

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.3.011:621.372

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.005>

РЕГУЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАРЯДНОГО КОЛА ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ЗМІНЕННЯМ ЙОГО ПОЧАТКОВОЇ НАПРУГИ ПРИ АПЕРІОДИЧНОМУ ЗАРЯДЖАННІ ВІД ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

А.А. Щерба*, акад. НАН України, Н.І. Супруновська**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: anat.shcherba@gmail.com, iednat1@gmail.com

Проведено аналіз перехідних процесів при аперіодичному заряджанні ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) електророзрядної установки (ЕРУ) від джерела постійної напруги (ДПН) $U_{\text{ДПН}}$ за умови змінення початкової напруги на ЄНЕ на момент початку заряду. Отримано залежності енергетичних характеристик (доза енергії, що надходить до ЄНЕ від ДПН, енергії втрат і коефіцієнта корисної дії) від величини і знаку (полярності) початкової напруги ЄНЕ. Визначено енергетично доцільні режими заряду ЄНЕ. Обґрунтовано, що збільшення початкової напруги на конденсаторі призводить до збільшення ККД зарядження. Аналіз співвідношення між дозою енергії, що надходить у ЄНЕ за один цикл заряду W_C^ , та енергією втрат $W_{\text{втрат}}^*$ показав, що відношення $W_C^*/W_{\text{втрат}}^*$ збільшується зі змінням напруги U_{0C} від $-U_{\text{ДПН}}$ до $+U_{\text{ДПН}}$ внаслідок того, що енергія втрат $W_{\text{втрат}}^*$ зменшується швидше, ніж доза енергії, що надходить у ЄНЕ за один цикл заряду W_C^* . Бібл. 11, рис. 3, таблиця.*

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

Для реалізації у навантаженні електророзрядних установок (ЕРУ) великих імпульсних потужностей і відповідно електричних струмів найбільш поширеним є застосування ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) – батарей імпульсних конденсаторів [1–4]. Такі накопичувачі використовуються в ЕРУ для електроімпульсної обробки різних середовищ [5–8]. У більшості імпульсних технологічних установок ЄНЕ заряджають від джерел постійної напруги (ДПН). Найбільш простим, але не достатньо енергоефективним є зарядження ЄНЕ від ДПН при нульовій початковій напрузі на ЄНЕ і повний його розряд до початку наступного заряду [1, 2, 5, 9]. За таких умов коефіцієнт корисної дії (ККД) кіл заряду ЄНЕ від ДПН дорівнює 50 % і не залежить від добротності зарядного кола та інших його параметрів. Цей факт зазначено у багатьох підручниках і літературних джерелах, присвячених аналізу енергетичних процесів у колах зарядження конденсатора, тобто ЄНЕ ємністю C від джерела постійного напруги $U_{\text{ДПН}}$ через активний опір R й індуктивність L [1, 2, 5, 9]. Під ККД розуміємо відношення величини (доза) електричної енергії W_C , що надходить у ЄНЕ, до енергії, що відбирається від ДПН за весь час зарядження ЄНЕ.

Дійсно, величина енергії, що відбирається від ДПН, дорівнює [10]:

$$W_{U_{\text{ДПН}}} = \int_0^{\infty} U_{\text{ДПН}} i dt = \int_0^{\infty} (u_R i + u_L i + u_C i) dt = \int_0^{\infty} R i^2 dt + \int_0^0 L i di + \int_0^{U_{\text{ДПН}}} C u_C du_C \quad (1)$$

або

$$U_{\text{ДПН}} \int_0^{U_{\text{ДПН}}} C du_C = C U_{\text{ДПН}}^2 = \int_0^{\infty} R i^2 dt + \frac{C U_{\text{ДПН}}^2}{2}, \quad \text{тобто} \quad \int_0^{\infty} R i^2 dt = \frac{C U_{\text{ДПН}}^2}{2}.$$

З рівняння (1) видно, що в ньому досліджується лише окремий випадок, коли зарядження ЄНЕ ємністю C здійснюється за нульових початкових умов $U_C(t=0) = U_{0C} = 0$ та



$i(t=0) = 0$, і за кінцевих умов $U_C(t=\infty) = U_{кС} = U_{ДПН}$ та $i(t=\infty) = 0$.

