

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.3.011:621.372

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.074>

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРЯДУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА НА ЛІНІЙНЕ АКТИВНЕ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ЗМІНІ ТРИВАЛОСТІ РОЗРЯДУ

А.А. Щерба^{1*}, чл.-кор. НАН України, Н.І. Супруновська^{1**}, докт. техн. наук,
С.В. Белкін^{1***}, асп., І.М. Маслюченко^{2****}, канд. техн. наук

1 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057

e-mail: iednat1961@gmail.com

2 – Науково-технічний центр ДП НАЕК "Енергоатом",
вул. Гоголівська, 22-24, Київ, 01054, Україна

У роботі визначені закономірності змінення втрат електроенергії та коефіцієнта її передачі у лінійне активне навантаження при розряді на нього суперконденсатора за різних умов переривання розрядних струмів. Визначено вплив умов переривання розрядних струмів суперконденсатора на енергетичні характеристики розрядного кола з урахуванням того, що ємність суперконденсатора є функцією від напруги на його клеммах. Водночас зважалося, що ця напруга може змінювати свою полярність. Було розроблено математичну модель, яка враховує, що розрядний процес може мати як аперіодичний, так і коливальний характер. Модель була реалізована в пакеті програм Matlab/Simulink. Було проведено порівняння енергетичних характеристик при розряді суперконденсатора та звичайного лінійного конденсатора на одне і те ж лінійне навантаження при однаковій початковій напрузі на цих конденсаторах. Встановлено, що енергія, що надходить у навантаження, при розряді суперконденсатора в 1,8 рази більша, ніж при розряді звичайного лінійного конденсатора, зарядженого до тієї ж напруги, проте коефіцієнти корисної дії (ККД) передачі енергії цих процесів практично однакові. Однак при примусовому перериванні розрядів як суперконденсатора, так і звичайного лінійного конденсатора, ККД передачі енергії в навантаження збігаються, причому ККД при розряді суперконденсатора завжди вищий. Бібл. 14, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: суперконденсатор, конденсатор, розряд, лінійне навантаження, втрати електроенергії, ККД передачі енергії.

Вступ. Останніми роками вчені в галузі імпульсної електротехніки приділяють велику увагу підвищенню енергетичних та динамічних параметрів ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) для передачі ними у навантаження великих імпульсних потужностей, неможливих для інших накопичувачів електроенергії [1, 2]. Тривалий час для розробки електроімпульсних технологій застосовувалися ЄНЕ на основі звичайних лінійних конденсаторів (ЛК), заряд яких прямо пропорційно (лінійно) залежить від напруги на їхніх клеммах, а постійним коефіцієнтом зазначеної пропорційної залежності є їхня електрична ємність. У роботі [2] досліджувалися такі енергетичні характеристики ЄНЕ, як енергія, що передається в лінійний активний опір, енергія, накопичена в реактивних елементах і розсіяна в активних опорах розрядного контуру і т.п. У роботі [3] визначено діапазони зміни коефіцієнтів корисної дії (ККД) зарядного та розрядного кіл ЛК при зміні активного опору навантаження.

На сьогодні фірми України, США, Японії та країн ЄС суттєво підвищили електроенергетичні характеристики ємнісних накопичувачів енергії, які називаються суперконденсаторами (ультраконденсаторами, іоністорами або двошаровими електрохімічними конденсаторами), що викликало новий сплеск досліджень щодо їх практичного використання в автономних джерелах електроживлення електронних та обчислювальних пристроїв, імпульсній електротехніці та тяговому електроприводі [4–8]. Огляд результатів аналізу енергетичних



характеристик сучасних суперконденсаторів (СК) [9–12] показав, що дослідження проводились без урахування електричних процесів у колах заряду, часткового розряду, дозаряду та внутрішнього перерозподілу зарядів СК при виникаючих комутаціях струмів і напруг.

У [13] автори вже дослідили енергетичні характеристики СК при їх заряді від джерела напруги та розряді на резистивне навантаження, а в [14] – виявили деякі закономірності обміну енергією між нелінійними та лінійними конденсаторами. У той же час залишається невизначеним вплив умов переривання розрядних струмів СК на їх енергетичні характеристики, зокрема на втрати енергії та ККД лінійних кіл розряду СК з урахуванням функціональної залежності ємності суперконденсатора від напруги на його клеммах.

