

УДК 621.3.011:672.372

### РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БІПОЛЯРНИХ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ У НАВАНТАЖЕННІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК ІЗ НАКОПИЧУВАЛЬНИМ КОНДЕНСАТОРОМ

Н.І. Супруновська<sup>2\*</sup>, докт.техн.наук, Ю.В. Перетятко<sup>1</sup>, канд.техн.наук, С.С. Розіскулов<sup>2</sup>,  
канд.техн.наук, В.В. Михайленко<sup>1</sup>, канд.техн.наук, В.І. Чибеліс<sup>1</sup>, канд.техн.наук, В.С. Олійник<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>- НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського",

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

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

<sup>2</sup>- Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

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

*Запропоновано метод регулювання параметрів розрядних імпульсних струмів (зменшення їхньої тривалості та збільшення амплітуди й швидкості наростання) напівпровідникових електророзрядних установок зі зворотним зв'язком за напругою з метою інтенсифікації динамічного силового впливу на їхнє технологічне навантаження. Метод базується на використанні двох пар зарядних і розрядних напівпровідникових (тиристорних) ключів, що дозволяють формувати у навантаженні біполярні імпульсні струми, та реалізації накладання процесів наступного заряду конденсатора на попередній його розряд шляхом змінення часу включення відповідних пар зарядних тиристорів. На основі проведеного аналізу взаємозв'язаних перехідних процесів у розгалуженому електричному колі змінної структури таких установок визначено залежності коефіцієнтів підвищення зарядної напруги та зарядного і розрядного струмів конденсатора від коефіцієнта перекриття його заряду і розряду при різних значеннях добротності зарядного кола. Бібл. 15, рис. 5.*

**Ключові слова:** заряд конденсатора, розряд конденсатора, біполярний імпульс, добротність, напруга заряду, імпульсний струм, тривалість розряду, зворотний зв'язок за напругою.

**Вступ.** Електророзрядні установки з накопичувальними конденсаторами знайшли широке використання при реалізації сучасних технологій електрогідравлічної обробки матеріалів [1], отримання електроіскрових порошків з унікальними властивостями [4, 7, 13], фізичного моделювання електромагнітних впливів, які виникають при ударах блискавок і коротких замиканнях потужних електромереж [3]. Однією з найбільш складних проблем, які необхідно вирішувати при розробці таких установок, є підвищення імпульсної потужності [1, 3] та швидкості наростання струму в навантаженні [8], що дає змогу інтенсифікувати силовий вплив на навантаження (зокрема силовий вплив плазмового каналу у воді на металеві гранули в установках електроімпульсного диспергування). Вирішення цієї проблеми зазвичай здійснюється шляхом структурно-параметричного синтезу кіл накопичувальних конденсаторів електророзрядних установок на різні напруги [1, 3, 8]. Підвищення енергетичної та технологічної ефективності більшості електророзрядних установок здійснюється за рахунок оптимізації ємності їхніх накопичувальних конденсаторів, напруги їхнього заряду та частоти повних розрядів [5].

Окрім цього, існує практична зацікавленість до створення електророзрядних установок, які здатні зменшувати тривалість імпульсного струму при підвищенні його величини та швидкості наростання у навантаженні, оскільки це дає можливість зменшувати максимальні розміри отримуваних електроіскрових порошків [2, 11] та покращувати їхні властивості [12, 14]. Створення таких установок ускладнюється при необхідності реалізації примусового обмеження величини та тривалості імпульсного струму у навантаженні [9], урахуванні його нелінійного опору [10] та процесів енергообміну між конденсаторами [6], які заряджаються на різні напруги та розряджаються у різні моменти часу [1, 6].

Для підвищення імпульсної потужності та швидкості наростання струму в навантаженні у роботі досліджувалася напівпровідникова електророзрядна установка з одним накопичувальним конденсатором, двома парами напівпровідникових ключів як у зарядному, так і у розрядному колах та позитивним зворотним зв'язком величини напруги заряду конденсатора з величиною напруги його

попереднього розряду. Для зменшення інтенсивності електрохімічних процесів, що призводять до посиленого спрацювання одного з електродів у випадку однополярних імпульсів, у навантаженні формувалися біполярні імпульсні струми регульованих величини і тривалості.

**Метою** роботи є аналіз перехідних процесів у розгалуженому електричному колі змінної структури напівпровідникових електророзрядних установок, які мають зворотний зв'язок за напругою та формують у навантаженні біполярні імпульсні струми з регульованими параметрами, що в результаті дозволяє збільшити амплітуду та швидкість наростання розрядних імпульсів.

На рис. 1 показано чотириконтурний формувач розрядних імпульсів (ФРІ) з накопичувальним конденсатором  $C$ , заряд якого здійснюється від формувача постійної напруги (ФПН) через дросель індуктивністю  $L_1$  та активний опір  $R_1$  (який є загальним активним опором цього дроселя та інших елементів зарядного контуру конденсатора) при одночасному включенні тиристорних ключів  $VT_1$  і  $VT_2$  або  $VT_5$  і  $VT_6$ .

