

УДК 621.3.011

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ТА СУПЕРКОНДЕНСАТОРА В СИСТЕМІ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Н.І. Супруновська¹, докт. техн. наук, С.В. Белкін², М.О. Реуцький³, канд. техн. наук, А.А. Щерба⁴, чл.-кор. НАН України

1, 4 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: iednat@ied.org.ua

2, 3 – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського",
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

Проведено порівняльний аналіз перехідних процесів, що відбуваються у разі пуску асинхронного двигуна електромобіля від акумуляторної батареї та комбінованого джерела живлення – паралельно підключених акумуляторної батареї і суперконденсатора. Результати моделювання перехідних процесів у програмному пакеті Matlab Simulink показали, що під час пуску асинхронного двигуна суперконденсатор обмежує струм в акумуляторній батареї і відповідно збільшує її ресурс. Підтверджено, що використання комбінованого джерела живлення в порівнянні з акумуляторною батареєю дає змогу збільшити кількість можливих послідовних пусків двигуна електромобіля та його пробіг на одній зарядці. Бібл. 7, рис. 6, табл. 10.

Ключові слова: асинхронний двигун, суперконденсатор, акумуляторна батарея, електромобіль, комп'ютерне моделювання.

Однією з головних переваг електричних двигунів у порівнянні з двигунами внутрішнього згорання є можливість використовувати рекуперативне гальмування, що в міських умовах руху збільшує кількість пусків і дальність проїзду на одному заряді та скорочує витрати електроенергії, пов'язані з частими розгонами і гальмуваннями. Проте повернення енергії в акумулятор у випадку частих гальмувань електромобіля спричинює його швидке спрацювання і старіння. У зв'язку з цим проводяться розробки щодо створення комбінованих джерел живлення на базі акумуляторних батарей (АБ) і суперконденсаторів (СК), що мають великі ресурс і питому потужність у порівнянні з АБ [1–5].

Використання в комбінованих джерелах СК дає змогу отримати низку переваг у системах живлення електромобілів: можливість отримання великих імпульсних струмів у електродвигуні на початку руху та забезпечення більш сприятливих умов експлуатації акумуляторів (за рахунок зменшення в них струмів, а також зростання ККД всієї системи живлення). Це дає змогу збільшити пробіг електромобіля на одному зарядженні та реалізувати до $1 \cdot 10^6$ зарядно-розрядних циклів [4, 6].

Метою роботи є оцінка ефективності використання суперконденсатора разом з акумуляторною батареєю в системі живлення універсального електромобіля "Трик" для збільшення кількості пусків і відповідно дальності проїзду на одному заряді акумуляторної батареї в міських умовах руху.

На рис.1 показано схему, реалізовану в пакеті прикладних програм Matlab Simulink [7], для дослідження перехідних процесів у системі "акумуляторна батарея – суперконденсатор", від якої відбувається електроживлення асинхронного двигуна. Суперконденсатор у цій схемі обмежує струм АБ під час пуску АД за рахунок меншого внутрішнього опору.

Асинхронний двигун на схемі має параметри, що відповідають реальній машині фірми АВВ серії М2 АА080С2 потужністю 1100 Вт, в якій номінальний струм становить 2,4 А, ККД $\eta = 0,806$, а коефіцієнт потужності $\cos\phi = 0,8$.

Результати дослідження. Для спрощення розрахунків на початковому етапі було прийнято, що ємність акумуляторної літій-іонної батареї під час її розряду зменшується за лінійним законом. У подальших розрахунках модель процесу розряду АБ може бути уточнена.

Розрахунок необхідної ємності акумуляторної батареї. Розраховано енергію на одну фазу двигуна, необхідну для проходження відстані 100 км у найбільш "економічному" режимі роботи:

$$W = P_{2H} \cdot t / 3\eta = P_{2H} \cdot S / 3\eta \cdot v_{ек} = 1516,4 \text{ [Вт}\cdot\text{год]},$$

де $P_{2H} = 1100 \text{ Вт}$ – номінальна потужність АД; $\eta = 0,806$ – ККД двигуна; $S = 100 \text{ км}$ – відстань; $v_{ек} = 30 \text{ км/год}$ – максимальна швидкість електромобіля в економічному режимі.

