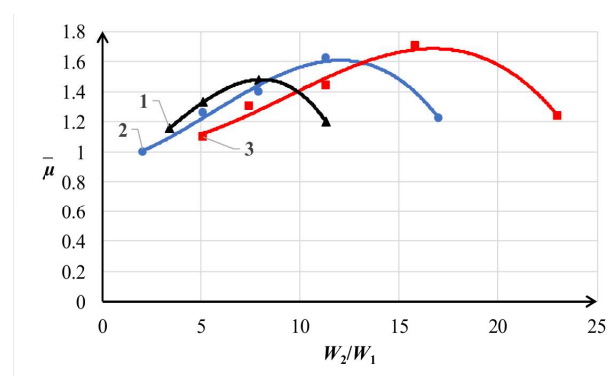


Рисунок 1. Залежність питомої енергетичної ефективності μ від співвідношення енергій W_2/W_1 при різних значеннях повної електроенергії W_τ : 1 – 400 Дж, 2 – 550 Дж, 3 – 750 Дж

В якості початкових умов задається напруга U_1 , U_2 на конденсаторах генератора імпульсних струмів (ГІС), що визначається із співвідношень:

$$W_\tau = \frac{W_i - \Delta W_x}{\eta_i}; \quad W_\tau = W_1 + W_2; \quad W_{1,2} = \frac{C_{1,2} U_{1,2}^2}{2}. \quad (1)$$

Наступним етапом є розробка алгоритму подання сигналу на включення другого розрядного контуру для збільшення часу протікання екзотермічної реакції в самопідтримному режимі. Включення другого розрядного контуру повинне відбуватися в момент, коли тиск в каналі розряду досягає гранично допустимого мінімального значення для даного екзотермічного складу. Заздалегідь час подання другого імпульсу встановити неможливо із-за стохастичності процесів в каналі розряду. Важливим є використання достовірної інформаційної координати для непрямої оцінки тиску в каналі розряду $P(t)$. Тиск в каналі розряду має значний статистичний розкид і є операційно не визначуваним, і тому не може бути використаним в якості інформаційної координати в системі керування. У зв'язку з цим були проведені дослідження з метою визначення інформаційних координат, що можуть бути непрямою оцінкою тиску в каналі розряду. До таких величин відносяться напруга пробою $U(t)$, розрядний струм $I(t)$, електрична потужність $N(t)$. Електродинамічні і гідродинамічні процеси в каналі розряду носять

стохастичний характер. Існує ряд досліджень, які показують, що ці характеристики підкоряються нормальному закону розподілу [11, 12]. З метою встановлення зв'язку між електродинамічними $U(t)$, $I(t)$, $N(t)$ і гідродинамічними $P(t)$ характеристиками проведено їх кореляційний аналіз. Оскільки досліджувані величини розподілені нормально, то для проведення кореляційного аналізу застосовувався лінійний коефіцієнт кореляції Пірсона r , який використовується для оцінки лінійного зв'язку, і коефіцієнт детермінації $R=r^2$, який характеризує щільність зв'язку. Найбільш щільний інформаційний зв'язок ($R=0,9368$) спостерігається між $P(t)$ і $N(t)$. Таким чином, в якості інформаційної координати, що побічно визначає тиск в каналі розряду, може бути використане операційно визначуване значення електричної потужності $N(t)=U(t) \cdot I(t)$. Поточне значення $P(t)$, що відповідає вимірюваному значенню $N(t)=U(t) \cdot I(t)$, може оперативно визначатися за виразами, що описують процеси в каналі розряду:

$$\frac{1}{\gamma-1} \cdot \frac{d(P \cdot \pi \cdot a^2)}{dt} + P \cdot \frac{d(\pi \cdot a^2)}{dt} = \frac{N}{l}, \quad (8)$$

$$P = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{d^2(\pi \cdot a^2)}{dt^2} \cdot \ln\left(\frac{l}{a}\right) - \frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot (\pi \cdot a^2)} \cdot \left(\frac{d(\pi \cdot a^2)}{dt}\right)^2, \quad (9)$$

де P – тиск в каналі розряду, a – радіус каналу розряду, l – довжина розрядного проміжку, γ – ефективний показник адиабати, ρ – густина середовища.

Використання $N(t)=U(t) \cdot I(t)$ в якості інформаційної координати дасть змогу з достатньою мірою точності мати оцінку тиску в каналі розряду $P(t)$ для своєчасної подачі керуючого сигналу на включення другого розрядного контуру ГПС.