При одночасному включенні ключів  $VT_3$  і  $VT_4$  або  $VT_7$  і  $VT_8$  здійснюється розряд конденсатора через дросель індуктивністю  $L_2$  (яка є загальною індуктивністю елементів розрядного кола конденсатора) на активний опір  $R_2$ , що є загальним активним опором власне навантаження та інших елементів розрядного кола.

Оскільки схема містить по дві пари зарядних ( $VT_1, VT_2$  та  $VT_5, VT_6$ ) і розрядних ( $VT_3, VT_4$  та  $VT_7, VT_8$ ) тиристорів, то вона дозволяє формувати біполярні імпульси у навантаженні та регулювати їхню тривалість.

При аналізі зарядно-розрядних процесів ці тиристори вважалися ідеальними ключами, тобто такими, що забезпечують миттєву комутацію і відсутність втрат при протіканні в них струму. Параметри елементів схеми обрано таким чином, щоб перехідні процеси заряду і розряду конденсатора мали коливальний характер:  $R_1 = 0,03$  Ом,  $L_2 = 4$  мкГн,  $C = 100$  мкФ. Опір навантаження (з урахуванням опору елементів розрядного кола) задано  $R_2 = 0,25$  Ом (відповідно до опору навантаження реальних установок електроіскрового диспергування металевих гранул). Напруга ФПН  $U_{\text{ФПН}} = 500$  В. Для регулювання тривалості заряду конденсатора індуктивність зарядного дроселя варіювалася ( $L_1 = \text{var}$ ).

Реалізація коливальних перехідних процесів заряду і розряду конденсатора забезпечує можливість природного запирання тиристорних ключів при зміні напрямку струму у контурі. Функціонування схеми на рис. 1 відбувається у такий спосіб: після подачі сигналів управління на тиристорні ключі  $VT_1$  і  $VT_2$  розпочинається заряд конденсатора  $C$  (через опір  $R_1$  та дросель  $L_1$ ), після закінчення якого (заряд закінчується, коли струм у колі досягне нуля і почне змінювати свій знак) ключі  $VT_1$  і  $VT_2$  запираються. Далі подаються сигнали управління на відпирання розрядних тиристорів  $VT_3$  та  $VT_4$  і розпочинається розряд конденсатора  $C$  на навантаження  $R_2$  через індуктивність  $L_2$ . Оскільки параметри елементів розрядного кола вибрані таким чином, щоб відбувався коливальний перехідний процес (при якому добротність розрядного кола  $Q_2 = (L_2 / C)^{0,5} / R_2 > 0,5$ ), то розряд конденсатора  $C$  закінчиться його перезарядом до напруги зворотної полярності [3, 6, 7]. При цьому струм у навантаженні досягне нуля і почне змінювати свій напрям, що забезпечить природне відключення розрядних комутаторів  $VT_3$  і  $VT_4$ . Після цього надходить сигнал на включення зарядних тиристорів  $VT_5, VT_6$  і починається повторний процес заряду конденсатора  $C$ , напруга на якому  $U_{C0} < 0$ . Завдяки зворотному під'єднанню тиристорів  $VT_5, VT_6$  реалізується негативний зворотний зв'язок за напругою, який забезпечує зменшення напруги такого повторного заряду конденсатора порівняно з умовами  $U_{C0} = 0$ . Після закінчення повторного заряду конденсатора (напруга заряду якого буде мати від'ємну полярність) і подачі сигналів управління відкриваються розрядні тиристори  $VT_7$  та  $VT_8$  і розпочинається повторний розряд конденсатора  $C$  на навантаження  $R_2$  через  $L_2$ , після закінчення якого перший повний зарядно-розрядний цикл вважається завершеним. Оскільки залишкова напруга (напруга перезаряду) конденсатора має зворотну (відносно напруги його заряду) полярність, то при наступному заряді конденсатора через ключі  $VT_1$  і  $VT_2$  знову реалізується негативний зворотний зв'язок за напругою, який зменшить напругу його заряду.

Якщо примусово скорочувати тривалість розрядних імпульсів, розпочинаючи черговий заряд конденсатора раніше, ніж закінчиться його попередній розряд, то можна регулювати глибину зворотного зв'язку за напругою і навіть змінювати його характер з негативного на позитивний, що дасть

можливість підвищити напругу заряду конденсатора і параметри розрядних імпульсів (збільшити амплітуду та швидкість наростання розрядних струмів та зменшити їхню тривалість).

У загальному випадку струм коливального заряду конденсатора від ФПН при ненульовій початковій напрузі на ньому визначається виразом [7]

$$i_{\text{зар}}(t) = (U_{\text{ФПН}} - U_{C0\text{зар}}) \cdot e^{-\omega_{0\text{зар}} \cdot t / 2Q_1} \sin(A_1 \omega_{0\text{зар}} t) / L_1 A_1 \omega_{0\text{зар}}, \quad (1)$$

де  $A_1 = \sqrt{1 - 1/4Q_1^2}$ ,  $U_{C0\text{зар}}$  – початкове значення напруги заряду конденсатора;  $L_1$  і  $Q_1 = (L_1 / C)^{0.5} / R_1$  – відповідно індуктивність і добротність зарядного кола;  $\omega_{0\text{зар}} = \sqrt{1/L_1 C}$  – кутова частота власних коливань зарядного кола ФПН- $R_1$ - $VT_1$ - $C$ - $L_1$ - $VT_2$ -ФПН (або ФПН- $R_1$ - $VT_5$ - $C$ - $VT_6$ - $L_1$ -ФПН).

