

УДК 621.3.011:621.372

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КІЛ ЗАРЯДУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ВІД ЇХНІХ ПОЧАТКОВИХ І КІНЦЕВИХ НАПРУГ

О.О.Білецький¹, Н.І.Супруновська^{2*}, канд.техн.наук, А.А.Щерба^{2**}, чл.-кор. НАН України

¹- Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: biletsky27@gmail.com

²- Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. e-mail: iednat1@gmail.com

У роботі визначено залежності енергетичних характеристик електричних кіл заряду суперконденсаторів (заряд яких є нелінійною функцією від напруги на їхніх клеммах) від ідеального джерела електрорушійної сили, яким для ємнісних накопичувачів електроенергії може бути батарея акумуляторів. Виконано порівняння енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів і звичайних конденсаторів. Визначено умови зменшення втрат електроенергії в колах заряду нелінійних і лінійних конденсаторів від акумуляторної батареї. Встановлено особливості впливу на такі втрати енергії початкових і кінцевих напруг на конденсаторах та їхніх ємностей. Бібл. 15, рис. 3, табл. 4.

Ключові слова: перехідний процес, ємність, заряд, суперконденсатор, нелінійність, внутрішній опір, акумуляторна батарея, втрати електроенергії.

Вступ. Сьогодні для формування великих імпульсних струмів в електротехніці, силовій електроніці та тяговому електроприводі у більшості випадків використовують накопичувальні лінійні конденсатори (ЛК), що здатні реалізувати у навантаженні великі швидкості зростання струму та імпульсні потужності, недосяжні для інших накопичувачів енергії. Також використовують електрохімічні акумуляторні батареї (АБ), які в одиниці об'єму можуть накопичувати дуже велику електричну енергію і відповідно віддавати її тривалий час споживачу. Відмінність енергетичних характеристик ємнісних і електрохімічних накопичувачів енергії є основою наукових розробок, спрямованих на створення комбінованих джерел електроживлення, де АБ використовують для тривалого живлення навантажень стабільним струмом, а накопичувальні конденсатори підключають при необхідності реалізації короткочасних великих струмів і потужностей. Але перешкодою створення таких комбінованих джерел довгий час були дуже низькі питомі енергетичні характеристики ЛК і, відповідно, дуже великі масогабаритні показники.

Протягом останніх десятиліть розроблено нові накопичувачі електроенергії – так звані суперконденсатори (СК), електрична ємність складових елементів яких може складати сотні-тисячі фарад при напрузі від 2,7 до 4 В і внутрішньому електричному опорі меншому від 0,1 МОм [2, 4, 6–12]. Виробники СК заявляють про їхню можливість витримувати до 1 млн. зарядно-розрядних циклів, що у сотні-тисячі разів перевищує можливості АБ і є запорукою дуже великого ресурсу. Мала напруга

допустимого заряду окремих елементів СК обмежується критичним значенням, при якому виникає інтенсивне електрохімічне розкладання їхнього електроліту зі швидким виходом із ладу всього накопичувача. Тому на практиці елементи СК з'єднують послідовно, створюючи ємнісні накопичувачі електроенергії з напругою на вихідних клеммах у десятки-сотні вольт [6–10].

Для оцінки перспективи використання СК разом із АБ у комбінова-

Таблиця 1

Характеристики	ЛК	Літій-іонна АБ ємністю до 700 А·год	СК
Тривалість заряду, с	$10^{-3} - 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^3 - 18 \cdot 10^3$	1 – 30
Тривалість розряду, с	$10^{-3} - 10^{-6}$	$\sim 10^3$	1 – 30
Число циклів заряд – розряд	10^6	10^3	10^6
Питома енергія, Вт·год/кг	0,1	200	30
Питома потужність, Вт/кг	10^6	$4 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^4$

© Білецький О.О., Супруновська Н.І., Щерба А.А., 2016

*ID <http://orcid.org/0000-0001-7499-9142>; **ID <http://orcid.org/0000-0002-0200-369X>

них джерелах електроживлення нестационарних споживачів електроенергії основні енергетичні й експлуатаційні характеристики сучасних ЛК, АБ і СК представлено у табл. 1 [6–12].

Із табл. 1 видно, що СК витримують без руйнування в тисячу разів більше зарядно-розрядних циклів, ніж сучасні літій-іонні АБ [12]. Питома потужність СК більше, ніж в 22 рази перевищує таку ж характеристику АБ, а тривалості процесів заряду і розряду СК на 2–3 порядки є меншими, ніж у АБ [8]. У той самий час питома енергія СК майже у 7 разів є меншою, ніж у літій-іонних АБ, але у 300 разів більшою, ніж в ЛК. Тому зрозуміло, що сталі режими споживання енергії електродвигуном автономного транспорту або іншими споживачами з незмінними електричними опорами доцільно забезпечувати від АБ, а короткочасні імпульсні режими споживання великої потужності – від СК [4, 6–9].