Однак попередні дослідження авторів показали, що при використанні початкових ненульових напруг на ЄНЕ і використанні напівпровідникових (зокрема тиристорних ключів) ККД та енергетичні характеристики ЕРУ можуть бути підвищені. Ці дослідження виконувались для аперіодичного режиму заряджання як найбільш простого для практичної реалізації.

Метою даної роботи є аналіз енергетичних характеристик аперіодичного заряджання ємнісного накопичувача електроенергії від джерела постійної напруги при змінних початкових напругах на ЄНЕ $U_{0C} = var$ у діапазоні $-U_{ДПН} < U_{0C} < +U_{ДПН}$ для визначення енергетично найбільш доцільних режимів його заряджання.

За таких умов нульові та кінцеві умови для струму в колі залишаються тими ж: $i(t=0) = i(t=\infty) = 0$.

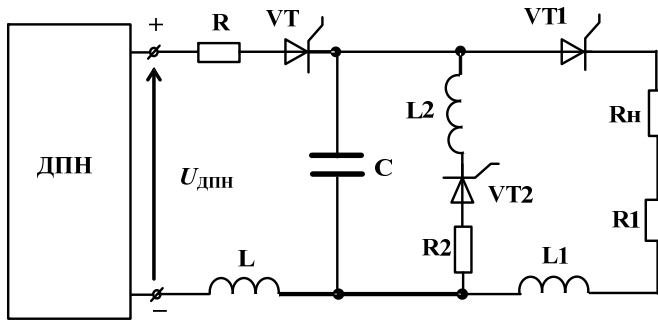


Рис. 1. Електрична схема ЕРУ електроіскрового диспергування струмопровідних гранул у рідині

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

Втратами в тиристорному ключі VT під час протікання струму ми нехтуємо, але його наявність дає змогу розуміти, що аперіодичний процес заряджання не є нескінченним. Він закінчується, коли струм у колі стає менше струму утримання тиристорного ключа у включеному стані. Такий струм залежно від типу тиристора становить $0,3 \dots 0,7$ А (в оціночних розрахунках ми приймали його $0,5$ А) [11].

Параметри зарядного кола вибираються таким чином, щоб виконувалася умова $\frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = Q \leq 0,5$, де Q – добротність кола. Відповідно до II закону Кірхгофа після включення тиристора VT в зарядному колі схеми на рис. 1 можна записати рівняння

$$u_R(t) + u_C(t) + u_L(t) = U_{ДПН}. \quad (2)$$

Враховуючи, що $u_R(t) = R \cdot i(t)$, $i(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}$, а $u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2}$, вираз (2)

матиме вид:

$$LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = U_{ДПН}. \quad (3)$$

Згідно з класичним методом аналізу перехідних процесів у лінійних електричних колах розв'язок такого неоднорідного рівняння щодо напруги на конденсаторі $u_C(t)$ можна подати у вигляді суми $u_C(t) = u_{Свимуш} + u_{Свільн}(t)$ [10], де вимушена складова напруги $u_{Свимуш} = U_{ДПН}$, а для знаходження вільної складової напруги $u_{Свільн}(t)$ треба знайти розв'язок однорідного диференціального рівняння:

$$\frac{d^2 u_{Свільн}(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_{Свільн}(t)}{dt} + \frac{1}{LC} u_{Свільн}(t) = 0. \quad (4)$$

Розв'язок такого рівняння записується у вигляді суми двох експонент

$$u_{Свільн}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (5)$$

де A_1 та A_2 постійні інтегрування, що визначаються з початкових умов, а p_1 та p_2 – корені характеристичного рівняння $p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0$, які визначаються нерівністю

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Якщо в момент включення тиристора VT напруга на конденсаторі $u_C(t=0) = U_{0C} \neq 0$, тоді $u_{C\text{вільн}}(t=0) = u_C(t=0) - u_{C\text{вимуш}} = U_{0C} - U_{\text{ДПН}}$.