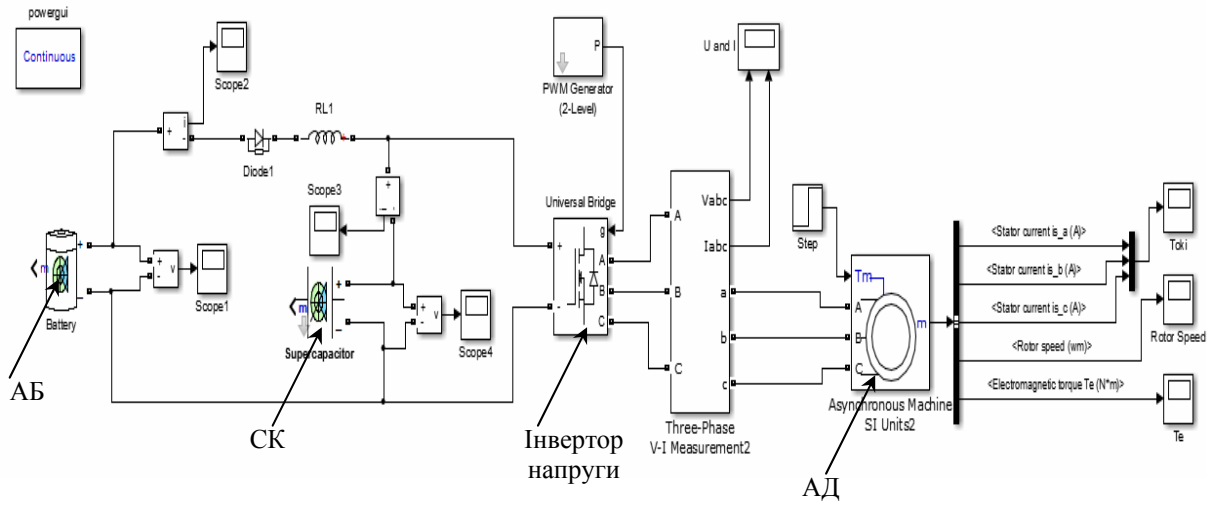


Рис. 1

Отже, необхідна ємність батареї акумуляторів $Q = W/U = 6,6 \text{ [А}\cdot\text{год]}$, де $U=230 \text{ В}$ – напруга акумуляторної батареї.

Для живлення АД електромобіля, враховуючи високі вимоги щодо питомої енергії, енергоефективності та низького внутрішнього опору, було вибрано п'ять підключених поспідовно батарей літій-іонних акумуляторів з такими параметрами: напруга $U = 48 \text{ В}$, ємність $Q = 11,6 \text{ А}\cdot\text{год}$, внутрішній опір $R = 0,1 \text{ Ом}$.

Заряджений акумулятор ємністю $11,6 \text{ А}\cdot\text{год}$ теоретично спроможний забезпечити силу струму $11,6 \text{ А}$ упродовж 1 год чи 1 А упродовж $11,6 \text{ год}$. На практиці надто великий струм розряду акумулятора зменшує ефективність віддачі електроенергії, що зменшує час його роботи.

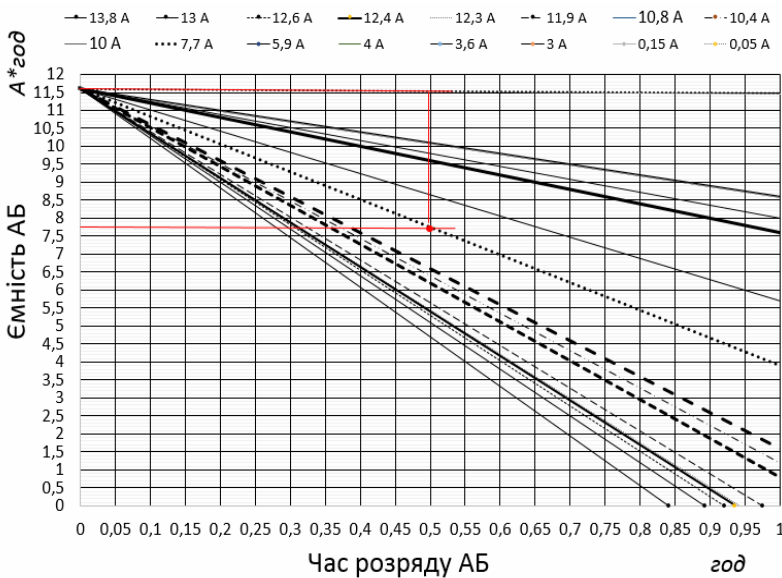


Рис. 2

Розраховано тривалість роботи АБ з характеристиками: $U = 230 \text{ В}$; $Q = 11,6 \text{ А}\cdot\text{год}$; $R = 0,5 \text{ Ом}$ у разі різних струмів розряду, що проходить при лінійному зменшенні ємності АБ.

На рис. 2 показано зміну з часом ємності АБ у разі різних струмів розряду.

У табл. 1 наведено значення тривалості роботи АБ у разі різних струмів розряду відповідно до залежностей на рис. 2. За цими залежностями можна розрахувати падіння ємності АБ за час протікання різних струмів.

