

**ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА**

УДК 621.3.011

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.005>**ВПЛИВ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА РОЗРЯДНОГО КОЛА  
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК НА ЇХНІ ВИХІДНІ  
СТРУМИ ОБМЕЖЕНОЇ ТРИВАЛОСТІ**

**А.А. Щерба\***, чл.-кор. НАН України, **Н.І. Супруновська\*\***, докт. техн. наук,  
**М.О. Ломко\*\*\***, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@gmail.com)

*На основі аналізу перехідних процесів коливального й аперіодичного розрядів накопичувального конденсатора електророзрядної установки на навантаження доведено, що збільшення його ємності завжди спричиняє збільшення величини розрядного струму, яка відповідає фіксованій тривалості розряду, меншій тривалості досягнення максимального значення розрядного струму. Для варійованих у широких межах ємностей розрядного конденсатора досліджено змінення величини розрядного струму в навантаженні під час його примусового переривання в певний момент часу. Базуючись на цьому, запропоновано метод підвищення швидкості наростання імпульсних струмів у навантаженні, що ґрунтується на виборі розрядного конденсатора більшої ємності порівняно з достатньою ємністю для реалізації потрібного технологічного режиму, і примусовому перериванні струму в навантаженні в певний момент часу, який відповідає певній фіксованій тривалості розряду (меншій тривалості досягнення максимального значення розрядного струму за ємності конденсатора, достатній для реалізації потрібного технологічного режиму). Примусове обмеження тривалості розряду здійснюється повністю керованим напівпровідниковим ключем. Цей метод може бути покладено в основу отримання іскроерозійних нанорозмірних порошків металів і сплавів. Бібл. 16, рис. 4, табл.*

**Ключові слова:** розряд конденсатора, швидкість наростання струму, перехідний процес, ємність конденсатора, тривалість розряду.

**Вступ.** Лінійні й нелінійні накопичувальні конденсатори зазвичай використовуються в електророзрядних установках (ЕРУ) для реалізації в технологічному навантаженні великих імпульсних струмів і потужностей, які неможливо споживати від живильної електричної мережі, але які необхідні для реалізації сучасних розрядно-імпульсних технологій [1–4], зокрема для обробки різних матеріалів й одержання іскроерозійних порошків [5–9]. У цьому випадку електроіскрове навантаження, що має параметричні, нелінійні й стохастичні властивості [10–12], включається тільки в коло розряду конденсаторів і впливає на їхні кінцеві напруги [3, 4], а також на характер перехідних процесів у цьому колі [10, 11, 13, 14].

Однією з основних електродинамічних проблем у процесі вдосконалення формувачів імпульсних струмів для електророзрядних установок є підвищення швидкості наростання струмів у технологічному навантаженні, оскільки в такому разі зростає їхній силовий вплив на навантаження. Зважаючи на те, що виділювана в навантаженні миттєва активна потужність прямо пропорційна величинам його активного опору й квадратичному значенню розрядного (імпульсного) струму, то підвищення силового впливу на технологічне навантаження, власне, досягається формуванням у ньому великих імпульсних струмів малої тривалості.

Так, наприклад, в установках об'ємного електроіскрового диспергування (ОЕІД) металів і сплавів у діелектричній рідині збільшення швидкості наростання розрядних струмів і зменшення їхньої тривалості дає можливість зменшувати розміри одержуваних дисперсних іскроерозійних частинок [6, 7, 9, 13]. Тому такий підхід може бути покладений в основу методу отримання іскроерозійних нанорозмірних порошків металів і сплавів, а також електрохімічно й біологічно активних колоїдних систем.

**Метою роботи** є аналіз особливостей перехідних процесів розряду накопичувального конденсатора електророзрядної установки на її технологічне навантаження для виявлення закономірностей збільшення швидкості наростання розрядного струму в навантаженні в разі зміни параметрів розрядного кола й умов розряду конденсатора.

