

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ В КОМБІНОВАНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ІОНІСТОРАМИ ТА ЛІТІЙ-ІОННИМИ АКУМУЛЯТОРНИМИ БАТАРЕЯМИ

Білецький О.О., Залуський Д.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ

biletsky27@gmail.com

В цій статті проведено дослідження електротехнічних процесів при коливальному заряді нелінійного конденсатора – іоністора (суперконденсатора) від реального літій-іонного акумулятора (неідеального джерела постійної електрорушійної сили) при комбінованому поєднанні їх в єдине джерело живлення. Показано, що якщо забезпечити велику добротність контуру заряду – можна заряджати іоністори, за умови коливального заряду від реального джерела постійної електрорушійної сили, до напруг, які будуть перевищувати напругу джерела. В даній роботі доведено, що за умови роботи при початкових напругах з від’ємними значеннями можна досягти максимальну напругу на клеммах іоністорів, яка буде до 2 разів більшою, ніж напруга на джерелі постійної напруги. Даний підхід дозволяє в деяких випадках обходитись без підвищувального трансформатора напруги. Перевірено, що при збільшенні значення добротності контуру коливального заряду буде забезпечено максимум напруги на клеммах іоністора (суперконденсатора). Досліджено два різні значення добротності контуру заряду і отримано ряд експериментальних даних. При дослідженні враховувалась залежність величини добротності коливального контуру зарядки іоністора від привладеної напруги до затискачів іоністора. Приведено шляхи збільшення величини напруги при коливальному заряді батарей іоністорів від ЛІАБ (реального джерела постійної напруги) при варіації величини добротності контуру заряду та різних умовах по початковій напрузі на клеммах іоністорів. Комбіноване поєднання батарей суперконденсаторів (СК) та літій-іонних акумуляторних батарей (ЛІАБ) дозволяє продовжити термін служби акумуляторів за рахунок забезпечення імпульсних режимів батарей СК. При цьому можливо забезпечити достатньо високий коефіцієнт передачі при коливальному чи аперіодичному заряді батарей іоністорів від батарей акумуляторів. Виконано дослідження кількості енергії, що поступає в іоністор; кількості енергії, що відбирається від ЛІАБ; кількості енергії, що втрачається в контурі заряду іоністора (СК) та коефіцієнта, що відображає передачу енергії від ЛІАБ при зарядці від реального джерела ЕРС. *Ключові слова:* енергетичні процеси, іоністор, нелінійний конденсатор, суперконденсатор, джерело постійної електрорушійної сили, комбіноване джерело електроживлення.

### Energy processes in combined power supplies with ionistors and lithium-ion accumulatory batteries. Biletskyi O., Zaluskyi D.

In this article, a study of electrotechnical processes during the oscillating charge of a nonlinear capacitor – an ionistor (supercapacitor) from a real lithium-ion battery (a non-ideal source of constant electromotive force) is carried out when they are combined into a single power source. It is shown that if a high Q-factor of the charge circuit is ensured, ionistors can be charged, under the condition of an oscillating charge from a real source of constant electromotive force, to voltages that will exceed the source voltage. In this work, it is proved that, under the conditions of operation at initial voltages with negative values, it is possible to reach the maximum voltage at the terminals of the ionistors, which will be up to 2 times higher than the voltage at the constant voltage source. This approach allows in some cases to do without a voltage step-up transformer. It has been verified that with an increase in the Q-factor of the circuit of the oscillating charge, the maximum voltage at the terminals of the ionistor (supercapacitor) will be ensured. Two different values of the Q-factor of the charge circuit were studied and a number of experimental data were obtained. The research took into account the dependence of the Q-factor of the oscillating circuit of the ionistor charging on the applied voltage to the ionistor clamps. Ways of increasing the voltage value during the oscillating charge of the battery of ionistors from LIAB (a real source of constant voltage) with variation in the value of the Q-factor of the charge circuit and under different conditions according to the initial voltage at the terminals of the ionistors are given. The combined combination of supercapacitor batteries (SC) and lithium-ion rechargeable batteries (LIAB) allows you to extend the life of batteries by providing pulse modes with SC batteries. At the same time, it is possible to ensure a sufficiently high transmission ratio during fluctuating or aperiodic charging of ionistor batteries from storage batteries. A study of the amount of energy entering the ionistor was carried out; the amount of energy taken from LIAB; of the amount of energy lost in the ionistor charge circuit (IC) and the coefficient reflecting the energy transfer from the LIAB when charging from a real EMF source. *Key words:* energy processes, ionistor, nonlinear capacitor, supercapacitor, source of constant electromotive force, combined source of power supply.

