

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ В НАВАНТАЖЕННІ ПРИ РОБОТІ ВІД КОМБІНОВАНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ З СУПЕРКОНДЕНСАТОРОМ І АКУМУЛЯТОРНОЮ БАТАРЕЄЮ

Білецький О.О., Петрученко А.О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ

biletsky27@gmail.com

В даній роботі проведено аналіз енергетичних процесів в навантаженні при живленні від комбінованого джерела живлення з батареєю суперконденсаторів (СК) та літій-іонною акумуляторною батареєю (АБ). Проведено аналіз енергетичних характеристик розрядних кіл комбінованої системи електроживлення. Досліджено режими при яких умовах батарея СК забезпечує імпульсну потужність, а літій-іонна АБ стала довготривалими режимами споживання потужності. Доведено, що паралельне під'єднання батареї СК до АБ зменшує в ній імпульсні струми при всіх збільшеннях активної потужності в навантаженні, за умови, що внутрішній опір батареї СК менше внутрішнього опору літій-іонної АБ. Еквівалентна схема відображає гібридне джерело з СК та літій-іонною АБ. Батарея СК підключена до перетворювача Buck/Boost, в той час як літій-іонна АБ підключена до Boost (підвищувального) перетворювача. Пікова потужність літій-іонної АБ обмежена електронікою, а потужність в навантаженні при пікових режимах перекривається за рахунок батареї СК. Досліджено енергетичні характеристики батареї СК та літій-іонної АБ при їх роботі в складі комбінованого джерела енергії на спільне навантаження. Враховано, що ємність батареї СК становила $C_{СК} = 500$ (Ф), а ємність АБ відповідно $E_{АБ} = 6,6$ (Агод). Моделювання проведено в пакеті прикладних програм Matlab. Проведено порівняння результатів досліджень для різних діапазонів зміни імпульсної потужності в навантаженні. Встановлено, що імпульсна потужність в навантаженні на початку перехідного процесу при роботі на навантаження забезпечується на 95 % за рахунок батареї СК. АБ забезпечує необхідну максимальну потужність в діапазоні часу від 3,3 до 6 (с), в цей час батарея СК не працює на навантаження і вся потужність забезпечується АБ. **Ключові слова:** енергетичні процеси; навантаження; розряд; ємність; суперконденсатор; нелінійність; внутрішній опір; акумуляторна батарея.

Energy processes in load when operating from a combined power source with a supercapacitor and a battery.
Biletskyi O., Zaluskyi D.

In this work, an analysis of energy processes in the load when powered by a combined power source with a supercapacitor battery (SC) and a lithium-ion battery was performed. An analysis of the energy characteristics of the discharge circuits of the combined power supply system was performed. The modes under which the SC battery provides pulsed power and the lithium-ion battery maintains long-term power consumption modes were investigated. It was proved that parallel connection of the SC battery to the battery reduces pulsed currents in it at all increases in active power in the load, provided that the internal resistance of the SC battery is less than the internal resistance of the lithium-ion battery. It was analyzed that when the internal resistance of the SC battery decreases with the unchanged resistance of the battery, the pulse current in the load and the ratio of currents in the SC battery and the battery increase. The equivalent circuit shows a hybrid source with SC and a lithium-ion battery. The SC battery is connected to a Buck/Boost converter, while the lithium-ion battery is connected to a Boost (boost) converter. The peak power of the lithium-ion battery is limited by electronics, and the power in the load at peak modes is covered by the SC battery. The energy characteristics of the SC battery and the lithium-ion AB were studied when they operate as part of a combined energy source for a common load. It was taken into account that the capacity of the SC battery was $C_{SC} = 500$ (F), and the capacity of the AB, respectively, $E_{AB} = 6.6$ (Ah). The simulation was carried out in the Matlab package. The results of the research were compared for different ranges of pulse power changes in the load. It was established that the pulse power in the load at the beginning of the transient process when working on the load is provided by 95% by the SC battery. The AB provides the required maximum power in the time range from 3.3 to 6 (s), at this time the SC battery does not work on the load and all the power is provided by the AB. **Key words:** energy processes; load; discharge; capacity; supercapacitor; nonlinearity; internal resistance; rechargeable battery.

