

О. О. БІЛЕЦЬКИЙ, аспірант НТУУ «Київський політехнічний інститут»;
А. А. ЩЕРБА, чл.-кор., Інститут електродинаміки НАН України, Київ;
Н. І. СУПРУНОВСЬКА, к.т.н., Інститут електродинаміки НАН України, Київ.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КІЛ АПЕРІОДИЧНОГО ЗАРЯДУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ВІД АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Вступ. Сучасні електротехнічні системи орієнтовані на використання накопичувачів електроенергії, які здатні швидко реалізувати у навантаженні великі імпульсні потужності і струми. Для вирішення такої задачі все частіше використовують суперконденсатори (СК), основним призначенням яких є реалізація короточасних великих потужностей в електротехнічних і електромеханічних системах. Розробники заявляють, що сучасні СК без суттєвого погіршення їх енергетичних характеристик витримують мільйон і більше циклів заряд – розряд при великих зарядних і розрядних короточасних струмах [2, 11-14].

З іншого боку, виробники сучасних електромобілів вже широко використовують літій-іонні акумуляторні батареї (АБ) [8-10], які мають ресурс 8 і більше років, що відповідає реалізації 2–3 тисяч зарядно-розрядних циклів, або 160 тис. км пробігу електромобілів [8, 9,13]. З метою досягнення більш тривалого ресурсу АБ, виробники продовжують шукати методи оптимізації їх режимів з точки зору збільшення кількості робочих циклів. Одним із таких методів є використання більш товстого сепаратора, що негативно впливає на вагу і габарити елементів АБ. Для збільшення ресурсу АБ їх заряджають на менші, ніж номінальні напруги. І все таки АБ добре себе зарекомендували для роботи на навантаження зі стабільним споживанням енергії, але при роботі в пікових режимах їх енергетичні характеристики суттєво погіршуються, а ресурс зменшується [13].

На даний час при електроживленні нестаціонарних споживачів найбільш доцільним вважається використання гібридної системи електроживлення, яка базується на одночасному використанні АБ і СК. Але всебічний огляд наукових досліджень в Україні і за кордоном щодо методів підвищення енергетичних характеристик систем електроживлення з паралельним включенням АБ і СК показав [8-14], що такі системи досліджуються без урахування втрат електроенергії в колах заряду і дозаряду СК. У відомих роботах не вирішувались також задачі підвищення коефіцієнта передачі енергії від АБ до СК при різних початкових напругах на його клеммах.

Постановка задачі та обговорення отриманих результатів. Дані дослідження спрямовані на підвищення енергетичних характеристик електричних кіл аперіодичного заряду суперконденсаторів від АБ на основі визначення та використання закономірностей впливу початкових напруг на клеммах СК на коефіцієнт передачі енергії від АБ до суперконденсаторів і на втрати електроенергії в колах їх аперіодичного заряду (підзаряду).

В попередніх роботах [2, 4, 11] зазначалось, що згідно фізики процесів в СК частина його ємності залежить від напруги на клеммах, що необхідно урахувати при змінненні як накопиченого заряду в СК, так і накопиченої електричної енергії.

За умовами експерименту СК заряджався від літій-іонної АБ [8], причому в урахувалось зростання ємності суперконденсатора при збільшенні напруги на його клеммах. Загальна ємність СК представлялась сумою незмінної ємності $C_1 = const$ і ємності $C_v(U) = k \cdot U$, яка згідно результатам робіт [2, 4, 8-16] лінійно залежить від величини напруги на клеммах СК. На основі багатьох експериментальних досліджень у роботах [2, 11, 14, 16] було обґрунтовано, що коефіцієнт $k = dC_v/dU$, який має розмірність [Ф/В], з високою точністю можна вважати сталою величиною для всіх досліджуваних СК, а загальну ємність СК можна визначати як:

$$C(U) = C_1 + k \cdot U \quad (1)$$

Для моделювання енергетичних процесів в СК у роботах [4, 14,16] було розроблено його еквівалентну схему заміщення, представлену на рис.1.

Ця схема використовувалась у статті для аналізу впливу ненульових початкових напруг СК на енергетичні характеристики кола його аперіодичного заряду.