Напруга на конденсаторі за таких умов його заряду розраховується за формулою

$$u_{C\text{зар}}(t) = U_{\text{ФПН}} - (U_{\text{ФПН}} - U_{C0\text{зар}}) \cdot e^{-\omega_{0\text{зар}} \cdot t / 2Q_1} [\sin(A_1 \omega_{0\text{зар}} t) / 2Q_1 A_1 + \cos(A_1 \omega_{0\text{зар}} t)]. \quad (2)$$

Тиристорні ключі  $VT_1$  та  $VT_2$  (або  $VT_5$  і  $VT_6$ ) запираються в момент часу, коли струм  $i_{\text{зар}}(t)$  спадає до нуля і починає змінювати свою полярність. Напруга на конденсаторі в цей момент часу досягає свого максимального значення, яке залежить від добротності зарядного кола.

Момент часу  $t_{U_{C\text{max}}}$ , коли напруга на конденсаторі буде максимальна  $U_{C\text{max}} = u_{C\text{зар}}(t_{U_{C\text{max}}})$ , визначається з рівняння  $du_{C\text{зар}} / dt = 0$

$$du_{C\text{зар}} / dt = (U_{\text{ФПН}} - U_{C0\text{зар}}) \cdot e^{-\omega_{0\text{зар}} \cdot t / 2Q_1} \cdot \omega_{0\text{зар}} (A_1 + 1/4Q_1^2 A_1) \sin \omega_{0\text{зар}} A_1 t = 0. \quad (3)$$

Звідки

$$t_{U_{C\text{max}}} = \pi / A_1 \omega_{0\text{зар}}. \quad (4)$$

Вплив початкового значення напруги конденсатора  $U_{C0\text{зар}}$  на його максимальне зарядне значення  $U_{C\text{max}}$  показано у роботі [3], тому у даній статті не наводиться.

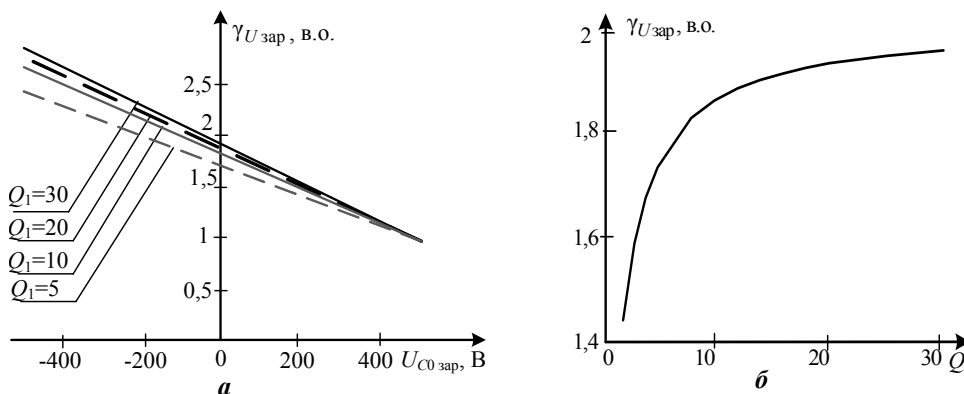


Рис. 2

На рис. 2, а показано залежність коефіцієнта підвищення напруги заряду конденсатора

$\gamma_{U_{\text{зар}}} = U_{C\text{max}} / U_{\text{ФПН}}$  від початкової напруги на ньому  $U_{C0\text{зар}}$ , а на рис. 2, б – від добротності зарядного кола  $Q_1$ .

Коефіцієнт підвищення напруги заряду конденсатора  $\gamma_{U_{\text{зар}}}$  можна визначити за фор-

мулою [7]

$$\gamma_{U_{\text{зар}}} = 1 + (1 - U_{C0\text{зар}} / U_{\text{ФПН}}) e^{-\pi / Q_1 A_1}. \quad (5)$$

Зазвичай для відновлення запираючих властивостей тиристорних комутаторів необхідна невелика пауза, після витримки якої подаються сигнали управління на пару розрядних тиристорів  $VT_3$  та  $VT_4$  (або  $VT_7$  й  $VT_8$ ).

Струм у розрядному колі можна знайти з виразу [7]

$$i_{\text{розр}}(t) = U_{C0\text{розр}} e^{-\omega_{0\text{розр}} \cdot t / 2Q_2} \sin(\omega_{0\text{розр}} A_2 t) / L_2 \omega_{0\text{розр}} A_2, \quad (6)$$

де  $A_2 = \sqrt{1 - 1/4Q_2^2}$ ,  $\omega_{0\text{розр}}$  – кутова частота власних коливань розрядного контуру  $C$ - $VT_3$ - $R_2$ - $L_2$ - $VT_4$  або ( $C$ - $VT_8$ - $L_2$ - $R_2$ - $VT_7$ ),  $U_{C0\text{розр}}$  – початкове значення напруги розряду конденсатора.

