

## ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.316

М.Я. Островерхов, д-р техн. наук, проф.

М.О. Реуцький, канд. техн. наук

Д. Я. Трінчук, аспірант

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПРИВОДІ ЕЛЕКТРОСКУТЕРА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ТА НАВАНТАЖЕННЯ

*На сьогодні у світі існує тенденція із обмеження споживання природних ресурсів, одним із наслідків якої є поступовий перехід від автомобілів із двигунами внутрішнього згорання до електромобілів. Система приводу останніх також неідеальна, зокрема через високий внутрішній опір автономного джерела живлення. Ефективність перетворення енергії в ній може бути покращена за рахунок підключення суперконденсаторів паралельно до акумулятора. В роботі на основі комп'ютерної моделі проведено аналіз ефективності використання суперконденсатора в електричному транспорті з автономним живленням при роботі в усталеному режимі та при відпрацюванні моделі на міський їздовий цикл. Отриманий числовий результат показав, що підключення суперконденсатора покращує енергетичну ефективність автономного електропривода.*

**Ключові слова:** електроскутер, суперконденсатор, енергоефективність, їздові цикли.

**Постановка проблеми.** Автомобільні дороги у світі загалом та в Україні зокрема все більше займають електромобілі. Люди обирають цей вид транспорту не тільки тому що він екологічніший, а й тому, що електромобілі споживають менше енергії і, таким чином, вигідніші. Незважаючи на це, їхня енергетична ефективність хоч і більша, ніж у автомобілів з двигунами внутрішнього згорання, проте може бути покращена. В приводі цих транспортних засобів 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) [4], що живиться від силового перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Літій-іонні акумулятори мають високий внутрішній опір, що призводить до зайвих втрат енергії. Для зменшення внутрішнього опору джерела живлення паралельно до акумулятора можна підключити батарею суперконденсаторів, оскільки останні мають суттєво менший активний опір, а також менш чутливі до ударних струмів [7].

**Метою дослідження** є оцінка ефективності роботи електричного привода транспортного засобу, у якому в якості джерела живлення використовується акумулятор з паралельно під'єднаним суперконденсатором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання паралельного з'єднання акумулятора із суперконденсатором було запропоновано в роботі [7]. В ній були проведені дослідження впливу суперконденсатора на акумулятор при роботі на навантаження, проте не було досліджено вплив такого підключення на саме навантаження, тобто на електродвигун.

Більш детальні дослідження такої системи електропривода були проведені в роботах [1-3]. В них показана ефективність такого виду живлення для гібридних транспортних засобів. 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, в яких використання суперконденсаторів є більш доцільним.

В роботі [6] 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.

В наведених роботах не бралось за мету дослідити вплив такої системи живлення саме на енергоефективність транспортного засобу. В даному дослідженні проведено аналіз ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера при окремо взятому усталеному режимі роботи, а також для більш наближеного до реальності режиму роботи на міський їздовий цикл. Результати цього

дослідження зможуть показати доцільність використання суперконденсаторів в системі живлення електроприводу транспортних засобів з автономним живленням.

Вибір елементів електропривода. Дослідження електропривода проведено на прикладі 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 завантаження – 150 кг.

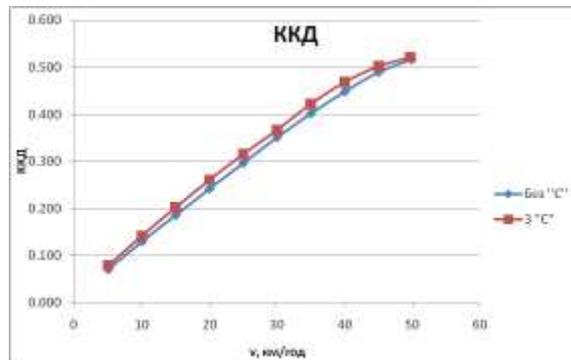
В якості електромеханічного перетворювача для привода електроскутера обрано два двигуни постійного струму марки ИУС-0.8, що ключені паралельно. Основні заводські параметри двигуна наступні: напруга живлення – 28 В; корисна механічна потужність – 800 Вт; номінальний коефіцієнт корисної дії – 0,74; частота обертання ротора – 6500 7700 об/хв; маса – 8,7 кг. Додаткові параметри двигуна, такі як електричні опори та індуктивності обмоток, момент тертя були визначенні 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; ємність – 40 А·год; внутрішній опір – 100 мОм; маса – 5,6 кг.