Детальний аналіз енергетичних характеристик суперконденсаторів і різних споживачів електроенергії показав [2–15], що дослідження проводяться без урахування втрат електроенергії в колах заряду і внутрішнього перерозподілу зарядів на елементах суперконденсатора. Не проводилися також дослідження щодо впливу початкових і кінцевих умов заряду СК при їхньому живленні від джерел електрорушійної сили, якими є сучасні акумуляторні батареї.

Метою даної роботи є визначення та порівняння енергетичних характеристик (енергії втрат і коефіцієнта передачі енергії) лінійного конденсатора і суперконденсатора при їхньому заряді від акумуляторної батареї при нульовій і ненульовій початковій напрузі та уточнення впливу початкових і кінцевих напруг конденсаторів на втрати електроенергії в колах їхнього заряду.

У роботах [2, 6–11] зазначалося, що фізика процесів СК пов'язана з наявністю в них частини ємності, яка залежить від прикладеної до його клем напруги. Ці висновки підтверджено експериментальними дослідженнями процесів заряду СК ємністю 470, 1500 і 2600 Ф від джерела постійної напруги [13, 15]. Тому у наших дослідженнях ураховувалася залежність ємності суперконденсаторів від величини напруги на їхніх клеммах відповідно до залежностей, наведених у зазначених публікаціях.

На рис. 1 показано нелінійну залежність загальної ємності СК від прикладеної напруги (експериментальні дані відображені суцільною лінією, а їхня апроксимація – пунктирною лінією). Номінальне значення загальної ємності такого СК (тобто ємність при половинній номінальній напрузі $U_n/2$) дорівнює 470 Ф (для $U_n=2,3$ В і температури від -20 до 60°C) [12].

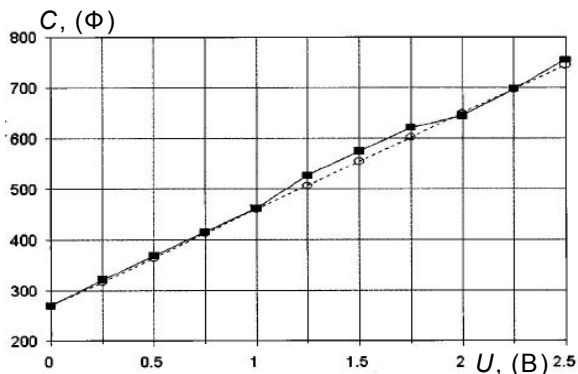


Рис. 1

Цю ємність створює послідовне з'єднання багатьох ємностей і наноелектродів первинних конденсаторів, які виникають у подвійному електричному шарі зарядів на поверхні пор активованого вугілля основних електродів СК.

Ємність СК, як будь-якого конденсатора, можна представити відомим виразом [1]

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / d, \quad (1)$$

де ε – діелектрична проникність електроліту; ε_0 – діелектрична проникність вакууму; S – загальна площа розвиненої поверхні нанопористого електроду; d – товщина подвійного електричного шару (діелектрика між зарядами подвійного електричного шару).

Тому збільшення загальної ємності СК із зростанням напруги може бути наслідком збільшення діелектричної проникності електроліту або зменшення товщини подвійного електричного шару. Іншим поясненням нелінійного зростання ємності СК з підвищенням напруги на його клеммах може бути те, що область накопичення зарядів в електродах СК збільшується при прикладанні більш високої напруги. За таких умов процес відбувається завдяки проникненню зарядів у розвинені нанопори електродів меншого діаметра, тому він може викликати збільшення накопиченого в СК заряду, нелінійне відносно збільшення напруги на клеммах СК [9, 12].

Відомо, що під ємністю C між двома тілами, на яких є рівні і протилежні за знаком заряди Q , розуміють абсолютну величину відношення заряду на одному з тіл до напруги між ними [1]

$$C = Q / U, \quad (2)$$

звідки одиницею ємності є $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$.

В електростатичному полі, яке виникає в лінійному й ізотропному діелектрику між двома провідними тілами, напруга U між ними є лінійною функцією заряду Q , тоді співвідношення Q/U , яке є ємністю між такими тілами, є константою і не залежить від величини Q (а отже і від величини U). Така ємність залежить тільки від конфігурації тіл, їхніх розмірів, відстані між ними і електричних

