

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРИВОДУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ ІЗ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОМ ТА ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

М. Я. Островерхов, Д. Я. Трінчук

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

Анотація. В статті наведено дослідження електроприводу транспортних засобів з автономним живленням з використанням перетворювача постійного струму. Дослідження проводились для живлення від акумулятора, а також від акумулятора та суперконденсатора. Показано, що для мінімізації споживання енергії необхідно правильно вибрати ємність суперконденсатора, а також застосувати систему дозаряду суперконденсатора під час пауз руху.

Ключові слова: електроскутер, асинхронний двигун, літій-іонний акумулятор, паралельне з'єднання суперконденсатора та акумулятора, перетворювач постійного струму.

Вступ

На сьогоднішній день в галузі транспорту все більшу нішу займають електричні транспортні засоби з автономним живленням: електромобілі, електробуси, електроскутери тощо, поступово витісняючи з ринку своїх конкурентів на базі двигуна внутрішнього згорання. Електричні транспортні засоби є не тільки більш екологічними, але й більш економічними, оскільки електродвигуни мають суттєво вищий коефіцієнт корисної дії (ККД), ніж двигуни внутрішнього згорання. Проте незважаючи на значну ефективність електродвигунів (ККД від 80% та більше), самі приводи електричних транспортних засобів мають цей показник суттєво нижчим, оскільки значні втрати виділяються на інших елементах електроприводу, зокрема на джерелі живлення. Покращення енергоефективності приводів електричних транспортних засобів з автономним живленням призведе до підвищення їхньої економічної привабливості, а значить і до збільшення конкурентоспроможності на ринку транспортних засобів, тому дослідження в цьому напрямку є актуальною на сьогоднішній день задачею.

1. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є привід електричних транспортних засобів з автономним живленням пониженої напруги.

Зазвичай в електромобілях в якості джерела енергії використовують літій-іонні або літій-полімерні акумулятори, які мають високі показники питомої енергії, що дозволяє отримати якомога більшу накопичену енергію і тим самим отримати можливість проїхати більшу відстань

на одному заряді. Такі акумулятори не розраховані на високі напруги, а тому для живлення електричних двигунів виникає необхідність підключати сотні елементів послідовно, що може бути технологічно незручним. Окрім того, така батарея може займати великий об'єм транспортного засобу. Саме тому часто буває зручніше використовувати джерело живлення пониженої напруги, з'єднавши його з двигуном через перетворювач постійного струму (ППС), який підвищуватиме напругу на джерелі до напруги на двигуні. Недоліком такого рішення є те, що на ППС також виділяються втрати енергії: його ККД складає приблизно 90%.

Для вибору електромеханічного перетворювача для приводу існує багато різних варіантів, проте не зважаючи на ряд пропозицій асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором стабільно займає високу нішу серед виробників електромобілів. Для керування таким приводом використовують широтно-імпульсний модулятор (ШІМ), що працює на систему векторного керування.

Така конфігурація електропривода, хоч і є найбільш широко розповсюдженою, має значні недоліки: літій-іонний акумулятор має високий внутрішній опір, що значно обмежує пусковий струм, послаблює динаміку транспорту та збільшує втрати енергії. Вирішити дані проблеми можливо підключивши паралельно до акумулятора батарею суперконденсаторів, оскільки останні мають суттєво менший активний опір, ніж літій-іонні акумулятори, та менш чутливі до ударних струмів. З іншого боку суперконденсатори – це додатковий об'єм та маса, яку доведеться перевозити з собою транспортному засобу, що призведе до додаткового споживання енергії.

© Островерхов, М. Я., Трінчук, Д. Я., 2018

2. Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є оцінка ефективності використання паралельного з'єднання акумулятора і суперконденсатора пониженої напруги для живлення електропривода транспортного засобу на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Створити модель для дослідження електропривода транспортних засобів з перетворювачем постійного струму та вибрати об'єктивний показник енергоефективності.