Постановка проблеми. Усталений розвиток електротехніки та електроніки потребує розробки і оновлення джерел живлення, які можуть забезпечувати накопичення електроенергії та швидко її передачу до споживачів. Електротехнічні пристрої повинні працювати мільйони циклів без суттєвого погіршення своїх характеристик. Нелінійні конденсатори – СК є сучасними ємнісними джерелами енергії. СК широко застосовується в комбінованих джерелах електричної енергії, електроніці та елек-

тротехніці. СК в електротехніці відомі як нелінійні конденсатори (НК), іоністори, двошарові конденсатори або ультраконденсатори [2, 4-10]. СК мають питому енергію, яка наближається до свинцевих акумуляторних батарей.

Показники по питомій потужності СК в 25 більші питомої потужності новітніх АБ [2]. Це досягається за рахунок значно меншого внутрішнього опору. При цьому ємність (Ф) для СК може бути до десятків тисяч (Ф), при напрузі в діапазоні до 4-5 (В).

Обмеження напруги для батареї СК є через поріг після якого відбувається електрохімічний розпад електроліту з подальшим розкладанням електроліту та поломкою через перегрів СК. Батареї СК використовуються для отримання напруг, які можуть становити декілька сотень вольт. Перевагою СК є те, що вони працюють до мільйона розрядних циклів без втрати електротехнічних характеристик. В свою чергу літій-іонні АБ працюють максимально до пари тисяч циклів заряд-розряд [2].

Враховуючи особливості АБ та СК, літій-іонні АБ використовують для забезпечення довготривалих режимів забезпечення енергії, а СК для перекривання імпульсних режимів споживання потужності в різноманітному навантаженні комбінованих систем [4, 6–9].

Актуальність дослідження. Огляд та аналіз енергетичних процесів в розрядних колах комбінованих джерел електроживлення енергетичних систем [2, 7–15] показав, що дослідження виконувалися без аналізу внутрішнього опору батареї СК та АБ та їх співвідношення при використанні з перетворювачами напруги. Також не виконувалася оптимізація розміру батареї СК та АБ при паралельній роботі в комбінованому джерелі живлення на навантаження.

Метою даної роботи є порівняння енергетичних характеристик в навантаженні при роботі від комбінованого джерела живлення з батареєю СК і АБ. Необхідно провести дослідження зміни імпульсних струмів в електричних колах навантаження, батареї СК та літій-іонної АБ при комбінованих режимах роботи.

Виклад основного матеріалу. Залежність ємності СК від напруги на його затискачах враховувалась при даних дослідженнях. Певна частина ємності СК залежить від напруги на затискачах СК, що описувалось в роботах [2-10] та підтверджено фізикою СК. Залежність ємності СК від напруги експериментально підтверджена в роботах [2-3,9] при роботі від джерела постійної електрорушійної сили (ЕРС) та при ємностях СК 470, 1500 і 2600 Ф. Сумарна ємність батареї СК зумовлена послідовним підключенням великої кількості ємностей, що утворені завдяки подвійному електричному шару в пористому матеріалі обкладок СК.

Сумарна ємність СК збільшується при збільшенні напруги на клеммах СК, дана особливість пояснюється підвищенням діелектричної проникності середовища електроліту та меншій товщині подвоєного електричного шару [2,3,9]. Значення ємності СК можна знайти за відомою формулою [2]

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (1)$$

відповідно ε – діелектрична проникність електроліту; S – загальна площа розвиненої поверхні нанопористого електроду; d – товщина подвійного електричного шару; ε_0 – діелектрична проникність вакууму [2].

