
ІННОВАЦІЙНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОБЕЗПЕКИ

УДК 621.3.01

МЕТОД ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ КІЛ ІЗ СУПЕРКОНДЕНСАТОРАМИ ТА АКУМУЛЯТОРНИМИ БАТАРЕЯМИ В КОМБІНОВАНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Білецький О.О., Котовський В.Й.

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

У роботі запропоновано метод параметричного синтезу кіл заряду суперконденсаторів від акумуляторної батареї в комбінованих джерелах живлення електромобілей. Цей метод дає можливість за відомими параметрами зарядного контуру визначити доцільні початкові умови щодо напруги на клеммах суперконденсатора, при яких забезпечено максимальний коефіцієнт передачі енергії від акумуляторної батареї. Обов'язковою умовою при цьому є забезпечення достатньої кількості енергії, яку може віддати суперконденсатор при розряді до цієї напруги. *Ключові слова:* енергетичні характеристики, суперконденсатор, внутрішній опір, електромобіль, акумуляторна батарея.

Метод параметрического синтеза цепей с суперконденсаторами и аккумуляторными батареями в комбинированных источниках питания электромобилей. Белецкий О.А., Котовский В.И. В работе предложен метод параметрического синтеза цепей заряда суперконденсаторов от аккумуляторной батареи в комбинированных источниках питания электромобилей. Данный метод позволяет по известным параметрам зарядного контура определить целесообразные начальные условия по напряжению на клеммах суперконденсатора, при которых было обеспечено максимальное значение передачи энергии от аккумуляторной батареи. Обязательным условием при этом является обеспечение достаточного количества энергии, которую может отдать суперконденсатор при разряде в данном напряжении. *Ключевые слова:* энергетические характеристики, суперконденсатор, внутреннее сопротивление, электромобиль, аккумуляторная батарея.

The method of parametric synthesis of circuits with supercapacitors and batteries in the combined power sources of electric vehicles. Biletskyi O., Kotovsky V. In this paper, a method for the parametric synthesis of the charge circuits of supercapacitors from a battery in combined electric vehicle power sources is proposed. This method makes it possible to determine from the known parameters of the charging circuit the appropriate initial conditions for the voltage at the terminals of the supercapacitor, at which the maximum value of energy transfer from the battery was ensured. A prerequisite for this is to provide a sufficient amount of energy that can give a supercapacitor when discharging at a given voltage. *Key words:* energy characteristics, supercapacitor, internal resistance, electric vehicle, battery.

Постановка проблеми. Досить часто для зберігання енергії в електромобілях (далі – ЕМ) застосовують сучасні акумуляторні батареї (далі – АБ). Передумовою є те, що АБ можуть зберігати багато енергії при своїх компактних малогабаритних розмірах. При задовільних значеннях питомої енергії АБ суттєво програють суперконденсаторам (СК) за значенням питомої потужності й з кількістю циклів заряд/розряд [1–4]. Розробники, через брак альтернативи, звикли до даних недоліків.

Актуальність дослідження. Прогрес змушує створювати пристрої для зберігання енергії, які задовольнятимуть вимогам щодо питомої потужності.

Нові зразки АБ з високими показниками питомої потужності програють за питомою енергією й кількістю циклів, які вони здатні виконати без погіршення технічних характеристик. СК можуть бути альтернативою цим новим зразкам АБ [1; 3–5].

Якщо використовувати тільки АБ, то їй необхідно підбирати згідно з вимогами щодо питомої потужності для ЕМ; під час використання тільки батареї СК їй підбирають відповідно до вимог щодо питомої енергії. Цей підхід призведе до значного збільшення маси, об'єму та вартості АБ. Наш підхід з комбінованим використанням батареї СК та АБ дасть можливість задовольнити вимоги щодо потужності для

функціонування ЕМ за рахунок СК, забезпечити необхідний запас енергії за допомогою АБ. Причому АБ буде функціонувати більшу кількість циклів заряд/розряд, оскільки всі імпульсні навантаження буде компенсувати батарея СК [3; 6; 7].

