

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ІЗ СУПЕРКОНДЕНСАТОРАМИ ТА НЕІДЕАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ В КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМАХ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Білецький О.О., Котовський В.Й.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ  
biletsky27@gmail.com

У роботі розглянуто енергетичні процеси в колах коливального заряду суперконденсаторів від неідеальних джерел постійної напруги в комбінованих системах живлення електромобілей. При коливальному заряді суперконденсаторів від неідеальних джерел постійної електрорушійної сили за умови великої добротності зарядного контуру запропоновано заряджати суперконденсатори до напруг, що перевищують напругу на джерелі енергії. Дослідним шляхом підтверджено, що в разі зменшення початкової напруги на клеммах суперконденсаторів від додатних до від'ємних значень максимальна напруга заряду суперконденсаторів нелінійно змінюється до значень, що можуть перевищувати в 1,7 рази напругу на джерелі. *Ключові слова:* енергетичні процеси, суперконденсатор, джерело постійної напруги, комбінована система живлення, електромобіль.

**Энергетические процессы в цепях с суперконденсаторами и неидеальными источниками постоянного напряжения в комбинированных системах питания электромобилей.** Белецкий О.А., Котовский В.И. В работе рассмотрены энергетические процессы в цепях колебательного заряда суперконденсаторов от неидеальных источников постоянного напряжения в комбинированных системах питания электромобилей. При колебательном заряде суперконденсаторов от неидеальных источников постоянной электродвижущей силы при условии большой добротности зарядного контура предложено заряжать суперконденсаторы до напряжений, превышающих напряжение на источнике энергии. Опытным путем доказано, что при уменьшении начального напряжения на клеммах суперконденсаторов от положительных до отрицательных значений максимальное напряжение заряда суперконденсаторов нелинейно меняется до значений, которые могут превышать в 1,7 раза напряжение на источнике. *Ключевые слова:* энергетические процессы, суперконденсатор, источник постоянного напряжения, комбинированная система питания, электромобиль.

**Energy processes in circuits with supercapacitors and nonideal sources of constant voltage in the combined power supply systems of electric vehicles.** Biletskyi O., Kotovskiy V. In this paper, the energy processes in the circuits of the oscillatory charge of supercapacitors from nonideal sources of constant voltage in the combined power supply systems of electric vehicles are considered. With the oscillatory charge of supercapacitors from nonideal sources of constant electromotive force, under the condition of a large Q-factor of the charging circuit, it is proposed to charge supercapacitors to voltages exceeding the voltage at the source of energy. It is confirmed experimentally that when the initial voltage is suppressed on supercapacitor terminals from positive to negative values, the maximum voltage of supercapacitor charge changes nonlinearly to values which may exceed 1.7 times the voltage at the source. *Key words:* energy processes, supercapacitor, constant voltage source, combined power supply system, electric vehicle.

**Постановка проблеми.** У новітніх електротехнічних комплексах усе більше застосовуються комбіновані системи живлення, в яких використовуються суперконденсатори (далі – СК) та акумуляторні батареї (далі – АБ). Поєднуючи високу питому потужність СК з високою питомою енергією АБ, можна реалізувати комбіновану електротехнічну систему, яка може забезпечити високу вихідну потужність при динамічних режимах електромобіля (далі – ЕМ) і при цьому забезпечувати споживання енергії з АБ протягом тривалого періоду часу [1–5]. У наукових роботах [2; 6] проводилось дослідження, в якому підтверджено, що використання комбінованих систем живлення може суттєво збільшити термін служби АБ й реалізує можливість працювати з високим коефіцієнтом передачі енергії як при аперіодичному, так і при коливальному заряді СК від АБ.

**Актуальність дослідження.** У низці робіт [4; 7; 8] під час аналізу енергетичних процесів заряду звичайного (лінійного) конденсатора приведено шляхи підвищення енергетичних характеристик за допомогою застосування ненульових початкових умов по напрузі на клеммах лінійних конденсаторів.

**Метою роботи** було дослідження варіантів підвищення напруги коливального заряду СК від неідеального джерела постійної напруги (на прикладі АБ) при довільних початкових умовах по напрузі на затискачах СК та різноманітних добротностях зарядного контуру.

