

М. Я. ОСТРОВЕРХОВ, докт. техн. наук, проф., Національний технічний університет України «КПІ»;
М. О. РЕУЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., Національний технічний університет України «КПІ»;
Д. Я. ТРІНЧУК, аспірант, Національний технічний університет України «КПІ».

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В НЕЛІНІЙНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ ЕЛЕКТРОСКУТЕРА, ЩО ПРАЦЮЄ НА МІСЬКИЙ ІЗДОВИЙ ЦИКЛ

Постановка проблеми. З кожним роком в транспортній галузі прискорюється розвиток електромобілів, які стають все більш серйознішими конкурентами автомобілям на двигунах внутрішнього згорання. В електромобілях в якості джерела енергії зазвичай використовуються літій-іонні акумулятори, котрі мають одні з найвищих показників питомої енергії. Одним з можливих перетворювачів енергії є двигун постійного струму (ДПС) [1], а регулювальним пристроєм – перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Така система має чимало недоліків: великий внутрішній опір акумулятора обмежує пускову потужність електромобіля та зменшує ККД привода; акумулятор є уразливим до струмів перехідних процесів, зокрема великих пускових струмів, які утворюються при розгоні електромобіля.

Для усунення даних недоліків розглядається можливість зменшення внутрішнього опору джерела живлення шляхом підключення паралельно до акумулятора батареї суперконденсаторів, оскільки останні мають суттєво менший активний опір, ніж літій-іонні акумулятори, та менш чутливі до ударних струмів [2].

Метою дослідження є оцінка ефективності роботи електричного привода транспортного засобу, у якому в якості джерела живлення використовується паралельне з'єднання акумулятора і суперконденсатора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення проблеми великого внутрішнього опору джерела живлення був запропонований варіант використання паралельно із акумулятором суперконденсатора [2]. В даній роботі були проведені дослідження впливу суперконденсатора на акумулятор при роботі на навантаженні, проте не було досліджень впливу такого підключення на саме навантаження, тобто на електродвигун.

Більш детальні дослідження такої системи електропривода були проведені в роботах [3,4]. В них показана ефективність такого виду живлення для гібридних транспортних засобів. В роботах [5-7] були навіть запропоновані схеми для найбільш ефективного застосування такого з'єднання. У гібридних автомобілях електропривод живиться від силового генератора або від акумулятора. Такий режим роботи є «важким» як для акумулятора, так і для двигуна, на відміну від чистого електромобіля тому використання суперконденсаторів в таких системах є більш доцільним.

В роботі [8] досліджено вплив системи живлення «акумулятор–суперконденсатор» на двигун гіпотетичного електромобіля. Але це дослідження базується лише на абстрактних об'єктах, без прив'язки до реальних транспортних засобів та їхніх навантажувальних характеристик.

Для розширення досліджень з даної тематики в даній роботі проведено аналіз роботи електропривода транспортного засобу з автономним живленням на прикладі електроскутера, який працює за міським їздовим циклом. Проведене дослідження електромеханічних процесів в електроприводі під час розгону та змодельована робота привода при навантаженні, яке відповідає міському їздовому циклу, що дозволяє точніше оцінити ефективність використання такої системи.

Вибір об'єктів електропривода, що досліджується. Дослідження електропривода проведено на прикладі транспортного засобу у вигляді електроскутера Genata Gtle 250 з наступними характеристиками:

- потужність – 1,6 кВт;
- максимальна швидкість – 55 км/год;
- максимальна відстань – 80 км при швидкості 30 км/год;
- маса – 45 кг;
- максимальне навантаження – 150 кг.

В якості електромеханічного перетворювача для привода електроскутера обрано двигун постійного струму марки ИУС–0.8. Основні заводські параметри двигуна наступні:

- напруга живлення – 28 В;
- корисна механічна потужність – 800 Вт;
- номінальний коефіцієнт корисної дії – 0,74;
- частота обертання ротора – 6500÷7700 об/хв;
- маса – 8,7 кг.

Для отримання необхідної потужності електроскутера 1,6 кВт можливе використання двох таких двигунів, працюючих паралельно. Додаткові необхідні параметри двигуна, такі як опори та індуктивності обмоток, момент тертя були визначені із проведеного розрахунку двигуна на базі заводських параметрів.

Для живлення електропривода, враховуючи високі вимоги з питомої енергії, енергоефективності та низького внутрішнього опору, було вибрано батарею літій-полімерних акумуляторів Polymer Lithium-ion Rechargeable Battery з наступними параметрами:

- напруга – 27 В; – внутрішній опір – 100 мОм;
- ємність – 40 А·год; – маса – 5,6 кг.