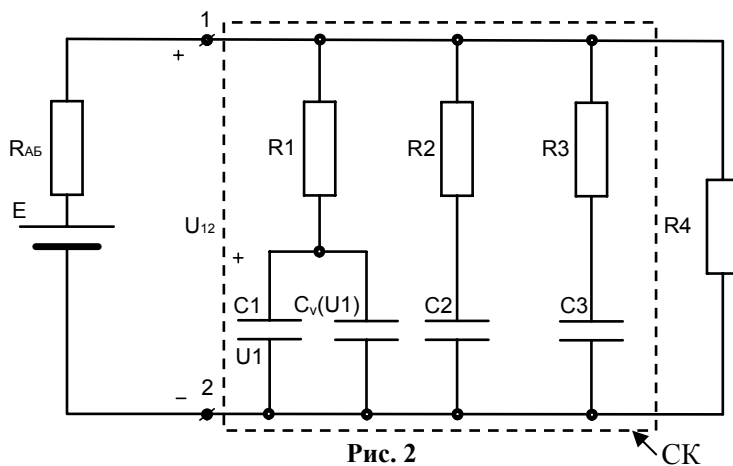
властивостей діелектрика [1]. Це справедливо для лінійних конденсаторів. Однак існують і інші пристрої, де залежність між Q і U є нелінійною (наприклад, пристрої, де використовуються сегнетоелектрики – речовини, в яких діелектрична проникність ϵ є функцією від напруги U). Для суперконденсаторів величина ємності C є функцією напруги між їхніми електродами U [2, 4, 7–15]. Але в усіх випадках вираз (2) є справедливим (у тому числі для ЛК і СК), оскільки він встановлює співвідношення між накопиченим на кожній із обкладок зарядом Q і напругою між ними U .

Згідно з фізикою подвійного електричного шару [2, 7, 9, 11] та отриманими експериментальними результатами [8, 12, 15] загальна ємність суперконденсаторів може визначатися виразом

$$C(U) = C_0 + k U. \quad (3)$$

З урахуванням виразу (3) та результатів досліджень, представлених у роботах [2, 4, 5, 7–15], для моделювання режимів роботи СК доцільно застосовувати розгалужені схеми заміщення. З метою урахування розподілених електричних параметрів суперконденсаторів у роботах [2, 9, 12, 15] запропоновано використовувати розгалужені схеми заміщення із різною кількістю паралельних гілок, що містять зосереджені лінійні та нелінійні елементи C , R і L . Схеми можуть бути вдосконалені з урахуванням тривалості перехідних процесів.

У даній роботі досліджується зміння енергетичних і динамічних характеристик СК при зміні напруги на його клеммах при його заряді від акумуляторної батареї. Оптимальним рішенням даної задачі є використання еквівалентної схеми заміщення СК з різною кількістю паралельних гілок із різними значеннями постійних часу $\tau = RC$ [15].



На рис. 2 показано схему заміщення, яка з достатньою точністю відображає енергетичні процеси в СК при тривалості перехідних процесів $\tau \leq 30$ хв. Параметри схеми СК були визначені експериментальним шляхом у роботі [15].

Перша ("швидка") гілка представлена ємністю, величина якої залежить від напруги [12] згідно з (3). Ця гілка складається з елементів C_1 та R_1 , значення яких не змінюються, і елемента $C_v(U_1)$, значення якого залежить від прикладеної напруги до клем СК. Гілка має настільки малу сталу часу, що її ємності заряджаються за декілька секунд.

Друга гілка (гілка "з затримкою") з незмінними параметрами C_2 та R_2 використовується для відображення перехідних процесів, які тривають декілька хвилин. Третя ("довготривала") гілка має найбільшу сталу часу і відображає перехідні процеси тривалістю більше 10 хвилин, причому допускається, що параметри C_3 та R_3 є незмінними, тобто незалежними від напруги на клеммах СК.

З метою врахування саморозряду СК в його схему заміщення паралельно включається резистор R_4 . Акумуляторна батарея представлена джерелом постійної напруги E з внутрішнім опором R_{AB} .

У роботі [12] експериментально було підтверджено, що така еквівалентна схема заміщення СК достатньо точно відображає залежність його ємності від напруги при тривалості зарядно-розрядних процесів не менше, ніж 10 с.

Енергетичні характеристики заряду лінійного і нелінійного конденсаторів від акумуляторної батареї. Зміну величини заряду конденсатора у часі dQ характеризує електричний струм у момент заряду

$$i(t) = dQ/dt, \quad (4)$$

звідки відповідно $dQ = i(t) dt$.

Для СК необхідно враховувати, що диференціал заряду dQ є лінійною частиною нескінченно малого приросту функції, яка дорівнює добутку $C(U)$ на U , а формула для визначення dQ має вигляд

$$dQ = d[U \cdot C(U)] = (C_0 + 2 kU)dU. \quad (5)$$

Підставивши (5) у (4), отримаємо вираз для визначення зміння величини струму у часі

$$i(t) = (C_0 + 2 kU)(dU/dt). \quad (6)$$

Диференціальну ємність суперконденсатора можна знайти за формулою

$$C_{\text{диф}}(U) = C_0 + 2kU. \quad (7)$$

Ємність звичайних лінійних конденсаторів C не залежить від напруги їхнього заряду U , а енергія, що накопичується в них за умов нульової початкової напруги, визначається виразом [1]