Момент часу  $t_{I_{\text{max}}}$ , коли розрядний струм досягає свого максимального значення, можна отримати з виразу (6), розв'язавши рівняння  $di_{\text{розр}}(t)/dt = 0$

$$t_{I_{\text{max}}} = \text{arctg}(2Q_2 A_2) / (\omega_{0\text{розр}} A_2). \quad (7)$$

Значимо, що зворотний заряд конденсатора по колу ФПН- $R_1$ - $VT_5$ - $C$ - $VT_6$ - $L_1$ -ФПН здійснюється від від'ємного початкового значення напруги на конденсаторі  $U_{C0 \text{ зар}} < 0$  до свого від'ємного максимального (за модулем) значення, яке розраховується за виразом (2). Зворотний розряд конденсатора по колу  $C$ - $VT_8$ - $L_2$ - $R_2$ - $VT_7$  закінчується перезарядом конденсатора вже до додатного значення, тому черговий його заряд почнеться при  $U_{C0 \text{ зар}} > 0$ .

Напруга у розрядному колі розраховується за формулою [7]

$$u_{C \text{ розр}}(t) = U_{C0 \text{ розр}} \cdot e^{-\alpha_0 \text{ розр} \cdot t / 2Q_2} \left[ \sin(A_2 \omega_{0 \text{ розр}} t) / 2Q_2 A_2 + \cos(A_2 \omega_{0 \text{ розр}} t) \right]. \quad (8)$$

Таким чином, кожний наступний зарядно-розрядний цикл починається з ненульових початкових умов  $U_{C0 \text{ зар}} \neq 0$ ,  $U_{C0 \text{ розр}} \neq 0$ , проаналізувати які дозволяють вирази (1)–(8) лише за умови повністю завершених зарядів і розрядів конденсатора (тобто за наявності достатніх пауз між подачею сигналів управління на відповідні тиристорні ключі).

За умови витримки достатніх пауз між подачею сигналів управління на пари зарядних і розрядних тиристорів тривалість розрядного імпульсу у навантаженні  $\tau_{PI}$  розраховується за виразом [7]

$$\tau_{PI} = \pi / A_2 \omega_{0 \text{ розр}}. \quad (9)$$

Попередні дослідження показали, що якщо подавати сигнал управління на відповідні пари зарядних тиристорів раніше, ніж закінчиться попередній розряд конденсатора (тобто реалізувати накладання початку чергового заряду конденсатора на його попередній розряд), то можна змінювати глибину зворотного зв'язку напруги чергового заряду конденсатора із залишковою напругою його попереднього розряду і таким чином впливати на параметри розрядних імпульсів (їхні амплітудні значення та тривалості).

Встановимо залежність тривалості імпульсного струму в навантаженні від початкового моменту накладання наступного зарядного процесу на ще незавершений розрядний процес. Для цього зменшимо тривалість затримки чергового включення пар зарядних тиристорів  $VT_1+VT_2$  (або  $VT_5+VT_6$ ) відносно моменту попереднього включення пар розрядних тиристорів  $VT_3+VT_4$  (або  $VT_8+VT_7$ ). При цьому параметри елементів схеми та період надходження імпульсів керування на тиристорні ключі залишалися незмінні.

Аналіз зарядно-розрядних процесів виконувався для різних значень добротності  $Q_1$  (30; 20; 10; 5) зарядного кола конденсатора ФПН- $R_1$ - $VT_1$  ( $VT_5$ )- $C$ - $VT_2$  ( $VT_6$ )- $L_1$  за умови, що вона змінювалася за рахунок зміни індуктивності кола  $L_1 = \text{var} = (81; 36; 9; 2,25)$  мкГн. Період сигналів управління для всіх пар тиристорів  $T = 2000$  мкс (цього часу вистачає на повний зарядно-розрядний цикл із двох зарядів і двох розрядів конденсатора), а максимальний час затримки між сигналами управління першої ( $VT_1+VT_2$ ) і другої ( $VT_5+VT_6$ ) пар зарядних тиристорів  $\Delta_{\text{max}} = 900$  мкс.

Моделювання зарядно-розрядних процесів проводилося із використанням програмного пакету MatLab R2009b, розрахунки та обробка результатів – пакету MatCAD 14.

Для оцінки змінення характеру та глибини зворотного зв'язку за напругою при скороченні затримки чергового включення пар зарядних тиристорів було введено коефіцієнт перекриття  $k_\Delta$ , який відображає ступінь (відсоток) накладання наступного зарядного процесу на ще не завершений розрядний процес конденсатора

$$k_\Delta = \Delta \cdot 100\% / \tau_{PI}, \quad (10)$$

де  $\Delta = \text{var} (0 \dots \tau_{PI})$  – змінна тривалість перекриття у часі зарядного і розрядного циклів у результаті зміщення моменту чергового включення зарядних тиристорів відносно їхнього попереднього включення.