Аналіз досліджень енергетичних характеристик в електричних колах комбінованих джерел електроживлення (КДЕ) з СК показав [1; 4; 7–9], що вони переважно проводились без урахування втрат електроенергії в колах заряду й дозаряду. Не проводився також аналіз утрат електроенергії в колах заряду СК від АБ при ненульових початкових і кінцевих умовах щодо напруги. Тому запропонований авторами метод параметричного синтезу кіл заряду СК від АБ [3], який базується на вирішенні зворотного завдання – визначенні початкової напруги на клеммах СК, при якій досягається максимальний коефіцієнт передачі енергії від АБ комбінованих джерел живлення ЕМ до СК, при заданій ефективній добротності зарядного контуру, є важливим та актуальним.

Метою роботи є підвищення енергетичних характеристик КДЕ шляхом визначення доцільних ненульових початкових умов щодо напруги на клеммах СК та їх вплив на коефіцієнт передачі енергії $\eta_{СК}$ в колах аперіодичного й коливального заряду від АБ і на кількість енергії, яка накопичується в СК.

Виклад основного матеріалу. Метод параметричного синтезу кіл заряду СК від АБ базується на аналізі функціональних залежностей: кількості енергії $W_{СК}$, яка надходить у СК за час заряду від напруги $U_{ОСК}$ до U_k ; кількості енергії $W_{АБ}$, яка відбирається від АБ за час заряду від напруги $U_{ОСК}$ до U_k ; енергії втрат $W_{втрат}$ у колі заряду СК від напруги $U_{ОСК}$ до U_k ; коефіцієнта передачі енергії від АБ $\eta_{СК}$ при різних значеннях напруг $U_{ОСК}/U_{АБ}$.

Відмінність енергетичних характеристик СК і АБ є основою цього методу параметричного синтезу кіл заряду СК від АБ КДЕ, в яких АБ використовують для тривалого живлення навантажень стабільним струмом, а накопичувальні СК підключають за необхідності реалізації короткочасних великих потужностей.

Доцільними ненульовими умовами щодо напруги на клеммах СК $U_{ОСК}$ будуть такі умови щодо напруги, при яких заряд СК буде відбуватися при максимально можливому коефіцієнті передачі енергії від АБ з мінімальними втратами енергії в зарядному колі. При цьому кількість енергії, яка надходить у СК під час заряду від доцільних ненульових умов щодо напруги на клеммах $U_{ОСК}$, повинна бути достатньою для забезпечення імпульсних режимів [3; 6].

За допомогою методу параметричного синтезу виберемо доцільні режими роботи цього джерела й забезпечимо високий $\eta_{СК}$.

1. Метод параметричного синтезу буде застосований для ЕМ Tesla S 70D. Цей ЕМ [10] є повнопривідним транспортним засобом, у якому силовою установкою є два асинхронні електродвигуни.

ЕМ експлуатується в режимі таксі в мегаполісі, де є необхідність часто зупинятися й динамічно рушати з місця. Як джерело живлення буде використане КДЕ з СК і літій-іонними АБ.

2. Еквівалентна схема заміщення ЕМ з КДЕ представлена на рис. 1.

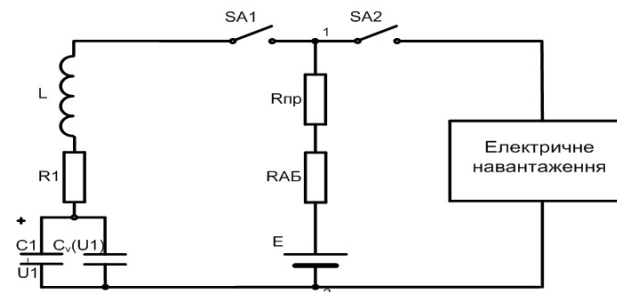


Рис. 1. Еквівалентна схема заміщення ЕМ з комбінованим джерелом живлення

Ця еквівалентна схема складається із зарядного контуру $E-R_{АБ}-R_{ПР}-SA1-L-R_1-(C+C_v(U_1))$ та розрядного контуру, в якому АБ і СК (або АБ самостійно) працюють на електричне навантаження.

Накопичувальна батарея СК заряджається від АБ через ключ, котушку індуктивності L та опір проводів $R_{ПР}$. Батарея СК представлена опором R_1 , а її ємність складається з паралельного з'єднання незмінної частини ємності C_1 [Ф] і ємності $C_v(U_1) = kU$ (де k [Ф/В]), яка залежить від напруги на клеммах батареї СК.