**Постановка проблеми.** В інноваційних енергетичних системах все частіше використовуються джерела електроживлення з паралельним поєднанням батарей іоністорів (суперконденсаторів) та літій-іонних акумуляторних батарей.

При такому поєднанні високої питомої енергії акумуляторних батарей з високою питомою потужністю батарей іоністорів можна забезпечити в навантаженні високу потужність для різного типу електродвигунів в електротранспорті та забезпечити

енергію на тривалий час за рахунок літій-іонних акумуляторних батарей [1–5]. В ряді наукових робіт на основі досліджень зазначено [2, 6], що комбіноване поєднання батарей суперконденсаторів (СК) та літій-іонних акумуляторних батарей (ЛІАБ) дозволяє продовжити термін служби акумуляторів за рахунок забезпечення імпульсних режимів батареями СК. При цьому можливо забезпечити достатньо високий коефіцієнт передачі при коливальному чи аперіодичному заряді батарей іоністрів від батарей акумуляторів.

**Актуальність дослідження.** В деяких дослідженнях зі звичайними конденсаторами [4, 7, 8] доведено ефективність використання ненульових початкових на клеммах конденсаторів при заряді від реальних джерел постійної електрорушійної сили, що суттєво підвищувало енергетичні показники.

Мета полягала у пошуку шляхів збільшення величини напруги при коливальному заряді батареї іоністорів від ЛІАБ (реального джерела постійної напруги) при варіації величини добротності контуру заряду та різних умовах по початковій напрузі на клеммах іоністорів.

**Виклад основного матеріалу.** При зарядці іоністора від ЛІАБ в коливальному режимі процес зарядки переривається завдяки напівпровідниковому елементу при зміні полярності струму в зарядному колі (рис. 1). У відповідності до еквівалентної схеми зарядного кола комбінованого джерела електроживлення (рис. 1) іоністор отримує заряд від ЛІАБ через

транзисторний напівпровідниковий ключ, індуктивність контуру  $L$  та опір контуру заряду. В ролі напівпровідникового ключа використовується біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT транзистор).

Завдяки високій добротності зарядного кола можна зарядити батарею іоністорів до напруг, які вищі за напругу джерела електрорушійної сили в 2 рази.

В еквівалентній схемі зарядного контуру іоністора (рис. 1) застосовано ЛІАБ з номінальною напругою 2,3 (В) та активним опором 0,012 (Ом). Батарея іоністорів замінена еквівалентною схемою з декількома вітками з різними сталими часу. До активного опору кола додано опір провідників  $R_{\text{пр}} = 0,01$  (Ом).

Перша вітка представлена активним опором  $R_1 = 0,0025$  (Ом) та ємністю, яка враховує залежність від напруги на клеммах іоністора  $C_v(U_1) = kU$ , де  $k = 190$  (Ф/В) та постійної частини ємності  $C_1 = 270$  (Ф). Значення опору та сталої ємності другої вітки складають  $R_2 = 0,9$  (Ом) і  $C_2 = 100$  (Ф). Опір та ємність вітки номер три становлять відповідно  $R_3 = 5,2$  (Ом) і  $C_3 = 220$  (Ф). В еквівалентній схемі для відображення процесу саморозряду іоністора застосовано опір  $R_4 = 9000$  (Ом) [2, 9, 10]. Завдяки напівпровідниковому комутатору реалізовано фіксацію максимуму напруги на клеммах іоністора, коли  $dU_{\text{СК}}(t)/dt = 0$ . Для аналізу електротехнічних та енергетичних характеристик в колах заряду батареї іоністорів від ЛІАБ треба дослідити енергетичні процеси при зарядці батареї іоністо-