Використовуючи рівняння (5), запишемо

$$U_{0C} - U_{\text{ДПН}} = A_1 + A_2. \quad (6)$$

Беручи до уваги, що $i_{\text{вільн}}(t) = C \frac{du_{C\text{вільн}}(t)}{dt}$, отримаємо

$$i_{\text{вільн}}(t) = C(p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}). \quad (7)$$

Враховуючи, що $i(t) = i_{\text{вільн}}(t)$ (оскільки $i_{\text{вимуш}} = 0$), отримуємо для моменту часу $t = 0$

$$i(t=0) = i_{\text{вільн}}(t=0) = C \frac{du_C(t=0)}{dt} = C \frac{dU_{0C}}{dt} = 0. \quad (8)$$

З виразів (7) і (8) маємо

$$p_1 A_1 + p_2 A_2 = 0. \quad (9)$$

З огляду на (6) і (9) вирази для коефіцієнтів A_1 та A_2 будуть такі:

$$A_1 = \frac{(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})p_2}{p_1 - p_2}; \quad A_2 = \frac{-(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})p_1}{p_1 - p_2}.$$

Підставляючи ці вирази в (5) і враховуючи, що $u_C(t) = u_{C\text{вільн}}(t) + U_{\text{ДПН}}$, запишемо вираз для напруги на конденсаторі:

$$u_C(t) = U_{\text{ДПН}} + \frac{(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \quad (10)$$

і для струму в зарядному колі:

$$i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{C(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})}{p_1 - p_2} p_1 p_2 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (11)$$

Отримавши вирази для струму і напруги, можна визначити енергетичні характеристики у колі під час заряджання конденсатора C від ДПН через опір R та індуктивність L .

Доза енергії, що відбирається від джерела постійної напруги $W_{\text{ДПН}}$, визначається за формулою

$$W_{\text{ДПН}} = \int_0^{\infty} U_{\text{ДПН}} i(t) dt.$$

Після підстановки в неї виразу для струму (11) і інтегрування отримуємо

$$W_{\text{ДПН}} = C U_{\text{ДПН}} (U_{\text{ДПН}} - U_{0C}). \quad (12)$$

Дозу енергії, що надходить у конденсатор за час його заряду, визначено як

$$W_C = \frac{C U_{\text{ДПН}}^2}{2} - \frac{C U_{0C}^2}{2} = \frac{C(U_{\text{ДПН}}^2 - U_{0C}^2)}{2}. \quad (13)$$

Враховуючи (12) і (13), запишемо вирази для енергії втрат у колі $W_{\text{втрат}}$ та ККД процесу заряджання η :

$$W_{\text{втрат}} = W_{\text{ДПН}} - W_C = \frac{C}{2} (U_{\text{ДПН}} - U_{0C})^2.$$

$$\eta = \frac{W_C}{W_{\text{ДПН}}} = \frac{U_{\text{ДПН}} + U_{0C}}{2U_{\text{ДПН}}}.$$

Було введено відносні енергетичні характеристики та початкова напруга на конденсаторі:

- W_C^* – енергія, що надходить у конденсатор W_C , приведена до величини $W_{0\text{ДПН}} = CU_{\text{ДПН}}^2$, тобто до величини дози енергії, яка відбирається від ДПН при заряджанні повністю розрядженого конденсатора (при $U_C(t=0) = 0$):

$$W_C^* = \frac{W_C}{CU_{\text{ДПН}}^2} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{U_{0C}}{U_{\text{ДПН}}} \right)^2 \right];$$

- $W_{\text{втрат}}^*$ – енергія втрат у колі $W_{\text{втрат}}$, приведена до величини $W_{0\text{ДПН}} = CU_{\text{ДПН}}^2$:

$$W_{\text{втрат}}^* = \frac{W_{\text{втрат}}}{CU_{\text{ДПН}}^2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{U_{0C}}{U_{\text{ДПН}}} \right)^2;$$

- доза енергії, що відбирається від ДПН $W_{\text{ДПН}}^* = W_C^* + W_{\text{втрат}}^*$;

- ККД заряджання конденсатора η буде дорівнювати: $\eta = \frac{W_C^*}{W_{\text{ДПН}}^*} = \frac{W_C}{W_{\text{ДПН}}} = \frac{U_{\text{ДПН}} + U_{0C}}{2U_{\text{ДПН}}}$.