3. Максимальна потужність електродвигунів в оригінальній системі електроживлення (без батареї СК) становить 244,2 кВт (332 к.с.) [10] та обмежена можливостями АБ. Як джерело електроенергії в ЕМ заводом використовується АБ ємністю 70 кВт·год [3; 10]. Це дає змогу отримати пробіг до 470 км.

У КДЕ максимальна потужність буде обмежена $P_{max}=244,2$ кВт – це потужність, яку повинна забезпечити батарея СК. Потужність АБ:

$$P_{АБmax} = 0,45P_{max} = 0,45P_{СКmax} = 109,9 \text{ кВт.} \quad (1)$$

4. АБ електромобіля [10] складається з елементів Panasonic NCR18650A з ємністю 3,1 А·год. (мінімальне значення ємності 2,95 А·год).

Параметри АБ: Номінальна напруга на клеммах кожного елемента $U_{ном} = 3,6$ В (мінімальна напруга розряду $U_{min} = 2,5$ В та максимальна напруга заряду $U_{max} = 4,2$ В) і SOC = 69,4% (англ. "state-of-charge") допустиме значення, тобто можливий рівень розряду у відсотках від номінальної напруги $U_{ном}$ В; внутрішній опір $R = 0,11$ Ом; час заряду 4 год. струмом $I = 0,2$ А; максимальний струм розряду $I_{max} = 2$ А; питома енергія – 245 Вт·год/кг; вага елемента – 45,5 г; розміри циліндричного елемента – 18,6×65,2 мм; об'єм – $1,77 \cdot 10^{-5}$ м³; термін служби АБ – 8 років [10].

Допустима потужність АБ залежить від SOC – можливого рівня розряду у відсотках від номінальної

напруги $U_{\text{ном}}$ В (чим менше SOC, тим менша допустима потужність). Відповідно, під час тестування й аналізу СК та АБ необхідно чітко знати діапазон зміни напруги, SOC і тривалість імпульсу [1–3].

Діапазон зміни напруги (ефективність [2; 3; 7]) визначається виразом:

$$EF = \frac{P}{P + I^2 R} = \frac{1}{1 + IR/U} = \frac{U}{U_{\text{OC}}}. \quad (2)$$

Максимальна імпульсна потужність АБ визначається як:

$$P_{\text{АБ, max}} = \frac{EF(1-EF)U_{\text{OC}}^2}{R}. \quad (3)$$

Аналогічно для визначення максимальної потужності СК [1; 2; 5; 7]:

$$P_{\text{СКmax}} = \frac{9}{16}(1-EF)\frac{U_{\text{OC}}^2}{R}, \quad (4)$$

Де U_{OC} – номінальна напруга СК.

Розрахуємо максимальну імпульсну потужність нашої АБ. Напруга, до якої заряджена АБ $U_{\text{OC}} = 4,2$ В. Згідно з виразами (5.11) – (5.12), при $U_1 = 4$ В, маємо $EF_1 = 0,95$, $P_{\text{АБ, max}} = 7,61$ Вт. Питома потужність АБ $P_{\text{пит.АБ1}} = 167,4$ Вт/кг.

Дана АБ має мінімально допустиму напругу розряду $U_{\text{min}} = U_2 = 2,5$ В. Для цього випадку $EF_2 = 0,6$ з урахуванням виразів (2) – (4), максимальна імпульсна потужність АБ становить $P_{\text{АБ, max2}} = 38,49$ Вт. При цьому значенні ефективності питома потужність АБ становить $P_{\text{пит.АБ2}} = 845,87$ Вт/кг. При реальних динамічних режимах експлуатації ЕМ необхідно орієнтуватися на питому потужність при ефективності $EF_1 = 0,95$. З метою підвищення енергетичних характеристик у цій КДЕ використані в поєднанні батарея СК та АБ з меншою ємністю. Для забезпечення пробігу до 270 км достатньо мати ємність до 40 кВт·год.