**Виклад основного матеріалу.** Під час коливального заряду СК від неідеального джерела постійної напруги процес заряду СК переривається, завдяки напівпровідниковому ключу (біполярному транзистору з ізольованим затвором), тоді як струм у заряд-

ному колі міняє полярність (рис. 1). Відповідно до схеми зарядного контуру комбінованої системи живлення ЕМ (рис. 1), СК заряджається від літій-іонної АБ через сумарний активний опір зарядного кола  $R_{\Sigma} = R_{AB} + R_1 + R_{IP}$ , котушку індуктивності  $L$  і біполярний транзистор PWM1. Біполярний транзистор з ізольованим затвором у новітній електроніці частіше називається IGBT транзистором. IGBT транзистор є гібридом полього й біполярного транзистора. Таке вдале поєднання транзисторів дало змогу використати їх позитивні властивості в IGBT транзисторі.

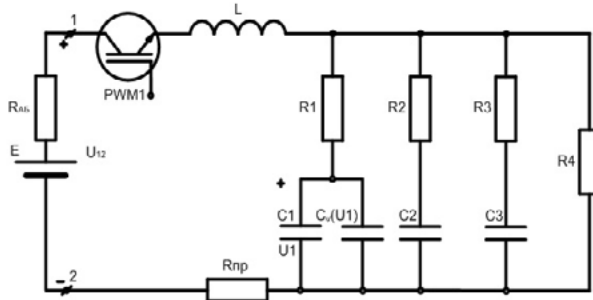


Рис. 1. Схема електричного кола заряду суперконденсатора

Велика добротність контуру заряду  $Q(U_H)$  дає змогу заряджати СК до напруг, що можуть суттєво перевищувати напругу на АБ.

У схемі електричного кола заряду СК (рис. 1) використовується АБ з напругою  $U_H = 2,3$  (В) та опором  $R_{AB} = 0,012$  (Ом). СК представлений схемою заміщення з трьома паралельними гілками, які мають, відповідно, різні сталі часу  $\tau = RC$ , також ураховано опір проводів  $R_{IP} = 0,01$  (Ом). Опір першої гілки становить  $R_1 = 0,025$  (Ом), а ємність складається з паралельного з'єднання постійної ємності  $C_1 = 270$  (Ф) і ємності  $C_v(U_1) = kU$ , яка залежить від напруги (коефіцієнт  $k = 190$  (Ф/В)). У другій гілці опір і ємність становлять  $R_2 = 0,9$  (Ом) і  $C_2 = 100$  (Ф), параметри третьої гілки мають значення  $R_3 = 5,2$  (Ом) і  $C_3 = 220$  (Ф). З метою врахування саморозряду СК в схемі на рис. 1 використано опір  $R_4 = 9000$  (Ом) [2; 9; 10]. Біполярний транзистор як комутатор допомагає зафіксувати максимальну напругу на клеммах СК у момент часу  $dU_{СК}(t)/dt = 0$ . З метою дослідження енергетичних процесів у комбінованій системі електроживлення ЕМ необхідно провести аналіз енергетичних характеристик у процесі коливального заряду СК від літій-іонної АБ при ненульових початкових умовах по напрузі на клеммах СК в діапазоні  $-U_{AB} < U_{ОСК} < +U_{AB}$ .

При цьому під час дослідження початкові й кінцеві умови для струму в контурі заряду були однакові:  $i(t=0) = i(t=\infty) = 0$ . Проведено аналіз дози енергії, яка надходить в СК; дози енергії, яка відбирається від АБ; енергії втрат у колі заряду СК й коефіцієнта передачі енергії від АБ при заряді від джерела постійної напруги (АБ). Досліджено точки:  $-U_H, -0,9 \cdot U_H, \dots, +U_H$ .

Загальна ємність СК представлялась сумою незмінної ємності  $C_1 = const$  і ємності  $C_v(U) = k \cdot |U|$ , яка лінійно залежить від величини напруги  $U$  [2; 4; 10]:

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

Щоб відбувався коливальний заряд СК від АБ, параметри кола вибираються так, щоб виконувалась умова для добротності  $Q$ . Ураховуючи вираз (1), маємо:

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

З урахуванням виразів (1)–(2), добротність також являє собою функцію від напруги на клеммах СК в процесі заряду  $Q(U)$ .

Необхідно визначити характер зміни добротності  $Q(U)$  на всьому діапазоні зміни напруги на клеммах СК ( $-U_{AB} < U_{ОСК} < +U_{AB}$ ). Для дослідження цієї залежності візьмемо два різні значення індуктивності  $L_1 = 1,697$  (Гн) та  $L_2 = 42,438$  (Гн) і сумарний опір зарядного кола  $R_{\Sigma} = R_{AB} + R_1 + R_{IP} = 0,0245$  (Ом), за яких добротності коливального зарядного контуру (рис. 1) становлять, відповідно,  $Q_1(U_H) = 2$  та  $Q_2(U_H) = 10$ . На рис. 2 зображені функціональні залежності добротностей від напруги на клеммах СК:  $Q_1(U)$  – суцільна крива,  $Q_2(U)$  – штрих-пунктирна крива.

