

ВПЛИВ ПОЧАТКОВОЇ НАПРУГИ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК НА ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЙОГО КОЛИВАЛЬНОГО ЗАРЯДУ

Н.І. Супруновська^{1*}, докт. техн. наук, Д.В. Вінниченко^{1**}, канд. техн. наук,
В.В. Михайленко^{2***}, канд. техн. наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: jednat1@gmail.com.

² НТУ України "КПІ ім. Ігоря Сікорського",
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.
E-mail: VladislavMihailenko@i.ua.

Проведено аналіз перехідних процесів під час коливальних зарядів ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) електророзрядної установки (ЕРУ) від джерела постійної напруги (ДПН) $U_{ДПН}$ за умови змінення початкової напруги на ЄНЕ на момент початку заряду. Отримано залежності максимальної зарядної напруги ЄНЕ та енергетичних характеристик (доза енергії, що надходить до конденсатору від ДПН, енергії втрат і коефіцієнта корисної дії) від величини і знаку (полярності) початкової напруги ЄНЕ і добротності зарядного кола. Показано, що збільшення абсолютної величини від'ємної початкової напруги ЄНЕ, як і збільшення добротності зарядного кола, приводить до підвищення максимальної напруги заряду ЄНЕ. Визначено енергетично доцільні режими заряду ЄНЕ. Обґрунтовано, що збільшення початкової напруги на конденсаторі, як і добротності зарядного кола, приводить до збільшення ККД заряду. Аналіз співвідношення між дозою енергії, що надходить у конденсатор за один цикл заряду W_C^* , та енергією втрат $W_{втрат}^*$ показав, що відношення $W_C^*/W_{втрат}^*$ збільшується зі змінням напруги $U_{0с}$ від $-U_{ДПН}$ до $+U_{ДПН}$. Бібл. 15, рис. 3.

Ключові слова: ємнісний накопичувач енергії, заряд конденсатора, початкова напруга конденсатора, зарядна напруга конденсатора, ККД заряду.

Використання накопичувачів електроенергії в колах систем електроживлення дає можливість багатократно підвищувати густину енергії, що вводиться в технологічний об'єкт, і керувати нестаціонарними процесами її споживання за допомогою регулювання величини, тривалості та частоти імпульсних струмів у навантаженні, що забезпечує реалізацію новітніх промислових електротехнологій [1–4]. В даний час для реалізації у навантаженні великих імпульсних потужностей і, відповідно, електричних струмів та швидкостей їхнього змінення найбільш поширеним є застосування ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) – батарей імпульсних конденсаторів [5–8]. Такі накопичувачі використовуються в електророзрядних установках (ЕРУ) з амплітудними значеннями струмів від сотень до мільйонів ампер (тривалістю від десятків наносекунд до сотень мікросекунд) для електроімпульсної (електромагнітної, іскроерозійної, плазмодугової та електрогідролічної) обробки різних середовищ та виробів [9–12]. Для розробки нових ЕРУ розвиваються теоретичні основи зарядних і розрядних електричних кіл ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ). Зокрема, задля аналізу перехідних процесів у колах ЕРУ зі стохастичним опором навантаження було розвинуто метод різницевих рівнянь [13]. Під час створення ЕРУ для виробництва електроіскрових мікро- і нанопорошків використовуються батареї паралельно з'єднаних конденсаторів, в яких бажано враховувати перерозподіл між ними електроенергії [14] і залежність її втрат від початкових напруг та співвідношення ємностей конденсаторів таких батарей [15].

У більшості імпульсних технологічних установок ЄНЕ заряджають від формувачів постійної напруги, які називають також вторинними джерелами постійної напруги (ДПН). Найбільш простим, але недостатньо енергоефективним, є заряд ЄНЕ від джерела постійної напруги за нульової початкової

© Супруновська Н.І., Вінниченко Д.В., Михайленко В.В., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-7499-9142>; ** <https://orcid.org/0000-0002-8894-860X>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-0973-4612>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

вої напруги на ЄНЕ і повний його розряд до початку наступного заряду [3, 5, 6, 9]. За таких умов ЄНЕ повністю розряджають через навантаження і додаткові елементи та в наступному зарядному циклі заряджають його до напруги ДПН за нульової початкової напруги на ЄНЕ й без примусового обмеження тривалості зарядного циклу. За цих умов коефіцієнт корисної дії (ККД) кіл заряду ЄНЕ від ДПН дорівнює 50% і не залежить від добротності зарядного кола та інших його параметрів. Але підкреслимо, що це вірно лише для випадку, коли заряд ЄНЕ відбувається до напруги ДПН і починається за напруги на конденсаторі, що дорівнює нулю.