Звичайно в перелічених областях застосування СК навантаження є нелінійною величиною, проте аналіз перехідних процесів у колах з двома нелінійностями зазвичай настільки ускладнюється, що виникають складнощі з визначенням детермінованих енергетичних закономірностей. Тому в даній роботі активні опори в колі розряду нелінійного СК приймалися лінійними. При цьому отримані результати можуть бути застосовані на практиці за умови, що лінійний опір навантаження енергетично буде еквівалентним нелінійному опору, тобто енергії, виділені за час розряду на лінійному і нелінійному опорах будуть однакові.

Тому **метою роботи** є визначення закономірностей змін втрат електроенергії та коефіцієнта її передачі у навантаження при розряді суперконденсатора на лінійне активне навантаження за різних умов переривання розрядних струмів.

Результати досліджень. На рис. 1 показана еквівалентна заступна схема кола розряду суперконденсатора на навантаження, яке представлено лінійним активним опором R_n . Індуктивність L відображає індуктивність елементів розрядного кола СК, а його внутрішній опір представлено активним опором R . Заступна схема швидкого ємнісного кола СК, як і в роботах [4–9, 10–13], представлена двома паралельно з'єднаними ємностями: лінійною – C_0 та нелінійною динамічною – $C_{\text{дин}}$, величина якої

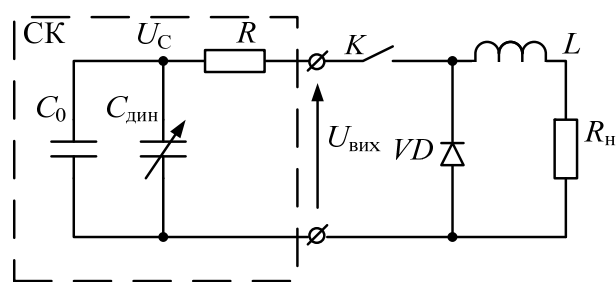


Рис. 1

залежить від напруги конденсатора U_C і визначається як $C_{\text{дин}} = k_0 \cdot U_C$ (де k_0 – постійний коефіцієнт, що має розмірність [Ф/В], а U_C – напруга на C_0 і $C_{\text{дин}}$). Таким чином ємність СК представляється функцією:

$$C(U_C) = C_0 + k_0 \cdot U_C. \quad (1)$$

Але раніше не враховувалося, що напруга U_C може змінювати свою полярність, оскільки конструкція СК цього не виключає.

Вищезазначений підхід дозволив дослідити детерміновані режими розряду СК при значеннях ємності $C(U_C)$, індуктивності L та опору R_n , за яких можливий і аперіодичний, і коливальний розряд СК зі зміною полярності напруги на його клеммах. Тому для визначення значення ємності $C(U_C)$ застосовувалась формула:

$$C(U_C) = C_0 + k_0 \cdot |U_C|, \quad (2)$$

в якій динамічна ємність $C_{\text{дин}} = k_0 \cdot |U_C|$ збільшується зі зростанням напруги U_C будь-якої полярності.

Для визначення закономірностей зміни втрат електроенергії та коефіцієнта її передачі на навантаження були розглянуті режими розряду СК, як з нерегульованою, так і з регульованою тривалістю. Регулювання тривалості розряду здійснюється шляхом примусового переривання (розмиканням ключа K). При розмиканні ключа K накопичена в індуктивності енергія розсіюється в опорі навантаження R_n через зворотний діод VD .

Зважаючи на складність одержуваних аналітичних виразів для дослідження енергетичних процесів в електричному колі, що містить СК, у [14] була побудована його математична модель у пакеті програм Matlab/Simulink. У ній СК моделюється керованим джерелом напруги, величина напруги на якому в поточний момент часу t_n задається математичним рівнянням, яке відображає залежність напруги на СК $U_C(t_n)$ від струму i , що протікає через СК:

$$U_C(t_n) = -C_0 + \sqrt{C_0^2 + 4k_0 \left(C_0 U_0 + k_0 U_0^2 + \int_0^{t_n} i(t) dt \right)} / 2k_0, \quad (3)$$

де U_0 – початкова напруга на СК.

Однак ця математична модель була розроблена за припущення, що напруга на СК U_C завжди більша або дорівнює нулю, оскільки в розрядному колі не враховувалася індуктивність, а отже, розряд не міг мати коливального характеру, і напруга на СК не могла змінювати свою полярність. Тому для електричних кіл розряду СК, які можуть містити досить велику індуктивність, була розроблена математична модель, яка враховує, що розрядний процес може бути як аперіодичним, так і коливальним.