Таблиця 1

$I \text{ (A)}$	13,8	13	12,6	12,4	12,3	11,9	10,8	10,4	10	7,7	5,9	4	3,6	3	0,15	0,05
$T \text{ (год)}$	0,84	0,89	0,92	0,93	0,94	0,97	1,07	1,11	1,16	1,5	1,96	2,9	3,22	3,86	77,33	232

Наприклад, у разі струму розряду $I = 7,7 \text{ А}$ тривалістю $0,5 \text{ год}$ (див. рис. 2) падіння ємності складає $3,8 \text{ А}\cdot\text{год}$. Тобто під час протікання струму $7,7 \text{ А}$ через заряджену АБ протя-

гом 0,5 год його ємність знизиться до 7,8 А·год (11,6 – 3,8 = 7,8 А·год).

Послідовні пуски АД від АБ. Розглядалась кількість можливих послідовних пусків АД за наявності в блоці живлення тільки одного повністю зарядженого літій-іонного акумулятора з вихідними характеристиками $Q = 11,6$ А·год; $U = 230$ В, $R = 0,5$ Ом.

На рис. 3 представлені струми розряду акумулятора при трьох пусках АД.

Перший пуск АД від акумулятора з вихідними характеристиками: $Q = 11,6$ А·год; $U = 230$ В.

Для спрощення розрахунку зміни характеристик АБ криву струму розряду у разі пуску АД було апроксимовано східчастою лінією з чотирма рівними ділянками тривалістю по 0,5 с, на яких вважаємо, що струм має незмінну амплітуду відповідно 13,8; 12,6; 10 і 4 А.

Падіння напруги на ділянці 1 становить

$$\Delta U = I \cdot R = 6,9 \text{ [В]}. \quad (1)$$

Зміну ємності АБ було знайдено відповідно до залежностей ємності АБ від часу розряду у разі відомого струму розряду (рис. 2), згідно з якими для струму розряду 13,8 А за час його протікання 0,5 с ємність АБ знизиться на 0,08 А·год. Так, вважаємо, що ємність АБ на ділянці 1, де протікає струм 13,8 А, буде мати значення $Q = 11,52$ А·год. Ємність АБ на ділянках 2, 3, 4 розраховується аналогічно.

Витрата енергії на ділянці 1 визначається за формулою

$$\Delta W = \Delta U \cdot Q \cdot 3600 = 286156,8 \text{ [Дж]}. \quad (2)$$

Витрати енергії на інших ділянках розраховуються аналогічно.

Для знаходження енергії, яка залишилась в АБ після першого пуску $W_{\text{АБ1}}$, достатньо відняти сумарні витрати енергії на всіх ділянках від енергії АБ до пуску:

$$W_{\text{АБ1}} = W - \sum \Delta W = 8765682,84 \text{ [Дж]}, \quad (3)$$

де енергія АБ до пуску $W = Q \cdot U \cdot 3600 = 11,6 \cdot 230 \cdot 3600 = 9604800$ [Дж].

Залишкова напруга АБ після першого пуску визначається за формулою

$$U_{\text{АБ1}} = W_{\text{АБ1}} / 3600 \Delta Q_c = 210,8 \text{ [В]}, \quad (4)$$

де $Q_c = \sum Q / 4 = 11,55$ [А·год] – усереднене значення ємності АБ за всіма ділянками.

Зміну параметрів АБ у разі першого пуску наведено в табл. 2, в якій використано такі позначення: I – струм однакової амплітуди у разі пуску АД; R – внутрішній опір АБ; ΔU – падіння напруги на відповідних ділянках; Q – ємність АБ у разі протікання відповідного струму; ΔW – витрати енергії на відповідних ділянках; Q_c – середнє значення ємності АБ на всіх ділянках; $\sum \Delta W$ – сумарні витрати енергії першого пуску; $W_{\text{АБ1}}$ – енергія, що залишилась в АБ після першого пуску; $U_{\text{АБ1}}$ – залишкова напруга АБ після першого пуску; $\Delta U_{\text{АБ1}}$ – падіння напруги за час першого пуску.

Таблиця 2

№ ділянки	I , [А]	R , [Ом]	ΔU , [В]	Q , [А·год]	$\Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	Q_c , [А·год]	$\sum \Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$W_{\text{АБ1}} \cdot 10^4$, [Дж]	$U_{\text{АБ1}}$, [В]	$\Delta U_{\text{АБ1}}$, [В]
1	13,8	0,5	6,9	11,52	28,62	11,55	83,95	876,6	210,8	19,2
2	12,6	0,5	6,3	11,53	26,14					
3	10,0	0,5	5,0	11,56	20,80					
4	4,0	0,5	2,0	11,60	8,39					

Другий пуск АД від літій-іонного акумулятора (рис. 3) буде відбуватися за таких його характеристик: $Q = 11,55$ А·год; $U = 210,8$ В.