Розглянуті елементи разом із ШІМ–перетворювачем створюють систему електропривода, що живиться лише від акумулятора. Для вибору батареї суперконденсаторів з метою ефективного покращення роботи електропривода необхідно розрахувати потрібну ємність суперконденсаторів.

Цей розрахунок проводиться на основі допущення, що при розгоні електроскутера енергія батареї суперконденсаторів переходить в кінетичну енергію. Проте при цьому напруга на акумуляторі має зменшитися лише до певного значення $U_p - \Delta U$, де ΔU – допустиме тимчасове падіння напруги. Напруга на двигуні в номінальному режимі роботи з урахуванням падіння напруги на внутрішньому опорі акумулятора

$$U_p = U_n - I_n \cdot r_{ак} = 27 - 40 \cdot 0,1 = 23 \text{ В}, \quad (1)$$

де $U_n = 27 \text{ В}$ – ЕРС акумулятора;

$I_n = 40 \text{ А}$ – номінальний струм ДПС;

$r_{ак} = 0,1 \text{ Ом}$ – внутрішній опір акумулятора.

Виходячи із закону збереження енергії знаходиться ємність батареї суперконденсаторів

$$\eta \cdot \left(\frac{2c \cdot U_1^2}{2} - \frac{2c \cdot U_2^2}{2} \right) = \frac{m \cdot v^2}{2}; \quad (2)$$

$$c = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \eta \cdot (U_1^2 - U_2^2)} = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \eta \cdot (U_n^2 - (U_p - \Delta U)^2)} = \frac{115 \cdot 15^2}{2 \cdot 0,74 \cdot (27^2 - (23 - 0,5)^2)} = 78,5 \text{ Ф},$$

де $m = 45 + 70 = 115 \text{ кг}$ – маса електроскутера із середньостатистичним водієм;

$v = 55 \text{ км/год} = 15 \text{ м/с}$ – максимальна швидкість електроскутера;

ра;

$\Delta U = 0,5 \text{ В}$ – допустиме тимчасове «просідання» напруги.

$\eta = 0,74$ – ККД двигуна;

Для покращення характеристик живлення була вибрана батарея суперконденсаторів, що складається із 11–ти з’єднаних послідовно суперконденсаторів WIMA SuperCap C. Параметрами наведені у таблиці:

Таблиця 1

Параметри	Суперконденсатор	Батарея
номінальна напруга	2,5 В	27,5 В
ємність	1200 Ф	109,1 Ф
внутрішній опір	0,5 мОм	5,5 мОм
маса	235 г	2,585 кг

Моделювання динамічних режимів роботи. Для моделювання робочих режимів в програмному пакеті Matlab Simulink буда створена модель привода електроскутера, яка зображена на рис. 1.

Модель навантаження двигуна постійного струму зі змішаним збудженням 2 складається з двох частин: постійного моменту 3, який визначається силою тертя кочення шин коліс і силою тяжіння при русі схилом та змінного моменту 4, що визначається силою опору повітря та пропорційний до квадрату швидкості. Причому обидва ці навантаження вважаються корисними при розрахунку потужності та ККД електроприводу.

Швидкість руху електроскутера регулюється на основі зворотного зв’язку за швидкістю 8 за допомогою силового перетворювача з ШІМ 6. Необхідна величина швидкості задається блоком 9. Для протікання струму через обмотку якоря двигуна при розімкненому ключі перетворювача використовується зворотний діод 7. Суперконденсатор 5 з ємністю 109,1 Ф та опором 5,5 мОм може бути підключено паралельно до акумулятора 1 з напругою 27 В та опором 0,1 Ом або відключено від нього.

Нормальний режим роботи електроскутера визначається за нормальних безвітряних погодних умов при перевезенні людини масою 70 кг асфальтованою дорогою без нахилу.

Для моделювання роботи електропривода скутера необхідно визначити величину його навантаження. Навантаження електроскутера під час його руху складається із сили тертя кочення по асфальту та аеродинамічної сили опору повітря.

Сила тертя кочення дорівнює

$$F_{т.к} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha = 0,015 \cdot (45 + 70) \cdot 9,9 \cdot 1 = 16,9 \text{ Н}; \quad (3)$$

$$F_{т.к} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha = 0,015 \cdot (45 + 70 + 2,6) \cdot 9,9 \cdot 1 = 17,3 \text{ Н},$$

де $m = 45 + 70 \text{ кг}$ – маса транспортного засобу з пасажиром;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$\mu = 0,015$ – коефіцієнт тертя повністю накачаних шин по асфальту.