$$W_{\text{ЛК}} = CU^2/2. \quad (8)$$

Якщо заряд СК починався при нульових початкових умовах (при $t_n = 0$ напруга $U_n = 0$ і величина заряду $Q_n = 0$), то, враховуючи вирази (4) – (5), можна отримати вираз для енергії $W_{\text{СК}}$, накопиченої в СК при певній кінцевій напрузі $U_k = U$

$$W_{\text{СК}} = \int_{t_n}^{t_k} U(t) \cdot i(t) dt = \int_{Q_n}^{Q_k} U dQ = \int_{U_n}^{U_k} U (C_0 + 2kU) dU = C_0 U^2/2 + 2k U^3/3. \quad (9)$$

Дозу енергії $W_{\text{АБ}}$, яка відбирається від акумуляторної батареї з напругою $U_{\text{АБ}}$ за час перехідного процесу, знайдемо за формулою

$$W_{\text{АБ}} = W_{\text{АБ}}(t_n) - W_{\text{АБ}}(t_k) = \int_{t_n}^{t_k} U_{\text{АБ}} i(t) dt. \quad (10)$$

Коефіцієнт передачі енергії η , що дорівнює відношенню енергії, яка поступила в ЛК або в СК, до енергії, яка відібрана від АБ за весь час заряду

$$\eta_{\text{ЛК}} = (W_{\text{ЛК}}(t_k) - W_{\text{ЛК}}(t_n)) / W_{\text{АБ}}, \quad (11)$$

$$\eta_{\text{СК}} = (W_{\text{СК}}(t_k) - W_{\text{СК}}(t_n)) / W_{\text{АБ}}, \quad (12)$$

де $W_{\text{ЛК}}(t_n)$, $W_{\text{СК}}(t_n)$, $W_{\text{ЛК}}(t_k)$, $W_{\text{СК}}(t_k)$ – енергії, які накопичені в ЛК і СК відповідно до комутації і після завершення перехідного процесу заряду від АБ.

З виразів (8), (9) і (10) отримаємо енергію втрат у колі заряду ЛК і СК від АБ. Енергія втрат є різницею між енергією, відданою АБ, і енергією, яку отримав у процесі заряду ЛК або СК

$$W_{\text{втрат ЛК}} = (W_{\text{АБ}}(t_n) - W_{\text{АБ}}(t_k)) - (W_{\text{ЛК}}(t_k) - W_{\text{ЛК}}(t_n)) = W_{\text{АБ}}(1 - \eta_{\text{ЛК}}), \quad (13)$$

$$W_{\text{втрат СК}} = (W_{\text{АБ}}(t_n) - W_{\text{АБ}}(t_k)) - (W_{\text{СК}}(t_k) - W_{\text{СК}}(t_n)) = W_{\text{АБ}}(1 - \eta_{\text{СК}}). \quad (14)$$

Таким чином, при аналізі енергетичних процесів лінійних конденсаторів, заряджених до будь-якої напруги, можна обмежуватися одним постійним значенням їхньої ємності C , а при аналізі таких процесів у суперконденсаторах, заряджених до деякої напруги U_1 , необхідно розраховувати їхню ємність як функцію $C(U_1)$ для значення напруги U_1 .

Згідно з виразами (8) і (9) СК накопичує більшу енергію, ніж ЛК, заряджений до такої самої напруги, тому при розряді СК і ЛК, які мають однакові внутрішні опори ($R_{\text{ЛК}} = R_{\text{СК}}$) і є зарядженими до однакових напруг, суперконденсатор віддасть у навантаження опором R_n більше енергії і з більшою імпульсною потужністю, ніж ЛК.

З формул (8) і (9) можна отримати вираз для ємності ЛК C_W , яка еквівалентна ємності СК за умови рівності накопичених у них енергій ($W_{\text{ЛК}} = W_{\text{СК}}$) і напруги на обкладках ($U_{\text{ЛК}} = U_{\text{СК}} = U$)

$$C_W = C_0 + 4kU/3. \quad (15)$$

При розряді СК та еквівалентного йому за початковою енергією ЛК від початкової напруги U_0 до половинної напруги $U_0/2$, енергію, яка залишиться у кожному із конденсаторів після їхнього розряду, з урахуванням (9) і (15) можна розрахувати наступним чином:

$$W_{\text{СК}}(t_k) = \frac{C_0 (U_0/2)^2}{2} + \frac{kU_0^3}{12}, \quad (16)$$

$$W_{\text{ЛК}}(t_k) = \frac{C_W (U_0/2)^2}{2} = \frac{C_0 (U_0/2)^2}{2} + \frac{kU_0^3}{6}. \quad (17)$$

Порівнюючи (16) і (17), можна зробити висновок, що після розряду від U_0 до $U_0/2$ в СК залишається менше (а отже у навантаження віддається більше) енергії, ніж у ЛК, на величину $kU_0^3/12$.