З урахуванням виразу (2) для визначення величини заряду СК q можна записати:

$$q = C(U_C) \cdot U_C = (C_0 + k_0 |U_C|) \cdot U_C. \quad (4)$$

Тоді значення струму в розрядному колі СК можна визначати за виразом:

$$i(t) = dq/dt = d(C_0 U_C + k_0 |U_C| U_C) / dt. \quad (5)$$

Виконавши інтегрування (5) за часом на інтервалі від $t = 0$ до поточного моменту часу $t = t_n$, отримаємо вираз:

$$\int_0^{t_n} i(t) dt = \int_{U_C(0)}^{U_C(t_n)} d(C_0 U_C(t) + k_0 |U_C(t)| U_C(t)), \quad (6)$$

з якого випливає, що

$$\int_0^{t_n} i(t) dt = (C_0 U_C(t) + k_0 |U_C(t)| U_C(t)) \Big|_{U_C(0)}^{U_C(t_n)} = C_0 U_C(t_n) + k_0 |U_C(t_n)| U_C(t_n) - C_0 U_C(0) - k_0 |U_C(0)| U_C(0). \quad (7)$$

Розглянемо наступні варіанти полярності напруг $U_C(0)$ и $U_C(t_n)$:

1. $U_C(0) > 0$, $U_C(t_n) \geq 0$. У цьому випадку $|U_C(t_n)|$ і $|U_C(0)|$ в рівнянні (7) можна замінити відповідно на $U_C(t_n)$ й $U_C(0)$:

$$k_0 U_C^2(t_n) + C_0 U_C(t_n) - C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) - \int_0^{t_n} i(t) dt = 0, \quad (8)$$

тобто отримаємо квадратне рівняння відносно напруги $U_C(t_n)$:

$$a \cdot (U_C(t_n))^2 + b \cdot U_C(t_n) + c = 0, \quad (9)$$

де $a = k_0$, $b = C_0$, $c = -C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) - \int_0^{t_n} i(t) dt$.

З урахуванням прийнятого припущення, що $U_C(0) > 0$ і за умови позитивного дискримінанта квадратного рівняння (тобто $b^2 - 4ac > 0$), рішенням рівняння (9) буде рівняння (3).

2. $U_C(0) > 0$, $U_C(t_n) < 0$. У цьому випадку позначення модуля $|U_C(t_n)|$ в рівнянні (7) можна відкинути, але одночасно з цим потрібно змінити знак напруги $U_C(t_n)$ під модулем (тобто $|U_C(t_n)|$ замінити на $-U_C(t_n)$). Одночасно $U_C(0)$ можна замінити на $U_C(0)$. Тоді рівняння (7) набуде вигляду:

$$k_0 U_C^2(t_n) - C_0 U_C(t_n) + C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_n} i(t) dt = 0 \quad (10)$$

У цьому випадку квадратне рівняння щодо напруги $U_C(t_n)$ має такі коефіцієнти a , b , c :

$$a = k_0, \quad b = -C_0, \quad c = C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_n} i(t) dt.$$

За умови позитивного дискримінанта квадратного рівняння (тобто $b^2 - 4ac > 0$) рівняння (10) має два розв'язки:

$$U_C(t_n)_1 = C_0 + \sqrt{C_0^2 - 4k_0 \left(C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_n} i(t) dt \right)} / 2k_0, \quad (11)$$

$$U_C(t_n)_2 = C_0 - \sqrt{C_0^2 - 4k_0 \left(C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_n} i(t) dt \right)} / 2k_0. \quad (12)$$

Оскільки $U_C(t_n)$ згідно з (11) (на відміну від (12)) завжди матиме додатне значення, що не відповідає варіанту, що розглядається, то в удосконаленій математичній моделі реалізовано вираз (12).

3. $U_C(0) < 0$, $U_C(t_n) \geq 0$. У цьому випадку $|U_C(0)|$ у виразі (7) потрібно замінити на $-U_C(0)$, а $|U_C(t_n)|$ – на $U_C(t_n)$:

$$k_0 U_C^2(t_n) + C_0 U_C(t_n) - C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_n} i(t) dt = 0. \quad (13)$$

Коефіцієнти квадратного рівняння (13): $a = k_0$, $b = C_0$, $c = -C_0 U_C(0) + k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_n} i(t) dt$.

Рішенням (13) є наступне рівняння:

$$U_C(t_n) = -C_0 + \sqrt{C_0^2 + 4k_0 \left(C_0 U_0 - k_0 U_0^2 + \int_0^{t_n} i(t) dt \right)} / 2k_0, \quad (14)$$

(оскільки другий корінь рівняння (13) завжди від'ємний, і тому не задовольняє вихідним умовам, що $U_C(t_n) \geq 0$).