2. Провести на створеній моделі дослідження вибраного показника енергоефективності для систем приводу з різною ємністю суперконденсатора та взагалі без нього. Провести аналіз цих досліджень.

3. На базі аналізу досліджень визначити, чи можливо змінюючи лише конфігурацію системи живлення досягти додаткового покращення енергоефективності транспортного засобу.

3. Дослідження існуючих рішень проблеми

Ідея використання суперконденсаторів паралельно з акумуляторами була запропонована в багатьох роботах. У праці [1] автори досліджували ефект, який це з'єднання викличе на акумуляторі при роботі на звичайне навантаження, не беручи до уваги особливості електромеханічного перетворювача енергії. В роботі [2] була показана ефективність такого з'єднання при живленні електричних двигунів, але без прив'язки до конкретних транспортних засобів.

Більш глибокі дослідження такої системи проведені в роботі [3]. Це дослідження доводить ефективність даної зв'язки в гібридних транспортних засобах. Проте система живлення гібридних транспортних засобів сильно відрізняється від електричних з незалежним живленням, тому показані переваги використання суперконденсаторів в гібридах не доводять їх наявності при використанні в електромобілях. Ці переваги продемонстровані в роботі [4], проте лише для приводів з двигунами постійного струму, які на сьогодні зустрічаються рідше, ніж приводи з асинхронними двигунами, що показано в роботі [5].

В роботі [6] проводилося дослідження системи незалежного живлення електричних транспортних засобів із суперконденсатором на прик-

ладі трамвая, який має свої особливості порівняно з електромобілями. Окрім того, в цій роботі вся увага концентрувалася виключно на джерелі живлення, а електромеханічний перетворювач енергії не брався до уваги.

В роботі [7] були проведені дослідження живлення паралельним з'єднанням акумулятор-суперконденсатор електроскутера, що працює на асинхронному двигуні. В ній було чітко показано, скільки енергії можна зекономити таким з'єднанням. Проте в цій роботі напруга живлення подавалася на двигун без перетворювача постійного струму, що може бути проблемним для реалізації в такому компактному транспортному засобі як електроскутер.

Тому в даній роботі проводиться оцінка ефективності використання енергії транспортним засобом, який працює на асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором, а також із живленням пониженої напруги для різних конфігурацій джерела живлення: з суперконденсаторами різної ємності та без них.

4. Методи досліджень

Дослідження проводилися з наступними параметрами елементів транспортного засобу:

- електроскутер типу Genata Gtle 250 (Китай): максимальна швидкість – 55 км/год, максимальна відстань пробігу – 80 км при швидкості 30 км/год., маса – 45 кг, максимальне навантаження – 150 кг;

- два асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором M2AA 080 C2 виробництва компанії АВВ (Швеція), що працюватимуть паралельно з номінальною потужністю 1,1 кВт, напругою живлення 230/400 В, частотою обертання 2870 об./хв., ККД – 80,6 % кожен;

- батарея літій-іонних акумуляторів Noncell HCP603650NЗС (Китай): номінальна напруга – 25,9 В, ємність – 16,25 А·год., внутрішній опір 0,07 Ом, маса – 1,91 кг;

- батарея суперконденсаторів Maxwell K2Series (Китай), що складається зі 10-ти послідовно з'єднаних елементів, ємність яких варіюється для різних точок досліджень в межах 650-2650 Ф на один елемент.

Для моделювання електропривода була розроблена модель в програмному пакеті Matlab/Simulink, що зображена на рис. 1.