Наприклад, СК, який згідно з [15] має параметри $C_0=270$ Ф, $k=190$ Ф/В, $U_0=2,3$ В, при повному заряді має ємність $C_{\text{СК}}=707$ Ф. Тоді енергетично еквівалентна йому ємність ЛК $C_W = 852,7$ Ф. Початкові енергії СК і ЛК будуть дорівнювати: $W_{\text{СК}}(t_n)=W_{\text{ЛК}}(t_n)=2255,3$ Дж, а після розряду від U_0 до $U_0/2$ у конденсаторах залишиться $W_{\text{СК}}(t_k)=371,2$ Дж та $W_{\text{ЛК}}(t_k)=563,8$ Дж, тобто відповідно 16,5 та 25 % від початкової енергії.

Для дослідження енергетичних характеристик кола при заряді СК і ЛК від АБ було виконано математичне моделювання в пакеті прикладних програм Matlab. Параметри СК і літій-іонної акумуляторної батареї [8, 15], які використовувалися при дослідженні, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри схеми заміщення СК								Параметри літій-іонної АБ	
R_1 , Ом	C_1 , Ф	k , Ф/В	R_2 , Ом	C_2 , Ф	R_3 , Ом	C_3 , Ф	R_4 , Ом	E , В	R_{AB} , Ом
0,0025	270	190	0,9	100	5,2	220	9000	2,3	0,012

Ф. Внутрішні опори ЛК і першої (швидкої) гілки СК були однаковими $R_{LK}=R_1=0,0025$ Ом.

Для визначення найбільш оптимальних режимів заряду суперконденсатора від літій-іонної батареї та їхнього порівняння з аналогічними режимами лінійного конденсатора, було виконано аналіз їхніх енергетичних характеристик: проведено аналіз змінення дози енергії, яка поступає в СК і ЛК; енергії втрат у колі; дози енергії, яка відбиралася від акумуляторної батареї, і коефіцієнта передачі енергії від АБ у залежності від напруги, до якої зарядився СК і ЛК.

Було розраховано п'ять режимів, за яких напруги на СК і ЛК були однакові й відповідно порівнювали $0,25U_n$, $0,5U_n$, $0,75U_n$, $0,9U_n$ та $0,99U_n$. Енергетичні характеристики СК і ЛК досліджувалися в процесі заряду від АБ у чотирьох діапазонах змінення напруг ЛК і СК: 1) від $0,25$ до $0,5U_n$; 2) від $0,5$ до $0,75U_n$; 3) від $0,75$ до $0,9U_n$; 4) від $0,9$ до $0,99U_n$.

На рис. 3, а показано функціональні залежності дози енергії $W_{СК}$, яка поступає в СК в кожний момент його заряду, і дози енергії W_{AB1} , яка при цьому відбирається від АБ; дози енергії W_{LK} , яка поступає в ЛК в

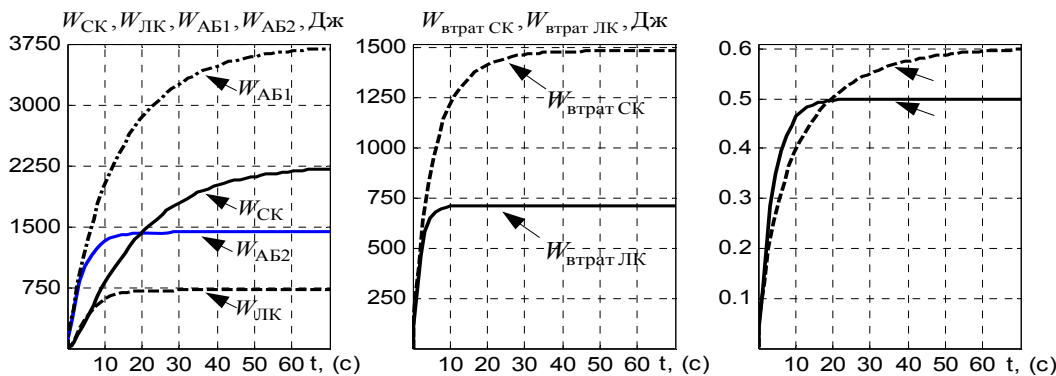


Рис. 3

Таблиця 3

Точки	1	2	3	4	5
U , В	$0,25U_n$	$0,5U_n$	$0,75U_n$	$0,9U_n$	$0,99U_n$
$W_{СК}$, Дж	68,77	371,70	1052,00	1703,00	2196,00
W_{LK} , Дж	44,63	178,60	401,80	578,50	700,20
W_{AB} , Дж (СК)	501,50	1293,00	2372,00	3159,00	3680,00
W_{AB} , (Дж) / ЛК	356,90	714,10	1071,00	1286,00	1414,00
$W_{втрат}$, (Дж) / СК	432,73	921,30	1320,00	1456,00	1484,00
$W_{втрат}$, (Дж) / ЛК	312,10	535,50	669,20	707,50	713,80
$\eta_{СК}$, %	13,7	28,7	44,3	53,9	59,7
η_{LK} , %	12,5	25,0	37,5	45,0	49,5
$t_{СК}$, с	1,604	5,166	13,490	26,810	63,910
t_{LK} , с	1,126	2,714	5,429	9,017	18,120