4. $U_C(0) < 0$, $U_C(t_n) < 0$. У такому разі в (7) можна опустити позначення модуля, але одночасно потрібно змінити знаки напруг, що стоять під знаком модуля (тобто замінити $|U_C(t_n)|$ і $|U_C(0)|$ відповідно на $-U_C(t_n)$ та $-U_C(0)$):

$$k_0 U_C^2(t_n) - C_0 U_C(t_n) + C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_n} i(t) dt = 0 \quad (15)$$

Коефіцієнти рівняння (15): $a = k_0$, $b = -C_0$, $c = C_0 U_C(0) - k_0 U_C^2(0) + \int_0^{t_n} i(t) dt$.

За умови $b^2 - 4ac > 0$ рівняння (15) має два розв'язки. Але тільки один з них може набувати від'ємних значень (тобто задовольняти вихідним умовам):

$$U_C(t_n) = C_0 - \sqrt{C_0^2 - 4k_0 \left(C_0 U_0 - k_0 U_0^2 + \int_0^{t_n} i(t) dt \right)} / 2k_0. \quad (16)$$

Таким чином, нова математична модель буде враховувати всі можливі варіанти полярності напруги на СК, використовуючи для розрахунку поточного значення $U_C(t_n)$ одне з рівнянь (3), (12), (14), (16) залежно від поєднання полярностей напруги $U_C(0)$ і $U_C(t_n)$.

Визначимо ККД передачі енергії в навантаження η як відношення дози енергії, переданої в навантаження ΔW_{R_n} , до дози енергії, відібраної від конденсатора ΔW_C (тобто $\eta = \Delta W_{R_n} / \Delta W_C$).

Водночас енергію втрат при розряді $W_{\text{втр}}_{\text{ат}}$ можна розрахувати як різницю доз енергії, відібраної від конденсатора ΔW_C , і енергії, переданої в навантаження ΔW_{R_n} (тобто $W_{\text{втр}}_{\text{ат}} = \Delta W_C - \Delta W_{R_n}$).

При моделюванні розряду СК на лінійне навантаження з активним опором R_n використовувалися наступні параметри кола: $R_n = 0,12 \text{ Ом} = \text{const}$; $R = 0,01 \text{ Ом}$; $U_0 = 200 \text{ В}$; $C_0 = 10^{-4} \text{ Ф}$; $k_0 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ Ф/В}$; $L = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$. Початкова добротність кола за таких його пара-

метрів дорівнює $Q_0 = \frac{\sqrt{L}}{(\sqrt{(C_0 + k_0 U_0)}(R + R_n))} \approx 1,36$.

Для порівняння енергетичних характеристик при розряді нелінійного і лінійного конденсаторів на однакове лінійне навантаження R_n був промодельований розряд на нього СК

ємністю $C = C_0 + k_0 \cdot U_C$, і розряд ЛК ємністю $C_{ЛК} = C_0$ (за однакової початкової напруги на конденсаторах $U(0) > 0$).

У табл. 1 представлено результати розрахунку втрат електроенергії $W_{\text{втрат}}$ і ККД її передачі в навантаження η , а на рис. 2 показано змінення напруги на конденсаторі (U_C) і навантаженні ($U_{Rн}$) при розрядах СК і ЛК на лінійне навантаження у разі розрядного перехідного процесу з нерегульованою тривалістю.

З табл. 1 видно, що ККД передачі енергії у навантаження η при нерегульованій тривалості розрядного перехідного процесу має практично однакове значення як при розряді СК, так і при розряді ЛК. Водночас енергія, відібрана від конденсатора, та енергія, що надійшла в навантаження, при розряді СК у 1,8 разу більша, ніж при розряді ЛК на те саме наванта-

Таблиця 1

Енергетичні характеристики	Розряд ЛК на навантаження R_n	Розряд СК на навантаження R_n
W_C , Дж	2,0	3,6
$W_{Rн}$, Дж	1,85	3,34
$W_{\text{втрат}}$, Дж	0,15	0,26
КПД η , в.о.	0,92	0,93

ження.