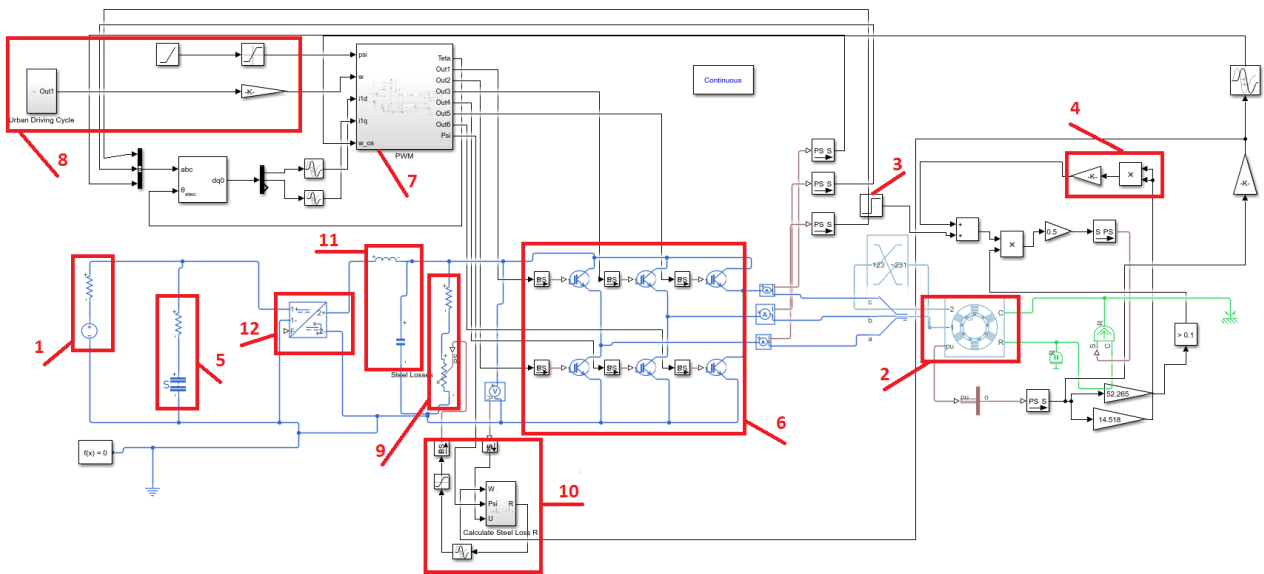


Рис. 1. Модель привода електроскутера в програмному пакеті Matlab/Simulink:

1 – літій-іонний акумулятор; 2 – асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором; 3 – блок завдання постійного моменту навантаження (сила тертя кочення); 4 – схема обчислення моменту опору, пропорційного до квадрату швидкості (сила опору повітря); 5 – батарея суперконденсаторів (може бути відключена); 6 – електронний перетворювач на базі IGBT-транзисторів; 7 – блок векторного керування перетворювачем; 8 – блоки завдання швидкості та магнітного потоку для векторного керування; 9 – модель для врахування магнітних втрат в АД; 10 – блок обчислення магнітних втрат в АД; 11 – індуктивно-ємнісний фільтр перетворювача з боку джерела (в реальному застосуванні фільтр музить бути з боку обох сторін ППС, але для моделювання задля зменшення складності системи диференціальних рівнянь з достатньою точністю можна провести їх на схемі з одним фільтром); 12 – підвищуючий перетворювач постійного струму.

Деякі блоки та схеми виводу на екран обчислених величин не вказані на рис. 1 задля покращення його наочності. Для об'єктивної оцінки енергоефективності схеми були прийняті стандартні норми оцінки енергоефективності транспортних засобів, а саме міський їздовий цикл за стандартами Євросоюзу The UN/ECE Elementary Urban Cycle (рис. 2). Цей цикл відображає характер руху транспортного засобу в місті і якнайкраще характеризує навантаження на електроскутер, що досліджується.

Залежність швидкості від часу їздового циклу використовується як завдання швидкості на векторне керування ШІМ.

5. Результати досліджень

Відпрацьовуючи міський їздовий цикл двигун працює в повторно-короткочасному режимі роботи. Особливістю такого режиму є підвищене навантаження при перехідних процесах: розгоні та гальмуванні, що викликане високим приведеним моментом інерції електроскутера. На рис. 3 представлений графік залежності споживаної потужності від часу при роботі на таке навантаження приводом без суперконденсатора.