Система автоматичного керування програмними засобами реалізує алгоритм керування двоконтурним генератором імпульсних струмів (ГПС), забезпечуючи подання управляючого сигналу, на включення другого розрядного контуру в момент досягнення тиском в каналі розряду $P(t)$ мінімального допустимого значення (Рис. 2)

Завдання в систему керування поступає з бази даних, в якій зберігаються результати заздалегідь проведених експериментальних досліджень і розрахунків, що визначають необхідні енергії першого і другого розрядних імпульсів W_1 , W_2 , що забезпечують максимальну ефективність виділення хімічної енергії. Величина граничного значення тиску в каналі розряду P_{\min} , необхідна для підтримки протікання екзотермічної реакції в самопідтримному режимі, визначається складом і масою екзотермічної суміші, вибраної виходячи із заданого технологічного режиму. Величини зарядної напруги U_1 , U_2 на першому і другому емнісних накопичувачах енергії відповідають необхідним значенням енергії розрядних імпульсів W_1 і W_2 . Визначені величини (U_1 , U_2 і P_{\min}) програмними засобами задаються як початкові умови алгоритму

керування.

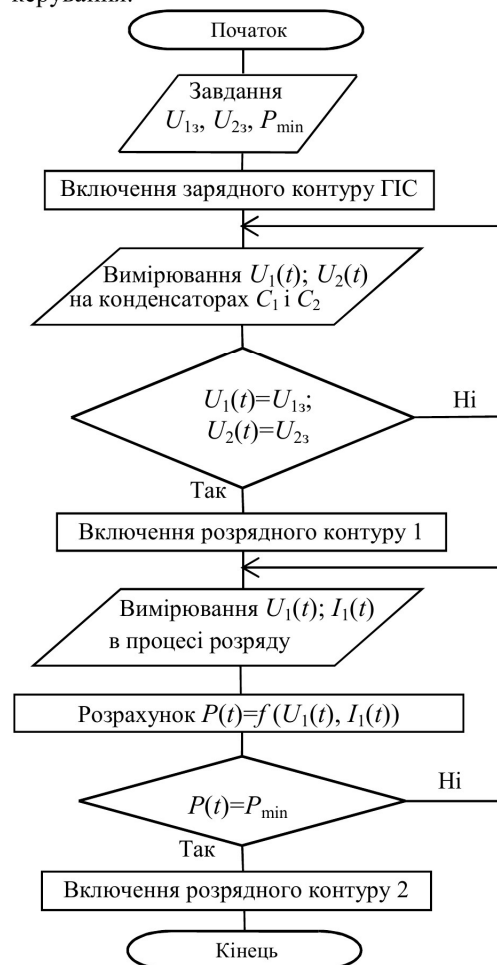


Рисунок 2. Алгоритм керування

Після цього надходить сигнал на включення зарядного блоку генератора імпульсних струмів для заряду емнісних накопичувачів енергії (C_1 , C_2). В процесі заряду вимірюються поточні значення напруг $U_1(t)$, $U_2(t)$ на емнісних накопичувачах датчиками напруги. Інформаційні сигнали з датчиків надходять в систему автоматичного керування, де поточні значення напруг $U_1(t)$, $U_2(t)$ порівнюються з заданими значеннями U_{13} , U_{23} . У момент, коли напруги на конденсаторах досягають заданих значень з системи автоматичного керування надходить сигнал на включення першого розрядного контуру і на електроди надходить перший розрядний імпульс. Починається процес високовольтного електрохімічного вибуху екзотермічної суміші в реакційній камері. В процесі реалізації першого розрядного імпульсу вимірюється напруга $U_1(t)$ датчиком напруги і розрядний струм $I_1(t)$ датчиком струму, що індуктивно пов'язаний з першим розрядним контуром. Значення напруги $U_1(t)$ і розрядного струму $I_1(t)$ передаються в систему керування. В системі керування програмними засобами розраховується поточне значення тиску в каналі розряду першого високовольтного розрядного імпульсу $P(t)$. Може також використовуватися попередньо сформована база даних для визначення тиску за електричними характеристиками. Поточне

значення тиску в каналі розряду $P(t)$ порівнюється із заданим граничним мінімальним значенням P_{\min} , необхідним для підтримання протікання екзотермічної реакції в самопідтримному режимі. При досягненні поточним значення тиску граничного значення $P(t)=P_{\min}$ з системи автоматичного керування подається сигнал на включення другого розрядного контуру. На електроди надходить другий розрядний імпульс, який підвищує тиск в реакційній камері і забезпечує подальше протікання екзотермічної реакції в самопідтримному режимі до повного згорання екзотермічної суміші.