**Зміна швидкості наростання розрядних струмів у електричному колі іскроерозійного навантаження.** В ЕРУ для отримання іскроерозійних частинок технологічним навантаженням є шар металевих гранул між електродами, зануреними в діелектричну рідину. Дослідження показали, що електричний опір  $R_n$  усіх типів електроіскрових навантажень є нелінійним. Його величина залежить від багатьох чинників: значення розрядного струму й швидкості його зміни, тривалості й частоти розрядних імпульсів, фізико-хімічних властивостей рідини і гранул, розмірів як самих гранул, так і шару з них, конструктивних і технологічних параметрів електророзрядної камери [5, 6, 8]. Нелінійна залежність опору електроіскрового навантаження від багатьох параметрів ускладнює застосування точних аналітичних методів для аналізу перехідних процесів у розрядному колі установки, тому зазвичай застосовують різні способи лінеаризації такого опору. Під час проведення аналізу в цій роботі (як і в більшості інших робіт з цієї тематики) допускається, що електроіскрове навантаження має кусочно-лінійний опір, величина якого  $R_n = \text{const}$  протягом кожного розряду, але може стохастично змінитися під час паузи між розрядами (тобто під час заряду конденсатора). Опір  $R_n$  є енергетично еквівалентним лінійним опором, в якому споживається така ж електрична енергія, як і в разі розряду конденсатора на реальне нелінійне електроіскрове навантаження.

Для збільшення частоти зарядно-розрядних циклів конденсатора, а, отже, продуктивності порошкоутворення в установках ОЕІД переважно використовується коливальний режим розряду конденсатора на навантаження з невеликим (до 30 % від зарядної напруги) його перезарядом [14, 15] до напруги протилежної полярності. Найпростішою електричною схемою заміщення розрядного кола ЕРУ з лінійним активним опором навантаження є послідовне  $RLC$  коло, що комутується напівпровідниковим ключем, в якому  $R$  – сумарний активний опір навантаження, з'єднувальних проводів і ключа,  $L$  – індуктивність кола,  $C$  – ємність конденсатора, що розряджається. Відомо, що максимальне значення коливального розрядного струму  $I_{max}$  за добротності такого контуру  $Q > 2$  прямо пропорційно початковій напрузі на конденсаторі, у разі його розряду, й величині  $\sqrt{C}$  та обернено пропорційно  $\sqrt{L}$  [16]. Тому здебільшого в ЕРУ індуктивність  $L$  зменшують до мінімально можливого значення. Збільшувати амплітуду струму можна, підвищуючи напругу заряду конденсатора і його ємність. Однак збільшення напруги заряду накопичувальних конденсаторів вище 1000 В має серйозні технічні обмеження й істотно посилює небезпеку обслуговування ЕРУ, а збільшення ємності призводить до небажаного збільшення тривалості розрядного імпульсу  $t_{PI}$  (оскільки  $t_{PI} \approx \pi\sqrt{LC}$ ) і розмірів отримуваних іскроерозійних порошоків. Тому в цій роботі було проведено дослідження перехідних процесів за збільшення ємності конденсатора  $C$  під час його розряду на навантаження із примусовим обмеженням тривалості імпульсного струму  $t_{PI}$  за допомогою повністю керованого напівпровідникового ключа (IGBT транзистора), що розриває розрядне коло в необхідний момент часу.

На рис. 1 показано електричну схему установки ОЕІД металів. Заряд накопичувального конденсатора  $C$  здійснюється від

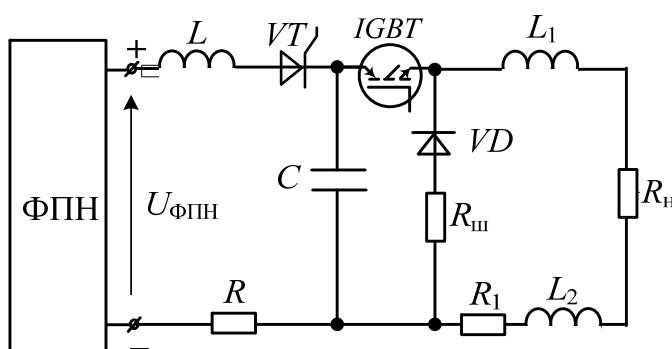


Рис. 1

формувача постійної напруги (ФПН) після відпирання зарядного ключа (тиристора  $VT$ ) зарядним колом ФПН- $L$ - $VT$ - $C$ - $R$ -ФПН. У розрядному колі використовується повністю керований ключ – IGBT транзистор.