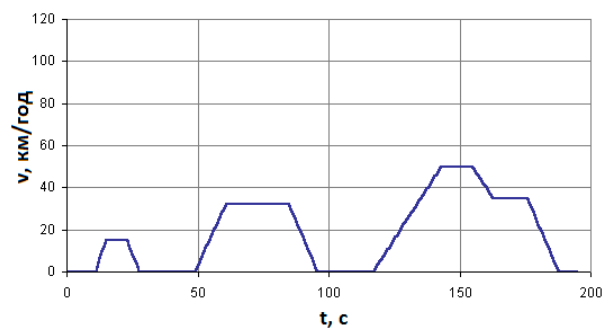


Рис. 2. Міський їздовий цикл The UN/ECE Elementary Urban Cycle

Як видно з рис. 3, максимальне споживання електроенергії, а відповідно, і найбільші втрати спостерігаються під час розгону транспортного засобу. Підключення суперконденсатора паралельно до акумулятора дозволить йому «взяти на себе» навантаження під час розгону двигуна та проводити більш ефективне рекуперативне гальмування. Очевидно, це покращить ККД електропривода та зменшить споживання електроенергії.

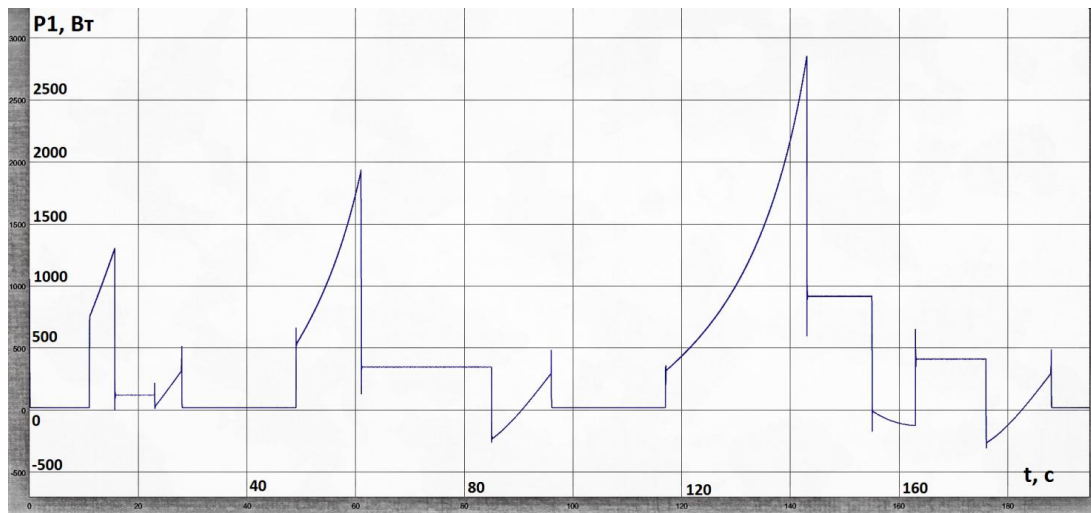


Рис. 3. Залежність споживаної електропотужності від часу з джерелом живлення без суперконденсатора

Чим більша буде ємність суперконденсатора, тим більше накопиченого заряду у нього залишатиметься і після розгону двигуна, тобто тим більшою має бути ефективність електропривода. Дослідження ККД проводилися для батарей суперконденсаторів різної ємності. Всі вони склалися зі 10-ти елементів, включених послідовно для того, аби утворити номінальну напругу батареї у 27 В. Проте змінювалась ємність (а разом з нею і активний опір та маса) кожного елемента. Результати досліджень наведені в табл. 1 та на рис. 4.

Таблиця 1
Залежність ККД електропривода від ємності суперконденсатора

с, Ф	ККД
0	0,3684
65	0,3854
120	0,3908
150	0,3931
200	0,3949
265	0,3953

Як бачимо з рис. 4, використання суперконденсатора дозволяє покращити усереднене за цикл ККД привода електроскутера від 36,8 % до 39,5 %. Цей результат повністю підтверджує вказані вище припущення. Проте варто зазначити, що для досліджень транспортних засобів ККД не є визначальним параметром. Річ у тім, що при його обчисленні в якості корисного навантаження враховується подолання сили опору транспортному засобу. При цьому при збільшенні маси транспортного засобу цей опір також збільшується, збільшуючи таким чином і «корисне навантаження». Тому більш об'єктивним є показник спожитої енергії за один цикл.