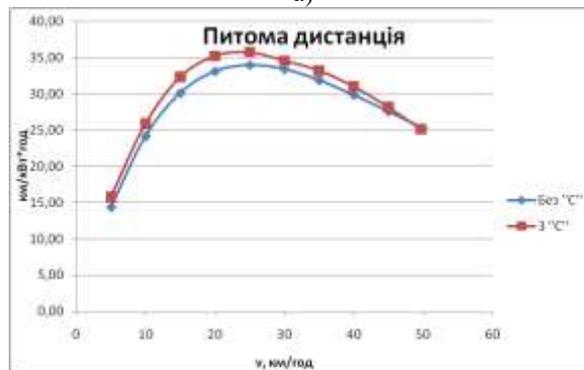
Розглянуті елементи разом із ШІМ-перетворювачем створюють систему електропривода, що живиться лише від акумулятора. Для покращення характеристик живлення була вибрана батарея суперконденсаторів, що складається із 11-ти з'єднаних послідовно суперконденсаторів WIMA SuperCap C з наступними параметрами кожен: номінальна напруга – 2,5 В; ємність – 1200 Ф; внутрішній опір – 0,5 мОм; маса – 235 г. Параметри батареї: номінальна напруга – 27,5 В; ємність – 109,1 Ф; внутрішній опір – 5,5 мОм; маса – 2,585 кг.

Дослідження робочих характеристик для нормального режиму роботи. Нормальний режим роботи визначається як робота електроскутера за нормальних безвітряних погодних умов при перевезенні людини масою 70 кг асфальтованою дорогою без схилу. Питома дистанція – відстань, яку може проїхати електроскутер за одиничну енергію запасену в акумуляторі.

Моделювання та дослідження приводу електроскутера здійснено на основі комп'ютерної моделі, адекватність якої перевірена на експериментальній установці [5]. Результати дослідження представлені на рис. 1.



а)



б)

Рисунок 1 – Робочі характеристики електроскутера для нормального режиму роботи з використанням суперконденсатора та без нього: а – залежність ККД; б – питома дистанція

Як видно з рис.1, використання в системі живлення приводу електроскутера суперконденсатора дозволяє покращити енергоефективність. Зокрема ККД електропривода підвищується на величину від 4 % до 12,5 % в залежності від швидкості електроскутера, що дозволяє збільшити шлях на величину до 10%, який можна проїхати на одному заряді.

**Дослідження робочих характеристик при роботі на міській їздовий цикл.** Оскільки електроскутер зазвичай застосовується для їзди в межах міста, то для дослідження його приводу був обраний європейський їздовий міський цикл The UN/ECE Elementary Urban Cycle. Результати досліджень зображені на рис. 2.

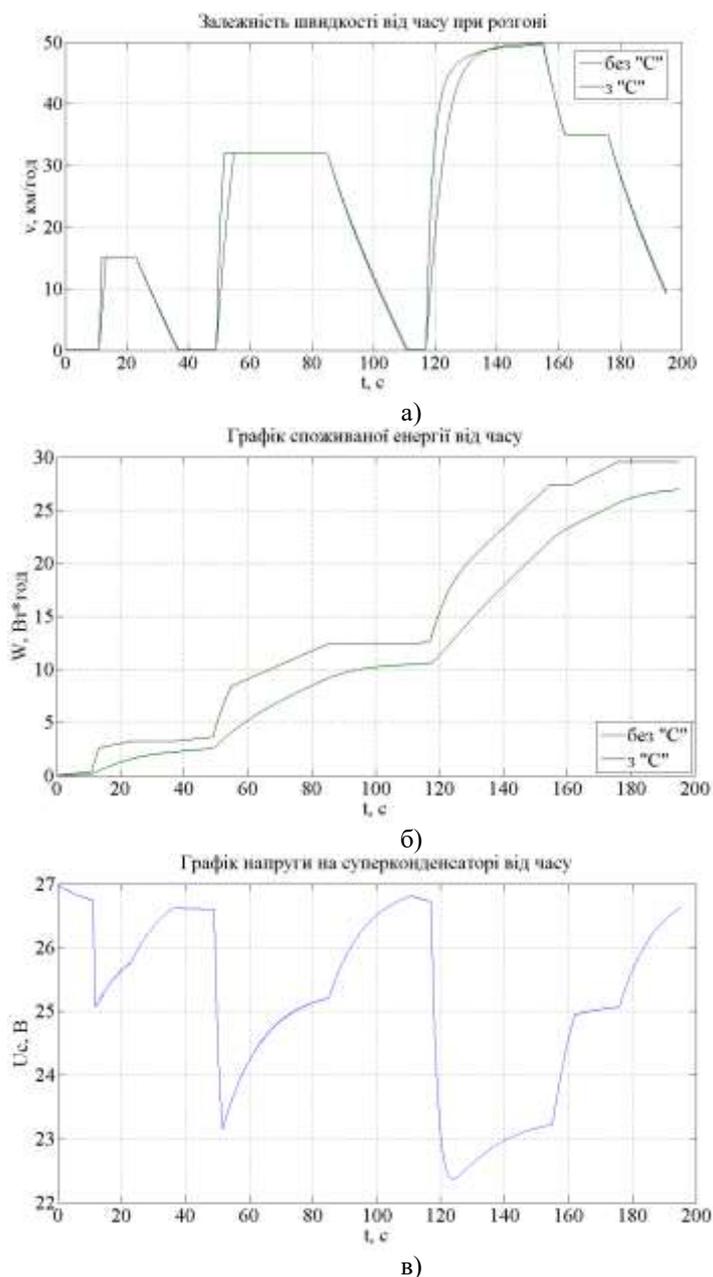


Рисунок 2 – Міський їздовий цикл:

- а) швидкість електроскутера;
- б) спожита енергія;
- в) напруга на суперконденсаторі.