У табл. 3 наведено енергетичні характеристики (дози енергії, яка поступає в СК і ЛК; дози енергії, яка відбирається від акумуляторної батареї, енергії втрат у колі заряду; коефіцієнта передачі енергії від АБ) та п'ять моментів часу $t_{СК}$ і t_{LK} , при яких напруга на СК і ЛК складала $0,25U_n$; $0,5U_n$; $0,75U_n$; $0,9U_n$ та $0,99U_n$.

Результати моделювання в пакеті програм Matlab, наведені в таблиці, підтвердили вірність аналітичних залежностей (3) – (15). Видно, що при заряді СК від напруги $U_{оск}=0$ до $0,25U_n$ коефіцієнт передачі енергії від АБ до СК у 1,1 рази є більшим, ніж коефіцієнт передачі енергії від АБ до ЛК. При збільшенні кінцевої напруги на СК до $0,5U_n$ коефіцієнт $\eta_{СК}$

нелінійно зростає до 28,7 % і стає у 1,15 раз більшим, ніж $\eta_{ЛК}$.

Відомо, що при заряді повністю розрядженого ЛК до напруги АБ коефіцієнт передачі енергії від АБ дорівнює 0,5 [1], що підтверджує табл. 3. А для аналогічного режиму заряду СК коефіцієнт передачі енергії від АБ до СК дорівнює 0,6, тобто ϵ в 1,2 рази більшим.

Доза енергії, яка поступає в СК при заряді до напруги $0,25U_n$, ϵ в 1,54 рази більшою, ніж доза енергії, яка поступає в ЛК. При цьому втрати електроенергії у колі заряду СК ϵ всього в 1,39 рази більшими від втрат у колі ЛК. При заряді СК до напруги $0,75U_n$ доза енергії, що поступає в СК, стає в 2,62 рази більшою, ніж доза енергії, що поступає в ЛК в аналогічному режимі, в той час як втрати у колі заряду СК будуть більшими всього в 1,47 раз, ніж у колі ЛК. При заряді ЛК і СК до напруги $0,99U_n$ доза накопиченої енергії в СК буде у 3,14 рази більшою, ніж енергія в ЛК, а втрати енергії в колі заряду СК – у 2,08 раз більшими, ніж у колі заряду ЛК.

У табл. 4 наведено характеристики ЛК і СК при їхньому підзаряді в різних діапазонах зміни напруги. При цьому змінюються також і тривалості заряду СК і ЛК, тобто значення $t_{СК\ i-n}$ і $t_{СК\ i-n}$. Але при зазначених ненульових початкових напругах СК і ЛК коефіцієнти передачі енергії до них від АБ ϵ майже однаковими, проте величина $\eta_{СК\ i-n}$ ϵ все таки більшою від значення $\eta_{ЛК\ i-n}$.

Таблиця 4

Діапазон зміни напруги, $(U_i - U_n) / U_n$, В	0,25 – 0,5	0,5 – 0,75	0,75 – 0,9	0,9 – 0,99
$W_{СК\ i-n}$, (Дж)	302,93	680,30	651,00	493,00
$W_{ЛК\ i-n}$, (Дж)	133,97	223,20	176,70	121,70
$W_{АБ\ i-n}$, (Дж) / СК	791,50	1079,00	787,00	521,00
$W_{АБ\ i-n}$, (Дж) / ЛК	357,20	356,90	215,00	128,00
$W_{втрат\ i-n}$, (Дж) / СК	488,57	398,70	136,00	28,00
$W_{втрат\ i-n}$, (Дж) / ЛК	223,23	133,70	38,3	6,3
$\eta_{СК\ i-n}$, %	38,3	63,0	82,7	95,0
$\eta_{ЛК\ i-n}$, %	37,5	62,5	82,5	95,0
$t_{СК\ i-n}$, с	3,562	8,324	13,320	37,100
$t_{ЛК\ i-n}$, с	1,588	2,715	3,588	9,103

Доза енергії, яка поступає в СК при змінній напруги від 0,25 до $0,5U_n$, ϵ в 2,26 рази більшою від дози енергії, що поступає в ЛК, але енергія втрат у колі заряду в 2,19 разів більше від втрат у колі заряду СК. При зростанні початкових напруг на ЛК і СК різниця між енергіями, переданими від АБ до СК і ЛК, зростає, але відносні енергетичні характеристики стають практично однаковими.

