

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБІНОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ІЗ СУПЕРКОНДЕНСАТОРАМИ ТА ЛІТІЙ-ІОННИМИ АКУМУЛЯТОРНИМИ БАТАРЕЯМИ

Білецький О.О., Котовський В.Й., Святненко В.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ
biletsky27@gmail.com

У статті досліджено енергетичні характеристики комбінованих джерел живлення з нелінійними елементами-суперконденсаторами під час їх зарядження від реальних джерел живлення – літій-іонних акумуляторних батарей. Запропоновано спосіб зарядження нелінійних конденсаторів до напруг, більших за напругу джерела, шляхом забезпечення високої добротності контуру за коливального процесу заряду від літій-іонних акумуляторних батарей. Під час цього дослідження початковий і кінцевий струм у зарядному контурі був нульовим.

У науковій роботі доведено ефективність використання ненульових початкових умов за напругою на контактах суперконденсаторів із метою покращення енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від неідеальних джерел постійної напруги. Проаналізовано величину енергії, яка віддається літій-іонній акумуляторній батареї; величину енергії, яка потрапляє у нелінійний конденсатор (суперконденсатор); втрати енергії у зарядному контурі суперконденсатора і коефіцієнт корисної дії, який у цій роботі називається коефіцієнтом передачі енергії від літій-іонних акумуляторних батарей до нелінійного конденсатора (суперконденсатора). Дослідження проведено на всьому діапазоні зміни напруги. Експериментально встановлено, що за від'ємних початкових умов за напругою на контактах суперконденсаторів можна заряджати суперконденсатори до напруг, які удвічі перевищують напругу на літій-іонній акумуляторній батареї. Установлено, що за умови зростання добротності коливального контуру заряду суперконденсатора від літій-іонної акумуляторної батареї може досягатися більша максимальна приведена напруга на клеммах нелінійного конденсатора. Наприклад, за добротності контуру заряду 2 максимальна приведена напруга становить $UC/K_{\max} = 1,32$. У разі зростання добротності до 10 ця величина становитиме 1,7 за умови від'ємних початкових умов за напругою на клеммах нелінійного конденсатора. Запропонований підхід дозволяє підвищувати приведену максимальну напругу на клеммах нелінійного конденсатора СК і за необхідності збільшувати напругу без трансформації енергії і додаткових втрат. *Ключові слова:* енергетичні характеристики, нелінійний конденсатор, суперконденсатор, літій-іонна акумуляторна батарея, комбіновані джерела живлення.

Energy characteristics of combined power supplies with supercapacitors and lithium-ion batteries. Beletsky O., Kotovsky V., Svyatnenko V.

The article investigates the energy characteristics in combined power supplies with nonlinear elements – supercapacitors when they are charged from real power sources – lithium-ion storage batteries. A method is proposed for charging nonlinear capacitors to voltages that exceed the source voltage by providing a high Q-factor of the circuit during the oscillatory process of charging from lithium-ion storage batteries. In this study, the initial and final current in the charging circuit was zero. The scientific work proves the efficiency of using non-zero initial conditions on the voltage at the contacts of supercapacitors in order to improve the energy characteristics of the charge circuits of supercapacitors from non-ideal sources of direct voltage. The amount of energy given to the lithium-ion battery is analyzed; the amount of energy that enters the nonlinear supercapacitor; energy losses in the charging circuit of the supercapacitor and the efficiency, which in this work is called the energy transfer factor from lithium-ion batteries to a nonlinear capacitor – supercapacitor. The study was conducted over the entire range of voltage changes. It has been experimentally established that under negative initial conditions for the voltage at the terminals of supercapacitors, it is possible to charge supercapacitors to voltages that are up to 2 times higher than the voltage on a lithium-ion storage battery. It is established that with increasing the quality factor of the oscillating circuit of the supercapacitor charge from the lithium-ion battery, a higher maximum reduced voltage can be achieved at the terminals of the nonlinear capacitor. For example, at the quality factor of the charge circuit 2, the maximum reduced voltage is $UC/K_{\max} = 1,32$. When the quality factor increases to 10, this value will be 1.7, subject to negative initial voltage conditions at the terminals of the nonlinear capacitor. The proposed approach allows to increase the maximum voltage at the terminals of the nonlinear capacitor of the supercapacitor and, if necessary, to increase the voltage without energy transformation and additional losses. *Key words:* energy characteristics, nonlinear capacitor, supercapacitor, lithium-ion storage battery, combined power supplies.