Графіки на рис. 2а, по суті, мають вигляд міського їздового циклу. Рис. 2а відображає, як змінюється швидкість транспортного засобу з часом. На ньому також помітно, що при наявності суперконденсатора електроскутер розганяється до заданих швидкостей швидше. Рисунок 2в демонструє зміну напруги на суперконденсаторі в часі, що дозволяє прослідкувати, як протікає енергія в залежності від режиму роботи, а також контролювати, аби суперконденсатор не розрядився занадто сильно.

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

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

(1)

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, що визначена при моделюванні.

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

**Висновки.** Дослідження ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера показали, що використання в системі живлення суперконденсатора дозволяє збільшити ККД електропривода на величину від 4% аж до 12,5% від базової величини в залежності від швидкості електроскутера. Дослідження роботи на міський їздовий цикл встановили, що застосування суперконденсатора паралельно з акумулятором при їзді в місті дозволяє зекономити 4,5% енергії. Це забезпечує пересування електроскутером дешевшим та дозволяє збільшити відстань, яку може він проїхати між підзарядками акумулятора.

#### Список використаної літератури

1. 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. – р. 212-218.
2. 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. – р. 1-6.
3. 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. – р. 8727-8731.
4. 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.
5. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. «Дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення в транспортних засобах на прикладі електроскутера». Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика – Кременчук, 2016 р. – №1. – с. 75-77.
6. 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 електроенергетичної та автоматики – Київ, 2014 р.
7. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 43–47.

УДК 621.316

**М.Я. Островерхов**, д-р техн. наук, проф.

**М.О. Реуцький**, канд. техн. наук

**Д.Я. Трінчук**, аспірант

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОСКУТЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И НАГРУЗКИ

*На сьогоднішній день в мирі існує тенденція по обмеженню потреби природних ресурсів. Одним із проявів цієї тенденції є поступовий перехід від автомобілів на двигателях внутрішнього згорання до електромобілів. Однак, система приводу останніх також неідеальна, в частині із-за високого внутрішнього опору автономного джерела живлення, і*

эффективность преобразования энергии в ней тоже может быть улучшена за счёт подключения суперконденсаторов параллельно к аккумулятору. В данной работе с использованием компьютерной модели электропривода произведён анализ эффективности использования суперконденсатора в электротранспорте с автономным питанием при работе в установившемся режиме и при отработке модели на городской ездовой цикл. Полученный числовой результат показал, насколько сильно подключение суперконденсатора улучшает энергетическую эффективность электропривода.

**Ключевые слова:** электроскутер, суперконденсатор, энергоэффективность, ездовые циклы.

**M. Ostroverkhov**, Dr. Eng. Sc., Prof.,

**M. Reutskyi**, Cand. Sc. (Eng.),

**D. Trinchuk**, postgraduate student,

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**RESEARCH OF THE ELECTRIC SCOOTER DRIVE ENERGY TRANSFORMATION  
EFFICIENCY DEPENDING ON POWER SUPPLY AND LOAD**

*In modern world society there is a tendency to decrease natural resources consumption. This leads to switch-over from the internal combustion engine vehicles to the electric vehicles. However, the electric drive system of the latter is not perfect as well, particularly due to high impedance of the independent power supply. So the efficiency of this system can be improved with the connection of supercapacitors in-parallel to the accumulator. This research, provided with the help of a computer model of the electric drive, was made to analyze the effectiveness of utilizing supercapacitors in electric vehicles with independent power supply by testing the computer model on steady-state working modes as well as on the urban driving cycle. The obtained numeric result has shown the increasing of the electric drive efficiency caused by the including a supercapacitor to the drive power supply.*

**Key words:** electric scooter, supercapacitor, energy efficiency, driving cycles.

**References**

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. M. Ostroverkhov, M. Reutsky, D. Trinchuk (2016). Study off operation modes of nonlinear electric circuit with independent power supply in vehicles by example of an electric scooter (Ukr). Problems of energy and resource saving in electrical systems. Science, education, and practice, 1, p. 75-77.
6. Reutsky M., Trinchuk D., Deshko A. (2014). Supercapacitor usage in electric vehicle drives on the example of DC motor with independent excitation (Ukr). International Scientific-Engineering Conference of Young Scientists, Post-Graduates, Students. Modern Problems of Electric Power Engineering and Automatics.
7. Shidlovskiy A., Pavlov V., Popov A. (2008). Supercapacitor usage in independent accumulator electric vehicles. Technical electro-dynamics (Rus), 4, 43-47.

Надійшла 31.05.2017

Received 31.05.2017