- U_{0C}^* – початкова напруга на конденсаторі U_{0C} , приведена до величини напруги ДПН: $U_{0C}^* = \frac{U_{0C}}{U_{\text{ДПН}}}$.

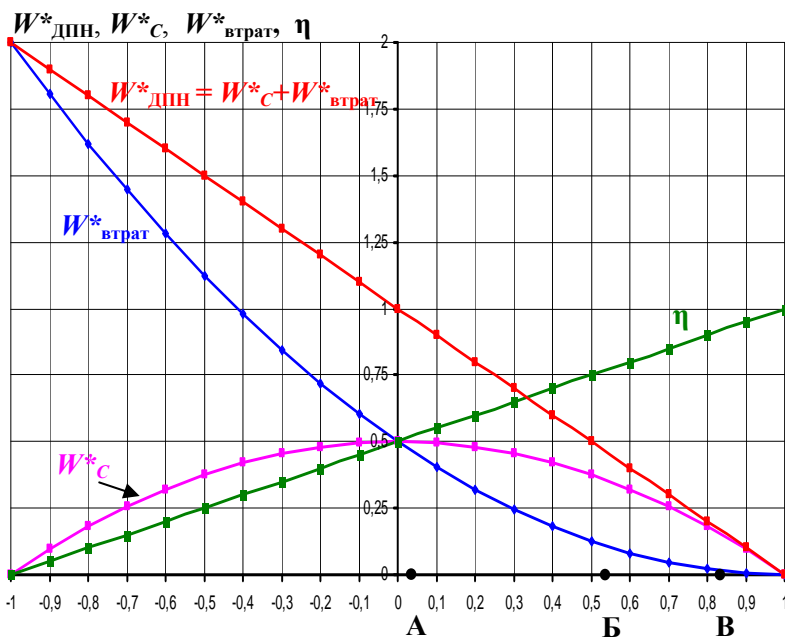


Рис. 2. Залежності від початкової напруги на конденсаторі U_{0C}^* відносних енергетичних характеристик W_C^* , $W_{\text{втрат}}^*$, $W_{\text{ДПН}}^*$, η

Із неї видно, що при $U_{0C}^* = 0,5$ ККД заряджання конденсатора η зростає в 1,5 рази в порівнянні з ККД при $U_{0C}^* = 0$, а при $U_{0C}^* = 0,8$ – він збільшується майже в 2 рази. Водночас

U_{0C}^*	$W_{\text{втрат}}^*$	W_C^*	η	$W_{\text{ДПН}}^*$
0	0,5	0,5	0,5	1
0,5	0,125	0,375	0,75	0,5
0,8	0,02	0,18	0,9	0,2

доза енергії, що надходить у конденсатор W_C^* , зменшується відповідно в 1,3 і 2,8 разу. Зростання ККД за таких умов пояснюється тим, що енергія втрат у колі зменшується ще інтенсивніше – відповідно у 4 і 25 разів.

На рис. 2 показано залежності від приведеної початкової напруги на конденсаторі U_{0C}^* відносних енергетичних характеристик W_C^* , $W_{\text{втрат}}^*$, $W_{\text{ДПН}}^*$, η .

Для аналізу зміння дози енергії, що надходить у конденсатор, енергії втрат у колі, дози енергії, що відбирається від ДПН, а також ККД в залежності від зміни початкової напруги U_{0C}^* на конденсаторі розглянемо три точки А, Б, В, в яких початкова напруга на конденсаторі становить відповідно 0, 0,5 та 0,8.

Значення відносних енергетичних характеристик W_C^* , $W_{\text{втрат}}^*$, $W_{\text{ДПН}}^*$ та η для зазначених вище точок А, Б, В представлено в таблиці.

Водночас доза енергії, що відбирається від джерела при $U_{0C}^* = 0,5$, зменшується в 2 рази, а при $U_{0C}^* = 0,8$ – у 5 разів (порівняно з нульовими умовами $U_{0C}^* = 0$). Отже, для споживання такої ж дози енергії від джерела, як і у випадку, що відповідає нульовим початковим умовам по напрузі, можна відповідно в 2 і 5 разів збільшити число циклів заряджання конденсатора за той же проміжок часу.