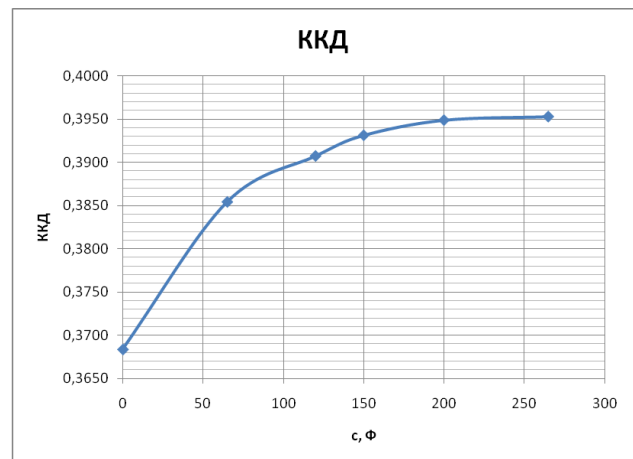


Рис. 4. Залежність ККД електропривода від ємності суперконденсатора

Для тих самих параметрів було проведене дослідження спожитої за міський їздовий цикл енергії, яке враховувало збільшення маси транспортного засобу у зв'язку з додаванням до нього батареї суперконденсаторів. Результати представлені в табл. 2 та на рис. 5.

Таблиця 2
Залежність спожитої електроприводом енергії від ємності суперконденсатора

с, Ф	W1, Дж
0	82174
65	79142
120	78440
150	78039
200	77989
265	78650

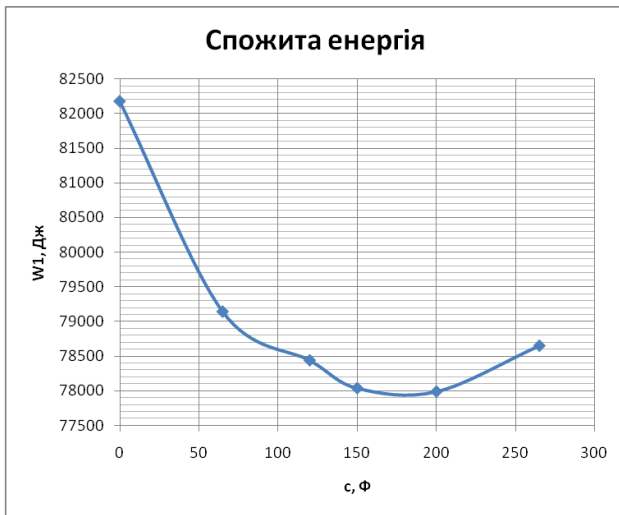
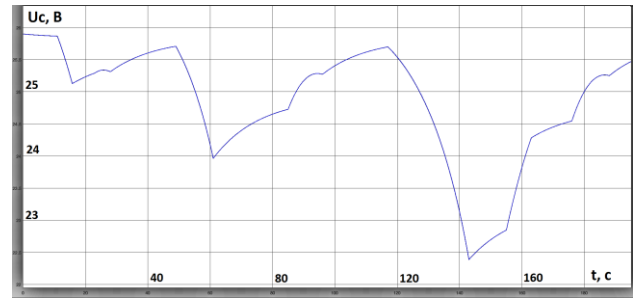


Рис. 5. Залежність спожитої електроприводом енергії від ємності суперконденсатора