На рис. 3 показано функціональні залежності приведеної тривалості розрядного імпульсу за умови накладання заряду і розряду конденсатора  $\tau_{PI}^{\text{var}*}$  від коефіцієнта перекриття  $k_\Delta$  при різних значеннях добротності зарядного кола  $Q_1 = 30; 20; 10; 5$ . Приведена тривалість розрядного імпульсу визначалася за формулою

$$\tau_{PI}^{\text{var}*} = \tau_{PI}^{\text{var}} / \tau_{PI}, \quad (11)$$

де  $\tau_{PI}^{\text{var}}$  – змінна величина тривалості розрядного імпульсу у навантаженні за умови накладання заряду і розряду конденсатора.

Як видно з рис. 3, збільшення  $k_\Delta$  призводить до зменшення  $\tau_{PI}^{\text{var}}$ , причому чим менша величина  $Q_1$ , тим інтенсивніше це змен-

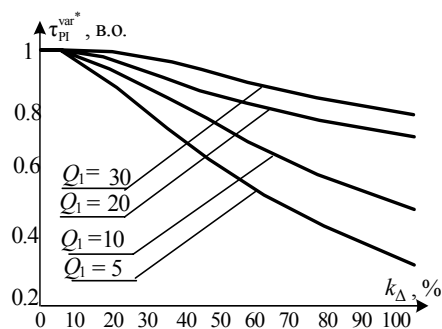


Рис. 3

шення. Так при  $Q_1=30$  і збільшенні  $k_\Delta$  від 0 до 100 % значення  $\tau_{p1}^{var*}$  зменшується в 1,4 рази, а при  $Q_1=5$  – у 6,3 разів. Таким чином, необхідне регулювання тривалості струму у розрядному колі можна реалізувати за рахунок накладання зарядного процесу на ще незавершений розрядний шляхом регулювання моментів подачі імпульсів керування на зарядні тиристори установки та змінення добротності зарядного кола.

Також було визначено закономірності підвищення величини зарядного і розрядного струмів конденсатора в залежності від коефіцієнта перекриття  $k_\Delta$ .

Було введено коефіцієнт підвищення струму зарядного контуру  $\gamma_{Iзар}$ , який розраховується як

$$\gamma_{Iзар} = I_{зар\ max\ \Delta} / I_{зар\ max\ 0} \quad (12)$$

де  $I_{зар\ max\ \Delta}$  та  $I_{зар\ max\ 0}$  – максимальні струми заряду конденсатора відповідно за наявності накладання зарядного процесу на розрядний і при його відсутності.

На рис. 4 показано залежності коефіцієнтів  $\gamma_{Uзар}$  (рис. 4, а) та  $\gamma_{Iзар}$  (рис. 4, б) від коефіцієнту  $k_\Delta$  при різних значеннях  $Q_1$ . Із рис. 4, а видно, що для всіх розглянутих значень  $Q_1$  коефіцієнт  $\gamma_{Uзар}$  (а отже і напруга заряду конденсатора) майже не змінюється при змінненні коефіцієнта  $k_\Delta$  від 0 до 20 %. При подальшому зростанні  $k_\Delta$  коефіцієнт  $\gamma_{Uзар}$  починає зростати, що є бажаним для подальшого підвищення амплітуди і швидкості наростання розрядного струму. Характерною точкою є значення  $k_\Delta = 35$  %, коли коефіцієнт підвищення напруги заряду стає однаковим ( $\gamma_{Uзар} = 1,8$ ) для всіх значень добротності  $Q_1$ . Слід зазначити, що чим вища добротність зарядного контуру, тим меншим є збільшення зарядної напруги конденсатора. Так при  $Q_1=30$  при зростанні коефіцієнта  $k_\Delta$  від 35 до 100 % коефіцієнт  $\gamma_{Uзар}$  змінюється від 1,8 до 2,3, тоді як при  $Q_1=5$  – від 1,8 до 3,5.

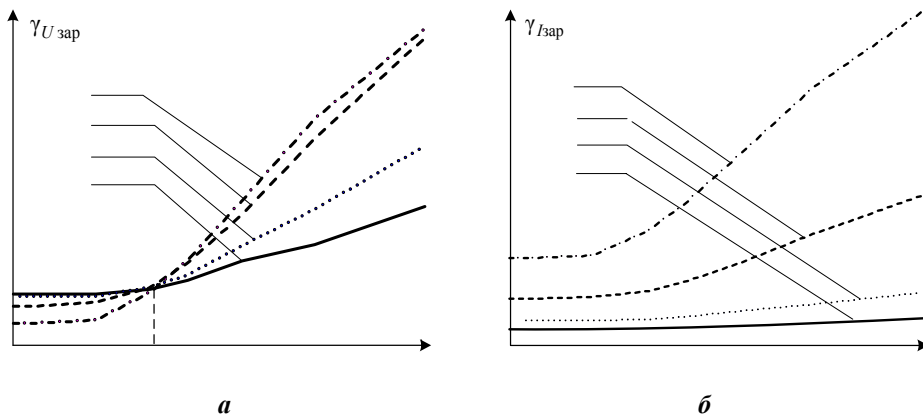


Рис. 4

Згідно з рис. 4, б коефіцієнт  $\gamma_{Iзар}$  (а отже і струм заряду конденсатора) при великій добротності кола  $Q_1=30$  практично не залежить від  $k_\Delta$ , тоді як зі зменшенням  $Q_1$  вплив величини  $k_\Delta$  на  $\gamma_{Iзар}$  починає посилюватися, і коефіцієнт підвищення струму (а отже і струм) зарядного кола зростає зі збільшенням  $k_\Delta$ . Так при  $Q_1=5$  максимальний за-