Згідно з виразом (1) перша гілка представлена конденсатором, ємність якого залежить від напруги [16]. В ній значення ємності $C_v(U_1)$ залежить від різниці напруги прикладеної до клем СК і падіння напруги на не-

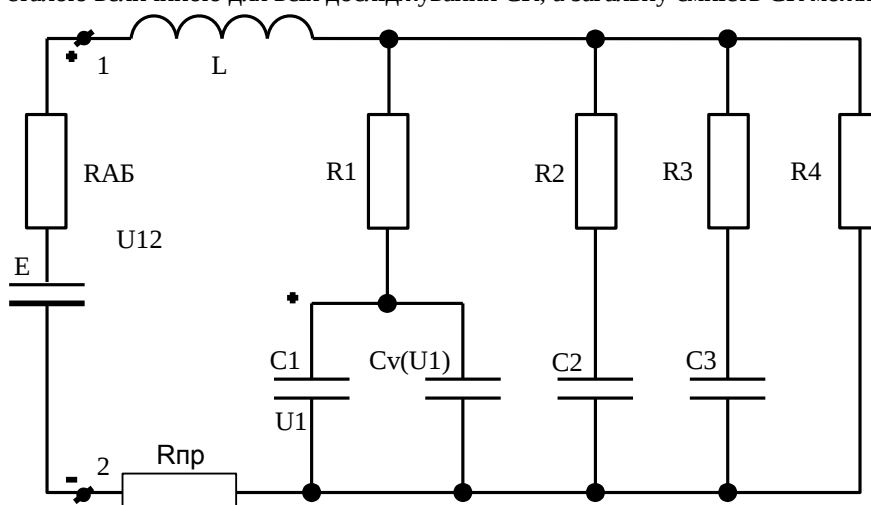


Рис. 1 – Еквівалентна схема заміщення СК
 © О.О. Білецький, А.А. Щерба, Н.І. Супруновська, 2015

змінному опорі R_1 . Конденсатори в даній гілці заряджаються в секундному часовому діапазоні, завдяки малій сталій часу. Гілка з незмінними елементами C_2 та R_2 працює в хвилинному часовому діапазоні. Стала часу третьої гілки з постійними елементами C_3 та R_3 найбільша і працює в діапазоні часу від 10 хвилин. В схемі заміщення додано опір R_4 для врахування саморозряду суперконденсатора.

Джерелом постійної напруги виступала літій-іонна акумуляторна батарея з внутрішнім опором R_{AB} . В схемі заміщення враховувалась індуктивність зарядного контуру L і опір проводів $R_{пр}$.

Смність C звичайних лінійних конденсаторів не залежить від напруги їх заряду U , а накопичена в них енергія визначається виразом [1]:

$$W_{лк} = CU^2/2. \quad (2)$$

Змінення електричної енергії в суперконденсаторі [4] при протіканні між його обкладками струму $i(t)$ за проміжок часу $\Delta t = t_2 - t_1$ (i відповідно змінення величини заряду Q на кожній з них від Q_1 до Q_2 і величини напруги U між ними від U_1 до U_2) можна знайти з виразу:

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot i(t) \cdot dt = \int_{Q_1}^{Q_2} U \cdot dQ = \int_{U_1}^{U_2} U \cdot (C_1 + 2kU) \cdot dU. \quad (3)$$

Звідки можна записати:

$$\Delta W = \frac{C_1(U_2^2 - U_1^2)}{2} + \frac{2k(U_2^3 - U_1^3)}{3} = (U_2 - U_1) \cdot \left[\frac{C_1(U_2 + U_1)}{2} + \frac{2k(U_2^2 + U_2U_1 + U_1^2)}{3} \right]. \quad (4)$$

Частковим випадком є заряд СК при нульових початкових умовах ($U(t_n) = 0$), тоді можна отримати вираз для енергії $W_{СК}$, накопиченої в СК при певній кінцевій напрузі $U_k = U$:

$$W_{СК} = \int_{t_n}^{t_k} U(t) \cdot i(t) \cdot dt = \int_{Q_n}^{Q_k} U \cdot dQ = \int_{U_n}^{U_k} U(C_1 + 2kU) \cdot dU = C_1 U^2/2 + 2kU^3/3. \quad (5)$$

Доза енергії, яка відбирається від АБ [7] W_{AB} , знаходиться за формулою:

$$W_{AB} = \int_{t_n}^{t_k} U_{AB} i(t) \cdot dt, \quad (6)$$

де U_{AB} – напруга акумуляторної батареї.