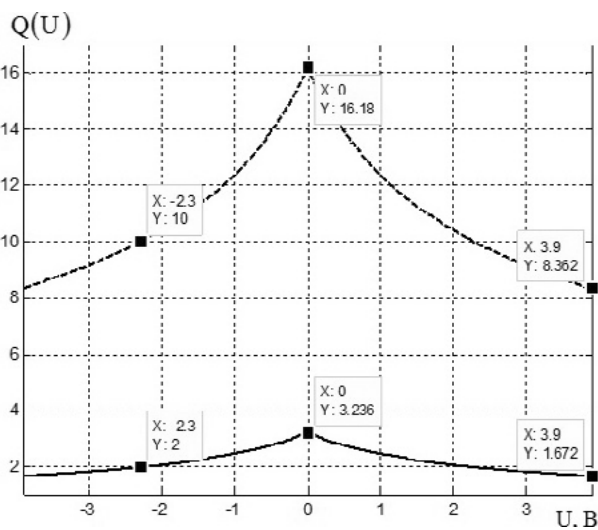


Рис. 2. Залежність добротності кола коливального заряду суперконденсатора від напруги на клеммах

Проаналізуємо зміну добротностей  $Q_1(U)$  та  $Q_2(U)$ , які зображені на рис. 2. При номінальній напрузі на СК  $|U_H|$  добротності становлять  $Q_1(|U_H|) = 2$  та  $Q_2(|U_H|) = 10$  для цих параметрів зарядного кола. Проведений аналіз показав, що при напрузі на клеммах  $U = 3,9$  (В) добротність становить  $Q_1 = 1,672$ , а при напрузі  $U = 1$  (В) це значення становитиме  $Q_1 = 2,479$ . Максимальне значення добротності  $Q_1 = 3,236$  буде при нульовій напрузі на клеммах СК, відповідно, при цій напрузі  $Q_2 = 16,18$ . Для контуру з індуктивністю  $L_2 = 42,438$  (Гн) добротність при  $U = 3,9$  (В) дорівнює  $Q_2 = 8,362$ , а при напрузі

$U = 1$  (В) добротність  $Q_2$  зростає в 1,48 рази. У разі зміни напруги в діапазоні від  $U = -3,9$  (В) до 0 (В) добротності  $Q_1(U)$  та  $Q_2(U)$  збільшуються на 93%. Цю залежність добротності зарядного контуру від напруги необхідно враховувати під час дослідження комбінованих електротехнічних систем електроживлення в ЕМ.

Проведемо дослідження залежностей максимальної напруги коливального заряду СК, приведеної до величини  $U_{AB}$  ( $U_{СКmax} = U_{СКmax}/U_{AB}$ ), від початкової напруги СК, приведеної до величини  $U_{AB}$  ( $U_{0СК}/U_{AB}$ ), для двох різних величин добротності контуру  $Q_1(U_H) = 2$  (суцільна лінія) та  $Q_2(U_H) = 10$  (пунктирна лінія) при коливальному заряді СК від АБ (рис. 3).

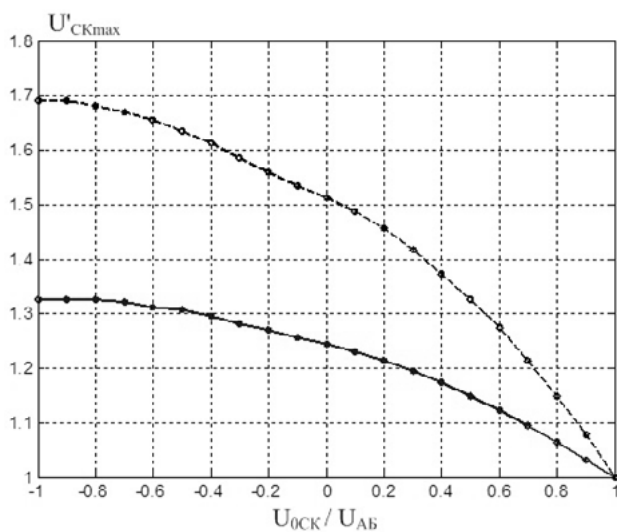


Рис. 3. Залежність максимальної напруги заряду СК, приведеної до величини  $U_{AB}$ , від початкової напруги СК, приведеної до величини  $U_{AB}$ , для двох значень добротності  $Q_1(U_H) = 2$  та  $Q_2(U_H) = 10$