При підвищенні напруги на клеммах СК збільшується область накопичення зарядів в електродах НК, цим пояснюється нелінійність ємності СК. Це стає можливим через утворення зарядів в шарах нанопор малого діаметру [2-3]. Відбувається нелінійне відносно напруги збільшення накопиченого в СК заряду. Ємність СК визначається класичним виразом як абсолютна величина відношення заряду на одному з тіл до напруги між тілами [2-3]:

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

Одиниця розмірності ємності відповідно до визначення $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$. Два тіла матимуть ємність, якщо вони розмежовані діелектриком. Величина ємності буде незалежною від величини напруги та від величини заряду, бо напруга між тілами буде лінійно визначена через величину заряду в електростатичному полі [2]. Відомо, що величина ємності буде залежати від розмірів тіл, їхньої конфігурації, від діелектрика та від відстані між цими тілами [2-3]. Підтверджено рядом наукових досліджень, що для СК їх ємність також залежить від напруги на їх обкладках [2, 4, 7–10]. Формула (2) підходить як для СК, так і для конденсаторів, бо дає закономірність між напругою між обкладками та зарядом кожної з обкладок.

При проведенні дослідження СК заряджали від джерела постійної ЕРС [9]. Підтверджено, що значення ємності СК збільшувалося нелінійно в даному діапазоні зміни напруги. Можна проксимувати загальну ємність СК у вигляді суми постійної ємності $C_1 = \text{const}$ та частини ємності $C_v(U) = k |U|$, яка залежить лінійно від напруги, k – сталий коефіцієнт з розмірністю $[\text{Ф/В}]$.

Відповідно з даними особливостями фізики СК [2-3, 9-10], значення повної ємності СК можна записати виразом:

$$C(U) = C_1 + k |U|. \quad (3)$$

В даній роботі проведено аналіз енергетичних процесів в навантаженні при живленні від комбінованого джерела живлення з батареєю СК та літій-іонною АБ. Проведено аналіз енергетичних характеристик розрядних кіл комбінованої системи електроживлення. Досліджено режими при яких умовах батарея СК забезпечує імпульсну потужність, а літій-іонна АБ сталі довготривалі режими споживання потужності. Для цього було використано модель в середовищі чисельного моделювання Matlab (рис. 1) [11].

Еквівалентна схема відображає гібридне джерело з СК та літій-іонною АБ. Батарея СК підключена до перетворювача Buck/Boost, в той час як літій-іонна АБ підключена до Boost (підвищувального) перетворювача. Пікова потужність АБ обмежена електронікою, а потужність в навантаженні при пікових режимах перекривається за рахунок батареї СК [11].

Електричний струм відображає зміну заряду dQ за одиницю часу в момент заряду, відповідно маємо вираз [2]:

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

з даного виразу маємо $dQ = i(t) dt$.

Диференціал заряду dQ для СК є нескінченно малим приростом для функції, що дорівнює добутку U на $C(U)$. Відповідна формула матиме вигляд [2]:

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

Робимо підстановку формули (5) в формулу (4), звідки маємо вираз для електричного струму:

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

Розрахунок диференційної ємності СК виконується за виразом [2-3]:

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

Дані багатьох експериментів підтверджують, що величина ємності СК нелінійно міняється при зміні напруги на його клеммах. При необхідності апроксимації дану криву можна замінити прямою лінією $C(U)$ за умови, що СК буде працювати при напрузі на його клеммах в діапазоні від $0,5U_n$ до U_n . В наукових роботах [1–10] зазначено, що при таких умовах за напругою СК накопичує до 70-80 % своєї енергії.

Для проведення аналізу енергетичних процесів в навантаженні при живленні від комбінованого

джерела живлення з батареєю СК та АБ проведено моделювання в Matlab. Параметри СК та АБ [2-5, 11], що використано в моделі зазначені в таблиці 1.