Коефіцієнт передачі енергії $\eta_{СК}$, рівний відношенню енергії, яка поступила в СК, до енергії, яка відібрана від АБ за весь час заряду:

$$\eta_{СК} = (W_{СК}(t_k) - W_{СК}(t_n)) / (W_{AB}(t_n) - W_{AB}(t_k)), \quad (7)$$

де $W_{СК}(t_n), W_{СК}(t_k)$ – енергії, які були накопичені в СК відповідно до комутації і після завершення перехідного процесу заряду від АБ; $\Delta W_{AB} = W_{AB}(t_n) - W_{AB}(t_k)$ – енергія, яку віддала АБ за час перехідного процесу.

З виразів (5), (6) і (7) отримаємо енергію втрат в колі заряду СК від акумуляторної батареї. Енергія втрат є різницею між енергією, відданою АБ і енергією, яку отримав в процесі заряду СК:

$$W_{втрат} = (W_{AB}(t_n) - W_{AB}(t_k)) - (W_{СК}(t_k) - W_{СК}(t_n)). \quad (8)$$

Для аналізу енергетичних характеристик кола заряду СК від АБ було виконано математичне моделювання в пакеті прикладних програм Matlab. Параметри еквівалентної електричної схеми кола заряду СК [8-10, 16] приведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри еквівалентної електричної схеми кола заряду

Параметри кола заряду СК		Параметри схеми заміщення СК								Параметри літій-іонної АБ	
L, мГн	R _{пр} , Ом	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
4,24	0,01	0,0025	270	190	0,9	100	5,2	220	9000	2,3	0,012

Параметри кола заряду СК вибрано таким чином, щоб виконувалася умова аперіодичного заряду (добротність контуру була не більше 0,5): $\frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \leq 0,5$.

З метою визначення оптимальних режимів аперіодичного заряду СК, виконано аналіз енергетичних характеристик заряду СК від акумуляторної батареї, при ненульових початкових напругах на СК, в діапазоні $-U_{AB} < U_{0СК} < +U_{AB}$. При дослідженні початкові і кінцеві умови для струму в контурі заряду однакові: $i(t=0) = i(t=\infty) = 0$. Проведено аналіз дози енергії, яка поступає в СК; дози енергії, яка відбирається від АБ; енергії втрат в колі заряду СК і коефіцієнта передачі енергії від АБ при заряді від джерела постійної напруги (АБ). Досліджено двадцять одну точку: $-U_{н}, -0,9 \cdot U_{н}, \dots, +U_{н}$.

На рис. 2 показано функціональні залежності від початкової напруги на СК, приведеної до значення U_{AB} ($U_{0СК} / U_{AB}$):

- $W'_{СК}$ – дози енергії $W_{СК}$, яка поступає в СК за час його одного заряду, приведеної до величини $W_{0АБ}$, тобто до величини дози енергії, яка відбирається від АБ при заряді повністю розрядженого СК ($U_{0СК}(t=0)=0$);
- $W'_{АБ}$ – дози енергії $W_{АБ}$, яка при цьому відбирається від АБ, приведена до величини $W_{0АБ}$;
- енергії втрат $W'_{втрат}$ в колі аперіодичного заряду СК, приведеної до величини $W_{0АБ}$;
- коефіцієнта передачі енергії від АБ при заряді суперконденсатора $\eta_{СК}$.