Для зменшення індуктивності розрядного кола з'єднання з навантаженням конструктивно виконано коаксіальним кабелем (замість проводу або шини), ін-

дуктивність якого має розподілений характер. У схемі ця розподілена індуктивність показана двома зосередженими дроселями з індуктивностями  $L_1$  й  $L_2$ . Розряд попередньо зарядженого накопичувального конденсатора  $C$  у схемі здійснюється розрядним колом  $C$ - $IGBT$ - $L_1$ - $R_H$ - $L_2$ - $R_1$ - $C$ . Після розмикання кола під час розряду за допомогою  $IGBT$  транзистора шунтувальний ланцюг  $R_H$ - $VD$  шунтує частину кола з індуктивностями  $L_1$  й  $L_2$  для розсіювання накопиченої в них енергії. Інші позначення в схемі:  $R$ ,  $R_1$  – активні опори відповідно зарядного і розрядного кіл,  $R_H$  – лінеаризований опір технологічного навантаження,  $R_H$  – опір шунта,  $VD$  – діод.

**Аналіз середньої швидкості наростання розрядного струму фіксованої тривалості, меншої за тривалість досягнення його максимального значення.** У таких установках здебільшого робочими режимами розряду конденсатора на навантаження є коливальні режими.

*Аналіз коливального розряду конденсатора.* У загальному випадку струм коливального розряду конденсатора у  $RLC$  колі може бути розрахований за формулою [16].

$$i(t) = U_{0Cp} e^{-\omega_{01} t/2Q} \sin(\omega_0 B t) / L \omega_0 B, \quad (1)$$

де  $U_{0Cp}$  – початкова напруга конденсатора під час його розряду,  $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$  і  $Q = \sqrt{L}/(\sqrt{C} \cdot R)$  – відповідно частота власних коливань та добротність розрядного кола,  $B = \sqrt{1 - 1/4Q^2}$ . Зауважимо, що для схеми на рис. 1 індуктивність  $L = L_1 + L_2$ , а опір  $R = R_H + R_1$ .

За добротності  $Q_1 > 2$  (приймається, що  $B \approx 1$  і  $e^{-\omega_0 t/2Q} \approx 1$ ) формула (1) спрощується:

$$i(t) = U_{0Cp} \sin(\omega_0 t) / L \omega_0. \quad (2)$$

Для більшості електроіскрових установок граничним найменшим значенням індуктивності розрядного контуру є  $L \approx 1$  мкГн. У разі під'єднання навантаження за допомогою коаксіального кабелю (замість проводів) можна ще зменшити індуктивність розрядного контуру. На експериментальній установці, де досліджувалися перехідні процеси, індуктивність розрядного кола вдалося зменшити до 0,75 мкГн. Тому під час визначення закономірностей зміни розрядних струмів у разі обмеження їхньої тривалості й збільшення ємності конденсатора, що розряджається, приймалося, що  $L = 0,75$  мкГн = const.

Максимальне значення розрядного струму  $I_{max}$  можна записати відповідно (2) у такому вигляді:

$$I_{max} = A / \omega_0, \quad (3)$$

де  $A = U_{0Cp} / L$  – постійний коефіцієнт, а  $\sin(\omega_0 t_{max}) = 1$  ( $t_{max}$  – момент часу, що відповідає максимальному значенню розрядного струму).

Для будь-якого фіксованого значення часу  $t_{fix} < t_{max}$ , за яке розрядний струм досягне значення  $I_{fix} < I_{max}$ , можна записати, використовуючи (2):

$$A \cdot \sin(\omega_0 t_{fix}) / \omega_0 = A / N, \quad (4)$$

де  $N$  – постійний коефіцієнт (який має розмірність кутової частоти), для якого виконується нерівність  $N > \omega_0$ .

Виконаємо диференціювання функції (2) за параметром  $\omega_0$ . Оскільки функція  $i(\omega_0)$  неперервна і диференційована в усій області визначення, то дістанемо

$$di(\omega_0) / d\omega_0 = A [\omega_0 t \cdot \cos(\omega_0 t) - \sin(\omega_0 t)] / \omega_0^2. \quad (5)$$

Згідно з визначенням коефіцієнт  $A > 0$  і  $\omega_0^2 > 0$ , тоді знак похідної  $di(\omega_0) / d\omega_0$  визначається співмножником у квадратних дужках виразу (5), який позначимо функцією  $f(\omega_0)$ :

$$f(\omega_0) = [\omega_0 t \cdot \cos(\omega_0 t) - \sin(\omega_0 t)], \quad \omega_0 \in (0; N). \quad (6)$$

Очевидно, що за умови  $\omega_0 = 0$  (нижній границі області визначення) функція  $f(\omega_0) = 0$ . Для визначення знаку функції  $f(\omega_0)$  на іншій частині області визначення  $0 < \omega_0 < N$  і для  $\forall t > 0$  досліджувалася її похідна:

$$df(\omega_0) / d\omega_0 = -\omega_0 t^2 \cdot \sin(\omega_0 t). \quad (7)$$

Зрозуміло, що за перший період коливального розряду конденсатора, коли  $\sin(\omega_0 t) > 0$ , можна стверджувати, що  $f'(\omega_0) < 0$  для  $0 < \omega_0 < N$  і  $\forall t > 0$ .