В роботі розглянуто гібридне джерело з СК та АБ. Батарея з шести СК підключена до перетворювача Buck/Boost (понижувально-підвищувальний), в той час як літій-іонна батарея підключена до Boost – підвищувального перетворювача. Понижувально-підвищувальний перетворювач пристроєм з напругами DC-DC. Даний перетворювач забезпечує вихідну напругу, що є більшою або меншою, ніж вхідна напруга. Він підходить для різних застосувань в сучасній силовій електроніці, бо є універсальним. В даному випадку регулювання величини вхідної напруги і вимоги до вихідної різні. З метою продовження терміну служби потужність АБ обмежується електронікою, а пікові режими споживання потужності в навантаженні забезпечуються батареєю з шести СК [2-4, 11].

Приймаємо, що початкова напруга на АБ $U_{AB} = 26,4$ (В), початкова напруга на батареї СК $U_{СК\text{бат}} = 16$ (В). Дослідження проводилось за умови, що ємність батареї СК становила 500 (Ф), ємність АБ становила 6,6 (А·год). Внутрішній опір СК $R_{СК} = 0,0021$ (Ом). Температура СК становила $t_{СК} = 25$ °C, температура АБ відповідно $t_{AB} = 30$ °C.

Для дослідження режимів роботи на навантаження гібридної системи живлення з батареєю СК та АБ проведено аналіз енергетичних характеристик.

Таблиця 1

Параметри схеми заміщення СК					Параметри літій-іонної АБ		
$R_{СК}$, Ом	$C_{СК}$, Ф	$U_{СК\text{бат}}$, В	$U_{СК1}$, В	$t_{СК}$, °C	U_{AB} , В	E_{AB} , А·год	t_{AB} , °C
0,0021	500	16	2,67	25	26,4	6,6	30