З урахуванням загальної напруги всієї АБ $U_{\text{АБ}} = 375$ В можна знайти кількість послідовно з'єднаних секцій з елементами $n_{\text{посл.}} = U_{\text{АБ}}/U_{\text{I max}} = 89,28$. Відповідно, будемо використовувати 90 послідовно з'єднаних секцій, це дасть можливість отримати напругу АБ до 378 В. При номінальній напрузі елемента $U_{\text{ном}} = 3,6$ В загальна напруга на клеммах АБ становить $U_{\text{АБном}} = 3224$ В. При напрузі $U_{\text{АБном}}$ ємність АБ дорівнює $E_{\text{АБ}} = 40000$ Вт·год. Накопичений заряд становить $q_{\text{АБ}} = 123,457$ А·год. Розрахуємо необхідну кількість паралельно з'єднаних елементів за формулою $q_{\text{АБ}}/q_1 = 40$ (шт.). Відповідно, в цій АБ буде розміщено $N=3600$ елементів. У кожній із 90 послідовних секцій (по 40 шт. паралельно з'єднаних елементів) буде накопичено заряд $q_{\text{АБ}} = 123,457$ А·год.

Вага буде дорівнювати $m_{\text{АБ}} = Nm_1 = 163,8$ кг. Об'єм становитиме $V_{\text{АБ}} = 63,72$ л. При $U_{\text{АБmax}}$ запас енергії в АБ становитиме $E_{\text{АБmax}} = 46,872$ кВт·год. При $U_{\text{АБном}}$ [3, 10] запас енергії буде дорівнювати $E_{\text{АБном}} = 40,180$ кВт·год.

Загальний опір усієї АБ становить $P_{\text{АБ}} = (R_1/n_{\text{пар}}) \cdot n_{\text{посл.}} = 0,2475$ Ом. Визначимо максимальну імпульсну потужність АБ ЕМ. При мінімально допустимій напрузі розряду АБ $U_1 = 226,8$ В, маємо $EF_{\text{ФБ1}} = 0,6$, $P_{\text{АБ, max}} = 138,554$ кВт. Питома потужність АБ становить $P_{\text{пит.АБ, max}} = 845,874$ Вт/кг. Для цього застосування АБ достатньо розряджати до напруги $U_2 = 279,72$ В. Для цього випадку імпульсна потужність становить $EF_2 = 0,74$, $P_{\text{АБ, max2}} = 111,07$ кВт, питома потужність – $P_{\text{пит.АБ2}} = 678,109$ Вт/кг.

5. Розрахуємо параметри батареї СК, яка застосовується в КДЕ. Вона складається з СК фірми «Maxwell Technologies». Параметри СК MC2600: ємність СК представляється сумою незмінної ємності $C_1 = 2620$ Ф і ємності $C_v(U) = k \cdot |U|$ ($k = 20,407$ Ф/В) [9]. Відповідно, маємо: $C(U) = C_1 + k|U| = 2675,1$ Ф.

Номінальна напруга $U_{\text{НСК}} = 2,7$ В; внутрішній опір СК $R_{\text{СК}} = 0,37$ мОм; вага СК $m_{\text{СК}} = 0,47$ кг; об'єм СК $V = 0,36$ л; максимальна питома енергія СК $E_{\text{пит.СК}} = 5,6$ Вт·год./кг; запас енергії (ємність Вт·год.) СК $E_{\text{СК}} = 2,63$ Вт·год.; запас заряду А·год. СК, відповідно, становить $q_{\text{СК}} = 0,975$ А·год.; максимальна питома потужність СК $P_{\text{пит.СКmax}} = 10400-10480$ Вт/кг (при $EF_{\text{СК}} = 5,6$ $EF_{\text{СК}} = 0,5$). При цьому максимальна імпульсна потужність СК $R_{\text{СК}} = 4925,67$ Вт; питома потужність – $P_{\text{пит.СК}} = 4100$ Вт/кг [1; 3], яка вказується в паспортних даних, розраховується за формулою:

$$P_{\text{пит.СК}} = 0,12 \frac{U_{\text{НСК}}^2}{R_{\text{СК}} m} \text{ Вт/кг}. \quad (5)$$

При ефективності $EF_{\text{СК}} = 0,95$ імпульсна та питома потужності цього СК будуть становити $R_{\text{СК}} = 554,138$ Вт і $P_{\text{пит.СК}} = 1179,02$ Вт/кг. Розрахуємо кількість СК для забезпечення необхідної імпульсної потужності. Номінальна напруга холостого ходу одного СК $U_{\text{НСК}} = 2,7$ В, можна знайти кількість послідовно з'єднаних секцій: $n_{\text{посл.СК}} = 140$. Для збільшення ємності всієї батареї СК приєднаємо паралельно дві батареї СК. Вага батареї СК становитиме $n_{\text{бат.СК}} = Nm_{\text{СК}} = 31,6$ кг, об'єм – $V_{\text{бат.СК}} = 100,80$ л. При номінальній напрузі запас енергії буде становити $E_{\text{бат.СК}} = U_{\text{бат.СК}} \cdot 2q_{\text{СК}} = 0,737$ кВт·год. Максимальна питома енергія становить $E_{\text{пит.СК}} = 5,6$ Вт·год/кг. Опір усієї батареї – $R_{\text{бат.СК}} = 0,0259$ Ом. Максимальна потужність батареї СК буде при $EF=1/2$, тобто