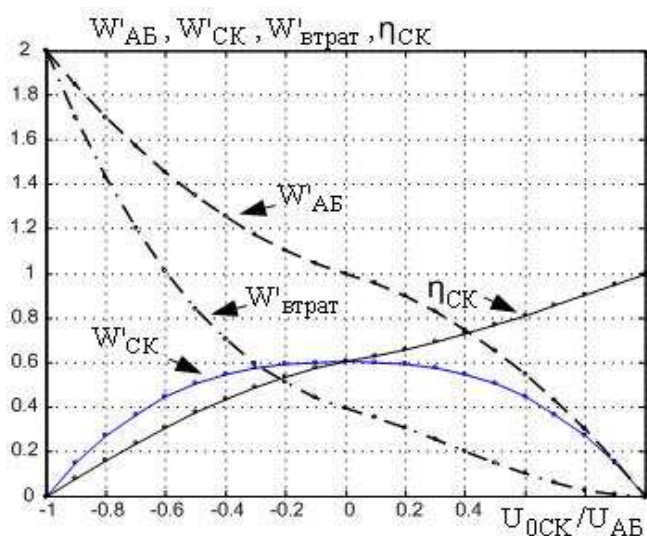


Рис. 2 – Залежності приведених енергетичних СК характеристик від приведеної напруги на СК

В табл. 2 приведені значення:

- дози енергії $W_{СК}$, яка поступає в СК за час заряду від напруги $U_{0СК}$ до U_n ;
- дози енергії $W_{АБ}$, яка відбирається від АБ за час заряду від напруги $U_{0СК}$ до U_n ;
- енергії втрат $W_{втрат}$ в колі заряду СК від напруги $U_{0СК}$ до U_n ;
- коефіцієнта передачі енергії від АБ, при різних значеннях напруг $U_{0СК} / U_{АБ}$.

$U_{0СК} / U_{АБ}$	$U_{0СК}$, В	$W_{СК}$, Дж	$W_{АБ}$, Дж	$W_{втрат}$, Дж	$\eta_{СК}$
-1,0	-2,30	0	7480,06	7480,06	0
-0,9	-2,07	552,30	6898,00	6345,70	8,00
-0,8	-1,84	1008,30	6362,18	5353,88	15,85
-0,7	-1,61	1376,50	5872,58	4496,08	23,44
-0,6	-1,38	1665,20	5429,23	3764,03	30,67
-0,5	-1,15	1884,00	5032,10	3148,10	37,44
-0,4	-0,92	2042,40	4681,22	2638,82	43,60
-0,3	-0,69	2149,40	4376,57	2227,17	49,11
-0,2	-0,46	2214,40	4118,16	1903,76	53,77
-0,1	-0,23	2246,60	3905,97	1659,35	57,51
0	0	2255,30	3740,03	1484,73	60,30
0,1	0,23	2246,61	3574,08	1327,46	62,86
0,2	0,46	2214,40	3361,90	1147,49	65,87
0,3	0,69	2149,42	3103,48	954,06	69,26
0,4	0,92	2042,41	2798,83	756,43	72,97
0,5	1,15	1884,12	2447,95	563,83	76,97
0,6	1,38	1665,32	2050,83	385,51	81,20
0,7	1,61	1376,75	1607,48	230,72	85,65
0,8	1,84	1009,28	1117,88	108,71	90,30
0,9	2,07	553,34	582,06	28,72	95,00
1,0	2,30	0	0	0	1,00

Приведені розрахунки в пакеті прикладних програм Matlab узгоджуються з математичними залежностями (1)-(7).

Виконаємо аналіз енергетичних характеристик СК (дози енергії, яка поступає в СК; дози енергії, яка відбирається від акумуляторної батареї, енергії втрат в колі; коефіцієнта передачі енергії від АБ) при ненульових початкових умовах по напрузі $U_{0СК}$.