Аеродинамічна сила опору повітря становить

$$F_{он} = c_x \cdot s \cdot \rho \cdot (v + v_{в})^2 / 2 = 1,0 \cdot 0,5 \cdot 1,29 \cdot v^2 / 2 = 0,3225 \cdot v^2, \quad (4)$$

де $c_x = 1,0$ – коефіцієнт аеродинамічного опору;

$s = 0,5 \text{ м}^2$ – площа перетину лобової поверхні;

$\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря за нормальних умов;

v – швидкість транспортного засобу, м/с.

Таким чином, навантаження електроскутера визначається на основі рівнянь (3) і (4). Залежність сили опору повітря від швидкості є квадратично зростаючою, причому ця сила для електроскутера складає значно більшу частку порівняно з іншими транспортними засобами. На відміну від електромобілів, в яких форма спеціально розроблена для мінімального опору повітря, в електроскутерах великий опір спричинений несприятливою формою лобової поверхні.

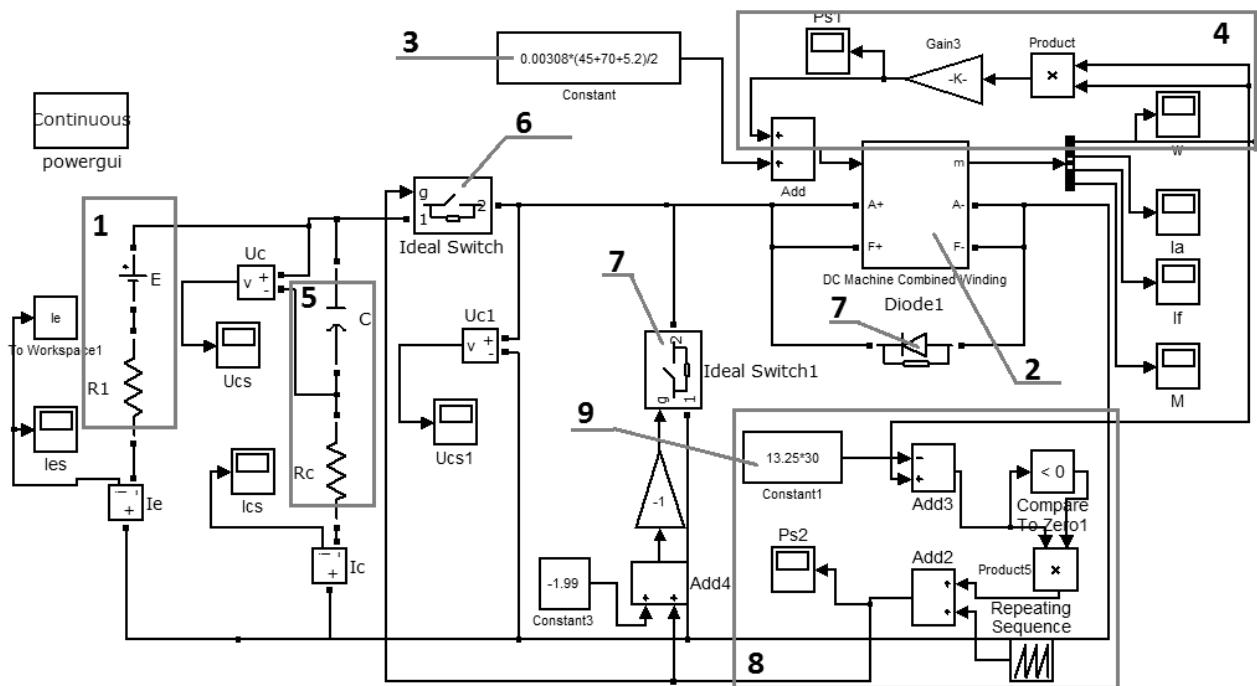


Рисунок 1 – Комп’ютерна модель привода електроскутера

Моделювання та дослідження робочих режимів при розгоні електроскутера. Перехідні процеси – найважливіші режими роботи для привода електротранспорту, а особливо для літій-іонних акумуляторів. Найважчим перехідним процесом для транспортного засобу є його розгін з нульової швидкості тобто старт. Саме величина ударних пускових струмів визначає тривалість роботи як акумуляторів, так і власне двигуна. Окрім того, пускова потужність або час розгону електроскутера до ustalеної швидкості є однією з основних характеристик транспортних засобів, яка цікавить користувача. Тому зменшення ударних пускових струмів через акумулятор під час розгону електроскутера є дуже важливою проблемою при проектуванні електропривода.