Таблиця 1

Параметри батареї СК MC2600

$EF_{\text{СК}} = U/U_{\text{OC}}$	$U, \text{ В}$	$P_{\text{СКmax}}, \text{ кВт}$	$P_{\text{пит.СКmax}}, \text{ кВт/кг}$
0,50	189,00	1379,189	10,480
0,60	226,80	1241,270	9,432
0,74	279,72	806,826	6,131
0,92	347,76	248,25	1,886

$P_{СК\max} = 1379,189$ кВт, питома потужність –
 $P_{\text{пит.СК}\max} = 10480,16$ Вт/кг.

Батарея СК може забезпечити необхідну імпульсну потужність $P_{СК\max1} = 248,25$ кВт при $EF_{СК1} = 0,92$. З метою порівняння максимальних імпульсних і питомих потужностей для батареї СК їх значення приведені в таблиці 1.

З таблиці 1 видно, що при ефективності $EF_{СК3} = 0,74$ імпульсна потужність збільшиться в 3,25 рази, а при $EF_{СК2} = 0,6$ – в 5 разів, порівняно з режимом розряду при ефективності $EF_{СК4} = 0,92$. Максимально допустима імпульсна потужність $P_{СК\max} = 1379,189$ кВт буде при режимі узгодженого навантаження.

При мінімально допустимій напрузі розряду цієї АБ $U_1 = 226,8$ В (при $EF = 0,6$) максимальна імпульсна потужність батареї СК буде в 8,96 разів більшою, ніж максимальна імпульсна потужність АБ. При цих умовах питома потужність цієї батареї СК буде в 11,15 разів більшою, ніж питома потужність АБ. При збільшенні ефективності до $EF = 0,74$ максимальна імпульсна потужність АБ є достатньою для забезпечення потреб цього ЕМ. При цьому максимальна імпульсна потужність батареї СК буде в 7,26 разів більшою за потужність АБ. Питомі потужності батареї СК та АБ будуть відрізнятися в 9,04 рази на користь батареї СК. Ємність батареї СК

$$C_{\text{батСК}}(U) = m \left(\frac{C_1}{n} + \frac{k}{n^2} |U| \right) = C_{\text{екв}} + k_{\text{екв}} |U| = 38.216 \text{ Ф},$$

де n та m – кількість послідовно й паралельно з'єднаних СК.

6. В еквівалентній схемі заміщення опір проводів $R_{\text{ГП}} = 0,01$ Ом.

7. Добротність зарядного контуру розраховується за виразом:

$$Q(U) = \frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \sqrt{\frac{L}{C(U)}} = 0,00057. \quad (6)$$

Опір зарядного контуру становить $R_{\Sigma} = R_{\text{АБ}} + R_{\text{батСК}} + R_{\text{ГП}} = 0,283$ Ом. Вибираємо котушку серії TSL1112 з номінальною індуктивністю $L=1$ мкГн.

8. Розрахуємо енергетичні характеристики кола заряду за допомогою MATLAB. Кількість енергії, яка відбирається від АБ, при заряді від початкової $U_n = 347,76$ В до кінцевої напруги $U_k = 378$ В розраховується за формулою:

$$W_{\text{АБ}} = \int_{t_n}^{t_k} U_{\text{АБ}} i(t) dt = 445070 \text{ Дж}. \quad (7)$$

При початковій напрузі $U_n = 347,76$ В можна визначити зміну енергії в батареї СК при заряді до $U_k = U_{\text{ном}} = 378$ В:

$$W_{\text{СК}} = \frac{C_1 (U_k^2 - U_n^2)}{2} + \frac{2k (U_k^3 - U_n^3)}{3} = 427270 \text{ Дж}. \quad (8)$$