З табл. 2 видно, що при заряді СК зі зміною початкової напруги з $U_{0СК} = -0,9U_{АБ}$ до $0,9U_{АБ}$, коефіцієнт передачі енергії від АБ $\eta_{СК}$ збільшується в 11,9 раз. При заряді СК від $U_{0СК} = 0,5U_{АБ}$ до напруги $U_{АБ}$ коефіцієнт передачі енергії від АБ $\eta_{СК}$ зростає в 1,28 рази в порівнянні з коефіцієнтом передачі енергії при $U_{0СК} = 0$. При збільшенні початкової напруги на СК до $0,8U_{АБ}$ коефіцієнт передачі енергії від АБ $\eta_{СК}$ складає 90,3 %, що в 1,5 рази більше коефіцієнта передачі при нульових початкових умовах по напрузі ($U_{0СК} = 0$). Даним дослідженням підтверджено, що коефіцієнт передачі при $U_{0СК} = 0$ становить 60,3 %, що в 1,2 рази більше коефіцієнта передачі для ЛК при тих же умовах [1]. При заряді СК в діапазоні напруг $U_{0СК} > 0,9U_{АБ}$ коефіцієнт передачі енергії від АБ зростає до $\eta_{СК} > 95$ %.

Доза енергії, яка поступає в СК при заряді від напруги $U_{0СК} = 0,5U_{АБ}$ до напруги $U_{АБ}$ в 1,2 рази менше дози енергії, яка поступає при заряді СК від напруги $U_{0СК} = 0$, але при цьому енергія втрат в колі заряду СК зменшується в 2,63 рази. При заряді СК від напруги $U_{0СК} = 0,8U_{АБ}$ (або $0,9U_{АБ}$) до $U_{АБ}$ доза енергії, що поступає в СК, зменшується в 2,23 (або 4,08) рази (при порівнянні з зарядом СК при нульових початкових умовах), в той час як втрати будуть меншими в 13,7 (або 51,7) раз, ніж втрати при заряді СК при $U_{0СК} = 0$.

Доза енергії, що відбирається від АБ при заряді СК від напруги $U_{0СК} = 0,5U_{АБ}$ до напруги $U_{АБ}$ в 1,53 рази менше дози енергії, яка відбирається при заряді від напруги $U_{0СК} = 0$. При заряді СК від напруги $U_{0СК} = 0,8U_{АБ}$ і $0,9U_{АБ}$ до напруги $U_{АБ}$ доза енергії, що відбирається від АБ, буде меншою в 3,35 і 6,42 рази відповідно, ніж доза енергії від АБ при нульових початкових умовах.

При порівнянні енергетичних характеристик ЛК і СК найбільш енергоефективний заряд відбувається в діапазоні напруг від $+0,9U_n$ до $+U_n$. При однаково високих коефіцієнтах передачі енергії ($\eta_{СК} = \eta_{ЛК} = 0,95$) перевагою СК є те, що він накопичує на 305,1 % більше енергії, ніж ЛК.

Слід зауважити, що енергетичні характеристики зарядних кіл суперконденсаторів при їхньому заряді від початкової напруги $U_{\text{оСК}} = 0$ до кінцевої напруги $U_{\text{СК}} < U_{\text{АБ}}$ суттєво відрізняються від характеристик цих кіл при заряді СК від початкової напруги $U_{\text{оСК}} > 0$ до кінцевої напруги $U_{\text{СК}} \approx U_{\text{АБ}}$. Зокрема при початковій напрузі $U_{\text{оСК}} = 0$ і кінцевій напрузі $U_{\text{СК}} = 0,25U_{\text{АБ}}$ коефіцієнт передачі електроенергії від АБ до СК становить $\eta_{\text{СК}} = 13,7\%$.

В той же час при початковій напрузі $U_{\text{оСК}} = 0,25U_{\text{АБ}}$ і кінцевій напрузі $U_{\text{СК}} = U_{\text{АБ}}$ коефіцієнт передачі електроенергії $\eta_{\text{СК}} = 58,1\%$. Якщо заряджати СК від початкової напруги $U_{\text{оСК}} = 0$ до кінцевої $U_{\text{СК}} = 0,5U_{\text{АБ}}$, то коефіцієнт передачі електроенергії $\eta_{\text{СК}} = 28,7\%$, а при заряді СК від напруги $U_{\text{оСК}} = 0,5U_{\text{АБ}}$ до напруги $U_{\text{СК}} = U_{\text{АБ}}$ коефіцієнт передачі електроенергії буде в 2,7 рази вище.