На рис. 2. представлено результати дослідження перехідних процесів при розгоні електроскутера до максимальної швидкості для нормального режиму роботи. З графіків можна зробити висновок, що система електропривода з суперконденсатором має всі переваги в даному режимі. По-перше, при наявності суперконденсатора зменшується час перехідного процесу при розгоні. Саме більший час розгону транспортного засобу, що обумовлений невисокою максимальною потужністю акумулятора, порівняно з системою на двигуні внутрішнього згорання є одним з недоліків електротранспорту, який відлякує споживачів. Використання суперконденсатора допомагає вирішити цю проблему.

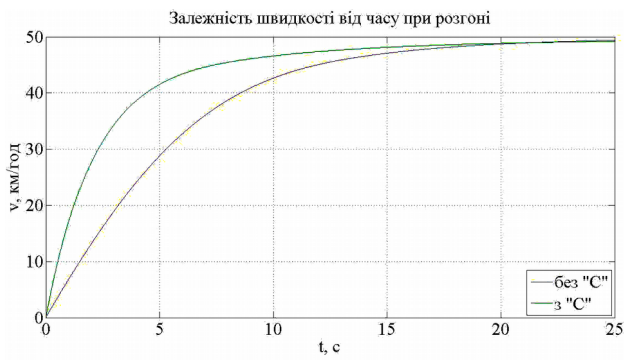
Другою перевагою системи з суперконденсатором є суттєво менший ударний струм. Високі ударні струми через акумулятор призводять до його швидкого старіння та виходу з ладу. Суперконденсатор, який є менш вразливим до високих струмів, може суттєво збільшити термін служби джерела живлення транспортних засобів.

Різноманіття можливих динамічних режимів роботи транспортних засобів дуже велике. Вони різняться в залежності від того, де саме цей транспортний засіб використовується. Так, наприклад, на міжміських трасах швидкість руху транспорту можна вважати постійною, в той час як для міста характерні часті зупинки й старту, рух на різних швидкостях, менших за номінальну. Для оцінки енергетичної та екологічної ефективності двигунів були розроблені так звані їздові цикли – часові навантажувальні діаграми, які репрезентують середньостатистичну навантажувальну характеристику транспортних засобів. Їздові цикли розробляються різними країнами, в залежності від характеру руху транспортних засобів у них. Вони представлені у вигляді діаграм залежності швидкості руху транспортного засобу від часу.

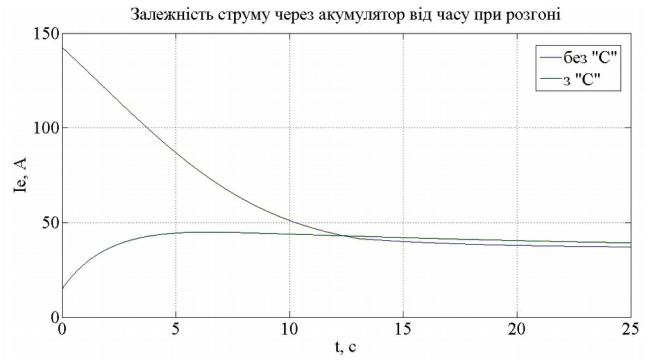
Оскільки електроскутер зазвичай застосовується для їзди в межах міста, то для дослідження його привода був обраний європейський міський цикл The UN/ECE Elementary Urban Cycle. Цей їздовий цикл був запрограмований та промодельований за допомогою представленої моделі привода електроскутера при застосуванні суперконденсатора та без нього. Результати досліджень зображені на рис. 3.

Графіки на рис. 3а, по суті, мають вигляд міського їздового циклу. Рис. 3а відображає, як змінюється швидкість транспортного засобу з часом. На ньому також помітно, що при наявності суперконденсатора електроскутер розганяється до заданих швидкостей швидше. Рис. 3г демонструє, що в цьому режимі роботи суперконденсатор тримає достатній для задовільної роботи рівень напруги.