Функція  $f(\omega_0) < 0$  на всій області визначення, а, отже, також і похідна  $di(\omega_0)/d\omega_0 < 0$  для  $\forall t > 0$ ,  $\omega_0 \in (0, N)$ . Тому функція  $i(\omega_0)$  для будь-якого поточного моменту часу  $t_k$  зменшується зі збільшенням  $\omega_0$ , і відповідно зростає зі збільшенням ємності  $C$ , оскільки величина  $\omega_0$  обернено пропорційна величині  $\sqrt{C}$ .

Отже, можна зробити висновок, що за коливальних режимів розряду конденсатора збільшення його ємності призводить до збільшення розрядного струму в будь-який момент часу  $t_{fix} < t_{max}$ .

*Аналіз аперіодичного розряду конденсатора.* У загальному випадку струм аперіодичного розряду конденсатора визначається функцією [16]

$$i(t) = Ae^{-\alpha t} \left( e^{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t} - e^{-\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t} \right) / 2\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \quad (8)$$

де  $\alpha = (R_H + R_1)/2(L_1 + L_2)$ .

Виконаємо диференціювання цієї функції за параметром  $\omega_0$ . Оскільки функція  $i(\omega_0)$  безперервна й диференційована в усій області визначення, то дістанемо

$$di(\omega_0)/d\omega_0 = A\omega_0 e^{-\alpha t} \left[ sh\left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\right) - t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \cdot ch\left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\right) \right] / (\alpha^2 - \omega_0^2). \quad (9)$$

Оскільки множники  $A$  і  $e^{-\alpha t}$  є додатними, і розглядається аперіодичний процес, за якого  $\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$  (тобто  $\omega_0 \in (0, \alpha)$ ), то знак похідної  $di(\omega_0)/d\omega_0$  визначається співмножником у квадратних дужках виразу (9), котрий позначимо, як функцію  $F(\omega_0)$ :

$$F(\omega_0) = \left[ sh\left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\right) - t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \cdot ch\left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\right) \right], \quad \omega_0 \in (0, \alpha). \quad (10)$$

Ясно, що за умови  $\omega_0 = \alpha$  (верхній границі області визначення) функція  $F(\omega_0 = \alpha) = 0$ . Для визначення знаку функції  $F(\omega_0)$  для  $0 < \omega_0 < \alpha$  і  $\forall t > 0$  досліджувалась її похідна:

$$F'(\omega_0) = \omega_0 \cdot t^2 \cdot sh\left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\right). \quad (11)$$

З того, що  $t > 0$  і  $\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} > 0$  випливає, що  $sh\left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\right) > 0$ . Тоді знаючи, що  $\omega_0 > 0$ , можна стверджувати, що  $F'(\omega_0) > 0$  для  $0 < \omega_0 < \alpha$  і  $\forall t > 0$ .

Функція  $F(\omega_0) < 0$  на всій області визначення, а, отже, й похідна  $di(\omega_0)/d\omega_0 < 0$  для  $\forall t > 0$ ,  $\omega_0 \in (0, \alpha)$ . Тому функція  $i(\omega_0)$  для будь-якого поточного моменту часу  $t_k$  спадає зі збільшенням  $\omega_0$ , і відповідно зростає зі збільшенням ємності  $C$ , через те, що величина  $\omega_0$  обернено пропорційна величині  $\sqrt{C}$ .

Отже можна зробити висновок, що за аперіодичних режимів розряду конденсатора (як і в разі коливальних розрядів) збільшення його ємності призводить до збільшення розрядного струму в будь-який момент часу  $t_{fix} < t_{max}$ .

**Визначення закономірності зміни швидкості наростання розрядного струму в навантаженні залежно від величини ємності накопичувального конденсатора й обраної тривалості розряду.** Перехідні процеси розряду конденсатора на навантаження досліджувалися на математичній моделі розрядного кола ОЕІД установки (рис. 1), реалізованій у програмному пакеті Mathlab Simulink. Параметри кола під час моделювання вибиралися відповідними до параметрів експериментальної установки:  $R_H = 0,2$  Ом,  $L_1 = L_2 = 0,7$  мкГн,  $R_1 = 20$  мОм,  $R_{ш} = 0,2$  Ом. Ємність конденсатора  $C$  змінювалась у широкому діапазоні від 6 до 300 мкФ за початкової напруги на конденсаторі  $U_{0cp} = 300$  В. Якщо  $C = 6$  мкФ і  $C = 30$  мкФ, розряд конденсатора має коливальний характер, а, якщо  $C = 300$  мкФ – аперіодичний (за відсутності примусового розмикання ключем розрядного кола).