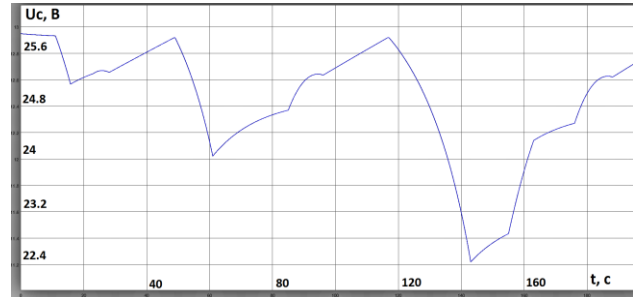
З рис. 5 очевидно впливає, що існує певне значення ємності, при якому споживання електроенергії транспортним засобом є мінімальним. Для даного електроскутера – це 200 Ф на батарею. При меншій ємності суперконденсатор занадто сильно розряджається при розгоні і через це збільшуються втрати на дозарядження його в подальшій роботі електропривода. При більшому значенні ефект покращення ККД зі збільшенням ємності слабшає, в той час як маса транспортного засобу стає більшою і тому й споживання енергії росте.

На рис. 6 а) зображена зміна напруги на суперконденсаторі з часом при його ємності у 100 Ф. З цього рисунку видно, що під час пауз руху суперконденсатор не встигає дозарядитись до свого початкового значення напруги, тому наступний розгін відбувається при пониженому значенні стартової напруги. Це призводить до зменшення ефективності електроприводу. Для усунення цього недоліку була запропонована схема, яка дозволяє суперконденсатору рівномірно заряджатись протягом пауз руху тривалістю у 20 секунд (що відповідає усередненим паузам під час руху транспорту містом – зупинкам на світлофорах) до свого номінального значення. На рис. 6 б) зображена динаміка напруги на суперконденсаторі у такому випадку.

Для оцінки ефективності цієї системи були проведені дослідження, результати яких занесені в табл. 3 та на рис. 8.



а)



б)

Рис. 6. Залежність напруги на суперконденсаторі від часу при ємності суперконденсатора 100 Ф а) без використання системи дозаряду суперконденсатора; б) при використанні системи дозаряду суперконденсатора

Таблиця 3
Залежність спожитої енергії від ємності елемента суперконденсатора при використанні системи дозарядки та без неї

с, Ф	W1, Дж		dW, %	
	без д/з	з д/з	без д/з	з д/з
0	82174			
65	79142	79163	3,690	3,664
120	78440	78373	4,544	4,626
150	78039	77941	5,032	5,151
200	77989	77877	5,093	5,229
265	78650	78586	4,288	4,366

З результатів досліджень (рис. 7) видно, що використання системи дозаряду дозволяє трошки зменшити споживання транспортним засобом електроенергії при використанні суперконденсатора. А саме, в точці мінімально споживання електроенергії – при ємності суперконденсатора $C=200$ Ф – вдалось покращити показник економії енергії від 5,09% до 5,23%. Зазначимо, що ця система не потребує у встановленні додаткових габаритних силових елементів, а значить покращення енергоефективності можливо досягти завдяки лише оптимізації системи керування живленням електропривода.