рядний струм конденсатора при зростанні  $k_\Delta$  від 20 до 80 % збільшується у 3 рази. Зазначимо, що при змінненні коефіцієнта  $k_\Delta$  від 0 до 20 % коефіцієнти  $\gamma_{Iзар}$  практично не змінюються.

Рис. 5 відображає залежності коефіцієнта підвищення розрядного струму конденсатора  $\gamma_{Iрозр}$  (який за аналогією з коефіцієнтом  $\gamma_{Iзар}$  розраховується як  $\gamma_{Iрозр} = I_{розр\ max\ \Delta} / I_{розр\ max\ 0}$ , де  $I_{розр\ max\ \Delta}$  та  $I_{розр\ max\ 0}$  – максимальні струми розряду конденсатора відповідно при наявності накладання зарядного процесу на розрядний і коли накладання відсутнє) від коефіцієнта  $k_\Delta$  при різних значеннях  $Q_1$ .

У послідовності перших трьох зарядно-розрядних циклів представлено другий (рис. 5, а) і третій (рис. 5, б) розряди конденсатора, на які вже може впливати наявність накладання наступного заряду конденсатора на попередній його розряд. Коефіцієнти підвищення розрядного струму конденсатора при другому та третьому розрядах конденсатора розраховуються за формулами

$$\gamma_{Iрозр2} = I_{розр2\ max\ \Delta} / I_{розр2\ max\ 0} \quad , \quad \gamma_{Iрозр3} = I_{розр3\ max\ \Delta} / I_{розр3\ max\ 0} \quad , \quad (13, 14)$$

де  $I_{розр2\ max\ \Delta}$  ( $I_{розр3\ max\ \Delta}$ ) та  $I_{розр2\ max\ 0}$  ( $I_{розр3\ max\ 0}$ ) – максимальні струми другого (третього) розряду конденсатора відповідно при наявності накладання зарядного процесу на розрядний і коли накладання відсутнє.

Як видно з рис. 5, для всіх розглянутих значень  $Q_1$  коефіцієнти  $\gamma_{Iрозр}$  (аналогічно коефіцієнтам  $\gamma_{Iзар}$ ), а отже і амплітуди розрядного струму у наступних після першого розрядах конденсатора майже не змінюються при змінненні коефіцієнта  $k_\Delta$  від 0 до 20 %. З подальшим зростанням  $k_\Delta$  коефіцієнти  $\gamma_{Iрозр}$  збільшуються. Причому, чим менша добротність  $Q_1$ , тим інтенсивніше це збільшення. Так при  $Q_1=30$

$$Q_1 = 10$$

$$Q_1 = 20$$

$$Q_1 = 30$$

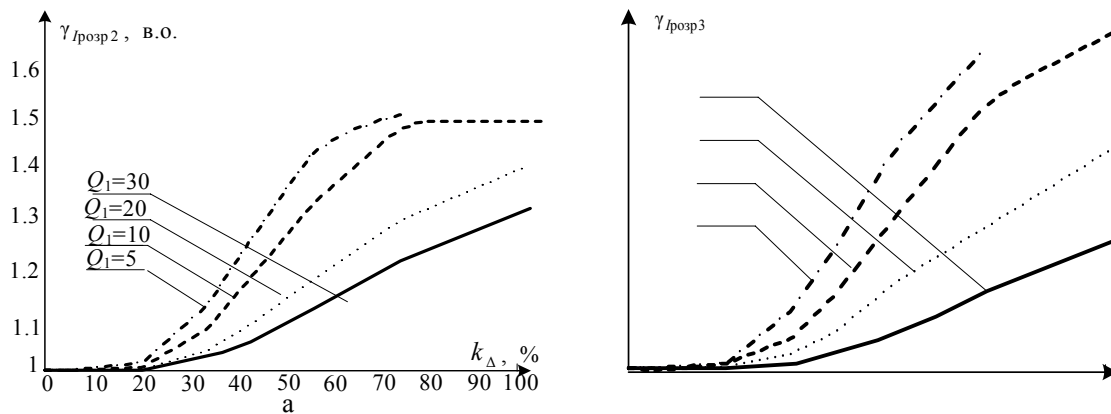


Рис. 5

максимальний струм конденсатора другого і третього розрядів при зростанні  $k_{\Delta}$  від 20 до 70 % збільшується у 1,2 рази, а при  $Q_1 = 5$  – у 1,5 рази.