Таким чином, якщо потрібно мати незмінну середню потужність споживання енергії від джерела, необхідно збільшити частоту зарядних циклів конденсатора відповідно в 2 і 5 разів.

Тобто в загальному випадку має дотримуватися умова $W_{\text{ДПН}}^* = \sum_1^{f_i} W_{\text{ДПН}_i}^*$, де $W_{\text{ДПН}_i}^*$ – доза енергії, що відбирається від ДПН, а f_i – частота зарядних циклів конденсатора при деякій i -й початковій напрузі на конденсаторі, відмінній від нуля. Причому також має виконуватися умова $f_i < \lambda$, де $\lambda = T/\tau_0$ – шпаруватість, τ_0 – тривалість зарядного циклу при $U_{0C}^* = 0$, і T – період повторення зарядних циклів (причому величина λ має бути > 1).

За умови стабілізації дози енергії, що відбирається від ДПН за деякий один і той же час T , протягом якого від ДПН у зарядне коло надходить деяка фіксована доза енергії $W_{\text{ДПН}_j}^*$, можна проаналізувати необхідну зміну кількості циклів заряду конденсатора залежно від початкової напруги на ньому.

Відносну дозу енергії, що відбирається від ДПН, визначаємо, використовуючи (12), як:

$$W_{\text{ДПН}}^* = \frac{CU_{\text{ДПН}}(U_{\text{ДПН}} - U_{0C})}{CU_{\text{ДПН}}^2} = 1 - \frac{U_{0C}}{U_{\text{ДПН}}}. \quad (14)$$

Нехай доза енергії, що відбирається від ДПН за час $t = T$, повинна залишатися незмінною та рівною дозі енергії $W_{\text{ДПН при } U_{C_0}=0}^*$, що відбирається від ФПН при нульовій початковій напрузі на конденсаторі $U_{0C}^* = 0$. У цьому випадку для дотримання умови $W_{\text{ДПН}_i}^* \cdot f_i = W_{\text{ДПН при } U_{C_0}=0}^* \cdot f_0 = \text{const}$ (де f_0 – частота зарядних циклів конденсатора при нульовій початковій напрузі на конденсаторі і незмінній величині ємності конденсатора C) має бути справедливим наступний вираз:

$$W_{\text{ДПН}_i}^* \cdot f_i = 1 \cdot f_0. \quad (15)$$

Вводячи відносну частоту зарядних циклів конденсатора при деякій i -й початковій напрузі на конденсаторі $f_i^* = \frac{f_i}{f_0}$ і використовуючи вираз (14), отримаємо

$$f_i^* = \frac{1}{1 - \frac{U_{C_0}}{U_{\text{ДПН}}}}. \quad (16)$$

Аналогічний вираз можна отримати і для зміни величини ємності конденсатора C_i при i -й ненульовій початковій його напрузі і незмінній частоті циклів заряду $f_i^* = \text{const}$, що випливає з виразу

$$C_0 U_{\text{ДПН}}^2 = C_i \cdot U_{\text{ДПН}} (U_{\text{ДПН}} - U_{0C_i}), \quad (17)$$

де C_0 – ємність конденсатора при $U_{0C} = 0$, а C_i – його ємність при ненульовій i -й початковій напрузі $U_{0C_i} \neq 0$.

Тоді вираз для відносної ємності конденсатора C_i^* при ненульовій i -й початковій напрузі (приведена до ємності при нульовій його початковій напрузі) буде

$$C_i^* = \frac{C_i}{C_0} = \frac{1}{1 - \frac{U_{0C}}{U_{ДПН}}} \quad (18)$$

Відзначимо, що при відносних значеннях, вибраних у такий спосіб, вирази (16), (18) для f_i^* і C_i^* є однаковими.