Доза енергія, яка поступає в СК при заряді СК від напруги $U_{\text{оСК}} = 0$ до напруги $U_{\text{СК}} = 0,5U_{\text{АБ}}$ в 5,1 раз менше, ніж енергія, яка поступає в СК при заряді від $U_{\text{оСК}} = 0,5U_{\text{АБ}}$ до напруги $U_{\text{СК}} = U_{\text{АБ}}$. При цих умовах енергія втрат в колі аперіодичного заряду СК в 1,63 разів більше при заряді суперконденсаторів від початкової напруги $U_{\text{оСК}} = 0$ до напруги $U_{\text{СК}} = 0,5U_{\text{АБ}}$.

Суперконденсатори є перспективними джерелами енергії для різноманітних електротехнічних систем. Найбільш прогресивним є розв'язок гібридних систем електропостачання з СК в електромобілях, завдяки їх здатності швидко віддавати енергію. Однак СК значно поступаються за питомою енергією літій-іонним АБ. Кращі зразки СК мають питому енергію до 30 Вт·год/кг [8-10], а літій-іонні АБ можуть зберігати до 200 Вт·год/кг.

Наразі відомі дослідження вчених про можливість СК на базі графену. В таких СК графенові плівки використовувались в якості електродів, а в ролі струмознімача виступали плівки з вуглецевих нанотрубок. При цьому були досягнуті показники питомої енергії від 8 до 14 Вт·год/кг. В той же час головною перевагою графенових СК є можливість їх виготовлення у вигляді тонких поверхонь. СК у вигляді плівок можливо вмонтовувати в кузовні деталі електромобілів. Питома потужність розроблених в Австралії експериментальних зразків графенових СК досить велика: від 250 до 450 кВт/кг. Дослідники прогнозують появу серійних гібридних електромобілів з графеновими СК у найближчі п'ять років. При наявності в майбутньому новітніх серійних зразків СК на основі інших матеріалів, необхідно буде вдосконалювати електричні схеми заміщення з врахуванням фізики процесів.

Висновки. 1. Виявлено наявність впливу початкових напруг на суперконденсаторі на втрати електроенергії та коефіцієнт її передачі при аперіодичному заряді суперконденсаторів від акумуляторних батарей.

Встановлено, що при аперіодичному заряді суперконденсаторів від літій-іонних акумуляторних батарей величина коефіцієнту передачі енергії $\eta_{\text{СК}}$ буде нелінійно зростати від 0 до 100% при змінненні початкової напруги на суперконденсаторі в діапазоні $-U_{\text{н}} < U_{\text{оСК}} < +U_{\text{н}}$. Зокрема при заряді суперконденсатора від початкової напруги $U_{\text{оСК}} = 0$ до кінцевої напруги $U_{\text{СК}} = 0,25U_{\text{АБ}}$ коефіцієнт передачі до нього електроенергії від акумуляторної батареї буде в 4,2 рази менше, ніж при аперіодичному заряді суперконденсаторів при початковій напрузі $U_{\text{оСК}} = 0,25U_{\text{АБ}}$ до кінцевої напруги $U_{\text{СК}} \approx U_{\text{АБ}}$.

2. Показано, що при нульовій початковій напрузі на суперконденсаторі коефіцієнт передачі електроенергії при його аперіодичному заряді від акумуляторної батареї становить близько 60,3 %, що в 1,2 рази більше коефіцієнта передачі електроенергії при аналогічних умовах заряду звичайного лінійного конденсатора.

Найбільш енергоефективним є аперіодичний заряд суперконденсаторів (як і звичайних лінійних конденсаторів) при наявності в них початкових напруг, близьких до напруги акумуляторної батареї. Так при змінненні початкової напруги на суперконденсаторі більше $0,9U_{\text{АБ}}$ коефіцієнт передачі до нього енергії від акумуляторної батареї може перевищувати 95%.