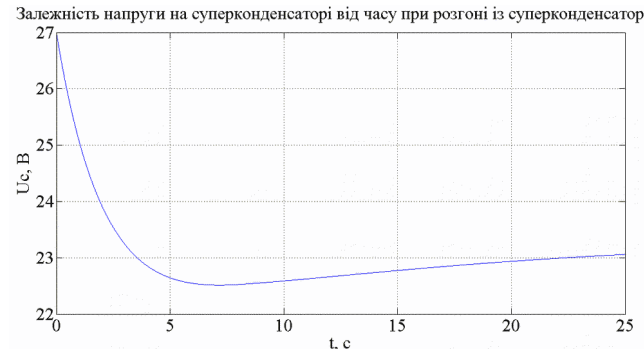
Для порівняння витрат енергії на один і той самий їздовий цикл без використання суперконденсатора та з ним необхідно врахувати енергію для дозарядки суперконденсатора до напруги 27 В.



а)



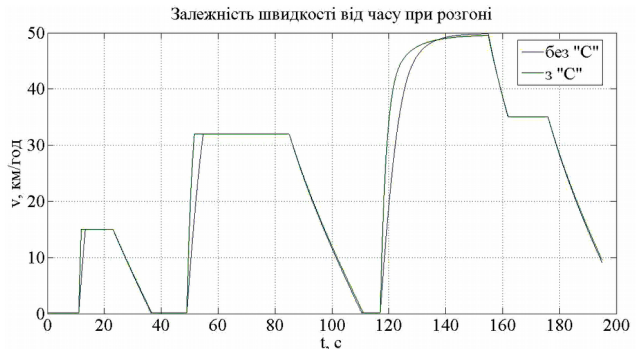
б)



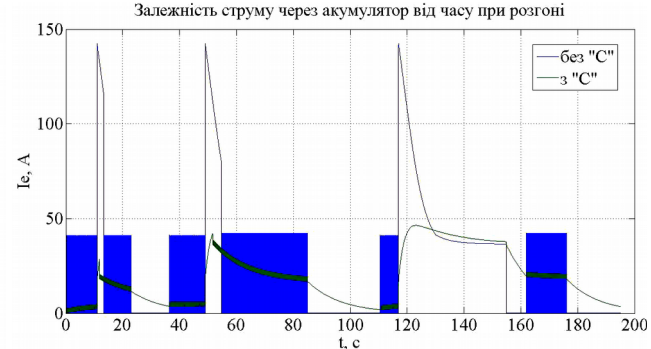
в)

Рисунок 2 – Графіки перехідних процесів при розгоні до максимальної швидкості електроскутера без суперконденсатора та з ним:

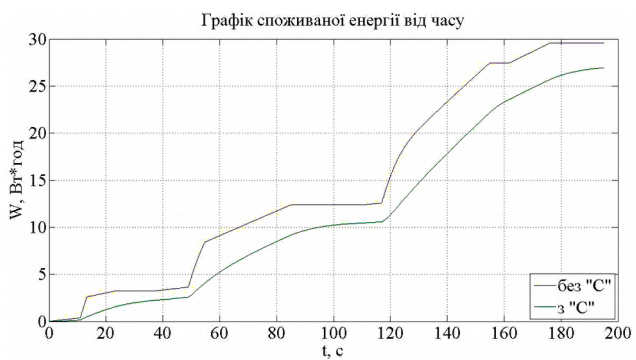
а) швидкість електроскутера; б) струм через акумулятор; в) напруга на суперконденсаторі



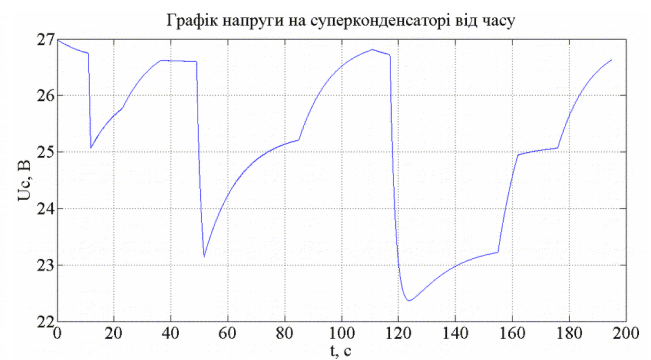
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Міський їздовий цикл:

а) швидкість електроскутера; б) струм через акумулятор; в) спожита енергії; г) напруга на суперконденсаторі

$$\Delta W = \frac{c \cdot U_n^2}{2} - \frac{c \cdot U_k^2}{2} = \frac{109,1}{2} \cdot (27^2 - 26,63^2) = 1082,4 \text{ Дж} = 0,30 \text{ Вт} \cdot \text{год}, \quad (5)$$

де $c = 109,1 \text{ Ф}$ – ємність суперконденсатора;

$U_n = 27 \text{ В}$ – напруга акумулятора;

$U_k = 26,63 \text{ В}$ – напруга на суперконденсаторі на момент закінчення їздового циклу.