Для розрахунку зміни параметрів АБ розділимо пуск АД на п'ять рівних ділянок, на

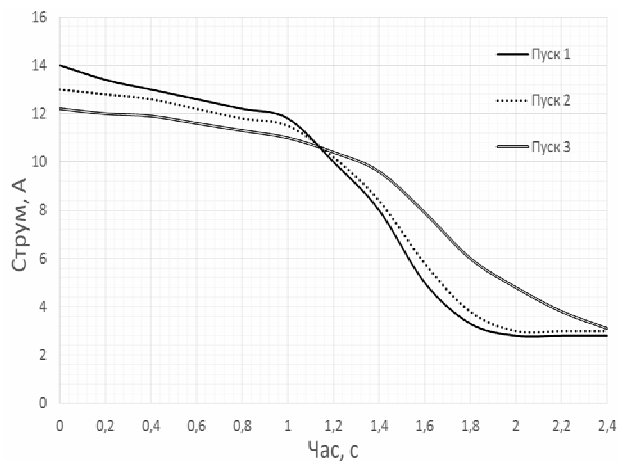


Рис. 3

яких вважаємо, що струм має незмінну амплітуду відповідно 13; 12,3; 10,4; 5,9 і 3 А.

У табл. 3 наведені результати розрахунків параметрів АБ, проведених аналогічно першому пуску.

Таблиця 3

№ ділянки	I , [А]	R , [Ом]	ΔU , [В]	Q , [А·год]	$\Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	Q_c , [А·год]	$\Sigma \Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$W_{AB2} \cdot 10^4$, [Дж]	U_{AB2} , [В]	ΔU_{AB2} , [В]
1	13,0	0,5	6,5	11,47	26,84	11,51	92,27	784,3	189,36	21,45
2	12,3	0,5	6,15	11,48	25,42					
3	10,4	0,5	5,2	11,50	21,53					
4	5,9	0,5	2,95	11,54	12,25					
5	3	0,5	1,5	11,54	6,23					

Третій пуск АД від літій-іонного акумулятора (рис. 3). Розглянемо його від акумулятора з вихідними характеристиками: $Q = 11,51$ А·год; $U = 189,36$ В.

Для розрахунку зміни параметрів АБ розділимо пуск АД на шість рівних ділянок, де вважаємо, що струм має незмінну амплітуду відповідно: 12,4; 11,9; 10,8; 7,7; 3,6; і 3 А.

У табл. 4 наведені результати розрахунків параметрів АБ, проведених аналогічно першому та другому пускам.

Таблиця 4

№ ділянки	I , [А]	R , [Ом]	ΔU , [В]	Q , [А·год]	$\Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	Q_c , [А·год]	$\Sigma \Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$W_{AB3} \cdot 10^4$, [Дж]	U_{AB3} , [В]	ΔU_{AB3} , [В]
1	12,4	0,5	6,2	11,44	25,52	11,47	101,87	682,4	165,3	24,06
2	11,9	0,5	5,95	11,45	24,51					
3	10,8	0,5	5,4	11,46	22,27					
4	7,7	0,5	3,85	11,47	15,90					
5	3,6	0,5	1,8	11,50	7,45					
6	3,0	0,5	1,5	11,50	6,21					

Четвертий пуск АД є неможливим, оскільки напруга акумуляторної батареї знизилася до критичної межі (165,3 В), за якої час розгону до номінальної швидкості електрокара прямує до нескінченності.

Послідовні пуски АД від комбінованого джерела живлення: АБ з паралельно підключеною до неї батареєю суперконденсаторів. Для живлення була вибрана батарея суперконденсаторів (СК), номінальна напруга якої є такою ж, як і у АБ $U = 230$ В. Ця батарея складається із 90 з'єднаних послідовно суперконденсаторів Yunasko з такими параметрами кожного: номінальна напруга – 2,75 В; ємність – 1275 Ф; внутрішній опір – $0,11 \cdot 10^{-3}$ Ом. Отже, параметри батареї такі: номінальна напруга – 230 В; ємність – 15 Ф; внутрішній опір – $9,9 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Перший пуск двигуна відбувається у разі параметрів СК ($C=15$ Ф; $U=230$ В; $R=0,0099 \approx 0,01$ Ом) та АБ ($Q=11,6$ А·год; $U=230$ В, $R=0,5$ Ом).

На рис. 4 і 5 наводяться струми розряду відповідно СК та АБ у разі пусків АД електромобіля.