У певний момент часу  $t_{fix} < t_{max}$  при  $C_{min}$  (де  $t_{max}$  при  $C_{min}$  – момент часу, у який струм, що відповідає найменшому з розглянутих значень ємності  $C$ , досягне свого максимального значення), повністю керований ключ (IGBT) почне розмикати розрядне коло.

На рис. 2 показано криві, які відображають змінення розрядного струму в навантаженні за трьох значень ємності конденсатора :  $C = 6; 30; 300$  мкФ і перериванні цього струму при  $t_{fix} = 3,15$  мкс (тоді як  $t_{max}$  при  $C_{min} = 3,32$  мкс).

У таблиці представлено результати аналізу залежностей, наведених на рис. 2: значення

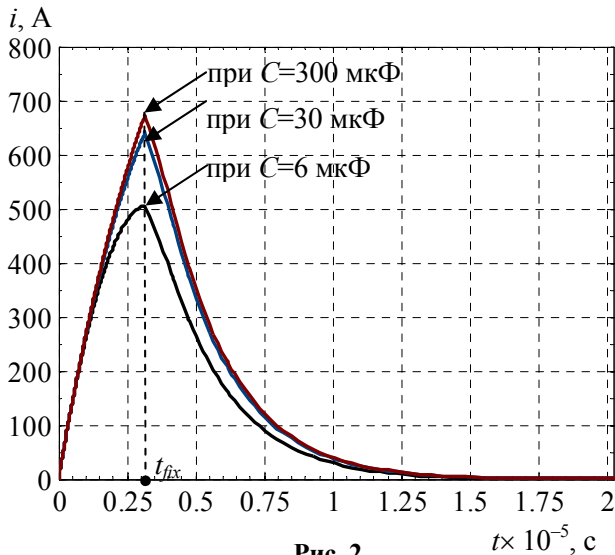


Рис. 2

струму  $I_{fix Ci}$ , якого він досягне за тривалості розряду  $t_{fix} = 3,15$  мкс. Також у таблиці наведено значення коефіцієнта  $k = I_{fix Ci} / I_{fix Cmin}$ , який показує у скільки разів збільшується розрядний струм  $I_{fix}$  за зростання ємності  $C$  від значення  $C_{min}$  до значення  $C_i$ .

Математичний аналіз функцій, якими описуються розрядні струми коливального й

Таблиця

$C$ , мкФ	6	30	300
$t_{fix}$ , мкс	3,15	3,15	3,15
$I_{fix Ci}$ , А	505	641	674
$k = I_{fix Ci} / I_{fix Cmin}$	1	1,27	1,33

аперіодичного розряду конденсатора у разі збільшення його ємності, а також аналіз результатів моделювання, наведених на рис. 2 та в таблиці, показує, що за збільшення ємності  $C$  струм  $I_{fix}$  зростає незалежно від характеру розряду. Водночас необхідно зазначити, що за багаторазового збільшення ємності  $C$  зростання  $I_{fix}$  стає усе менш значущим. Так, зі збільшенням ємності  $C$  від 6 до 30 мкФ (у 5 разів) значення  $I_{fix}$  зростає на 27 %, а в разі її подальшого збільшення від 30 до 300 мкФ (у 10 разів) – усього на 6 %.

Аналіз виразу (8) показує, що, якщо ємність  $C$  перевищить деяке критичне значення  $C_{кр}$  ( $C > C_{кр}$ ), за якого  $\alpha^2 \gg \omega_0^2$ , то вираз (8) може бути перетворений до виду

$$i(t) \approx A(1 - e^{-2\alpha t}) / 2\alpha \approx U_{0Cp} (1 - e^{-(R_H + R_1)t / (L_1 + L_2)}) / (R_H + R_1), \quad (12)$$

з котрого видно, що струм  $i(t)$  не залежить від величини ємності  $C$ . Тобто у разі подальшого збільшення ємності вище значення  $C_{кр}$  крива розрядного струму асимптотично наближується до кривої, описаної виразом (12). Тому надмірне збільшення ємності  $C$  конденсатора несуттєво змінює значення  $I_{fix}$  і швидкість наростання струму  $I_{fix} / t_{fix}$ .