Постановка проблеми. У сучасних системах із високими вимогами до питомої потужності і питомої енергії усе частіше застосовується поєднання суперконденсаторів (СК) і літій-іонних акумуляторних батарей (ЛІАБ). У комбінованих джерелах живлення поєднується велика питома потужність суперконденсаторів та велика питома енергія новітніх ЛІАБ. Завдяки такій комбінації стає можливим створити

ефективне комбіноване джерело живлення, що легко перекидає потреби у питомій потужності за енерговитратних режимів електротехнічних систем і комплексів. У разі необхідності довготривалого забезпечення енергії використовують новітні зразки ЛАБ [1–5]. У низці наукових робіт були висвітлені та проаналізовані результати досліджень [2; 6], в яких зазначено, що застосування комбінованих джерел живлення із СК та ЛАБ значно підвищує строк служби ЛАБ та надає можливість забезпечити великий коефіцієнт передачі енергії за будь-якого виду заряду СК від ЛАБ.

Актуальність дослідження. У наукових роботах [4; 7; 8] доведено ефективність використання ненульових початкових умов за напругою на контактах лінійних конденсаторів (ЛК) із метою покращення енергетичних характеристик кіл заряду ЛК від неідеальних джерел постійної напруги.

Метою роботи є проведення аналізу можливих шляхів підвищення напруги заряду суперконденсатора у коливальному режимі від реального джерела електрорушійної сили (ЕРС) – літій-іонної акумуляторної батареї у разі варіації початкової напруги на контактах нелінійних конденсаторів (СК) та підвищення добротності контуру заряду.

Викладення основного матеріалу. У разі заряду СК у коливальному режимі від джерела постійної напруги (ЛАБ) заряд нелінійного конденсатора (СК) переривається через наявність напівпровідникового ключа – біполярного транзистора (рис. 1), коли струм змінює свою полярність. Згідно зі схемою контуру заряду комбінованого джерела енергії електротехнічних та електромеханічних комплексів (рис. 1) нелінійний конденсатор заряджається від ЛАБ. У схемі враховано загальний активний опір кола заряду $R_{\Sigma} = R_{AB} + R_1 + R_{np}$, індуктивність L та напівпровідниковий ключ (біполярний транзистор). У сучасній термінології біполярний транзистор називають IGBT-транзистором (від англ. Insulated-gate bipolar transistor).

Завдяки високій добротності зарядного контуру $Q(U_H)$ напруга на клеммах СК може значно перевищувати напругу на клеммах ЛАБ.

На рис. 1 представлена електрична схема комбінованого джерела живлення із суперконденсатором та літій-іонною акумуляторною батареєю. Напруга ЛАБ становить $U_H = 2,3$ (В), опір – $R_{AB} = 0,012$ (Ом). Нелінійний конденсатор – СК замінений еквівалентною схемою із трьома паралельними гілками із різними сталими показниками часу $\tau = RC$. У схемі комбінованого джерела живлення враховується власний опір провідників, який становить $R_{np} = 0,01$ (Ом). Перша гілка має опір $R_1 = 0,0025$ (Ом).

Еквівалентна ємність першої гілки зображена паралельно з'єднаній сталій ємності $C_1 = 270$ (Ф) і змінній ємності $C_v(U_1) = kU$, залежній від напруги на контактах нелінійного конденсатора СК із коефіцієнтом $k = 190$ (Ф/В). Друга гілка має опір $R_2 = 0,9$ (Ом) та ємність $C_2 = 100$ (Ф). Третя гілка представлена конденсатором та резистором із параметрами: $R_3 = 5,2$ (Ом) і $C_3 = 220$ (Ф). Опір $R_4 = 9000$ (Ом) ураховує саморозряд СК у схемі комбінованого джерела живлення [2; 9; 10]. Із метою фіксації максимальної напруги на нелінійному конденсаторі у момент $dU_{СК}(t)/dt = 0$. СК використовується ключ – біполярний транзистор. Задля аналізу процесів у комбінованих джерелах живлення із нелінійним конденсатором СК і реальним джерелом постійної напруги – ЛАБ слід провести дослідження характеристик під час зарядження нелінійного конденсатора СК від ЛАБ за ненульової початкової напруги $U_{0СК}$ на нелінійному конденсаторі на проміжку від $-U_{AB}$ до $+U_{AB}$.

У цьому дослідженні початковий і кінцевий струм у зарядному контурі був нульовим. Проаналізовано величину енергії, яка віддається ЛАБ; величину енергії, яка потрапляє у нелінійний конденсатор СК; втрати енергії у зарядному контурі СК і коефіцієнт корисної дії, який у цій роботі називається коефіцієнтом передачі енергії від ЛАБ до нелінійного конденсатора – СК. Дослідження проведено на всьому діапазоні зміни напруги – $U_H, -0,9 \cdot U_H, \dots, +U_H$.