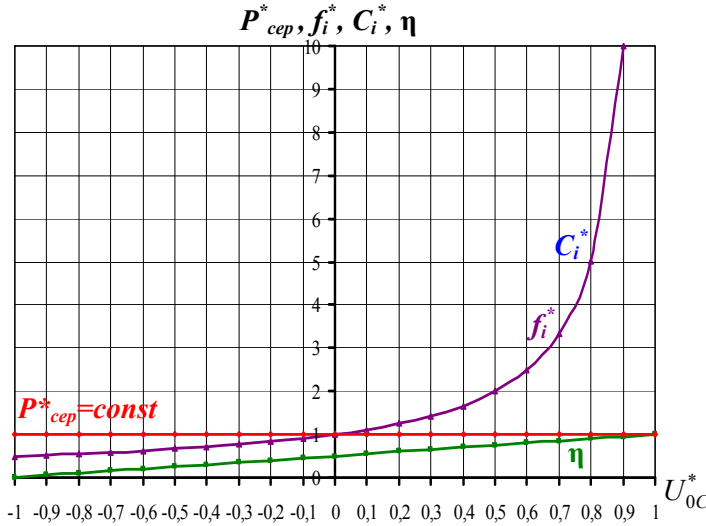


Рис. 3. Залежність частоти зарядних циклів конденсатора f_i^* , ємності конденсатора C_i^* і ККД η зарядного процесу від відносної початкової напруги на конденсаторі U_{0C}^* при стабілізації дози енергії, що відбирається від ДПН, за час $t = T$

Залежність частоти зарядних циклів конденсатора f_i^* , ємності конденсатора C_i^* і ККД η зарядного процесу від відносної початкової напруги на конденсаторі U_{0C}^* при стабілізації дози енергії, що відбирається від ДПН, за час $t = T$, показано на рис. 3.

Таким чином, можна реалізувати режим заряду конденсатора з високим ККД ($\eta > 0,5$) при постійній споживаній від ДПН потужності за час $t = T$, збільшуючи початкову напругу на конденсаторі при одночасному збільшенні (відповідно до виразу (16)) частоти зарядних циклів конденсатора за час $t = T$ або ємності конденсатора (відповідно до виразу (18)) при незмінній частоті циклів зарядання. Можна також зі збільшенням початкової напруги на конденсаторі збільшувати добуток

$f_i^* \cdot C_i^*$. Однак треба враховувати, що при збільшенні ємності збільшуватиметься час зарядання конденсатора і амплітудне значення струму в зарядному колі.

Висновки. Встановлено закономірності регулювання енергетичних характеристик аперіодичного зарядання ємнісного накопичувача електроенергії від джерела постійної напруги шляхом змінення початкових напруг на такому накопичувачі:

1. При зміні початкової напруги U_{0C} на ЄНЕ змінюється доза енергії, що надходить у ЄНЕ за один цикл зарядання. Максимальною ця доза буде за нульових початкових умов на ЄНЕ ($U_{0C} = 0$), а мінімальних значень набуватиме при значеннях $U_{0C} = -U_{ДПН}$ та при значеннях U_{0C} , близьких до $+U_{ДПН}$.

2. При зміні початкової напруги на ЄНЕ U_{0C} енергія втрат у зарядному колі зменшується від свого максимального значення при $U_{0C} = -U_{ДПН}$ до мінімальних значень при наближенні U_{0C} до $+U_{ДПН}$. Оскільки енергія втрат набуває найбільших значень при U_{0C} , близьких до $-U_{ДПН}$, таких режимів зарядання ЄНЕ у схемах ЕРУ слід уникати.

3. При аперіодичному заряданні ЄНЕ ємністю C від джерела постійної напруги $U_{ДПН}$, ККД зарядного процесу η лінійно збільшується зі збільшенням величини початкової напруги на ЄНЕ U_{0C} : η зростає від нульового значення при $U_{0C} = -U_{ДПН}$ і прямує до 1 при значеннях U_{0C} , близьких до $+U_{ДПН}$ (зазначимо, що при умові $U_{0C} = +U_{ДПН}$ зарядання ЄНЕ не відбувається саме внаслідок відсутності різниці потенціалів у колі, необхідної для початку процесу зарядання). Лінійне зростання ККД зі зростанням напруги U_{0C} в досліджуваному діапазоні зумовлено тим, що при цьому збільшується співвідношення між дозою енергії, що надходить у ЄНЕ, і енергією втрат у колі. Так, при $U_{0C} = 0,5U_{ДПН}$ доза енергії, що надходить у ЄНЕ, зменшиться в 1,33 разу, в той час як енергія втрат зменшиться в 4 рази

(порівняно з дозами енергії при $U_{0C} = 0$), а при $U_{0C} = 0,8U_{ДПН}$ відповідні дози зменшаться у 2,78 та 25 разів.