З огляду на те, що  $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$  і  $\alpha = (R_H + R_1) / 2(L_1 + L_2)$ , ємність конденсатора не має значно перевищувати значення  $4(L_1 + L_2) / (R_H + R_1)^2$ . В іншому разі змінення в часі струму розряду конденсатора практично перестає залежати від його ємності (див. (12)).

У загальному випадку вибір оптимального збільшення ємності та визначення діапазону, в якому таке збільшення дає позитивний результат, залежить від усіх інших параметрів кола і потребує подальших досліджень.

З рис. 2 видно, що тривалість розряду в навантаженні становить приблизно 15 мкс за всіх розглянутих значень  $C$ . Проведені нами дослідження показали, що в разі використання в схемі тиристора (тобто напівкерованого ключа) замість IGBT тривалість розряду зі збільшенням  $C$  значно подовжується. Наприклад, при  $C = 300$  мкФ тривалість розряду стає 375 мкс, тобто збільшується у 25 разів, що недопустимо знижує частоту розрядних циклів.

На рис. 3 наведено осцилограму струму в навантаженні, зняту на лабораторній установці (з електричною схемою розрядного кола, як на рис. 1), в якій було реалізовано описаний метод збільшення швидкості наростання струму. Осцилограму отримано за допомогою давача струму з коефіцієнтом перетворення 1:100 (В/А) та осцилографу НАМЕГ–НМ–1507.

Ціна поділок на осцилограмі: за напругою (струмом) – 200 мВ/поділка (20 А/поділка), а за часом – 2 мкс/поділка.

Параметри розрядного кола цієї установки:  $C = 300$  мкФ,  $R_n = 1$  Ом,  $L_1 = L_2 = 0,7$  мкГн,  $R_1 = 20$  мОм,  $R_{ш} = 3$  мОм. Початкова напруга на конденсаторі становила  $U_{0cp} = 130$  В. Використовувався IGBT модуль SKM 300 GB12T4. На рис. 4 відображено результат моделювання розрядного струму в навантаженні такої установки. Порівняльний аналіз кривих на рис. 3 і 4 показує достатню точність їхнього збігу (похибка не перевищує 7 %).