Однак у разі використання початкових ненульових напруг на ЄНЕ і використанні напівпровідникових (зокрема тиристорних ключів) ККД та енергетичні, електродинамічні і технологічні характеристики ЕРУ можуть значно покращуватися, особливо у разі використання високодобротних зарядних і перезарядних кіл ЄНЕ.

Метою роботи є визначення впливу початкової напруги ЄНЕ на електричні та енергетичні характеристики його коливального заряду від ДПН у тиристорних ЕРУ електроіскрового диспергування шару металевих гранул у рідині.

На рис. 1 приведено електричну схему ЕРУ електроіскрового диспергування струмопровідних гранул у рідині. В даній схемі ЄНЕ (власне накопичувальний конденсатор ємністю C) заряджається від джерела постійної напруги (ДПН) $U_{\text{ДПН}}$ через резистор R (активний опір зарядного кола), котушку індуктивності L і тиристорний комутатор VT .

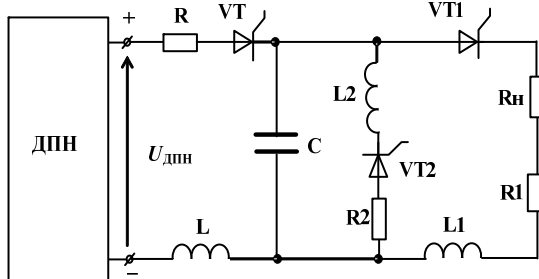


Рис. 1

Оскільки зарядне коло такої ЕРУ містить напівпровідниковий тиристорний ключ, то при коливальному заряді конденсатора відбувається швидке вимкнення зарядного тиристора природним шляхом без застосування додаткових вузлів для примусової комутації.

Подальший коливальний розряд конденсатора здійснюється через розрядний тиристорний комутатор VT_1 , резистори R_n (опір навантаження) та R_1 (активний опір розрядного кола) та котушку індуктивності L_1 (індуктивність розрядного кола). Задля можливості реалізувати різний зворотний зв'язок по напрузі (додатний або від'ємний) у схемі застосовується додатковий контур перезаряду конденсатора через тиристорний комутатор VT_2 , резистор R_2 (активний опір перезарядного кола) та котушку індуктивності L_2 .

Параметри зарядного кола конденсатору вибиралися таким чином, щоб виконувалася умова його коливального заряду: $Q = \sqrt{L} / (R \cdot \sqrt{C}) > 0,5$, де Q – добротність зарядного кола. Статичними і динамічними втратами електроенергії в тиристорному ключі VT будемо нехтувати.

Відповідно до II закону Кірхгофа після включення тиристора VT вірним є наступне рівняння:

$$u_R(t) + u_C(t) + u_L(t) = U_{\text{ДПН}} \quad (1)$$

Враховуючи, що $u_R(t) = R \cdot i(t)$, $i(t) = C du_C(t)/dt$, а $u_L(t) = L di(t)/dt = LC d^2u_C(t)/dt^2$, вираз (1) набуде вигляду

$$LC d^2u_C(t)/dt^2 + RC du_C(t)/dt + u_C(t) = U_{\text{ДПН}} \quad (2)$$

Розв'язуючи це диференціальне рівняння класичним методом розрахунку перехідних процесів, і враховуючи, що початкові умови для напруги на конденсаторі є ненульовими: $u_C(t=0) = U_{0C} \neq 0$, отримаємо вирази для напруги на конденсаторі та струму в зарядному колі

$$u_C(t) = U_{\text{ДПН}} + (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}) \cdot (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) / (p_1 - p_2), \quad (3)$$

$$i(t) = C (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}) p_1 p_2 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) / (p_1 - p_2), \quad (4)$$

де p_1 і p_2 – комплексно-спряжені корені характеристичного рівняння $p_{1,2} = -R/2L \pm j\sqrt{1/LC - R^2/4L^2}$.