4. При стабілізації дози енергії, що споживається від джерела за час $t = T = f_i T_i$, можна реалізувати режими заряду ЄНЕ з досить високим ККД ($\eta > 0,5$), збільшуючи початкову напругу на ЄНЕ при одночасному збільшенні частоти зарядних циклів конденсатора при незмінній його ємності, або при одночасному збільшенні величини ємності ЄНЕ при незмінній частоті його зарядних циклів. Також можна збільшувати добуток частоти та ємності, однак треба враховувати, що при збільшенні ємності збільшуватиметься час заряджання ЄНЕ і амплітудне значення струму в зарядному колі.

Дослідження виконані за Проєктом № 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. Фрюнгель Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. М.: Наука, 1970. 320 с.
2. Пентегов І.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. К.: Наук. думка. 1982. 422 с.
3. 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.
4. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2007. № 6. С. 70–75.
5. Nguyen P.K., Sugho 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/1.4868330>
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. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Блащенко А.Д., Старков И.Н. Повышение эффективности высоковольтных электроразрядных установок, использующих экзотермические дисперсные среды. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.077>
8. 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>
9. 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.
10. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М: Энергия, 1975. 752 с.
11. Григорьев О.П., Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Пожидаев С.Л. Тиристоры: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 272 с.

REGULATION OF THE CHARGING CIRCUIT CHARACTERISTICS OF CAPACITIVE ENERGY STORAGE BY CHANGING ITS INITIAL VOLTAGE DURING APERIODIC CHARGING FROM A DC VOLTAGE SOURCE

A.A. Shcherba, N.I. Suprunovska

Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine,
Beresteisky ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: anat.shcherba@gmail.com, iednat1@gmail.com

An analysis of the transient processes during aperiodic charging of the capacitive energy storage (CES) of the electrical discharge installation (EDI) from the source of direct voltage (SDV) of the U_{SDV} was carried out under the condition of changing the initial voltage of the CES at the time of the start of charging. The dependences of energy characteristics (dose of energy that powers the capacitor, energy losses and efficiency) on the magnitude and sign (polarity) of the initial voltage CES were obtained. The energetically appropriate CES charge modes were determined. It is substantiated that increasing the initial voltage of the capacitor leads to an increase in the charging efficiency. The analysis of the ratio between the dose of energy that powers the CES during one charge cycle W_C^ and the energy of losses W_{losses}^* showed that the ratio W_C^*/W_{losses}^* increases with a change in the voltage U_{0C} from $-U_{SDV}$ to $+U_{SDV}$ due to the fact that the energy of losses W_{losses}^* decreases faster than the dose of energy that powers the CES. Ref. 11, fig. 3, table.*

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

1. Fryungel F. Pulse technique. Generation and application of capacitor discharges. Moscow: Nauka, 1970. 320 p. (Rus)
2. Pentegov I.V. Fundamentals of the theory of charging circuits of capacitive energy storage devices. Kyiv: Naukova Dumka, 1982. 422 p. (Rus)
3. 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)
4. 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. URI: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/142945> (Rus)
5. Nguyen P.K., Sugho 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/1.4868330>
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. Vovchenko O.I., Demydenko L.Yu., Blashchenko O.D., Starkov I.M. Improving the efficiency of high-voltage electric discharge installations which use exothermal dispersed media. *Tekhnichna Electrodynamica*. 2019. No 5. Pp. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.0077> (Rus)
8. 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>
9. 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. URI: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/142945> (Rus)
10. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. Fundamentals of Circuit Theory. Textbook for universities. Moscow: Energy, 1975. 752 p. (Rus)
11. Grigoriev O.P., Zamiatin V.Ya., Kondratiev B.V., Pozhidaev S.L. Thyristors: Grigoriev O.P., Zamiatin V.Ya., Kondratyev B.V., Pozhidaev S.L. Thyristors: Handbook. Moscow: Radio i Sviaz', 1990. 272 p. (Rus)

Надійшла: 16.06.2024

Прийнята: 17.07.2024

Submitted: 16.06.2024

Accepted: 17.07.2024