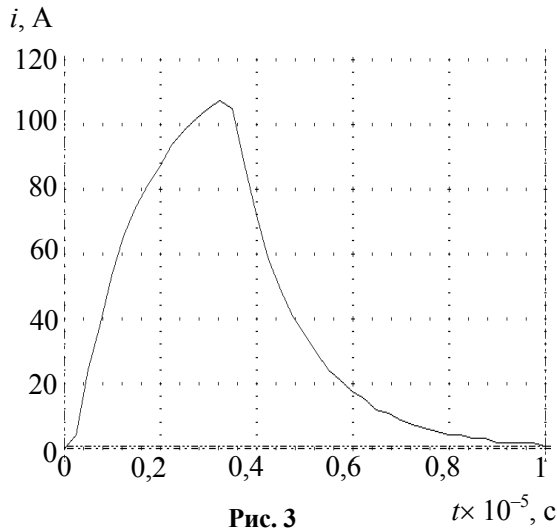


Рис. 3

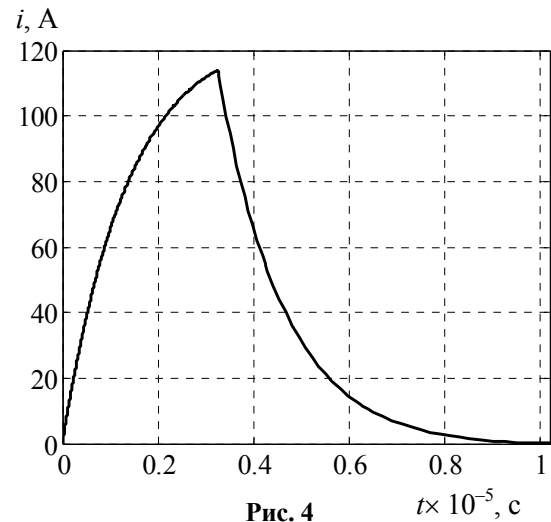


Рис. 4

Раніше аперіодичний режим розряду був неприйнятним для установок ОЕІД металів через неприпустимо велику тривалість протікання розрядного імпульсу в навантаженні та, як наслідок, неможливості реалізації високих частот зарядно-розрядних циклів конденсатора, що формує розрядні імпульси (а, отже, низьку продуктивність порошкоутворення). За використання запропонованого методу аперіодичний режим розряду став бажаним. Це пов'язано з тим, що опір електроіскрового навантаження не є постійним під час розряду конденсатора, а змінюється за законом U-подібної функції (за збільшення струму до максимального значення струму опір навантаження зменшується до мінімальної величини, а після – у разі зменшення розрядного струму знову збільшується) [11]. Для установок ОЕІД металів зменшення опору навантаження (у разі наростання розрядного струму) є додатковим чинником, що впливає на ще більше зростання цього струму, зокрема і його значення  $I_{fix}(t_{fix})$ . Окрім того, характерне підвищення величини опору навантаження наприкінці розрядного імпульсу буде зменшувати динамічні втрати в напівпровідниковому ключі, оскільки за тієї ж самої величини розрядного струму спадання напруги на опорі навантаження буде збільшуватися, а отже, у ньому буде виділятися й більша потужність порівняно з потужністю при розряді конденсатора на лінійний опір  $R_n$ .

У процесі реалізації алгоритму системи керування таких ЕРУ необхідно зважати на те, що внаслідок зміни опору іскроерозійного навантаження від одного розряду до іншого до моменту  $t_{fix}$  струм буде наростати до різних величин. Отже, значення струму і швидкість його наростання будуть змінюватися в деякому діапазоні. У цьому випадку в разі збільшення ємності конденсатора необхідно врахувати можливість того, що за значного зменшенні опору навантаження величина струму може перевищити технологічно припустиме значення. Тому, крім  $t_{fix}$ , задається й гранично припустиме значення струму  $I_{пр}$ , за досягнення якого процес розряду має бути примусово перерваний.

За реалізації такого шляху формування розрядних імпульсів з підвищеною швидкістю наростання струму збільшення ємності конденсатора ЕРУ призводить не тільки до збільшення розрядного струму й швидкості його наростання, але й до збільшення середньої імпульсної потужності, виділюваної в навантаженні.

**Висновки.** Досліджено закономірності змінення вихідних струмів напівпровідникових електророзрядних установок з накопичувальним конденсатором залежно від ємності цього конденсатора і умов обмеження тривалості струмів. Аналітично доведено, що для довільного режиму (коливального чи аперіодичного) розряду конденсатора збільшення його ємності за незмінних інших параметрів розрядного кола призводить до збільшення величини вихідного струму в будь-який фіксований момент часу ( $t_{fix}$ ), менший за момент часу ( $t_{max}$ ), що відповідає максимальній величині цього струму.

Базуючись на цьому, запропоновано метод підвищення швидкості наростання імпульсних струмів у навантаженні, що ґрунтується на виборі розрядного конденсатора більшої ємності порівняно з ємністю, достатньою для реалізації потрібного технологічного режиму, і примусовому перериванні струму в навантаженні в певний момент часу, що відповідає певній фіксованій тривалості розряду (яка менша за час досягнення максимального значення струму розряду конденсатора з ємністю, достатньою для реалізації потрібного технологічного режиму). Використання цього методу для установок з іскроерозійним навантаженням, опір якого не є постійним, а змінюється за законом U-подібної функції, буде сприяти більш інтенсивному зростанню струму, а отже, і швидкості його наростання у навантаженні.

Фінансується за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ"), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 04.07.2017 р., протокол №11. Державний реєстраційний номер роботи 0117U007713. 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. 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/techmed2016.03.009>.
4. Білецький О.О., Супруновська Н.І., Щерба А.А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їх початкових і кінцевих напруг. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.01.003>.
5. Liu Y., Li X., Li Y., Zhao Zh., Bai F. The lattice distortion of nickel particles generated by spark discharge in hydrocarbon dielectric mediums. *Applied Physics A*. 2016. Vol. 122. Pp. 174-1 – 174-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9698-2>.
6. Casanueva R., Azcondo F.J., Branas C., Bracho S. Analysis, design and experimental results of a high frequency power supply for spark erosion. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2005. Vol. 20. Pp. 361–369. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.842992>.
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
8. 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>.
9. 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 Performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7.
10. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Анализ электромагнитных процессов в выходной цепи генератора разрядных импульсов с нелинейной моделью плазмозероизионной нагрузки при изменении их параметров в широких диапазонах. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 87–95. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.01.087>.
11. Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Многоуровневая модель взаимозависимых переходных процессов в цепях электроразрядных установок со стохастической нагрузкой. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 5. С. 5–13.
12. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Модель выходной цепи генератора разрядных импульсов с плазмозероизионной нагрузкой, адекватная в широких диапазонах изменений их параметров. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 6. С. 69–77.
13. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекося А.Е., Залуцкий В.П., Козырский В.В., Лопатько К.Г. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состоя-