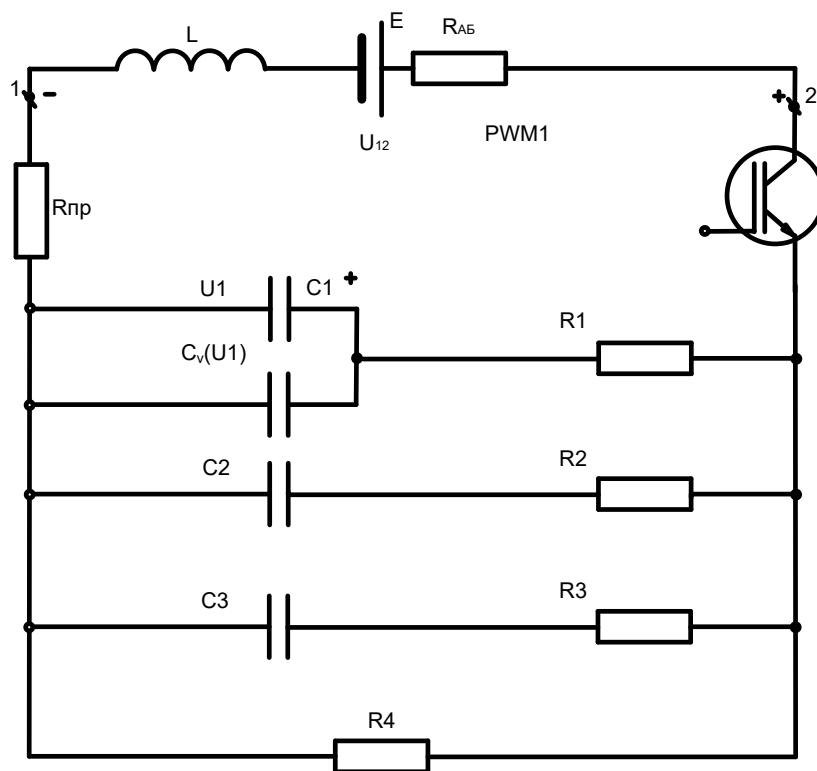


Рис. 1. Схема еквівалентного кола заряду іоністора

рів (СК) від ЛАБ (реального джерела постійної ЕРС) при варіації початкових умов за напругою на затискачах батареї іоністорів (СК) при зміні напруги в межах  $U_{AB} < U_{OCK} < +U_{AB}$ . В межах даного дослідження умови по струму в контурі заряду були нульовими.

Виконано дослідження кількості енергії, що поступає в іоністор; кількості енергії, що відбирається від ЛАБ; кількості енергії, що втрачається в контурі заряду іоністора (СК) та коефіцієнта, що відображає передачу енергії від ЛАБ при зарядці від реального джерела ЕРС. Проаналізовано діапазон напруг від  $-U_H, -0,9 \cdot U_H, \dots, +U_H$ . У відповідності до передових наукових досліджень [2, 4, 10] сумарна ємність іоністора представлена як сума сталої ємності  $C_1 = \text{const}$  та ємності  $C_v(U) = k \cdot |U|$ , що апроксимована лінійною залежністю від напруги на затискачах іоністора.

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

Умовою при якій можливий заряд в коливальному режимі іоністора від ЛАБ є відповідність параметрів електричного кола при яких виконується вираз для добротності контуру:

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

Враховуючи формули (1) – (2), для коливального контуру заряду добротність є залежною від величини напруги на затискачах іоністора при зарядці від ЛАБ.