Нелінійний конденсатор СК на схемі (рис. 1) представлений постійною ємністю $C_1 = const$ та ємністю $C_v(U) = k \cdot |U|$, залежною від напруги U на клеммах СК [2; 4; 10]:

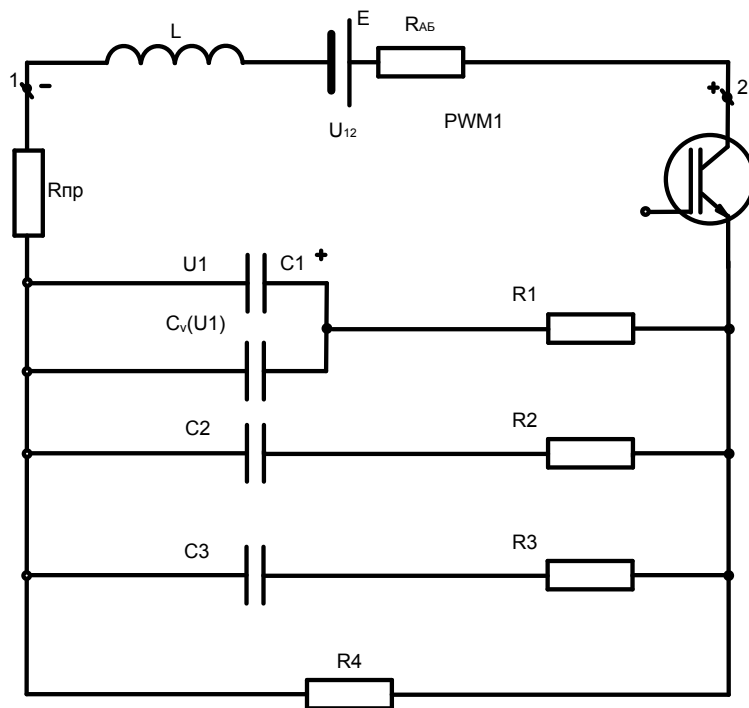


Рис. 1. Комбіноване джерело живлення із суперконденсатором та літій-іонною акумуляторною батареєю

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

Параметри зарядного кола комбінованого джерела енергії вибирають такими, щоб забезпечувався коливальний заряд нелінійного конденсатора СК від ЛАБ. З урахуванням формули (1) ми отримуємо вираз для добротності Q зарядного контуру:

$$Q = \frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \sqrt{\frac{L}{C(U)}} > 0,5. \quad (2)$$

Відповідно до формул (1) і (2) добротність зарядного контуру $Q(U)$ залежить також від напруги на клеммах нелінійного конденсатора СК.

Постає питання про зміну добротності зарядного контуру $Q(U)$ у разі варіації напруги на нелінійному конденсаторі СК $U_{\text{ОСК}}$ у межах від $-U_{\text{АБ}}$ до $+U_{\text{АБ}}$.

У роботі взято дві різні індуктивності $L_1=1,697$ (Гн) та $L_2=42,438$ (Гн) із метою проведення дослідження цієї залежності. Загальний опір зарядного контуру $R_{\Sigma} = R_{\text{АБ}} + R_1 + R_{\text{ПР}} = 0,0245$ (Ом). За таких параметрів добротності контуру заряду становлять $Q_1(U_{\text{н}}) = 2$ і $Q_2(U_{\text{н}}) = 10$.

У табл. 1 представлені показники зміни добротності $Q_1(U)$ та $Q_2(U)$ контуру заряду залежно від напруги на нелінійному конденсаторі СК.

Ми проаналізуємо зміни добротності $Q_1(U)$ та $Q_2(U)$ за двох значень індуктивності у контурі заряду (табл. 1). За цих параметрів контуру заряду та за номінальної напруги на клеммах нелінійного конденсатора СК добротності відповідно становлять $Q_1(|U_{\text{н}}|) = 2$ та $Q_2(|U_{\text{н}}|) = 10$. Це дослідження показало, що добротність становить $Q_1 = 1,672$ у разі напруги на нелінійному конденсаторі СК $U = 3,9$ (В). Під час зменшення напруги на СК до $U = 1$ (В) добротність складатиме $Q_1 = 2,479$. За умов нульової напруги на нелінійному конденсаторі СК отриму-