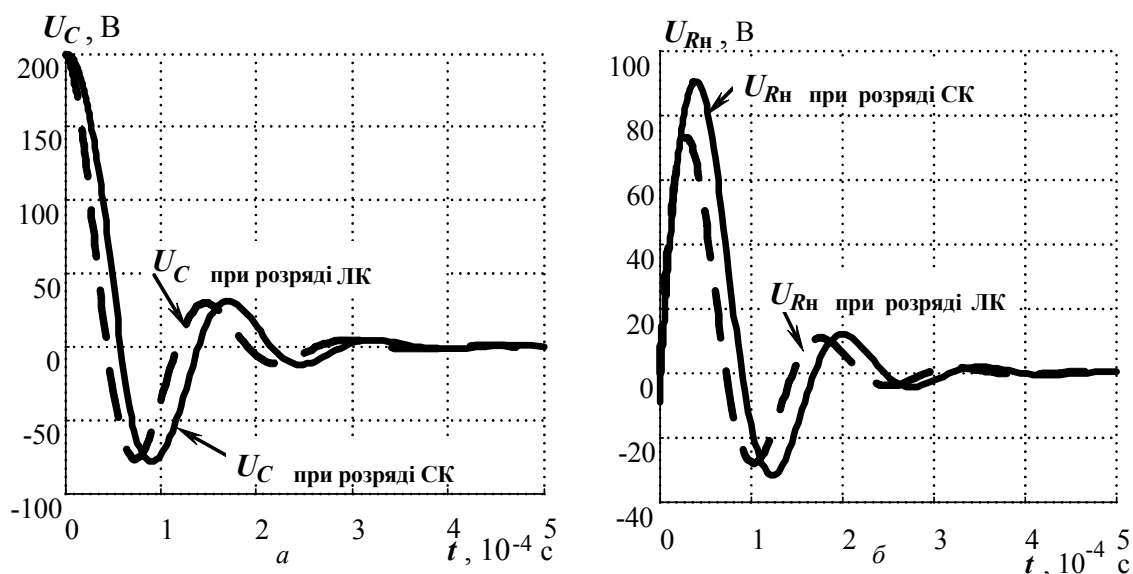


Рис. 2

Також було досліджено енергетичні характеристики розряду СК при регулюванні тривалості перехідного процесу. Регулювання здійснювалося примусовим перериванням розряду за допомогою ГТО-комутатора при досягненні струму навантаження величин, рівних $I_{\text{max}}/4$, $I_{\text{max}}/3$, $I_{\text{max}}/2$ і I_{max} . Також аналізувався режим, коли ГТО-комутатор закривався під час проходження напруги на ньому через нуль. Одночасно струм у навантаженні досягав значення $I_{UGTO=0} \approx 530$ А.

Схема для моделювання процесів розряду нелінійного конденсатора на лінійне навантаження R_n з примусовим перериванням розряду, реалізована у пакеті програм Matlab/Simulink, представлена на рис. 3.

У ній СК моделюється керованим джерелом напруги, величина напруги якого задається математичним рівнянням, що відображає залежність напруги на СК від струму у ньому. Напруга на СК розраховується за чотирма різними формулами – (3), (12), (14), (16) в залежності від знаків $U_C(0)$ і $U_C(t_n)$. Для коректної роботи моделі при реалізації автоматичного визначення знака напруги на СК використовувався наступний алгоритм: коли час моделювання був меншим 1 нс, модель прирівнювала знаки напруги на $U_C(t_n)$ і $U_C(0)$. Після 1 нс модель вже могла коректно автоматично визначати знак $U_C(t_n)$.

Для розряду ЛК реалізована аналогічна схема, в якій кероване джерело напруги замінено на звичайний конденсатор.

При моделюванні всі параметри елементів кола (R_n , R , U_0 , C_0 , L) і коефіцієнт k_0 приймалися такими ж, як зазначалось вище.