3. Втрати електроенергії в колах аперіодичного заряду суперконденсаторів зменшуються при збільшенні початкової напруги від $U_{\text{оСК}} \approx -U_{\text{АБ}}$ до $U_{\text{оСК}} \approx U_{\text{АБ}}$. Максимальними втрати електроенергії будуть при наблизненні значення початкової напруги на суперконденсаторів до $-U_{\text{АБ}}$. Для зменшення втрат електроенергії у колі аперіодичного заряду суперконденсаторів від акумуляторних батарей необхідно дозаряджати суперконденсатори при найбільш можливих додатних початкових напругах на їх клеммах. Так при початковій напрузі $U_{\text{оСК}} = +0,9U_{\text{АБ}}$ втрати енергії зменшуються більше, ніж в 50 разів порівняно з втратами при нульових початкових напругах.

4. Максимальна доза енергії $W_{\text{СК}}$, що поступає в суперконденсатор (як і в звичайний конденсатор) при його аперіодичному заряді (підзаряді) від акумуляторної батареї, буде при нульовій початковій напрузі на його клеммах, а мінімальна доза енергії – при початкових напругах на суперконденсаторі, близьких до напруги батареї. Але якщо при початковій нульовій напрузі звичайний і суперконденсатор будуть мати однакові ємності, то при повному заряді конденсаторів у першому буде в чотири рази менше накопичено енергії, ніж у другому.

5. Підтверджено, що енергетичні характеристики зарядних кіл суперконденсаторів при їх заряді від акумуляторних батарей суттєво залежать не лише від початкових, але й від їх кінцевих напруг. Причому чим до більших кінцевих напруг буде заряджатись коефіцієнт передачі електроенергії від акумуляторних батарей, тим більшим буде коефіцієнт передачі електроенергії.

6. Таким чином, при використанні суперконденсаторів, які включені паралельно акумуляторним батареям в електротехнічних і електромеханічних пристроях, енергетично доцільно не розряджати їх до нульових напруг (і тим більше не перезаряджати), а використовувати режими підзаряду від акумуляторів при ненульових додатних напругах на клеммах суперконденсаторів.

Результати даного дослідження можуть бути корисними і для нових промислових зразків суперконденсаторів (наприклад з графеновими електродами тощо), незважаючи на те, що еквівалентна схема заміщення нових суперконденсаторів може бути вдосконалена, з урахуванням електрофізичних характеристик нових матеріалів їх електродів.

Список літератури: 1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973. – 733 с. 2. Изотов В.Ю. Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатора / В.Ю. Изотов, Д.Г. Громадский, Ю.А. Малетин // *Наук. вісті НТУУ «КПІ»*. – 2008. – № 6. – С. 114–118. 3. Супруновская Н.И. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба // *Техн. электродинамика*. – 2015. – № 4. – С. 3–12. 4. Щерба А.А. Энергетические характеристики суперконденсаторов при их заряде от источника напряжения и разряде на резистивную нагрузку / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская, О.А. Белецкий // *Пр. Ін-ту электродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.* – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 65–74. 5. Щерба А.А. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская, Д.С. Иващенко // *Техн. электродинамика*. – 2014. – № 3. – С. 12–18. 6. Супруновская Н.И. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба, Д.С. Иващенко, О.А. Белецкий // *Техн. электродинамика*. – 2015. – № 5. – С. 3–11. 7. Щерба А.А. Повышение энергетических характеристик при аperiodической зарядке конденсатора от источника постоянного напряжения за счет изменения начальных напряжений на конденсаторе / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская // *Пр. Ін-ту электродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.* – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 19. – С. 113–119. 8. Burke A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles / Burke A. // *Proc. of the IEEE*. No. 4. V. 95. 2007. 806–820. 9. Burke A. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications / Burke A., Miller M. // *Journ. of the Power Sources*. Iss. 1. V. 196. Jan. 2011. 514–522. 10. Burke A. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density / Burke A., Miller M., Zhao H. // *Research Report – UCD-ITS-RR-12-06*. – Institute of Transportation Studies. University of California, May 2012. 11. Kurzweil P. Capacitance characterization methods and ageing behaviour of supercapacitors / Kurzweil P., Frenzel B. // *Proc. the 15th International seminar on double layer capacitors*. – Deerfield Beach, FL, U.S.A., December 5-7, 2005. 12. Maletin Y. Matching the Nanoporous Carbon Electrodes and Organic Electrolytes in Double Layer Capacitors / Maletin Y., Novak P., Shembel E., Izotov V. // *Appl. Phys. A: Material Science and Processing*. – 2006. – Vol. 82, No. 4. – P. 653–657. 13. Mihailescu B. Hybrid Supercapacitor-Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications / Mihailescu B., Svasta P., Varzaru G // *U.P.B. Scientific Bulletin, Series C*. Iss. 2. V. 75. 2013. P. 277–290. 14. Rafik F. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling / Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A., and Berthon A. // *Journ. of Power Sources*. No. 2. V. 165. 2007. P. 928–934. 15. Shcherba A.A. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load / Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I. // *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine*. – P. 50–54. 16. Zubieta L. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications / Zubieta L., Bonert R. // *IEEE Trans. On Industry Applications*. No. 1. V. 36. January-February 2000. 199–205.