Порівнюючи рис 4 і 5, приходимо до висновку, що протягом першої секунди пуску практично всю енергію двигун електромобіля споживає від СК. Отже, паралельне підключення суперконденсатора обмежує струм акумулятора під час пуску АД.

Для спрощення розрахунку зміни характеристик АБ і СК криві струму розряду у разі пуску АД було апроксимовано східчастими лініями відповідно з двома (для АБ) та чотирма (для СК) рівними ділянками. Вважаємо, як і раніше, що струм на цих ділянках є незмінним.

Розрахунки зміни параметрів АБ проводяться аналогічно наведеним вище розрахункам за формулами (1)...(4).

Зміна параметрів СК розраховується так.

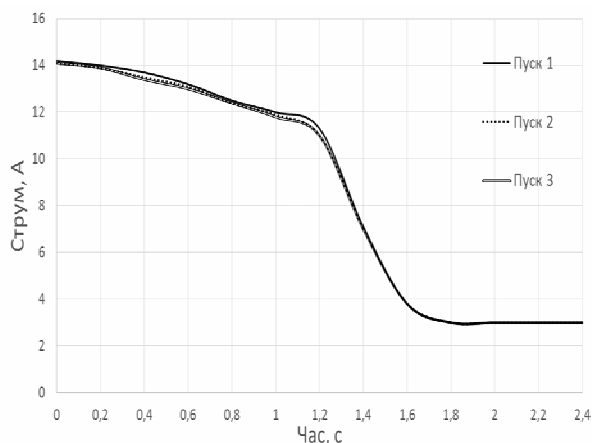


Рис. 4

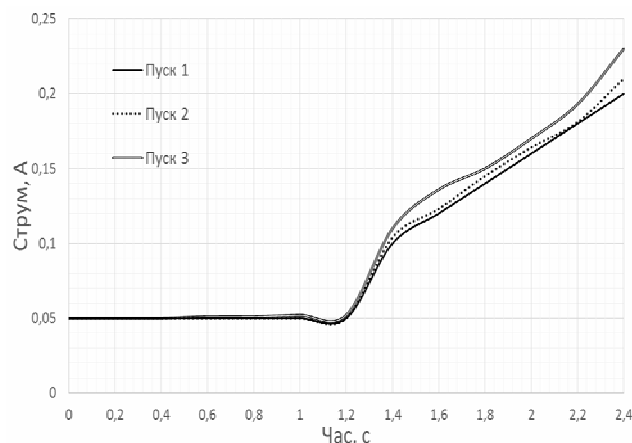


Рис. 5

Початкову енергію СК у разі номінальних параметрів до моменту пуску розраховуємо за формулою [1, 5]:

$$W = \frac{C_0 \cdot U^2}{2} + \frac{2\xi \cdot U^3}{3} = 46,74 \cdot 10^4 \text{ [Дж]}, \quad (5)$$

де згідно з паспортними даними мінімальна ємність СК $C_0 = 7 \text{ Ф}$; коефіцієнт заряду СК $\xi = 0,0348 \text{ Ф/В}$.

Падіння напруги ΔU на кожній ділянці знайдемо за формулою (1). Тоді кінцеву напругу на кожній ділянці U_k можна визначити як

$$U_k = U_n - \Delta U, \quad (6)$$

де U_n – початкова напруга на кожній ділянці, яка для першої ділянки дорівнює 230 В, а для усіх інших – кінцевій напрузі попередньої ділянки.

Підсумовуючи падіння напруги за всіма чотирма ділянками, знаходимо падіння напруги на СК під час першого пуску $\sum \Delta U = \Delta U_{СК1}$.

Для знаходження напруги, яка залишилася на СК, достатньо від напруги до пуску (номінальна напруга СК) відняти падіння напруги:

$$U_{СК1} = U - \sum \Delta U = 229,59 \text{ [В]}. \quad (7)$$

Втрати енергії на кожній ділянці ΔW знаходимо з виразу [5]

$$\Delta W = \frac{C_0(U_n^2 - U_k^2)}{2} + \frac{2\xi \cdot (U_n^3 - U_k^3)}{3}. \quad (8)$$

Сумарні втрати енергії за весь пуск склали $\sum \Delta W = 0,21 \cdot 10^4 \text{ Дж}$.