Таким чином, збільшення коефіцієнта  $k_{\Delta}$  призводить до скорочення тривалості розрядного струму та збільшення його максимальної величини, а отже – до підвищення швидкості наростання струму у навантаженні, що є важливим для більшості електророзрядних технологій. Наприклад, такий підхід дозволяє розширити можливості для отримання нанорозмірних порошоків в установках електроіскрового диспергування шару металевих гранул у діелектричній рідині.

При цьому необхідно зазначити, що збільшення коефіцієнта  $k_{\Delta}$  вище 20 % (при якому негативний зворотний зв'язок за напругою змінюється на позитивний) призведе до збільшення втрат електричної енергії в зарядному колі (оскільки при додатному зворотному зв'язку за напругою відбувається наростання напруги заряду конденсатора від зворотної полярності до прямої, а отже на відрізку наростання напруги до нульового значення енергія конденсатора зменшується, а її втрати в колі зростають). Тому енергоефективність меж збільшення коефіцієнта  $k_{\Delta}$  ще потребує додаткових досліджень.

**Висновки.** Запропоновано метод регулювання параметрів розрядних імпульсних струмів (зменшення їхньої тривалості та збільшення амплітуди й швидкості наростання) у напівпровідникових електророзрядних установках, які мають зворотний зв'язок за напругою та формують у навантаженні біполярні імпульсні струми. Метод базується на використанні накладання процесів наступного заряду конденсатора на попередній його розряд шляхом змінення часу включення відповідних пар зарядних тиристорів.

Даний підхід дозволяє регулювати глибину зворотного зв'язку за напругою та змінювати його характер з негативного на позитивний, що дає можливість підвищити напругу заряду конденсатора і параметри розрядних імпульсів. Встановлено, що максимальне значення напруги заряду конденсатора та максимальні значення струмів його заряду та розряду зростають зі збільшенням ступеня перекриття (коефіцієнту перекриття  $k_{\Delta}$ ) процесів розряду і наступного заряду конденсатора. Причому, чим менша добротність зарядного кола, тим інтенсивніше зростають напруги та струми.

Збільшення коефіцієнта  $k_{\Delta}$  призводить до скорочення тривалості розрядного струму та збільшення його максимальної величини і відповідно до підвищення швидкості наростання струму у навантаженні, що зумовлює актуальність даного методу для більшості електророзрядних технологій.

1. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий // 36. наук. праць Національного університету кораблебудування. – 2010. № 4. – С. 118–124.

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

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

4. Лившиц А.Л., Отто М.А. Импульсная электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.

5. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – К.: Наукова думка, 1982. – 424 с.

6. Супруновская Н.И., Щерба А.А., Иващенко Д.С., Белецкий О.А. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов // Техн. электродинаміка. – 2015. – № 5. – С. 3–11.
7. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии. – Киев: Интерконтиненталь-Украина, 2009. – 208 с.
8. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. электродинаміка. – 2014. – № 1. – С. 3–11.
9. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Синицин В.К., Иващенко Д.С. Аперiodические и колебательные процессы разряда конденсатора при принудительном ограничении длительности токов в нагрузке // Техн. электродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 9–10.
10. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке // Техн. электродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 23–25.
11. Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zakharchenko S.M., Portier R. Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids // Металлофизика и новейшие технологии. – 2009. – Vol. 31. – № 5. – С. 603–614.
12. Kokorin V.V., Perekos A.O., Tshcherba A.A., Babiy O.M., Efimova T.V. Intermartensitic phase transitions in Ni-Mn-Ga alloy, magnetic field effect // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Vol. 302. – Iss. 1. – Pp. 34–39.
13. Mysinski W. Power supply unit for an electric discharge machine // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09, Poznan, Poland, 01-03 September, 2009. – Pp. 1–7.
14. 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.
15. Sen B., Kiyawat N., Singh P.K., Mitra S., Ye J.H., Purkait P. Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM) // The 5th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. PEDS 2003, Singapore, 17-20 November 2003. – Vol. 1. – Pp. 659–664.

УДК 621.3.011:672.372

## РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ В НАГРУЗКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК С НАКОПИТЕЛЬНЫМ КОНДЕНСАТОРОМ

Н.И. Супруновская<sup>2</sup>, докт.техн.наук, Ю.В. Перетятко<sup>1</sup>, канд.техн.наук, С.С. Розискулов<sup>2</sup>, канд.техн.наук, В.В. Михайленко<sup>1</sup>, канд.техн.наук, В.И. Чибелис<sup>1</sup>, канд.техн.наук, В.С. Олійник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>- НТУУ "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского",

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

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

<sup>2</sup>- Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: [jednat1@gmail.com](mailto:jednat1@gmail.com)

*Предложен метод регулирования параметров разрядных импульсных токов (уменьшения их длительности и увеличения амплитуды и скорости нарастания) полупроводниковых электроразрядных установок с обратной связью по напряжению с целью интенсификации динамического силового воздействия на их технологическую нагрузку. Метод базируется на использовании двух пар зарядных и разрядных полупроводниковых (тиристорных) ключей, которые позволяют формировать в нагрузке биполярные импульсные токи, и реализации наложения процессов последующего заряда конденсатора на предыдущий его разряд путем изменения времени включения соответствующих пар зарядных тиристоров. На основе проведенного анализа взаимосвязанных переходных процессов в разветвленной электрической цепи изменяемой структуры таких установок определены зависимости коэффициента повышения зарядного напряжения, а также зарядного и разрядного токов конденсатора от коэффициента перекрытия его заряда и разряда при разных значениях добротности зарядной цепи. Библ. 15, рис. 5.*

**Ключевые слова:** заряд конденсатора, разряд конденсатора, биполярный импульс, добротность, напряжение заряда, импульсный ток, длительность разряда, обратная связь по напряжению.