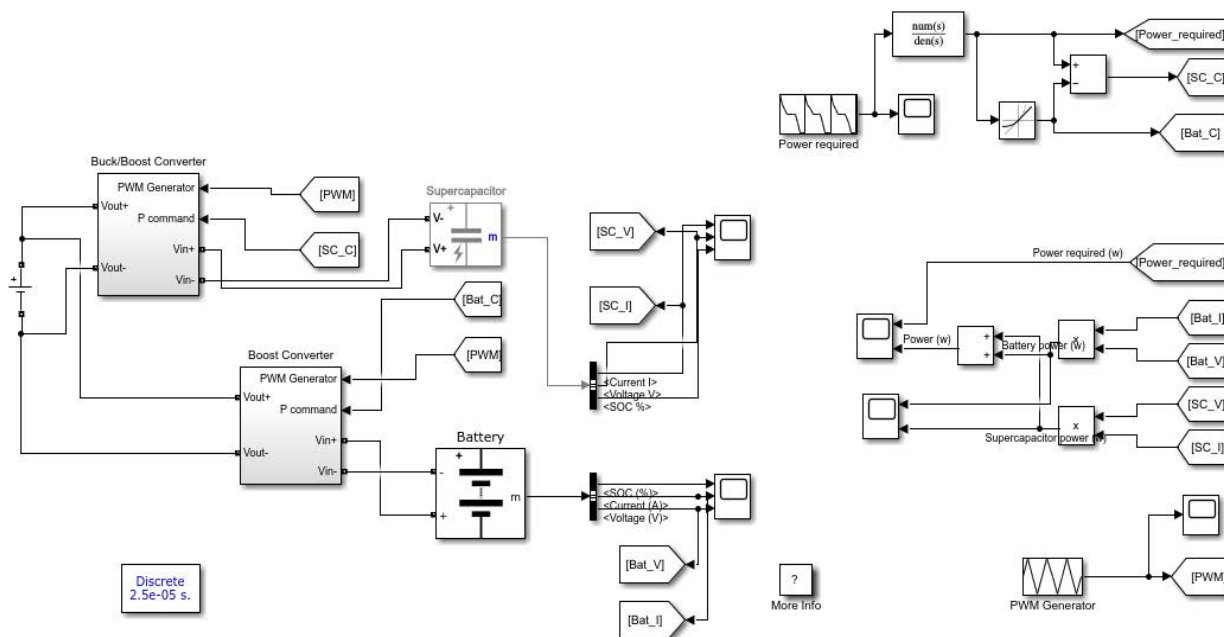


Рис. 1. Еквівалентна схема гібридного джерела з СК та АБ

Таблиця 2

t, c	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
SOC _{AB}	100	99,9	99,7	99,3	99,2	99,1	99,0	98,7	98,5	98,2	98,2
SOC _{CK}	100	90,2	89,9	89,9	90,1	90,3	88,4	88,0	88,0	88,4	88,6
I _{AB} , A	0	20,0	35,0	35,0	14,0	0	21,0	35,0	35,0	14,0	0
I _{CK} , A	0	40,0	0	0	-25,0	0	40,0	0	0	-25,0	0
U _{AB} , B	30,80	29,80	28,80	28,40	29,00	29,50	28,70	27,70	27,50	28,20	28,80
U _{CK} , B	16,00	15,60	15,62	15,62	15,72	15,71	15,30	15,32	15,32	15,42	15,40
P _{AB} , Вт	0	600,0	1000,0	1000,0	400,0	0	600,0	1000,0	1000,0	400,0	0
P _{CK} , Вт	0	650,0	0	0	-400,0	0	650,0	0	0	-400,0	0
P _н , Вт	0	1250,0	1000,0	1000,0	0	0	1250,0	1000,0	1000,0	0,0	0

Виконано аналіз зміни потужності батареї СК та АБ, потужності, яка необхідна в навантаженні. Проаналізовано: SOC % (стан заряду) батареї СК та АБ; зміну струму і напруги батареї СК та АБ.

Розглянуто 11 точок – таблиця 2.

Розглянуто 11 часових точок. Проаналізовано енергетичні характеристики батареї СК та АБ в процесі роботи гібридної системи на навантаження. З табл. 2 маємо, що при роботі на навантаження в діапазоні часу від 0 до 20 (с) SOC для СК змінюється від 100 % до 88,6 %, в порівнянні для АБ SOC змінюється від 100,0 % до 98,2 %. Відповідно для СК SOC зменшився на 11,4 %, а для АБ на 1,8 %. Це пояснюється більшою питомою енергією літій-іонної АБ.

При на навантаження від початку роботи до 4 с напруга на АБ зменшується на 3,2 %, в той час напруга на батареї СК зменшується на 2,4 %. При подальшій роботі на навантаження від 0 до 20 с напруга на АБ зменшується на 6,5 %, при цьому напруга на батареї СК зменшиться на 3,7 % (таблиця 2).

В перші моменти після комутації імпульсний струм через СК становить 125 (А), в той час як струм АБ наростає плавно, обмежується електронікою і доходить до 35 (А) за 3,2 (с). При роботі на навантаження максимальний струм СК в 3,57 рази більший за максимальний струм АБ.

Імпульсна потужність в навантаженні на початку перехідного процесу при роботі на навантаження забезпечується на 95 % за рахунок батареї СК. Максимальна імпульсна потужність в навантаженні становить 1950 (Вт). Максимальна імпульсна потужність батареї СК доходить до 1900 (Вт). Потужність АБ плавно наростає в діапазоні часу від 0 до 3,3 с і має максимальне значення 1000 (Вт). АБ забезпечує необхідну максимальну потужність в діапазоні часу від 3,3 до 6 (с), в цей час батарея СК не працює на навантаження і вся потужність забезпечується АБ. Відповідно батарея СК віддає в навантаження в 1,9 разів більше імпульсної потужності на початку перехідного процесу при даних умовах, ніж АБ.

Подібні енергетичні характеристики батарея СК може забезпечити за рахунок того, що питома енергія СК в тисячі разів перевищує питому енергію простих конденсаторів [1-10]. В свою чергу питома

енергія новітніх СК еквівалентна звичайним свинцевим АБ [1-3, 10]. По питомій потужності новітні СК більш ніж в 20 разів перевищують цю характеристику відомих літій-іонних АБ [1-3].