Використавши вираз для добротності $Q = \sqrt{L}/(R \cdot \sqrt{C})$, і вводячи параметри $\alpha = R/2L$, $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$, після перетворень (3) і (4) отримаємо

$$u_c(t) = U_{\text{ДПН}} - (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}) \cdot e^{-\omega_0 t/2Q} \times (\sin(\omega_0 At)/2QA + \cos(\omega_0 At)), \quad (5)$$

$$i(t) = (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}) e^{-\omega_0 t/2Q} \cdot \sin(\omega_0 At)/L\omega_0 A, \quad (6)$$

де $A = \sqrt{1 - 1/4Q^2}$. Вирази (5) і (6) можна спростити, маючи на увазі, що вже за $Q \geq 2$ величиною $1/4Q^2$ у підкореному виразі можна знехтувати, оскільки помилка буде меншою від 3%

$$u_c(t) = U_{\text{ДПН}} - (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}) \cdot e^{-\omega_0 t/2Q} (\sin \omega_0 t/2Q + \cos \omega_0 t), \quad (7)$$

$$i(t) = (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}) \cdot e^{-\omega_0 t/2Q} \cdot \sin \omega_0 t/L\omega_0. \quad (8)$$

Оскільки в схемі є тиристорний ключ VT , то коливальний процес заряду конденсатора перебивається в той момент часу, коли струм у колі змінює свою полярність з додатної на від'ємну. Напруга ж на конденсаторі досягає в цей момент свого максимального значення $U_{C\text{max}}$ і, відповідно, похідна $du_c(t)/dt = 0$. Підставивши в це рівняння продиференційований вираз (7), і враховуючи, що за $Q \geq 2$ величиною $1/4Q^2$ можна знехтувати, визначаємо момент часу $t_{U_{C\text{max}}}$, коли напруга на конденсаторі стане максимальною

$$t_{U_{C\text{max}}} = \pi/\omega_0. \quad (9)$$

Отже, вираз для максимальної напруги, до якої зарядиться конденсатор, отримаємо, підставляючи у вираз (7) значення часу (9)

$$U_{C\text{max}} = U_{\text{ДПН}} + (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}) \cdot e^{-\pi/2Q}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлено функціональні залежності максимальної напруги заряду конденсатора, приведеного до величини $U_{\text{ДПН}}$ ($U_{C\text{max}}^* = U_{C\text{max}}/U_{\text{ДПН}}$) від початкової напруги конденсатора, приведенної до величини $U_{\text{ДПН}}$ ($U_{0C}^* = U_{0C}/U_{\text{ДПН}}$) для трьох значень добротності кола $Q_1 = 2$; $Q_2 = 5$; $Q_3 = 30$ при коливальному заряді конденсатора від ДПН у часовому інтервалі від $t = 0$ до $t = \pi/\omega_0$.

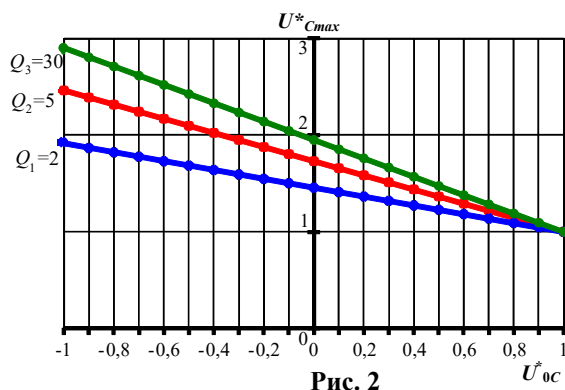


Рис. 2

Аналіз залежностей на рис. 2 показує, що у разі зміни початкової напруги на конденсаторі U_{0C} в діапазоні значень від $+U_{\text{ДПН}}$ до $-U_{\text{ДПН}}$ величина максимальної напруги заряду конденсатора $U_{C\text{max}}$ змінюється в діапазоні від $U_{\text{ДПН}}$ до значень, які можуть перевищувати $2U_{\text{ДПН}}$ (і чим вище добротність кола Q , тим більше це перевищення).

Таким чином, реалізація від'ємних початкових напруг на конденсаторі дає можливість значно підвищити $U_{C\text{max}}^*$ (при $Q_3 = 30$ і $U_{0C} = -U_{\text{ДПН}}$ напруга $U_{C\text{max}}^*$ зростає майже в 3 рази).