ємо максимальну величину добротності $Q_1 = 3,236$, водночас добротність $-Q_2 = 16,18$. Для зарядного кола комбінованого джерела живлення з СК та ЛАБ за індуктивністю $L_2=42,5$ (Гн) добротність становить $8,36$ у разі напруги на клеммах $U = 3,9$ (В). За цих умов і у разі зменшення напруги на СК до 1 (В) добротність збільшується майже у $1,5$ рази. За умови збільшення напруги на клеммах нелінійного конденсатора СК від $-3,9$ до 0 (В) значення добротності $Q_1(U)$ і $Q_2(U)$ зростають на $92,8\%$. Під час дослідження енергетичних характеристик комбінованих джерел живлення із СК та ЛАБ треба враховувати те, що добротність контуру заряду залежить від напруги на клеммах нелінійного конденсатора.

Проаналізуємо залежність наведеної максимальної напруги, до якої заряджається нелінійний конденсатор СК ($U_{\text{СКmax}} = U_{\text{СКmax}}/U_{\text{АБ}}$), від наведеної початкової напруги нелінійного конденсатора СК ($U_{\text{ОСК}}/U_{\text{АБ}}$) за двох значень індуктивностей у контурі заряду $L_1=1,697$ (Гн) та $L_2=42,438$ (Гн). Ми одержимо два різних діапазони зміни цих наведених величин для добротності Q_1 та Q_2 (табл. 2 і 3).

Проведений аналіз залежності наведеної максимальної напруги, до якої заряджається нелінійний конденсатор СК, $U_{\text{СКmax}}(U_{\text{ОСК}}/U_{\text{АБ}})$ у табл. 2 і 3 показує, що під час зменшення початкової напруги на клеммах нелінійного конденсатора СК до величини $U_{\text{ОСК}} = -U_{\text{АБ}}$ значення максимальної приведенної початкової напруги нелінійного конденсатора СК $U_{\text{СКmax}}$ збільшується нелінійно від величин, рівних напрузі ЛАБ $U_{\text{АБ}}$, до величин, які перевищують напругу на ЛАБ практично удвічі за добротності зарядного контуру 10 .

Максимальна напруга на клеммах нелінійного конденсатора дорівнює $U_{\text{СКmax}} = 1,07$ за добротно-

Таблиця 1

Зміна добротності контуру заряду залежно від напруги на СК

U, В	-2.3	1.5	-1	0.5	0	0.5	1	1.5	2.3
$Q_1(U)$	2.00	2.25	2.47	2.83	3.23	2.83	2.47	2.25	2.00
$Q_2(U)$	10.00	11.23	12.52	13.93	16.18	13.93	12.52	11.23	10.00

Таблиця 2

$U_{\text{СКmax}}/U_{\text{АБ}}$	$Q_1(U_{\text{н}}) = 2$										
	1,32	1,32	1,32	1,31	1,30	1,30	1,30	1,28	1,26	1,24	1,23
$U_{\text{СКmax}}/U_{\text{АБ}}$	$Q_2(U_{\text{н}}) = 10$										
	1,69	1,69	1,68	1,67	1,65	1,63	1,61	1,58	1,55	1,53	1,52
$U_{\text{ОСК}}/U_{\text{АБ}}$	-1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0

Таблиця 3

$U_{\text{СКmax}}/U_{\text{АБ}}$	$Q_1(U_{\text{н}}) = 2$										
	1,23	1,22	1,21	1,19	1,17	1,15	1,12	1,10	1,06	1,03	1
$U_{\text{СКmax}}/U_{\text{АБ}}$	$Q_2(U_{\text{н}}) = 10$										
	1,51	1,48	1,45	1,42	1,37	1,32	1,28	1,21	1,15	1,08	1
$U_{\text{ОСК}}/U_{\text{АБ}}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

сті зарядного контуру $Q_1 (|U_H|) = 2$ та за умови, що початкова напруга на нелінійному конденсаторі становить $U_{0СК}/-U_{АБ} = 0,8$. Максимальна напруга на клеммах СК складатиме $U/_{СКmax} 1,24$ при $U_{0СК}/U_{АБ} = 0$.

Під час подальшого зменшення початкових умов за напругою на клеммах нелінійного конденсатора до $U_{0СК}/-U_{АБ} = -0,8$ наведена максимальна напруга на клеммах нелінійного конденсатора становитиме 1,32.

Слід зазначити, що за умови збільшення добротності коливального зарядного контуру до $Q_2 (|U_H|) = 10$ приведена максимальна напруга $U/_{СКmax}$ на контактах нелінійного конденсатора СК підвищуватиметься більш стрімко.