Залишкову енергію після першого пуску розраховуємо як

$$W_{СК1} = W - \sum \Delta W = 46,53 \cdot 10^4 \text{ [Дж]}. \quad (9)$$

Різницю напруги між АБ та СК після першого пуску можна визначити як

$$\Delta U_{(АБ-СК)1} = U_{АБ1} - U_{СК1} = 0,3 \text{ [В]}. \quad (10)$$

Внаслідок зниження напруги СК після пуску його ємність також знизиться і стане рівною:

$$C_{СК1} = C_0 + \xi \cdot U_{СК1} = 14,99 \text{ [Ф]}. \quad (11)$$

Зміни параметрів АБ та СК у разі першого пуску наведені відповідно в табл. 5 і 6, позначення в табл. 5 такі ж самі, як і в табл. 2–4.

Таблиця 5

№ діл.	I , [А]	R , [Ом]	ΔU , [В]	Q , [А]·год	$\Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	Q_c , [А]·год	$\sum \Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$W_{АБ1} \cdot 10^4$, [Дж]	$U_{АБ1}$, [В]	$\Delta U_{АБ1}$, [В]
1	0,05	0,5	0,025	11,6	0,104	11,6	0,418	960,062	229,9	0,1
2	0,15	0,5	0,075	11,6	0,313					

Зазначимо, що під час пуску і після нього відбувається заряд СК від АБ. Процес заряду після пуску відбувається доти, доки напруги на АБ і СК не зрівняються і струм у колі СК не зменшиться до нуля.

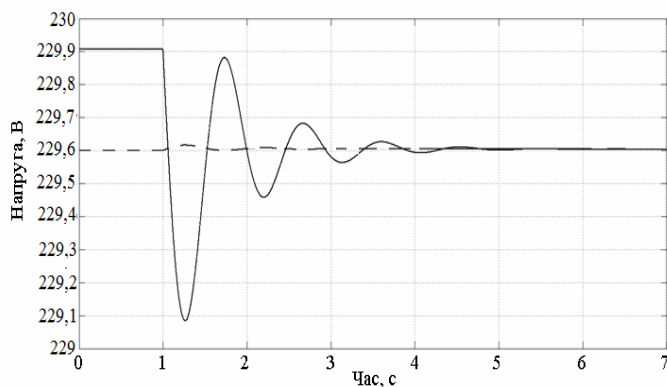


Рис. 6

На рис. 6 зображено осцилограми напруг АБ і СК, отримані в результаті моделювання схеми рис. 1 (з осцилографів Score 1 і 4).

З осцилограм видно, що напруги на СК і АБ зрівнюються через час, приблизно рівний 5 с, а їх величина досягає значення

$$U_{СК=АБ} = U_{СК} = U_{АБ} = 229,604 \text{ [В]}. \quad (10)$$

Ємність СК після пуску і підзаряду від АБ розраховуємо як [5]

$$C = C_0 + \xi \cdot U_{СК=АБ} = 14,99 \text{ [Ф]}. \quad (11)$$

Таблиця 6

№ діл.	I , [А]	R , [Ом]	$U_{п}$, [В]	$U_{к}$, [В]	ΔU , [В]	$\Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$\Sigma \Delta U_{СК1}$, [В]	$\Sigma \Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$W_{СК1} \cdot 10^4$, [Дж]	$U_{СК1}$, [В]	$C_{СК1}$, [Ф]
1	14,0	0,01	230,00	229,86	0,14	0,073	0,4	0,21	46,53	229,59	14,99
2	13,0	0,01	229,86	229,73	0,13	0,068					
3	10,0	0,01	229,73	229,63	0,10	0,052					
4	3,7	0,01	229,63	229,59	0,037	0,019					

Саме з цих значень напруг і ємності СК почнеться наступний пуск.

Другий пуск АД відбувається за таких початкових параметрів: СК ($C = 14,99$ Ф; $U = 229,604$ В; $R \approx 0,01$ Ом), АБ ($Q = 11,6$ А·год; $U = 229,604$ В; $R = 0,5$ Ом).

Розрахунки зміни параметрів АБ і СК проводяться аналогічно наведеним вище розрахункам для першого пуску. Результати наведені в табл. 7 та 8.

Таблиця 7

№ діл.	I , [А]	R , [Ом]	ΔU , [В]	Q , [А]·год	$\Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	Q_c , [А·год]	$\Sigma \Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$W_{АБ1} \cdot 10^4$, [Дж]	$U_{АБ1}$, [В]	$\Delta U_{АБ1}$, [В]
1	0,05	0,5	0,025	11,6	0,104	11,6	0,422	958,405	229,503	0,101
2	0,152	0,5	0,076	11,6	0,317					