Максимальне значення зарядного струму можна отримати з виразу (6), підставивши $t = \pi/2\omega_0$ і маючи на увазі, що вже за $Q \geq 2$ можна вважати, що параметр $A \approx 1$

$$I_{\text{max}} = (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}) \cdot e^{-\pi/4Q} / \sqrt{L/C}. \quad (11)$$

Було визначено залежності енергетичних характеристик (доза енергії, що споживається від ДПН, коефіцієнта корисної дії та дози енергії, що надходить у конденсатор) від величини і знаку (полярності) початкової напруги СНЕ та добротності зарядного кола.

Доза енергії $W_{\text{ДПН}}$, що споживається від ДПН за час заряду конденсатора до моменту спрацювання тиристорного комутатора за $t = t_{U_{\text{max}}}$, визначалася як

$$W_{\text{ДПН}} = \int_0^{t_{U_{\text{max}}}} U_{\text{ДПН}} i(t) dt. \quad (12)$$

Після підстановки у (12) виразу для струму (8), врахування, що за $Q > 2$ час $t_{U_{\text{max}}} = \pi/\omega_0$ та виконання перетворень отримано

$$W_{\text{ДПН}} = C \cdot U_{\text{ДПН}} (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}) \cdot (1 + e^{-\pi/2Q}). \quad (13)$$

Дозу енергії W_C , що надходить у конденсатор, розраховано за формулою

$$W_C = C \cdot (U_{C_{\text{max}}}^2 - U_{0C}^2) / 2. \quad (17)$$

Підставляючи (10) в (17), отримано остаточний вираз для W_C

$$W_C = \frac{CU_{\text{ФПН}}^2}{2} \left\{ \left[1 + (1 - U_{0C}/U_{\text{ДПН}}) \cdot e^{-\pi/2Q} \right]^2 - U_{0C}^2/U_{\text{ДПН}}^2 \right\}. \quad (18)$$

ККД процесу заряду конденсатора η обчислювався як $\eta = W_C/W_{\text{ДПН}}$. Підставляючи (18) і (13) відповідно для W_C і $W_{\text{ДПН}}$, було отримано

$$\eta = \frac{W_C}{W_{\text{ДПН}}} = \left\{ \left[1 + (1 - U_{0C}/U_{\text{ДПН}}) \cdot e^{-\pi/2Q} \right]^2 - U_{0C}^2/U_{\text{ДПН}}^2 \right\} / 2 \cdot (1 - U_{0C}/U_{\text{ДПН}}) \cdot (1 + e^{-\pi/2Q}). \quad (19)$$

Приведена енергія втрат у зарядному колі $W_{\text{втр}}^*$ визначається як $W_{\text{втр}}^* = W_{\text{ДПН}}^* - W_C^*$.

На рис. 3 показано залежності від U_{0C}^* приведених доз енергії: $W_C^* = W_C/CU_{\text{ДПН}}^2$ (рис. 3, а); $W_{\text{ДПН}}^* = W_{\text{ДПН}}/CU_{\text{ДПН}}^2$ (рис. 3, б); $W_{\text{втр}}^* = W_{\text{втр}}/CU_{\text{ДПН}}^2$ (рис. 3, в) та ККД $\eta = W_C^*/W_{\text{ДПН}}^*$ (рис. 3, г) при $Q_1 = 2$; $Q_2 = 5$; $Q_4 = 10$; $Q_5 = 20$; $Q_3 = 30$ у часовому проміжку від $t = 0$ до $t = \pi/\omega_0$.