Отже загальні витрати енергії без використання суперконденсатора склали $28,52 \text{ Вт} \cdot \text{год}$, а з ним – $26,95 + 0,30 = 27,25 \text{ Вт} \cdot \text{год}$. Це означає, що окрім інших переваг суперконденсатор дозволяє зекономити $4,5\%$ енергії на міському їздовому циклі.

Висновки. Дослідження ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі електроскутера показали, що використання в системі живлення суперконденсатора дозволяє зекономити $4,5\%$ енергії на міському їздовому циклі. Це дозволить покращити економію енергії для електричного транспортного засобу, зробити пересування дешевшим та збільшити відстань, яку може він проїхати між підзарядками акумулятора. Окрім того, дослідження перехідних процесів при розгоні електротранспорту підтверджують, що застосування суперконденсатора значно зменшує навантаження на акумулятор, що забезпечує збільшення тривалості його роботи.

Список літератури: 1. Zhi Yang, Fei Shang, Ian P. Brown, Mahesh Krishnamurthy. Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction and Switched reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. - 2015. – Iss 1/3. – PP. 245-254. 2. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // *Технічна електродинаміка*. – 2008. – № 4. – С. 43–47. 3. Cristina Pitorac. Using Li-Ion accumulators as traction batteries in the automotive industry. Cost reduction using ultra-capacitors // *International Conference on Development and Application Systems*. – 2016. – p. 212-218. 4. Anupama Singh, P.B. Karandikar. Lead-acid battery for HEV using fuzzy controller and ultracapacitor // *Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*. – 2016. – p. 1-5. 5. Sanfeng Liu, Jun Peng, Liran Li, Xiaohui Gong, Honghai Lu. A MPC based energy management strategy for battery-supercapacitor combined energy storage system of HEV // *35th Chinese Control Conference*. – 2016. – p. 8727-8731. 6. S. Butterbach, B. Vulturescu, G. Coquery, Ch. Forgez, G. Friedrich. Design of a supercapacitor-battery storage system for a waste collection vehicle // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. – 2010. – p. 1-6. 7. Victor Isaac Herrera, Haizea Gaztanga, Aitor Milo, Txomin Nieva, Ion Etxeberria-Otadui. Optimal Operation Mode Control and Sizing of a Battery-Supercapacitor Based Tramway // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. – 2015. – p. 1-6. 8. Реуцький М.О., Трінчук Д.Я., Дешко А.О. «Застосування суперконденсаторів у приводі електромобіля на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням». Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики – Київ, 2014 р.

Bibliography (transliterated): 1. Zhi Yang, Fei Shang, Ian P. Brown, Mahesh Krishnamurthy. (2015). Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction and Switched reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1/3, 245-254. 2. Shidlovskiy A., Pavlov V., Popov A. (2008). Supercapacitor usage in independent accumulator electric vehicles. *Technical electrodynamics*, 4, 43-47. 3. Cristina Pitorac. (2016). Using Li-Ion accumulators as traction batteries in the automotive industry. Cost reduction using ultra-capacitors. *International Conference on Development and Application Systems*, 212-218. 4. Anupama Singh, P.B. Karandikar. (2016). Lead-acid battery for HEV using fuzzy controller and ultracapacitor. *Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*, 1-5. 5. Sanfeng Liu, Jun Peng, Liran Li, Xiaohui Gong, Honghai Lu. (2016). A MPC based energy management strategy for battery-supercapacitor combined energy storage system of HEV. *35th Chinese Control Conference*, 8727-8731. 6. S. Butterbach, B. Vulturescu, G. Coquery, Ch. Forgez, G. Friedrich. (2010). Design of a supercapacitor-battery storage system for a waste collection vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-6. 7. Victor Isaac Herrera, Haizea Gaztanga, Aitor Milo, Txomin Nieva, Ion Etxeberria-Otadui. (2015). Optimal Operation Mode Control and Sizing of a Battery-Supercapacitor Based Tramway. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-6. 8. Reutskyi M., Trinchuk D., Deshko A. (2014). Supercapacitor usage in electric vehicle drives on the example of DC motor with independent excitation. *International Scientific-Engineering Conference of Young Scientists, Post-Graduates, Students. Modern Problems of Electric Power Engineering and Automatics*.

Надійшла 26.04.2017