Аналіз цих функціональних залежностей максимальної напруги заряду СК, приведеної до величини напруги, на клеммах АБ  $U_{СКmax} / U_{AB}$  ( $U_{0СК}/U_{AB}$ ) на рис. 3 підтверджує, що в міру зменшення початкової напруги в діапазоні від  $U_{0СК} = U_{AB}$  до  $U_{0СК} = -U_{AB}$  величина максимальної напруги коливального заряду СК  $U_{СКmax} / U_{AB}$  нелінійно змінюється в діапазоні від значень  $U_{AB}$  до значень, які можуть перевищувати майже в 1,7 рази значення напруги на АБ (при  $Q(U_H) > 10$ ).

При добротності контуру заряду СК від АБ  $Q_1(U_H) = 2$  та початковій напрузі на клеммах СК  $U_{0СК}/U_{AB} = 0,8$  максимальне значення напруги на затискачах СК буде становити  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,07$ , а

при подальшому зменшенні початкової напруги до  $U_{0СК}/U_{AB} = 0$  ця величина становитиме  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,24$ . При від'ємних початкових напругах на клеммах СК максимальне значення напруги на клеммах підвищуватиметься й при величині  $U_{0СК}/U_{AB} = -0,8$  становитиме  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,32$ .

Варто підкреслити, що при добротності коливального контуру заряду  $Q_2(U_H) = 10$  (рис. 2 – пунктирна лінія) за один цикл заряду СК максимальна величина напруги на клеммах СК  $U_{СКmax} / U_{AB}$  буде підвищуватися більше. Так, при початковій напрузі на затискачах СК  $U_{0СК}/U_{AB} = 0,8$  величина максимальної напруги становить  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,15$ , а при нульовій початковій напрузі –  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,52$ . При подальшому зменшенні початкової напруги на клеммах СК до  $U_{0СК}/U_{AB} = -0,8$  величина максимальної напруги на клеммах становитиме  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,68$ .

При збільшенні значення добротності контуру заряду СК від джерела постійної напруги (АБ) може бути реалізоване більше значення максимальної напруги на затискачах СК  $U_{СКmax} / U_{AB}$  (при добротності  $Q_1(U_H) = 2$  –  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,32$ , а при  $Q_2(U_H) = 10$  ця величина становитиме  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,69$ , при початковій напрузі на затискачах СК –  $U_{0СК} = -U_{AB}$  [2; 6].

**Головні висновки.** Отже, з огляду на викладене вище, можемо резюмувати таке:

1. Під час коливального заряду СК від неідеального джерела постійної напруги (АБ) при великій добротності зарядного контуру  $Q(U_H)$  можна реалізувати заряд СК до напруг, які можуть суттєво перевищувати напругу на джерелі енергії.

2. Дослідження показали, що при зменшенні початкової напруги в діапазоні від  $U_{0СК} = U_{AB}$  до  $U_{0СК} = -U_{AB}$  величина максимальної напруги заряду СК  $U_{СКmax} / U_{AB}$  нелінійно міняється в межах від величини  $U_{AB}$  до величин, які перевищують майже в 1,7 рази значення напруги на неідеальному джерелі напруги (АБ) (при високих добротностях контуру  $Q(U_H) > 10$ ).

3. Визначено, що при більшій величині добротності коливального зарядного контуру може реалізуватися більша величина максимальної напруги на затискачах СК  $U_{СКmax} / U_{AB}$  (при добротності  $Q_1(U_H) = 2$  –  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,32$ , а при  $Q_2(U_H) = 10$  це значення становить  $U_{СКmax} / U_{AB} = 1,69$ , при початковій напрузі на затискачах суперконденсатора –  $U_{0СК} = -U_{AB}$ ).

4. Цей спосіб дає змогу збільшувати максимальну напругу на затискачах СК  $U_{СКmax} / U_{AB}$  та в низці випадків реалізує можливість обходитись без підвищувального трансформатора.

### 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: спец. 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.

4. 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.
5. 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. 21.23: 15.
6. Білецький О.О., Котовський В.Й. Енергетичні характеристики кіл коливального заряду суперконденсатора. Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 10–11.
7. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии. ИЭД НАНУ. 2009. 207 с.
8. 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.
9. Zubieta L., Bonert R. 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. № 12 (1121). С. 379–383.