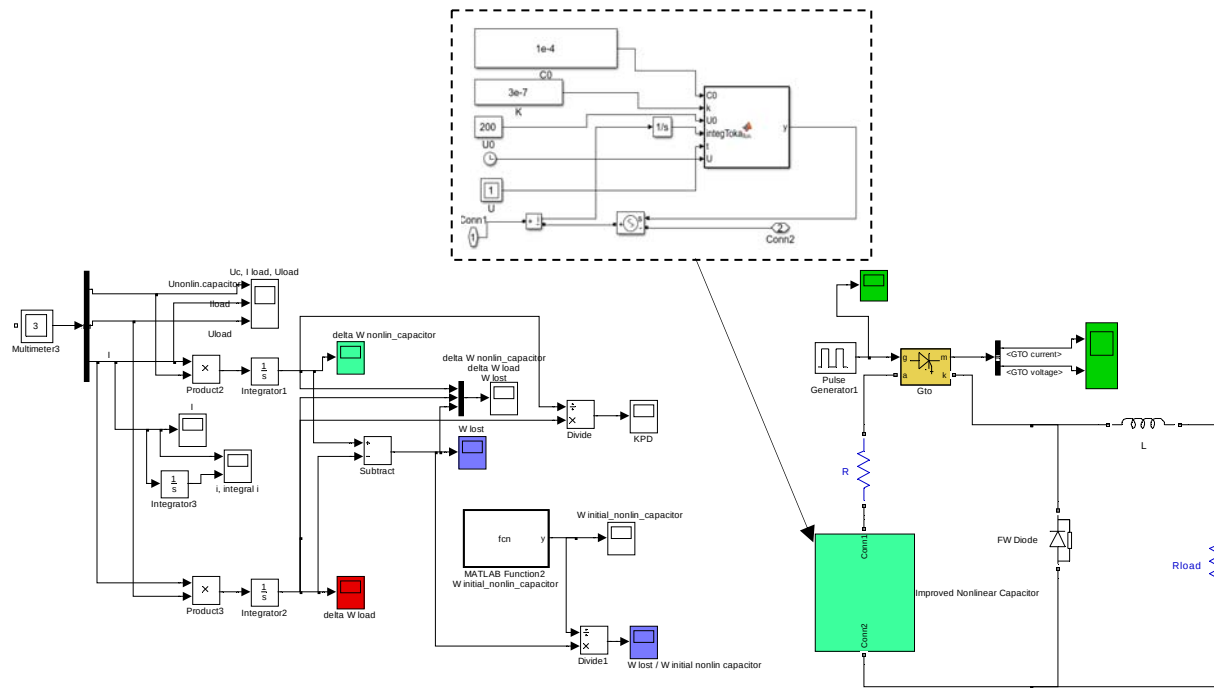


Рис. 3

У табл. 2 наведено результати розрахунків втрат електроенергії та ККД її передачі в навантаження при розрядах нелінійного та лінійного конденсаторів та регулюванні тривалості розрядів за допомогою повністю керованого ключа (GTO-комутатора).

Як впливає з табл. 2, при примусовому перериванні розряду як лінійного, так і нелінійного конденсатора до моменту, коли струм у колі досягне свого максимального значення, втрати електроенергії $W_{\text{втр}} \text{ збільшуються, досягаючи свого максимального значення за } I_{\text{max}}$, після чого починають зменшуватися. Водночас ККД передачі енергії в навантаження η (і ЛК, і СК) збільшується у всьому розглянутому діапазоні. Зазначимо, що ККД СК перевищують відповідні ККД ЛК. Порівнюючи ККД η СК і ЛК у разі нерегульованого (табл. 1) і регульованого розряду (табл. 2), можна зробити висновок, що примусове переривання розрядного процесу знижує величину η . Однак у багатьох високочастотних технологічних установках потрібно зменшувати тривалість розряду (зокрема для іскроерозійної обробки матеріалів), що викликає необхідність використання керованих напівпровідникових комутаторів. У випадку використання напівпровідникового ключа (GTO) і переривання розряду за нульової напруги на ключі ККД СК досить високий ($\eta_{\text{СК}} = 0,89$, табл. 2) і є порівняним з ККД СК нерегульованого розряду ($\eta_{\text{СК}} = 0,93$, табл. 1), в той час як для ЛК відповідні ККД значно різняться ($\eta_{\text{ЛК}} = 0,62$ з GTO та $\eta_{\text{ЛК}} = 0,92$ без GTO).

Таблиця 2

Величина струму в навантаженні, А $I_{Rn \text{ СК}} ; I_{Rn \text{ ЛК}}$	$I_{\text{max}}/4$ 181 ; 147	$I_{\text{max}}/3$ 241 ; 196	$I_{\text{max}}/2$ 362 ; 294	I_{max} 724 ; 587	$I_{U_{\text{GTO}}=0}$ 530 ; 498
$W_{\text{втр}} \text{ СК, Дж}$	1,22	1,66	2,46	2,72	0,39
$W_{\text{втр}} \text{ ЛК, Дж}$	0,12	0,2	0,36	1,0	0,75
ККД $\eta_{\text{СК}}$	0,06	0,08	0,13	0,48	0,89
ККД $\eta_{\text{ЛК}}$	0,07	0,1	0,15	0,44	0,62

Висновки. 1. Визначено закономірності змін втрат електроенергії та коефіцієнта її передачі у навантаження, яке може бути представлене лінійним активним опором, при розрядах (як з нерегульованою, так і з регульованою тривалістю) суперконденсатора та звичайного лінійного конденсатора.