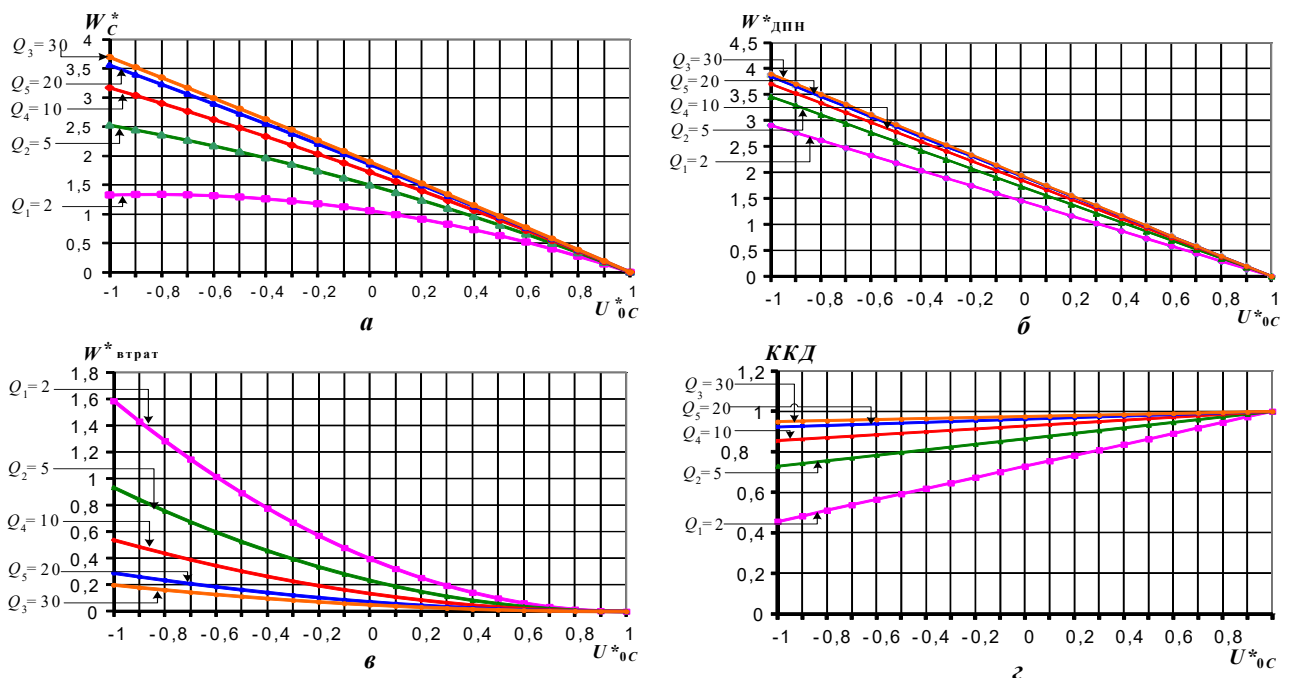


Рис. 3

Аналіз залежностей, наведених на рис. 3, показує, що у разі змінення початкової напруги на конденсаторі U_{0C} у діапазоні $-U_{ДПН} \dots +U_{ДПН}$, величини всіх досліджуваних енергій, а саме доз енергії: W_C^* , що надходить у конденсатор (рис. 3, а); $W_{ДПН}^*$, що споживається від ДПН (рис. 3, б); $W_{втрат}^*$ (рис. 3, в) зменшуються, тоді, як ККД заряду η зростає.

Зазначимо, що ця закономірність є справедливою для всіх розглянутих значень добротності кола Q ($Q_1 = 2$; $Q_2 = 5$; $Q_4 = 10$; $Q_5 = 20$; $Q_3 = 30$). При цьому чим більшою є величина добротності кола Q , тим вищими є дози енергії: W_C^* , що надходить у конденсатор і $W_{ДПН}^*$, що споживається від ДПН, а енергія втрат $W_{втрат}^*$ є меншою. За $U_{0C}/U_{ДПН} > 0$ зростання величини U_{0C} викликає збільшення ККД η (рис. 3, з) і зменшення W_C^* (рис. 3, а). При $U_{0C}/U_{ДПН} < 0$ зростання величини $|U_{0C}|$ викликає збільшення W_C^* (рис. 3, а), тоді як значення η зменшується (рис. 3, з).

Експериментально було виявлено, що збільшення величини максимальної напруги, до якої зарядиться конденсатор, зазвичай викликає зменшення величини активного опору навантаження, яким в ЕРУ об'ємного електроіскрового диспергування є шар металевих гранул у діелектричній рідині між електродами [12, 13], і відповідне збільшення добротності розрядного контуру і напруги перезаряду ЄНЕ протягом декількох зарядно-розрядних циклів, що не завжди є доцільним. В такому випадку, якщо після завершення розряду VT_1 на конденсаторі буде недопустимо висока напруга перезаряду, то включається тиристорний ключ VT_2 і здійснюється зворотний перезаряд конденсатора ЄНЕ, а лише потім включається зарядний тиристор VT . Причому його включення може відбуватися раніше, ніж завершиться зворотний перезаряд конденсатора ЄНЕ. Змінням моменту включення тиристорного ключа VT_2 можна здійснювати регулювання величини початкової напруги на конденсаторі ЄНЕ і, відповідно, її величини під час наступного заряду від ДПН, який буде здійснюватися наступним включенням зарядного тиристорного ключа VT .