9. Коефіцієнт передачі енергії при ефективності $EF_{СК1} = 0,92$ дорівнює відношенню енергії $W_{\text{СК}}$, яка надійшла в СК, до енергії, яка відібрана від АБ $W_{\text{АБ}}$ за весь час заряду:

$$\eta_{\text{СК}} = (W_{\text{СК}}(t_k) - W_{\text{СК}}(t_n)) / (W_{\text{АБ}}(t_n) - W_{\text{АБ}}(t_k)) = 0,96, \quad (9)$$

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

10. Енергія втрат у колі заряду є різницею між енергією, відданою АБ, й енергією, яку отримала в процесі заряду батарея СК:

$$W_{\text{втр}} = (W_{\text{АБ}}(t_n) - W_{\text{АБ}}(t_k)) - (W_{\text{СК}}(t_k) - W_{\text{СК}}(t_n)) = 17787 \text{ Дж}. \quad (10)$$

11. У цьому КДЕ технічно можливо забезпечити добротність зарядного контуру $Q(U_{\text{ном}}) = 0,00057$. При таких умовах реалізовано аперіодичний заряд.

12. Згідно з рекомендаціями цього методу, можна вибрати доцільні початкові умови щодо напруги на клеммах СК. При початковій напрузі на клеммах СК $U_n = 347,76$ В заряд батареї СК від АБ відбувається при $\eta_{\text{СК}} = 0,96$.

Головні висновки. Отже, на основі викладеного вище можемо резюмувати:

1. При подібних умовах дослідження можна бачити аналогію енергетичних характеристик заряду СК від АБ, отриманих шляхом розрахунку аналітичних залежностей та експериментального чисельного моделювання в пакеті Matlab.

2. Використання ненульових початкових умов щодо напруги на клеммах СК при заряді від АБ дає змогу підвищити коефіцієнт передачі енергії від АБ. При збільшенні початкової напруги коефіцієнт передачі енергії буде нелінійно зростати.

3. Розроблено метод параметричного синтезу кіл заряду СК від АБ, який дає змогу за відомими параметрами зарядного контуру визначити доцільні початкові умови щодо напруги на клеммах СК, при яких буде забезпечено максимальний коефіцієнт передачі енергії від АБ. Обов'язковою умовою при цьому є забезпечення достатньої кількості енергії, яку може віддати СК, при розряді до цієї напруги.

4. Експериментальне дослідження розробленого методу показало підвищення енергетичних характеристик КДЕ шляхом визначення необхідних початкових умов щодо напруги на клеммах батареї СК, при якій заряд від АБ відбувається при максимальному значенні коефіцієнта передачі енергії від АБ $\eta_{\text{СК1}} = 0,96$.

5. Розраховане КДЕ відповідає високим вимогам щодо питомої потужності. Запропонований авторами підхід дає змогу задовольнити вимоги щодо потужності для функціонування ЕМ за рахунок батареї СК та забезпечити необхідний запас енергії за допомогою АБ.

6. Літій-іонна АБ функціонуватиме більшу кількість циклів заряд/розряд, оскільки всі імпульсні навантаження буде компенсувати батарея СК. Це дає можливість суттєво зменшити масогабаритні показники та вартість АБ.

Література

1. A. Burke, M. Miller. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications. *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196. № 1. P. 514–522.
2. 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.
3. 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.
4. Kurzweil P., Frenzel B., Gallay R. Capacitance characterization methods and ageing behaviour of supercapacitors. In *Proc. 15th International Seminar On Double Layer Capacitors*, Deerfield Beach, FL, USA. 2005. P. 14–25.
5. 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.
6. Білецький О.О., Щерба А.А., Супруновська Н.І. Енергетичні характеристики кіл аперіодичного заряду суперконденсаторів від акумуляторних батарей. *Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр. темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»*. 2015. № 12 (1121). С. 379–383.
7. Burke A., Miller M., Van Gelder E. Ultracapacitors and batteries for hybrid vehicle applications. *23rd Electric Vehicle Symposium*. Anaheim, California. 2007.
8. 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.
9. Camara M.B. et al. DC/DC converters control for embedded energy management – Supercapacitors and battery. *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. 2010. P. 2323–2328.
10. Model s | tesla europe. Tesla motors. 2016. URL: https://www.tesla.com/en_eu/models?redirect=no/ (дата звернення: 03.10.2018).