Bibliography (transliterated): 1. Bessonov, L.A. *Theory of electrical engineering*. – Moskva: Vysshaya shkola, 1973. – 733p. Print. 2. Izotov, V.Yu., D.G. Gromadsky and Yu.A. Maletin «Simulation and calculation of the operating parameters of the supercapacitor.» *Naukovi visti NTUU «KPI»*. No. 6. 2008. 114–118. Print. 3. Suprunovskaya, N.I., Shcherba, A.A. «Protsessy pereraspredeleniya jelektricheskoy jenerghii mezhdru parallel'no soedinyonnymi kondensatorami.» // *Theknichna elektrodynamika*. No. 4. 2015. 3–12. Print. 4. Shcherba, A.A., Suprunovskaya, N.I., Beletsky, O.A. «Jenergeticheskie harakteristiki superkondensatorov pri ih zaryade otistochnika napryazheniya i razryade na rezistivnyuyu nagruzku.» // *Pratsi Insitutu elektrodynamiky NAN Ukrainy: Zbirnyk nauk. prats.* Kiev: IED NANU. No. 39. 2014. 65 – 74. Print. 5. Shcherba, A.A., Suprunovskaya, N.I., Ivashchenko, D.S. «Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load for synthesis of discharge circuit of capacitor by time parameters.» // *Theknichna elektrodynamika*. No. 3. 2014. 12–18. Print. 6. Suprunovskaya, N.I., Shcherba, A.A., Ivashchenko, D.S. and Beletsky, O.A. «Protsessy obmena jenerghiey mezhdru nelineynymi i lineynymi zven'yami jelektricheskoy shemy zameshcheniya superkondensatorov.» // *Theknichna elektrodynamika*. No. 5. 2015. 3–11. Print. 7. Shcherba, A.A., Suprunovskaya, N.I. «Improving the energy characteristics for aperiodic charging of the capacitor from a DC voltage by changing the initial voltages of the capacitor» // *Pratsi Insitutu elektrodynamiky NAN Ukrainy: Zbimyk nauk. prats.* Kiev: IED NANU. No. 19. 2008. 113 – 119. Print. 8. Burke, A. «Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles.» *Proc. of the IEEE*. No. 4. V. 95. 2007. 806–820. Print. 9. Burke, A., Miller, M. «The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications.» *Journ. of the Power Sources*. 1. 196. (Jan. 2011). 514–522. Print. 10. 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. Print. 11. 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. 12. Maletin, Y., Novak, P., Shembel, E., Izotov, V. «Matching the Nanoporous Carbon Electrodes and Organic Electrolytes in Double Layer Capacitors» // *Appl. Phys. A: Material Science and Processing*. – 2006. – Vol. 82, No. 4. – P. 653–657. 13. 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*. 2.75. 2013. 277–290. Print. 14. Rafik, F., Gualous, H., Gallay, R., Crausaz, A., and Berthon, A. «Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling.» *Journ. of Power Sources*. No. 2. 165. 2007. 928–934. Print. 15. Shcherba, A.A., Suprunovskaya, 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*. – P. 50–54. 16. Zubieta, L., Bonert, R. «Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications.» *IEEE Trans. On Industry Applications*. No. 1. 36. January-February 2000. 199–205. Print.

Надійшла (received) 31.08.2015