Висновки. Задля визначення впливу початкової напруги ЄНЕ тиристорних ЕРУ на електричні характеристики при його коливальному заряді від ДПН та використання цього впливу в ЕРУ було проведено аналіз перехідного процесу такого заряду та отримано аналітичні вирази для напруги на ЄНЕ і струму в зарядному колі. Було отримано вирази для максимальної напруги заряду ЄНЕ і доз енергій, які за один цикл заряду ЄНЕ можуть надходити у нього, живлячись від ДПН. Отримано також втрати електроенергії в зарядному колі та значення ККД такого заряду. Визначено залежності цих характеристик у разі змінення початкової напруги ЄНЕ U_{0C} від $-U_{ДПН}$ до $+U_{ДПН}$ за різних значень добротності зарядного кола Q . На підставі проведеного аналізу одержано наступні результати.

1. Використання ненульових початкових напруг при коливальному заряді ЄНЕ дає змогу регулювати максимальну напругу його заряду, яка може перевищувати подвійну напругу ДПН без застосування підвищувального трансформатора, і таким чином підвищувати ККД заряду ЄНЕ.

2. За різних U_{0C} змінюється доза енергії, що надходить у конденсатор за один цикл заряду W_C^* . Ця доза буде максимальною при $U_{0C} = -U_{ДПН}$ (причому чим вище Q , тим вище буде її значення). Мінімальною ця доза енергії буде при $U_{0C} = +U_{ДПН}$.

3. Зі зміною величини початкової напруги на ЄНЕ U_{0C} в діапазоні від $-U_{ДПН}$ до $+U_{ДПН}$: ККД заряду η збільшується від деякого мінімального значення η_{\min} до 1. Причому значення η_{\min} залежить від добротності зарядного кола Q – воно тим більше, чим більше значення Q .

4. У разі змінення U_{0C} у діапазоні від $-U_{ДПН}$ до $+U_{ДПН}$, енергія втрат $W_{втрат}^*$ зменшується від максимального (при $U_{0C} = -U_{ДПН}$) до мінімального значення (при $U_{0C} = +U_{ДПН}$). Причому чим вище Q , тим меншим буде значення максимальних втрат.

5. Аналіз показав, що за всіх значеннях добротності зарядного кола Q зі збільшенням напруги U_{0C} від $-U_{ДПН}$ до $+U_{ДПН}$ енергія втрат $W_{втрат}^*$ зменшується швидше, ніж доза енергії, що надходить у конденсатор за один цикл заряду W_C^* , тобто відношення $W_C^* / W_{втрат}^*$ зростає.

Дослідження виконано за Проектом № 2022.01/0211 "Розробка мобільної системи формування напруги зі змінними параметрами для моніторингу безпеки і надійності високовольтного електрообладнання енергетичних об'єктів критичної інфраструктури України", який фінансується Національним фондом досліджень України.

1. Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2006. Pp. 288–305.
2. Лившиц А.Л., Отто М.С. Импульсная электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983. 352 с.
3. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития мощных высоковольтных

генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 5. С. 69–74.

4. Dubovenko K.V., Kurashko Yu.I., Shvets I.S. Power Supplies for Compact Sub-merged High Voltage Equipment. *IEEE Intl Pulsed Modulator Conf. (PMC'2002)*. Report PA55. Hollywood, California, USA. 2002. 73 p.

5. Фрюнгель Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. М.: Наука, 1970. 320 с.

6. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. К.: Наукова думка, 1982. 422 с.

7. 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.

8. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2007. № 6. С. 70–75.

9. Sizonenko O.N., Grigoryev E.G., Zaichenko A.D., Pristash N.S., Torpakov A.S., Lipyan Y.V., Tregub V.A., Zholnin A.G., Yudin A.V., Kovalenko A.A. Plasma methods of obtainment of multifunctional composite materials, dispersion-hardened by nanoparticles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 130. Issue 1. 012048. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/130/1/012048>.