## CONTROL OF PARAMETERS OF BIPOLAR PULSE CURRENTS IN THE LOAD OF SEMICONDUCTOR ELECTRIC DISCHARGE INSTALLATIONS WITH RESERVOIR CAPACITOR

N.I. Suprunovska<sup>2</sup>, Y.V. Peretyatko<sup>1</sup>, S.S. Roziskulov<sup>2</sup>, V.V. Mikhaylenko<sup>1</sup>, V.I. Chibelis<sup>1</sup>, V.S. Oliynyk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>- National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

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

<sup>2</sup>- Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: [jednat1@gmail.com](mailto:jednat1@gmail.com)

*The method for regulating the parameters of discharge pulse currents (reducing their duration and increasing the amplitude and rate of current rise) of semiconductor electro-discharge installations with voltage feedback in order to intensify the dynamic force action on their technological load is proposed. The method is based on the use of two pairs of charge and discharge semiconductor (thyristor) switches, which allow to form a bipolar pulsed current in the load and implement the overlay of subsequent capacitor charge to its previous discharge by varying the switching time of the corresponding pairs of charge thyristors. On the basis of performed analysis of the interrelated transients in the branched electrical circuit with variable structure in such installations the dependences of increasing ratios of the charge voltage, charge and discharge currents of the capacitor on the overlap ratio capacitors charge and discharge for different charging circuit Q values are determined. References 15, figures 5.*

**Key words:** capacitor charge, capacitor discharge, bipolar pulse, Q-factor, charge voltage, pulse current, discharge duration, voltage feedback.

1. *Vovchenko A.I., Tertilov R.V.* Synthesis of capacitive non-linear- parametrical energy sources for discharge-pulse technologies // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia. – 2010. – No 4. – Pp. 118–124. (Rus)
2. *Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.Ye., Zalutsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G.* Influence of duration of discharge pulses in a layer of iron granules on the sizes and a structurally-phase state of its electro-eroded particles // Vostochno-Evropeiskii Zhurnalпередovykh tekhnologii. – 2012. – Vol. 6. – No 5 (60). – Pp. 66–72. (Rus)
3. *Kravchenko V.I., Petkov A.A.* Parametrical synthesis of high-voltage pulse test device with capacitive energy storage // Electrical engineering & Electromechanics. – 2007. – No 6. – Pp. 70–75. (Rus)
4. *Livshits A.L., Otto M.Sh.* Pulse electrotechnology. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 352 p. (Rus)
5. *Pentegov I.V.* Basis of charging circuits of capacitive energy storage. – Kyiv: Naukova dumka, 1982. – 424 p. (Rus)
6. *Suprunovska N.I., Shcherba A.A., Ivashchenko D.S., Beletsky O.A.* Processes of energy exchange between nonlinear and linear links of electric equivalent circuit of supercapacitors // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 5. – Pp. 3–11. (Rus)
7. *Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Suprunovska N.I.* Power processes in the electropulse installations with capacitive energy storages. – Kiev: Intercontinental-Ukraine, 2009. – 208 p. (Rus)
8. *Shcherba A.A., Suprunovska N.I.* Synthesis of electrical circuits with capacitive energy storages in semiconductor formers of power discharge pulses // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 1. – Pp. 3–11. (Rus)
9. *Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Synytsyn V.K., Ivashchenko D.S.* Aperiodic and Oscillatory Processes of Capacitor Discharge at Forced Limitation of Duration // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 3. – Pp. 9–10. (Rus)
10. *Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S.* Modeling of Nonlinear Resistance of Electro-Spark Load Taking into Account its Changes During Discharge Current Flowing in the Load and et Zero Current in it // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 5. – Pp. 23–25. (Rus)
11. *Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R.* Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2009. – Vol. 31. – No 5. – Pp. 603–614.
12. *Kokorin V.V., Perekos A.O., Tshcherba A.A., Babiy O.M., Efimova T.V.* Intermartensitic phase transitions in Ni-Mn-Ga alloy, magnetic field effect // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Vol. 302. – Iss. 1. – Pp. 34–39.
13. *Mysinski W.* Power supply unit for an electric discharge machine // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09, Poznan, Poland, 01-03 September, 2009. – Pp. 1–7.
14. *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.
15. *Sen B., Kiyawat N., Singh P.K., Mitra S., Ye J.H., Purkait P.* Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM) // The 5th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003, Singapore, 17-20 November 2003. – Vol. 1. – Pp. 659–664.

Надійшла 11.04.2017

Остаточний варіант 25.04.2017