Проаналізуємо як змінюється величина добротності  $Q(U)$  при варіації напруги на затискачах іоністора в діапазоні  $-U_{AB} < U_{OCK} < +U_{AB}$ . При аналізі цієї закономірності прийнято два варіанти параметрів індуктивності  $L_1=1,697$  (Гн) та  $L_2=42,438$  (Гн). Також враховувався сумарне значення опору контуру заряду  $0,0245$  (Ом). При даних параметрах електричного коливального контуру добротності будуть рівні  $Q_1(U_{\pm}) = 2$  та  $Q_2(U_{\pm}) = 10$ .

Проведемо аналіз варіації добротностей контуру заряду  $Q_1(U)$  та  $Q_2(U)$  відповідно до виразу (2). При цих значеннях параметрів контуру заряду та за умови номінальної напруги на затискачах іоністора  $|U_{\pm}|$  значення добротностей складають  $Q_1(|U_{\pm}|) = 2$

та  $Q_2(|U_{\pm}|) = 10$ . Екстремум – максимум добротності  $Q_1 = 3,236$  досягається за умови нульових початкових умов по напрузі на затискачах іоністора, при аналогічній умові величина другої добротності  $Q_2 = 16,18$ . Дане дослідження показало, що при значенні напруги  $U = 1$  (В) добротність складає  $Q_1 = 2,479$ , а при підвищенні напруги на клеммах іоністора до величини  $U = 3,9$  (В) добротність складатиме  $Q_1 = 1,672$ . При значенні індуктивності  $L_2=42,43$  (Гн) величина добротності контуру становить  $Q_2 = 8,362$  при напрузі на затискачах СК при  $U = 3,9$  (В), а при зниженні напруги до  $U = 1$  (В) величина добротності  $Q_2$  збільшиться в 1,5 раза.

Перевірено, що добротності  $Q_1(U)$  та  $Q_2(U)$  будуть збільшені на 92 %, якщо зміниться напруга на клеммах іоністорів з  $-3,9$  до  $0$  (В). При аналізі та дослідженні комбінованих джерел електроживлення з іоністорами та ЛАБ необхідно враховувати те, що значення добротності контуру залежить від величини напруги на затискачах СК.

Досліджено закономірність як змінюється максимальна напруги при коливальному режимі зарядки іоністора, яка приведена до значення  $U_{AB}$  ( $U'_{CKmax} = U_{CKmax} / U_{AB}$ ) від значення напруги на затискачах іоністора при початку зарядки, яка приведена до значення  $U_{AB}$  ( $U_{OCK} / U_{AB}$ ). Режими досліджені при добротностях коливального контуру  $Q_1(U_H) = 2$  та  $Q_2(U_H) = 10$  відповідно (таблиця 1).

При аналізі залежностей напруги зарядки іоністорів, яка приведена до значення напруги на затискачах ЛАБ  $U'_{CKmax} (U_{OCK} / U_{AB})$  (таблиця 1) показано, що при роботі з початковими значеннями напруг в межах  $U_{OCK} = U_{AB}$  до  $U_{OCK} = -U_{\square}$  по мірі наближення до  $U_{OCK} = -U_{AB}$  максимальне значення напруги зарядки іоністора  $U'_{CKmax}$  варіюється нелінійно в межах від  $U_{AB}$  до воєичин, що перевищують майже в два рази величину номінальної напруги ЛАБ при високих значеннях добротності коливального зарядного контуру.