2. Встановлено, що енергія, яка надходить у навантаження при нерегульованому розряді суперконденсатора, в 1,8 рази більше, ніж при розряді звичайного лінійного конденсатора, зарядженого до такої ж напруги. Водночас ККД передачі енергії суперконденсатора у навантаження є всього на 1 % більшим, ніж у випадку передачі енергії від лінійного конденсатора.

3. У разі переривання розряду як лінійного, так і нелінійного, конденсаторів у часовому діапазоні до моменту досягнення розрядним струмом максимального значення, втрати електроенергії $W_{\text{втр}}^{\text{ат}}$ збільшуються, досягаючи максимального значення за $I = I_{\text{max}}$, після чого починають зменшуватися.

4. ККД передачі енергії у навантаження суперконденсатора і звичайного конденсатора збільшуються у всьому розглянутому часовому діапазоні, причому ККД СК завжди перевищує ККД ЛК. Однак, порівнюючи ККД при нерегульованому і регульованому розрядах, можна дійти висновку, що примусове переривання розрядного процесу зменшує його величину у разі розряду як лінійного конденсатора, так і нелінійного конденсатора.

Роботу виконано за держбюджетною темою "Розробка основ теорії і методів дослідження впливу несинусоїдних напруг і струмів та виникаючих електротермодинамічних процесів на надійність і ресурс сучасних кабельних ліній електропередачі та на енергоефективність електротехнічних установок резонансного типу" (Шифр "ЕЛРЕС").

1. Вінниченко Д.В., Назарова Н.С., Вінниченко І.Л. Дослідження характеристик високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача. *Технічна електродинаміка*. 2023. №2. С. 21–27. <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.021>.
2. Шидловский А.К. Н.И. Супруновская Энергетические процессы в электрических цепях разрядно-импульсных установок с емкостным накопителем энергии при ограничении длительности его разряда на электроискровую нагрузку и ненулевых условиях его заряда. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 1. С. 42–48.
3. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 4. С. 3–12.
4. Изотов Ю.В., Громадский Д.Г., Малетин Ю.А. Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатора. *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. 2008. № 6. С. 114–118.
5. Beguin F., Frackowiak E. *Supercapacitors: Materials, Systems and Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. 527 p.
6. Maletyn Y., Stryzhakova N., Zelinskyi S., Chernukhin S., Tretyakov D., Mosqueda H., Davydenko N., and Drobnyi D. New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles. *Journal of Energy and Power Engineering*. 2015. No. 9. Pp. 585–591. DOI: <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2015.06.010>
7. Mihailescu B., Svasta P., Varzaru G. Hybrid Supercapacitor-Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications. *U.P.B. Scientific Bulletin, Series C. Iss. 2. V. 75*. 2013. Pp. 277–290.
8. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications. *IEEE Trans. On Industry Applications*. January-February 2000. No. 1. V. 36. Pp. 199–205. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.821816>
9. Zhao Jingyuan, Burke Andrew F. Review on supercapacitors: Technologies and performance evaluation. *Journal of energy chemistry*. August 2021. Vol. 59. Pp. 276–291. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.11.013>
10. Burke A., Miller M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications. *Journal of the Power Sources*. Jan. 2011. Iss. 1. V. 196. Pp. 514–522.
11. Burke A., Zhao H. Supercapacitors in micro-and mild hybrids with lithium titanate oxide batteries: Vehicle simulations and laboratory tests. Research Report – UCD-ITS-RR-15-20. Institute of Transportation Studies. University of California, December 2015. <https://escholarship.org/uc/item/87j1k9fn>
12. Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A., and Berthon A. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. *Journal of Power Sources*. 2007. No. 2. V. 165. Pp. 928–934.
13. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Белецкий О.А. Энергетические характеристики суперконденсаторов при их заряде от источника напряжения и разряде на резистивную нагрузку. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ, 2014. Вип. 39. С. 65–74.
14. Shcherba Anatolii, Suprunovska Nataliia, Biletsky Oleh. Increasing Energy Efficiency of Charge Circuits of Supercapacitors from Voltage Source. 2020 IEEE 7th International Conference on *Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 12-14 May 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160218>

REGULARITIES OF CHANGES IN THE ENERGY EFFICIENCY OF THE SUPERCAPACITOR DISCHARGE TO LINEAR ACTIVE LOAD WHEN THE DURATION OF THE DISCHARGE CHANGES