Таблиця 8

№ діл.	I , [А]	R , [Ом]	$U_{п}$, [В]	$U_{к}$, [В]	ΔU , [В]	$\Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$\Sigma \Delta U_{СК1}$, [В]	$\Sigma \Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$W_{СК1} \cdot 10^4$, [Дж]	$U_{СК1}$, [В]	$C_{СК1}$, [Ф]
1	14,0	0,01	229,60	229,46	0,14	0,073	0,4	0,21	45,32	229,20	14,976
2	12,9	0,01	229,46	229,34	0,13	0,068					
3	9,9	0,01	229,34	229,24	0,10	0,052					
4	3,6	0,01	229,24	229,20	0,04	0,019					

Після процесу підзаряду СК від АБ величина їхніх напруг досягне значення

$$U_{СК=АБ} = U_{СК} = U_{АБ} = 229,22 \text{ [В]}. \quad (12)$$

Ємність СК стане рівною:

$$C = C_0 + \xi \cdot U_{СК=АБ} = 14,977 \text{ [Ф]}. \quad (13)$$

Третій пуск АД відбувається за таких початкових параметрів: СК ($C = 14,977$ Ф; $U = 229,22$ В; $R \approx 0,01$ Ом); АБ ($Q = 11,6$ А·год; $U = 229,22$ В; $R = 0,5$ Ом).

Розрахунки зміни параметрів АБ і СК проводяться аналогічно наведеним розрахункам. Результати наведені в табл. 9 та 10.

Таблиця 9

№ діл.	I , [А]	R , [Ом]	ΔU , [В]	Q , [А]·год	$\Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	Q_c , [А·год]	$\Sigma \Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$W_{АБ1} \cdot 10^4$, [Дж]	$U_{АБ1}$, [В]	$\Delta U_{АБ1}$, [В]
1	0,052	0,5	0,026	11,6	0,109	11,6	0,428	956,795	229,118	0,103
2	0,153	0,5	0,077	11,6	0,319					

Таблиця 10

№ діл.	I , [А]	R , [Ом]	$U_{п}$, [В]	$U_{к}$, [В]	ΔU , [В]	$\Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$\sum \Delta U_{СК1}$, [В]	$\sum \Delta W \cdot 10^4$, [Дж]	$W_{СК1} \cdot 10^4$, [Дж]	$U_{СК1}$, [В]	$C_{СК1}$, [Ф]
1	14,0	0,01	229,22	229,08	0,14	0,073	0,4	0,21	45,12	228,82	14,963
2	12,9	0,01	229,08	228,95	0,13	0,067					
3	9,8	0,01	228,95	228,85	0,10	0,051					
4	3,5	0,01	228,85	228,81	0,04	0,018					

Після процесу підзаряду СК від АБ величина їхніх напруг досягне такого значення:

$$U_{СК=АБ} = U_{СК} = U_{АБ} = 228,84 \text{ [В]}, \quad (14)$$

а ємність СК стане рівною:

$$C = C_0 + \xi \cdot U_{СК=АБ} = 14,964 \text{ [Ф]}. \quad (15)$$

Четвертий пуск АД у процесі комбінованого живлення відбудеться у разі початкових параметрів: СК ($C = 14,964 \text{ Ф}$; $U = 228,84 \text{ В}$; $R = 0,01 \text{ Ом}$); АБ ($Q = 11,6 \text{ А} \cdot \text{год}$; $U = 228,84 \text{ В}$).

Порівняння трьох послідовних пусків асинхронного двигуна електромобіля "Трик" від акумуляторної батареї та комбінованого джерела живлення "акумуляторна батарея – суперконденсатор" показує, що використання суперконденсатора може суттєво збільшити кількість послідовних пусків АД і відповідно дальність пробігу електромобіля в міських умовах його руху на одному заряді АБ.

Висновки: 1. Якісний аналіз перехідних процесів послідовних пусків асинхронного двигуна електромобіля від акумуляторної батареї і комбінованого джерела живлення, яке складається з паралельно підключених акумуляторної батареї та суперконденсатора, підтверджує, що використання останнього може підвищувати ефективність використання електроенергії, накопиченої в акумуляторній батареї, та зменшує втрати електроенергії в колах її розряду на асинхронний двигун.

2. Для кількісних енергетичних порівнянь енергоефективності руху електромобілів з АБ та комбінованим джерелом живлення у подальших дослідженнях планується ввести в схему для моделювання системи електроживлення вимірювачі струму, падіння напруги, потужності та потоків енергії, що дасть змогу уточнити втрати електроенергії не тільки в колах навантаження (тобто асинхронного двигуна), але і в колах заряду суперконденсатора від акумуляторної батареї. Такий підхід буде основою для вибору оптимальних схем і алгоритмів підключення суперконденсатора до акумуляторної батареї та асинхронного двигуна з реалізацією енергоефективних режимів.