Підтверджено, що при значенні добротності кола зарядки іоністора від ЛАБ  $Q_1(U_H) = 2$  і при значенні напруги на затискачах  $U_{OCK} / U_{AB} = 0,8$  екстремум по напрузі на затискачах іоністора буде рівним  $U'_{CKmax} = 1,07$ . Якщо і надалі зменшувати початкове значення напруги до  $0$  – то отримаємо максимальне

Таблиця 1

**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  $Q_2(U_H) = 10$**

		$U_{OCK} / U_{AB}$										
$Q=2$	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	,2	0,4	0,6	0,8	1	
$U_{CKmax}$	1,32	1,32	1,31	1,29	1,26	1,24	1,21	1,75	1,12	1,07	1	
$Q=10$	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	
$U_{CKmax}$	1,69	1,68	1,66	1,61	1,56	1,51	1,46	1,37	1,28	1,15	1	

значення  $U'_{СК\max} = 1,24$ . З метою підвищення максимуму по напрузі на затискачах іоністорів необхідно використовувати від'ємні початкові умови по напрузі на затискачах іоністорів, відповідно при  $U_{ОСК}/U_{АБ} = -0,8$  напруга буде складати  $U'_{СК\max} = 1,32$ .

Встановлена закономірність, що при збільшенні добротності кола при коливальному заряді іоністора максимальне значення напруги на затискачах іоністора  $U'_{СК\max}$  буде зростати більше. Наприклад при добротності контуру 10 та при нульовому значенні напруги – максимальне значення напруги іоністора  $U'_{СК\max} = 1,52$ , а якщо взяти умови при  $U_{ОСК}/U_{АБ} = 0,8$  – то значення екстремуму напруги складатиме  $U'_{СК\max} = 1,15$ .

Відповідно якщо і надалі зменшувати початкові умови по напрузі на затискачах іоністора до  $-0,8$  – можна отримати підвищення значення напруги на затискачах до  $U'_{СК\max} = 1,68$ .

В деяких випадках при підвищенні величини добротності кола зарядки іоністора від ЛІАБ можна забезпечити більш величини максимуму по напрузі на клеммах іоністорів  $U'_{СК\max}$ . В даному випадку перевірено, що при величині добротності контуру  $Q_1(U_H) = 2$  – максимальне значення напруги  $U'_{СК\max} = 1,32$ , але при підвищенні величини добротності до  $Q_2(U_H) = 10$  – можна досягти значення  $U'_{СК\max} = 1,69$  при умові, що початкова напруга на клеммах іоністора  $U_{ОСК} = -U_{АБ}$  [2, 6].

### Головні висновки.

1. При зарядці іоністора в коливальному режимі від літій-іонної батареї, за умови високої добротності кола зарядки  $Q$ , зарядка іоністорів відбувається до напруг, що значно перевищують напругу на акумуляторній батареї.

2. При великих добротностях кола зарядки іоністорів  $Q(U_H) > 10$  підтверджено, що при подальшому зменшенні напруг в межах від  $U_{ОСК} = U_{АБ}$  до значень  $U_{ОСК} = -U_{АБ}$ , значення екстремуму напруги зарядки іоністора  $U'_{СК\max}$  варіюється нелінійно в діапазоні від значень  $U_{АБ}$  до значень, які значно більші (до 2 раз) від значення напруг на літій-іонній акумуляторній батареї (реальному джерелі постійної ЕРС).

3. Перевірено, що при збільшенні значення добротності контуру коливального заряду буде забезпечено максимум напруги на клеммах іоністора (СК)  $U'_{СК\max}$ . Відповідно при величині добротності контуру  $Q_1(U_H) = 2$  – максимум напруги  $U'_{СК\max} = 1,32$ , а при підвищенні добротності до  $Q_2(U_H) = 10$  – екстремум по напрузі дорівнює  $U'_{СК\max} = 1,69$  за умови, що початкова напруга на клеммах іоністора (СК)  $U_{ОСК} = -U_{АБ}$ .

4. Подібний підхід реалізовує можливість підвищувати максимальну напругу на клеммах іоністорів (СК)  $U'_{СК\max}$ . За допомогою даної методики реалізовано підхід інколи обходитись без трансформатора напруги.

### 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. ун-ту "ХПИ": зб. наук. пр. Темат. вип. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. 2015. No. 12 (1121). с. 379–383.