Зрозуміло, що найбільш енергоефективний заряд відбувається при змінній напруги на СК і ЛК від 0,9 до $0,99U_n$. Проте при однаково високих коефіцієнтах передачі енергії $\eta_{СК} = \eta_{ЛК} = 0,95$ значною перевагою СК ϵ те, що він накопичує в 4 рази більше енергії, ніж ЛК. Перевагою СК ϵ також те, що його питома енергія в декілька сот разів більше, ніж у ЛК [9]. Тобто при накопиченні однакових енергій вага батареї СК буде в декілька сот разів меншою від ваги ЛК. За питомою енергією промислові зразки СК наближаються до сучасних свинцевих акумуляторів [7], а їхня питома потужність більше, ніж у 20 разів перевищує питому потужність серійних літій-іонних акумуляторів [8].

Удосконалення технології виробництва суперконденсаторів вже призвело до виготовлення таких нових матеріалів для їхніх електродів, як тривимірний пористий вуглець, що має властивості суперконденсатора при товщині всього в один атом. Площа поверхні одного грама отриманого матеріалу може становити майже 3100 м^2 . Обробка такого матеріалу гідроксидом калію призводить до створення у вуглеці великої кількості крихітних пор, які в поєднанні з електролітом можуть зберігати в собі колосальний електричний заряд. Матеріал має ідеальні властивості для виготовлення суперконденсаторів, що створює великі перспективи для подальших їхніх впроваджень.

Висновки. 1. Проведено порівняння енергетичних характеристик лінійного конденсатора і суперконденсатора при їхньому заряді від літій-іонної акумуляторної батареї з урахуванням залежності ємності суперконденсаторів від величини напруги на його клеммах. Встановлено, що при заряді повністю розряджених СК і ЛК (за умови рівності їхніх внутрішніх опорів $R_{ЛК} = R_1 = 0,0025\text{ Ом}$) коефіцієнт передачі енергії нелінійно зростає. З метою зменшення втрат енергії оптимальним ϵ заряд СК і ЛК до напруг, вищих $0,9U_n$, що забезпечує реалізацію коефіцієнта передачі енергії від акумуляторної батареї до суперконденсатора майже 0,54, а до звичайного конденсатора – 0,45.

2. Заряд повністю розрядженого суперконденсатора до напруги $0,99U_n$ (де U_n – напруга АБ) відбувається при коефіцієнті передачі 0,6, який у 1,2 рази вище від коефіцієнта передачі енергії до звичайного конденсатора. Крім цього, при заряді ЛК і СК до напруги $0,99U_n$ накопичена енергія в СК буде в 3,14 рази більшою від енергії в ЛК.

3. Встановлено, що у всіх досліджуваних діапазонах змінення напруги при заряді СК і ЛК від АБ коефіцієнт передачі енергії в СК вище аналогічного коефіцієнта ЛК. При заряді СК і ЛК у діапазоні $0,9 - 0,99U_n$ їхні коефіцієнти передачі енергії зростають до 0,95, але перевагою СК є те, що в ньому накопичується у 4 рази більше енергії, а оскільки його питома енергія в декілька сот разів є більшою, ніж у ЛК, то його вага повинна бути у декілька сот разів меншою, ніж ЛК.

4. Для більш системних досліджень суперконденсаторів треба вдосконалювати їхні еквівалентні схеми заміщення з урахуванням таких електрофізичних властивостей СК, як залежність його експлуатаційних параметрів від частоти зарядно-розрядних циклів та пульсацій напруги під час швидких зарядних і розрядних циклів. Важливо також удосконалити схему заміщення СК для дослідження енергетичних процесів, тривалість яких складає десятки і сотні хвилин.

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 733 с.
2. Изотов В.Ю., Грамадский Д.Г., Малетин Ю.А. Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатора // Наук. вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 6. – С. 114–118.
3. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. электродинамика. – 2014. – № 1. – С. 3–11.
4. 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. электродинамика. – 2015. – № 5. – С. 3–11.
5. Щерба 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 // Техн. электродинамика. – 2013. – № 3. – С. 3–11.
6. Burke A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles // Proc. of the IEEE. – 2007– Vol. 95. – No 4. – Pp. 806–820.
7. Burke A., Miller M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications // Journ. of the Power Sources. – 2011. – Vol. 196. – Issue 1. – Pp. 514–522.
8. Burke A., Miller M., Zhao H. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density // Research Report – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012.
9. Kurzweil P., Frenzel B. Capacitance characterization methods and ageing behaviour of supercapacitors // Proc. the 15th International seminar on double layer capacitors. – Deerfield Beach, FL, U.S.A., December 5-7, 2005.
10. Maletin Y., Stryzhakova N., Zelinskyi S., Chernukhin S., Tretyakov D., Mosqueda H., Davydenko N., and Drobnyy D. New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles // Journ. of Energy and Power Engineering. – 2015. – No 9. – Pp. 585–591.
11. 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. – 2013. – Vol. 75. – Iss. 2. – Pp. 277–290.
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. – Vol. 165. – No 2. – Pp. 928–934.
13. Monastyrsky G.E., Yakovenko P.A., Kolomytzev V.I., Koval Yu.N., Shcherba A.A., Portier R. Characterization of spark-eroded shape memory alloy powders obtained in cryogenic liquids // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 481–482. – Iss. 1–2. – Pp. 643–646.
14. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 50–54.
15. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications // IEEE Trans. On Industry Applications. – 2000. – Vol. 36. – No 1. – Pp. 199–205.