Приведена максимальна напруга становить $U/_{СКmax} = 1,15$ за приведеної напруги на клеммах нелінійного конденсатора $U_{0СК}/-U_{АБ} = 0,8$. Для цього ж зарядного контуру, але за нульових початкових умов з напруги наведена напруга $U/_{СКmax} = 1,52$. У разі індуктивності зарядного контуру $L_2 = 42,438$ (Гн) та за умови зменшення початкових умов з напруги на контактах нелінійного конденсатора СК до $U_{0СК}/-U_{АБ} = -0,8$ значення приведеної максимальної напруги на контактах нелінійного конденсатора СК становитиме 1,7.

За умови високої добротності коливального зарядного контуру нелінійного СК від реального джерела напруги ЛАБ [2; 6] можна заряджати нелінійний конденсатор СК до приведених максимальних напруг на клеммах $U/_{СКmax}$, які можуть бути більш ніж удвічі вищими за напругу джерела ЛАБ. За величини добротності контуру заряду $Q_2(U_H) = 10$ значення наведеної максимальної напруги стано-

витиме 1,7 (за умови початкової напруги на клеммах нелінійного СК $U_{0СК} = -U_{АБ}$).

Висновки.

1. За коливального зарядження нелінійного конденсатора СК від реального джерела постійної напруги ЛАБ можна заряджати СК до значень напруги, які перевищують напругу на джерелі енергії ЛАБ, за умови використання від'ємних початкових умов із напруги на клеммах нелінійного конденсатора СК та за умови високої добротності коливального зарядного контуру.

2. Проведений аналіз коливального заряду СК від ЛАБ за високої добротності $Q(U_H) > 10$ показав, що під час зміни початкових умов із напруги на нелінійному конденсаторі СК від $+U_{АБ}$ до $-U_{АБ}$ наведена значення максимальної напруги на контактах нелінійного конденсатора СК змінюється від значення $U_{АБ}$ до напруги, яка вдвічі перевищує напругу на реальному джерелі напруги ЛАБ.

3. Установлено, що за умови зростання добротності коливального контуру заряду СК від ЛАБ може досягатися більша максимальна приведена напруга на клеммах нелінійного конденсатора. Наприклад, за добротності контуру заряду $Q_1(U_H) = 2$ максимальна приведена напруга становить $U/_{СКmax} = 1,32$. У разі зростання добротності до 10 ця величина становитиме 1,7, за умови від'ємних початкових умов із напруги на клеммах нелінійного конденсатора $-U_{0СК} = -U_{АБ}$.

4. Запропонований підхід дозволяє підвищувати приведену максимальну напругу на клеммах нелінійного конденсатора СК $U/_{СКmax}$ і за необхідності збільшувати напругу без трансформації енергії і додаткових втрат.

Література

- Burke A. Present and future supercapacitors: technology and applications. *Presented at the supercapacitor USA*. Santa Clara, California. 2014.
- Білецький О. О. Енергетичні процеси в колах заряду суперконденсаторів зі змінними початковими напругами: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.05. Київ, 2016. 195 с.
- Burke A. Ultracapacitors alone and in combination with batteries in hybrid- electric vehicles: system considerations and performance. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer Publishing. 2011.
- Білецький О. О., Супруновська Н. І., Щерба А. А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їх початкових і кінцевих напруг. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 3–10.
- Burke A., Miller M., Zhao H. Lithium batteries and ultracapacitors alone and in combination in hybrid vehicles: fuel economy and battery stress reduction advantages. *JSR*. 2010. Vol. 21, No 23. P. 15.
- Білецький О. О., Котовський В. Й. Енергетичні характеристики кіл коливального заряду суперконденсатора. Вінниця, ВНТУ. 2017. С. 10-11.
- Шидловский А. К., Щерба А. А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии. ИЭД НАНУ. 2009. 207 с.
- Щерба А. А., Супруновская Н.И., Белецкий О.А. Энергетические характеристики суперконденсаторов при их заряде от источника напряжения и разряде на резистивную нагрузку. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2014. № 39. С. 65–73.
- L. Zubieta R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Trans. on Ind. Appl.* 2000. Vol. 36, № 1. P. 199–205.
- Білецький О. О., Щерба А. А., Супруновська Н. І. Енергетичні характеристики кіл аперіодичного заряду суперконденсаторів від акумуляторних батарей. *Вісник Нац. ун-ту "ХПИ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. 2015. № 12 (1121). С. 379–383.