10. 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>.

11. 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>.

12. Ochín P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 738–739. Pp. 451–455. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>.

13. Щербя А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. Развитие метода разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления нагрузки. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 3. С. 3–11.

14. Супруновская Н.И., Щербя А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 3–11.

15. 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/techned2016.03.009>.

INFLUENCE OF THE INITIAL VOLTAGE OF THE CAPACITIVE ENERGY STORAGE IN ELECTRICAL DISCHARGE INSTALLATIONS ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ITS OSCILLATORY CHARGE

N.I. Suprunovska¹, D.V. Vinnychenko¹, V.V. Mykhailenko²

¹Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: jednat1@gmail.com.

²NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Beresteyskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: VladislavMihailenko@i.ua.

An analysis of the transient processes of the oscillatory charge of the capacitive energy storage (CES) in the electric discharge installation (EDI) from the direct voltage source (DVS) of the U_{DVS} was carried out under the condition of a non-zero voltage of the CES at the start time of the charge. The dependences of the maximum charging voltage of CES and energy characteristics (dosage of energy consumed from the DVS and one entered to capacitor, energy losses and efficiency) on the magnitude and sign (polarity) of the initial voltage CES and the Q factor of the charge circuit were obtained. It is shown that an increase in the absolute value of the negative initial voltage of the CES together with an increase in the Q factor of the charging circuit leads to an increase in the maximum voltage of the CES charge. The most energetically appropriate capacitor charge modes were determined. It is substantiated that increasing the initial voltage on the capacitor, as well as the Q factor of the charging circuit, leads to an increase in the charge efficiency. Analysis of the ratio between the dose of energy entering the capacitor during one charge cycle W_c^ and the energy losses W_{losses}^* showed that the ratio W_c^* / W_{losses}^* becomes larger with the change of the U_{0C} voltage from $-U_{DVS}$ to $+U_{DVS}$. References 15, figures 3.*

Key words: capacitive energy storage, capacitor charge, capacitor initial voltage, capacitor charging voltage, charge efficiency.

1. Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2006. Pp. 288–305.
2. Livshits A.L., Otto M.S. Pulse electrical engineering. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 352 p. (Rus)
3. Vovchenko A.I., Bohuslavsky L.Z., Myroshnychenko L.N. Trends in development of high-powered high-voltage pulse current generators in the Institute of Pulse Processes and Technology of Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No 5. Pp. 69-74. (Rus)
4. Dubovenko K.V., Kurashko Yu.I., Shvets I.S. Power Supplies for Compact Sub-merged High Voltage Equipment. *IEEE Intl Pulsed Modulator Conf. (PMC'2002)*. Report PA55. Hollywood, California, USA. 2002. 73 p.
5. Friungel F. Pulse technique. Generation and application of capacitor discharges. Moskva: Nauka, 1970. 320 p. (Rus).
6. Pentegov I.V. Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage devices. Kiev: Naukova Dumka, 1982. 422 p. (Rus)
7. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of nonlinear parametric capacitive energy sources for a discharge pulse technologies. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo universytetu korablebuduvania*. 2010. No 4. Pp. 118–124. (Rus)
8. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test devices with capacitive energy storage. *Elektrotehnika I Elektromekhanika*. 2007. No 6. Pp. 70–75. (Rus)
9. Sizonenko O.N., Grigoryev E.G., Zaichenko A.D., Pristash N.S., Torpakov A.S., Lipyan Y.V., Tregub V.A., Zholnin A.G., Yudin A.V., Kovalenko A.A. Plasma methods of obtainment of multifunctional composite materials, dispersion-hardened by nanoparticles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 130. Issue 1. 012048. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/130/1/012048>.
10. 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>.
11. 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>.
12. Ochin P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 738–739. Pp. 451–455. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.451>.
13. Shcherba A.A., Ivashchenko D.S., Suprunovska N.I. Development of difference equations method for analysis of transient processes in the circuits of electro-discharge systems at stochastic changing of load resistance. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 3. Pp. 3–11. (Rus)
14. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 3–11. (Rus)
15. 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. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.

Надійшла 04.04.2024
Остаточний варіант 04.06.2024