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень високовольтного імпульсного розряду в екзотермічному середовищі як об'єкта керування отримана залежність питомої енергетичної ефективності виділення потенційної хімічної енергії екзотермічної суміші від розподілу повної електричної енергії між послідовними розрядними імпульсами. Це дозволяє, за запропонованими авторами правилами, визначити початкові умови алгоритму керування режимом розряду, що забезпечують максимальну ефективність екзотермічних перетворень.

Дослідження електродинамічних і гідродинамічних характеристик високовольтного розряду в екзотермічному середовищі і їх статистичний аналіз показали істотну стохастичність процесів при екзотермічних перетвореннях в режимі вибухового горіння.

Проведено кореляційний аналіз взаємозв'язку поточного тиску в каналі розряду і електричних параметрів розряду, що характеризують режим введення електричної енергії. За його результатами в якості інформаційних координат, що побічно визначають тиск в каналі розряду, запропоновано використовувати операційно визначувані електричні характеристики розряду $U(t)$, $I(t)$, $N(t)$.

Розроблено алгоритм керування високовольтним багатоімпульсним розрядом в екзотермічному середовищі, який дозволяє уникнути згасання екзотермічної реакції при випадковому, із-за стохастичності процесу, зниженні тиску до гранично допустимого мінімального значення. Використання запропонованого алгоритму керування забезпечить збільшення часу протікання екзотермічної реакції в самопідтримному режимі до повного згорання екзотермічної суміші при кожній реалізації розряду. За рахунок цього зменшаться непродуктивні втрати хімічної і електричної енергії при кожній реалізації розряду і збільшиться кількість виділеної сумарної енергії для виконання технологічних операцій, без збільшення витрат електроенергії.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Ризун А. Р., Голень Ю. В., Денисюк Т. Д., Кононов В. Ю. и др. Электроразряд – источник энергии экологически чистых технологий разрушения. *Электронная обработка материалов*. 2012. Т. 48. № 5. С. 109–111.
- [2] Rizun A. R., Golen' Yu. V., Denisjuk T. D. Seismically safe distances for bottom ground loosening by high-voltage

electrochemical explosion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2008. Vol. 44, Issue 3, P. 240–242.

- [3] Коростовенко В. В., Коростовенко Л. П., Стрекалова Т. А., Стрекалова В. А. Особенности физических процессов при разрядноимпульсных методах в комбинированных технологиях переработки минерального сырья. *Международный журнал экспериментального образования*. 2013, № 10 1, С. 129–132.
- [4] Крутиков В. С., Ризун А. Р., Голень Ю. В. Метод оценки полей давлений при высоковольтном электрохимическом взрыве в закрытых объемах. *Электронная обработка материалов*. 2014. Т. 50. № 5. С. 84–87.
- [5] Rizun A. R., Posdeev V. A., Golen' Yu. V. One-shot electrode systems for high-voltage electrochemical destruction of natural and artificial lumps. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010. Vol. 46. No. 3. P. 263–265.
- [6] Rizun A. R., Golen' Yu. V., Denisjuk T. D. Initiation of electrical discharge by exothermal compositions at destruction of firm soils. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007. Vol. 43. Issue 2. P. 116–118.
- [7] Vovchenko A. I., Shomko V. V., Barbashova G. A., Kamenskaya L. A. Investigation of hydrodynamic processes at multi-pulse power input into the channel of an electric discharge in liquid. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. Vol. 50. № 1. P. 72–77.
- [8] Barbashova G. A., Shomko V. V. Cyclicity effect of the electrical energy input in a channel of the underwater spark discharge. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007. Vol. 43. № 2. P. 110–115.
- [9] Barbashova G. A. 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*. 2010. Vol. 46. № 1. P. 53–56.
- [10] Тертилов Р. В. Оптимизация разрядноимпульсных технологий на базе применения двухконтурных генераторов импульсных токов. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 3. С. 67–72.
- [11] Sergey Kozyrev “Control System of Discharge-Pulse Installation with Elements of Artificial Intelligence”. 2019. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON 2019*. Proceedings 8879816, P. 513–517.
- [12] Sergey Kozyrev, Natalia Nazarova, Dmitriy Vinnichenko “Adaptive Filter of Input Information Signal for Discharge Pulse Installation Control System”. 2018. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems. IEPS 2018*. Proceedings 8559558, P. 343–346.