При появі новітніх зразків СК потрібно буде змінити еквівалентні схеми заміщення СК для їх досліджень і подальшого використання. Фізичні властивості СК необхідно досліджувати з врахуванням умов по температурі, напрузі та робочій частоті.

Головні висновки.

1. Досліджено енергетичні характеристики батареї СК та літій-іонної АБ при їх роботі в складі комбінованого джерела енергії на спільне навантаження. Враховано, що ємність батареї СК становила $C_{СК} = 500$ (Ф), а ємність АБ відповідно $E_{АБ} = 6,6$ (А·год). Моделювання проведено в пакеті програм Matlab.

2. Встановлено, що при роботі на навантаження в діапазоні часу від 0 до 20 (с) SOC для СК змінюється від 100 % до 88,6 %, в порівнянні для АБ SOC змінюється від 100,0 % до 98,2 %. Відповідно для СК SOC зменшився на 11,4 %, а для АБ на 1,8 %. Це пояснюється більшою питомою енергією літій-іонної АБ.

3. В перші моменти після комутації імпульсний струм через СК становить 125 (А), в той час як струм АБ наростає плавно, обмежується електронікою і доходить до 35 (А) за 3,2 (с). При роботі на навантаження максимальний струм СК в 3,57 рази більший за максимальний струм АБ.

4. Проведено порівняння результатів досліджень для різних діапазонів зміни імпульсної потужності в навантаженні. Встановлено, що імпульсна потужність в навантаженні на початку перехідного процесу при роботі на навантаження забезпечується на 95 % за рахунок батареї СК.

Перспективи використання досліджень.

Постійний розвиток та розробка нових технологій для СК привела до появи сучасних матеріалів для виготовлення електродів. Відомо про появу сучасних СК з електродами з графену та оновленої технології виготовлення електродів з поєднанням графену та азоту. Такий підхід забезпечив збільшення ємності в порівнянні зі звичайними зразками СК в 2 рази. Це стало можливим завдяки додаванню азоту в електроди.

Література

1. A. Burke Present and future supercapacitors: technology and applications. *Presented at the supercapacitor USA*. Santa Clara. California. 2014.
2. Білецький О. О. Енергетичні процеси в колах заряду суперконденсаторів зі змінними початковими напругами: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.05. Київ, 2016. 195 с.
3. Білецький О. О., Супруновська Н. І., Щерба А. А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їх початкових і кінцевих напруг. *Технічна електродинаміка*. 2016. No. 1. с. 3–10.
4. A. Burke Ultracapacitors alone and in combination with batteries in hybrid- electric vehicles: system considerations and performance. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer Publishing. 2011.
5. A. Burke, M. Miller, H. Zhao. Lithium batteries and ultracapacitors alone and in combination in hybrid vehicles: fuel economy and battery stress reduction advantages. *JSR*. 2010. 21.23: 15.
6. O.O. Biletskyi, V.I. Kotovskyi, N. Višniakov, A. Šešok Investigation of the Energy Characteristics of a Circuit under the Charge of a Supercapacitor and an Equivalent Linear Capacitor. *Applied Sciences* 12 (18), 9182.
7. O.O. Biletskyi, V.I. Kotovskyi Investigation of energy processes in circuits of oscillatory charge of supercapacitors Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. 2019. С. 5-14.
8. Білецький О. О., Котовський В.Й. Енергетичні процеси в колах із суперконденсаторами та неідеальними джерелами постійної напруги в комбінованих системах живлення електромобілів Науково-практичний журнал «Екологічні науки». 2018, с. 63-66.
9. 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.
10. Білецький О. О., Щерба А. А., Супруновська Н. І. Енергетичні характеристики кіл аперіодичного заряду суперконденсаторів від акумуляторних батарей. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. 2015. No. 12 (1121). с. 379–383.
11. Matlab model. Pierre Clement Bland, L.-A. Dessaint (Ecole de technologie superieure, Montreal).