A.A. Shcherba¹, N.I. Suprunovska¹, S.V. Belkin¹, I.M. Masluchenko²

1 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: iednat1961@gmail.com

2 – Scientific and Technical Center State Enterprise
"National Atomic Power Generating Company "Energoatom",
Gogolivska St. 22-24, Kyiv-54, 01054, Ukraine

In the paper, the regularities of changes in electricity losses and the coefficient of its transfer to a linear active load during the discharge of a supercapacitor on the load under different conditions of interruption of discharge currents are determined. The influence of the conditions of interruption of discharge currents of the supercapacitor on the energy characteristics of the discharge circuit is determined, taking into account the fact that the capacity of the supercapacitor is a function of the voltage at its terminals. It was taken into account that this voltage can change its polarity. A mathematical model was developed that takes into account that the discharge process can be both aperiodic and oscillatory. The model was implemented in the Matlab/Simulink software package. A comparison of the energy characteristics during the discharge of a supercapacitor and a conventional linear capacitor on the same linear load at the same initial voltage on these capacitors was carried out. It has been established that the energy delivered to the load during the discharge of a supercapacitor is 1.8 times greater than during the discharge of a conventional linear capacitor charged to the same voltage, but the efficiency of energy transfer for these processes is almost the same. However, when the discharges of a supercapacitor and a conventional linear capacitor are forcibly interrupted, the efficiency of energy transfer to the load increases, and the efficiency during the discharge of the supercapacitor is always higher. Bibl. 14, fig. 3, tables 2.

Key words: supercapacitor, capacitor, discharge, linear load, electricity losses, energy transfer efficiency.

1. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S. Research of characteristics of high voltage transformerless resonant charger of capacitive storage device. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.038> (Ukr)
2. Shydlovsky A.K., Suprunovskaya N.I. Energy processes in the electrical circuits of pulsed discharge installations with a capacitive energy storage at limitation of duration of its discharge on electrospark load at nonzero conditions of its charge. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2010. No 1. Pp. 42–48. (Rus)
3. Suprunovskaya N.I., Shcherba A.A. Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2015. No 4. Pp. 3–12. (Rus)
4. Izotov V.Yu., Gromadsky D.G., Maletin Yu.A. Simulation and calculation of the operating parameters of the supercapacitor. *Naukovi visti NTUU "KPI"*. 2008. No 6. Pp. 114–118. (Rus)
5. Beguin F., Frackowiak E. *Supercapacitors: Materials, Systems and Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. 527 p.
6. Maletin Y., Stryzhakova N., Zelinskyi S., Chernukhin S., Tretyakov D., Mosqueda H., Davydenko N., and Drobnii D. New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles. *Journal of Energy and Power Engineering*. 2015. No 9. Pp. 585–591. DOI: <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2015.06.010>
7. Mihailescu B., Svasta P., Varzaru G. Hybrid Supercapacitor-Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications. *U.P.B. Scientific Bulletin, Series C. Iss. 2. V. 75*. 2013. Pp. 277–290.
8. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications. *IEEE Trans. On Industry Applications*. January-February 2000. No 1. V. 36. Pp. 199–205. DOI: <https://doi.org/10.1109/28.821816>
9. Zhao Jingyuan, Burke Andrew F. Review on supercapacitors: Technologies and performance evaluation. *Journal of energy chemistry*. August 2021. Vol. 59. Pp. 276–291. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.11.013>
10. Burke A., Miller M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications. *Journal of the Power Sources*. Jan. 2011. Iss. 1. V. 196. Pp. 514–522.
11. Burke A., Zhao H. Supercapacitors in micro-and mild hybrids with lithium titanate oxide batteries: Vehicle simulations and laboratory tests. Research Report – UCD-ITS-RR-15-20. Institute of Transportation Studies. University of California, December 2015. <https://escholarship.org/uc/item/87j1k9fn>
12. Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A., and Berthon A. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. *Journal of Power Sources*. 2007. No 2. V. 165. Pp. 928–934.
13. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I., Beletsky O.A. Power characteristics of supercapacitors during their charge from a source of voltage and discharge on resistive load. *Pratsi Insitutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv, 2014. No. 39. Pp. 65–74. (Rus)
14. Shcherba Anatolii, Suprunovska Nataliia, Biletsky Oleh. Increasing Energy Efficiency of Charge Circuits of Supercapacitors from Voltage Source. 2020 IEEE 7th International Conference on *Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 12-14 May 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160218>

Надійшла: 05.06.2023

Прийнята: 06.07.2023

Submitted: 05.06.2023

Accepted: 06.07.2023