- ние его электроэрозионных частиц. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 6. № 5 (60). С. 66–72.
14. Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. Переходные процессы в электрических цепях со стохастической нагрузкой, характеризующейся непрерывной случайной величиной. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 17–19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.017>
15. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 3. С. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.043>
16. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Санкт-Петербург: Питер, 2003. Т. 2. 576 с.

## INFLUENCE OF THE CAPACITANCE OF THE CAPACITOR OF THE DISCHARGE CIRCUIT OF SEMICONDUCTOR ELECTRIC DISCHARGE INSTALLATIONS ON THEIR OUTPUT CURRENTS OF LIMITED DURATION

**A.A. Shcherba, N.I. Suprunovska, M.O. Lomko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@gmail.com)

*Based on the analysis of transient processes of oscillatory and aperiodic discharges of the storage capacitor of the electric discharge installation to the load, it is proved that an increase in its capacity always causes an increase in the value of the discharge current corresponding to a fixed duration of the discharge, less than the duration of reaching the maximum value of the discharge current. For the capacities of the discharge capacitor varied over a wide range, the change in the value of the discharge current in the load during its forced interruption at a certain time was studied. Based on this study, we proposed a method for increasing the rate of rising of impulse currents in the load, which consists in choosing a discharge capacitor with a larger capacity compared with a capacity sufficient to implement the desired technological mode, and forced interrupting the current in the load at a certain point in time, which corresponds to a certain fixed duration discharge (less than the duration of reaching the maximum value of the discharge current when the capacitor capacity is sufficient to implement the required technological mode). The forced limitation of the discharge duration is carried out by a fully controlled semiconductor switch. This method can be used as the basis for the production of spark erosion nano-sized powders of metals and alloys. References 16, figures 4, table.*

**Keywords:** capacitor discharge, rate of current rise, transient process, capacitor capacity, discharge duration.

1. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of nonlinear parametric capacitive energy sources for a discharge pulse technologies. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo universytetu korablebuduvania*. Mykolaiv, 2010. No 4. Pp. 118–124. (Rus)
2. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test devices with capacitive energy storage. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2007. No 6. Pp. 70–75. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/142945>. (Rus)
3. 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. № 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.
4. Beletsky O.A., Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Dependences of power characteristics of circuit at charge of supercapacitors on their initial and final voltages. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 3–10. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.003>. (Ukr)
5. Liu Y., Li X., Li Y., Zhao Zh., Bai F. The lattice distortion of nickel particles generated by spark discharge in hydrocarbon dielectric mediums. *Applied Physics A*. 2016. Vol. 122. Pp. 174-1 – 174-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9698-2>.
6. Casanueva R., Azcondo F.J., Branas C., Bracho S. Analysis, design and experimental results of a high frequency power supply for spark erosion. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2005. Vol. 20. Pp. 361–369. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.842992>.
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
8. 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>.
9. 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 Performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>



10. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkassky O.P. The analysis of electromagnetic processes in output circuit of the generator of discharge pulses with non-linear model of plasma-erosive load at change their parameters in wide ranges. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 87–95. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.01.087>.
11. Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Multilevel model of interdependent transients in circuits of electro-discharge installations with stochastic load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 5. Pp. 5–13. (Rus)
12. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkassky O.P. Model of an output circuit of the discharge pulses generator with a plasma-erosive load adequate in wide range of changes of their parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 6. Pp. 69–77. (Rus)
13. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.E., Zalutsky, V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G. Influence of discharge pulses duration in a layer of iron granules on the size and structurally-phase conditions of its electroerosion particles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. Vol. 6. No 5 (60). Pp. 66–72. (Rus)
14. Ivashchenko D.S., Suprunovska N.I. Transients in circuits with stochastic load, which characterized by continuous random variable. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 4. Pp. 17–19. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.04.017>.
15. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.03.043>.
16. Demirchyan K.S., Nejman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Electrical engineering theory*. Sankt-Petersburg: Piter, 2003. Vol. 2. 576 p. (Rus)

Надійшла: 23.12.2020

Received: 23.12.2020