1. Emadi A., Williamson S.S., Khaligh A. Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. May 2006. Vol. 21, Iss. 3. Pp. 567–577. DOI: 10.1109/TPEL.2006.872378.
2. Stienecker A.W., Stuart T., Ashtiani C. A combined ultracapacitor - lead acid battery storage system for mild hybrid electric vehicles. *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Chicago, IL, USA, September 7, 2005. DOI: 10.1109/VPPC.2005.1554582
3. Cao J., Emadi A. A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jan. 2012. Vol. 27, Iss. 1. P. 122–132. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2151206.
4. Гончар А.С., Семиков А.В. К реализации рекуперативных режимов в электроприводе электромобиля с ионисторами. Зб. матер. конф. *Расчет энергоэффективности использования тягового электропривода без и с рекуперацией для легкового автомобиля*. Кременчуг, 2013. С. 25–26.
5. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Белецкий О.А. Энергетические характеристики суперконденсаторов при их заряде от источника напряжения и разряде на резистивную нагрузку. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 39. С. 65–74.
6. 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.
7. Островерхов М.Я., Пижев В.М. Моделювання електромеханічних систем в "Simulink": Навчальний посібник. Київ: ВД "Стилос", 2008. 528 с.

УДК 621.3.011

Н.И. Супруновская¹, докт. техн наук, **С.В. Белкин²**, **Н.А. Реуцкий³**, канд. техн. наук, **А.А. Щерба⁴**, чл.-корр. НАН Украины

1, 4 – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

2, 3 – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. И. Сикорского",
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРА В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Проведен сравнительный анализ переходных процессов, протекающих при пуске асинхронного двигателя электромобиля от аккумуляторной батареи и комбинированного источника питания – параллельно подключенных аккумуляторной батареи и суперконденсатора. Результаты моделирования переходных процессов в программном пакете Matlab Simulink показали, что во время пуска асинхронного двигателя суперконденсатор ограничивает ток в аккумуляторной батарее и соответственно увеличивает ее ресурс. Подтверждено, что использование комбинированного источника питания по сравнению с аккумуляторной батареей позволяет увеличить количество возможных последовательных пусков двигателя электромобиля и его пробег на одной зарядке. Библиограф. 7, рис. 6, табл. 10.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, суперконденсатор, аккумуляторная батарея, электромобиль, компьютерное моделирование.

N.I. Suprunovska¹, S.V. Belkin², N.A. Reutsky³, A.A. Shcherba⁴

1, 4 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

2, 3 – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

THE EFFICIENCY EVALUATION OF USE OF THE ACCUMULATOR BATTERY AND THE SUPERCAPACITOR IN THE ELECTROMOBILE POWER SUPPLY SYSTEM

A comparative analysis of transients occurring during start of the asynchronous motor of an electromobile that is supplied from accumulator battery or from combined power source – parallel-connected accumulator battery and supercapacitor is carried out. The results of transient simulation in the Matlab Simulink software package showed that during the start of the asynchronous motor the supercapacitor limits current in the accumulator battery, and thus increases its life. It is confirmed that the use of a combined power source in comparison with the accumulator battery allows to increase the number of possible consecutive starts of asynchronous motor of electromobile and its mileage on a single charge. References 7, figures 6, tables 10.

Key words: asynchronous motor, supercapacitor, accumulator battery, electromobile, computer simulation.

1. Emadi A., Williamson S.S., Khaligh A. Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. May 2006. Vol. 21, Iss. 3. Pp. 567–577. DOI: 10.1109/TPEL.2006.872378.
2. Stienecker A.W., Stuart T., Ashtiani C. A combined ultracapacitor - lead acid battery storage system for mild hybrid electric vehicles. *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Chicago, IL, USA, September 7, 2005. DOI: 10.1109/VPPC.2005.1554582
3. Cao J., Emadi A. A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jan. 2012. Vol. 27, Iss. 1. Pp. 122–132. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2151206.
4. Gonchar A.S., Semikov A.V. To the realization of recuperative modes in the electric drive of an electromobile with ionistors. *Proc. Calculating the energy efficiency of using a traction electric drive without and with the recuperation for a car*. Kremenchuk, 2013. Pp. 25–26. (Rus)
5. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Beletsky O.A. Power characteristics of supercapacitors during their charge from a source of voltage and discharge on resistive load. *Pratsi Institutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv, 2014. No. 39. Pp. 65–74. (Rus)
6. Biletsky O.O., Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Dependences of power characteristics of circuit at charge of supercapacitors on their initial and final voltages. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 3–10. (Ukr)
7. Ostroverkhov M.Ya., Pizhov V.M. Modeling of electromechanical systems in "Simulink": Textbook. Kyiv: VD "Stylos", 2008. 528 p. (Ukr)

Надійшла 06.07.2018

Received 06.07.2018