УДК 621.3.011:621.372

ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕПЕЙ ЗАРЯДА СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ОТ ИХ НАЧАЛЬНЫХ И КОНЕЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

О.А.Белецкий¹, Н.И. Супруновская², канд.техн.наук, А.А. Щерба², чл.-корр. НАН Украины

¹- **Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, E-mail: biletsky27@gmail.com**

²- **Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.**

E-mail: iednat1@gmail.com

В работе определены зависимости энергетических характеристик электрических цепей заряда суперконденсаторов (заряд которых является нелинейной функцией от напряжения на их клеммах) от идеального источника ЭДС, которым для емкостных накопителей электроэнергии может быть батарея аккумуляторов. Выполнено сравнение энергетических характеристик цепей заряда суперконденсаторов и обычных конденсаторов.

ров. Определены условия уменьшения потерь электроэнергии в цепях заряда нелинейных и линейных конденсаторов от аккумуляторной батареи. Установлены особенности влияния на такие потери энергии начальных и конечных напряжений на конденсаторах и их емкостей. Библ. 15, рис. 3, табл. 4.

Ключевые слова: переходной процесс, емкость, заряд, суперконденсатор, нелинейность, внутреннее сопротивление, аккумуляторная батарея, потери электроэнергии.

DEPENDENCES OF POWER CHARACTERISTICS OF CIRCUIT AT CHARGE OF SUPERCAPACITORS ON THEIR INITIAL AND FINAL VOLTAGES

O.A. Beletsky¹, N.I. Suprunovska², A.A. Shcherba²

¹- National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",

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

E-mail: biletsky27@gmail.com

²- Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

E-mail: iednat1@gmail.com

Available dependences of power characteristics of charge circuits of supercapacitors (charge of which is nonlinear function of voltage on their terminals) on ideal source EMF, which for capacitive storages can be the accumulator battery are defined in this work. Comparison of power characteristics of charge circuits of supercapacitors and usual capacitors is executed. Conditions of decrease of electric power losses in charge circuits of nonlinear and linear capacitors from the accumulator battery are defined. Features of influence of energy of initial and final voltages of capacitors and their capacities on such losses are determined. References 15, figures 3, tables 4.

Key words: transient process, capacity, charge, supercapacitor, nonlinearity, internal resistance, accumulator battery, electric power losses.

1. Bessonov L.A. Theory of electrical engineering. – Moskva: Vysshaya shkola, 1973. – 733 p. (Rus)
2. 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)
3. 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)
4. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I., 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)
5. 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)
6. Burke A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles // Proc. of the IEEE. – 2007. – Vol. 95. – No 4. – Pp. 806–820.
7. Burke A., Miller M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications // Journal of the Power Sources. – 2011. – Vol. 196. – Issue 1. – Pp. 514–522.
8. Burke A., Miller M., Zhao H. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density // Research Report – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012.
9. Kurzweil P., Frenzel B. Capacitance characterization methods and ageing behaviour of supercapacitors // Proc. the 15th International seminar on double layer capacitors. – Deerfield Beach, FL, U.S.A., December 5-7, 2005.
10. Maletin Y., Stryzhakova N., Zelinskyi S., Chernukhin S., Tretyakov D., Mosqueda H., Davydenko N., and Drobynyi D. New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles // Journ. of Energy and Power Engineering. – 2015. – No 9. – Pp. 585–591.
11. 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. – 2013. – Vol. 75. – Iss. 2. – Pp. 277–290.
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. – Vol. 165. – No 2. – Pp. 928–934.
13. Monastyrsky G.E., Yakovenko P.A., Kolomytzev V.I., Koval Yu.N., Shcherba A.A., Portier R. Characterization of spark-eroded shape memory alloy powders obtained in cryogenic liquids // Materials Science and Engineering A. – 2008. – Vol. 481–482. – Iss. 1–2. – Pp. 643–646.
14. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-spark load // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 50–54.
15. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications // IEEE Trans. On Industry Applications. – 2000. – Vol. 36. – No 1. – Pp. 199–205.

Надійшла 17.08.2015

Остаточний варіант 03.09.2015