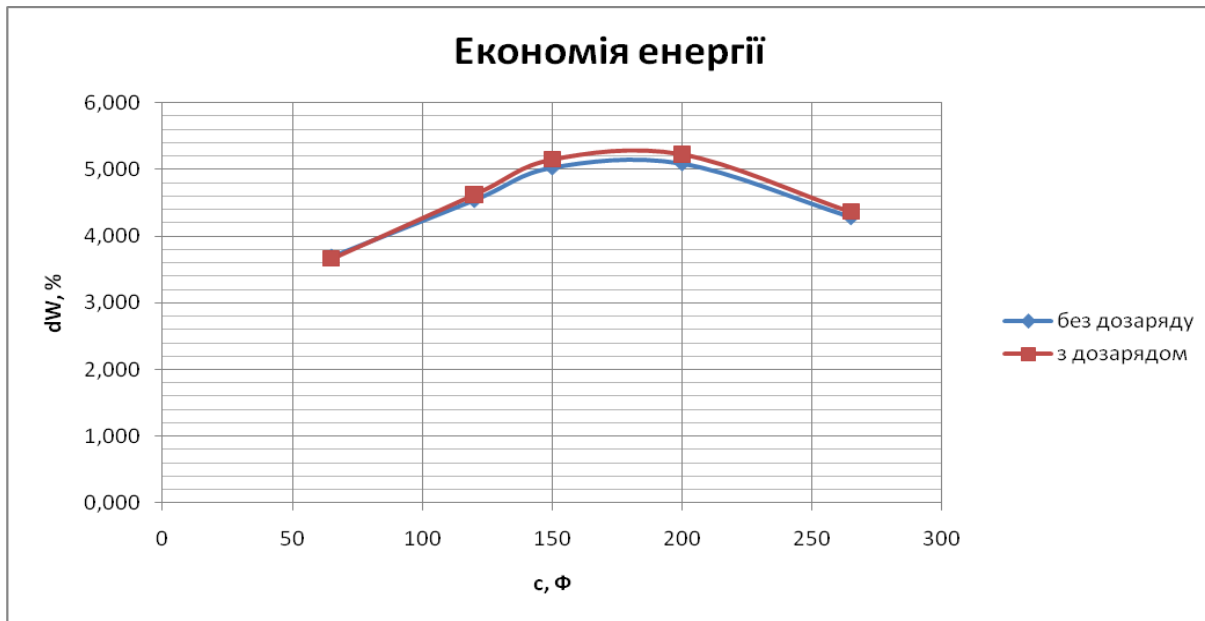


Рис. 7. Залежність зменшення спожитої енергії порівняно з випадком без використання суперконденсатора від ємності останнього при використанні системи дозаряду та без неї.

Порівнявши отримані в цій роботі результати з результатами з роботи [11] (рис. 8) можна побачити, що ефективність використання системи дозаряду суперконденсатора практично не залежить від наявності в електроприводі перетворювача постійного струму, а залежить лише від ємності обраного суперконденсатора.

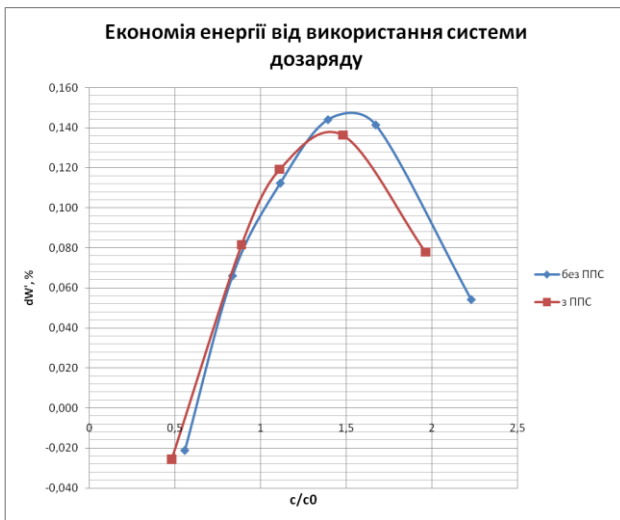


Рис. 8 – залежність різниці між зменшенням споживаної за цикл енергії від використання суперконденсатора при наявності системи дозаряду та без неї від приведеної ємності суперконденсатора для електропривода з ППС та без нього

На рис. 8 c_0 – розрахунково необхідна ємність суперконденсаторної батареї, яка визначається з необхідної для розгону електроскутера від нуля до номінальної швидкості енергії.

Висновки

В ході даної роботи була створена в програмному пакеті Matlab/Simulink модель приводу електроскутера на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що живиться через перетворювач постійного струму від паралельного з'єднання літій-іонного акумулятора та суперконденсатора пониженої напруги, з можливістю регулювати ємність або відключати суперконденсатор. Для оцінки енергоефективності такої системи модель випробовувалася на міському їздовому циклі The UN/ECE Elementary Urban Cycle, для якого в якості показника енергоефективності використовувалась спожита за один цикл енергія.

Аналіз цієї комп'ютерної моделі показав, що використання суперконденсатора само лише по собі зменшує споживання електричної енергії на величину від 3,7 %. Більше того, для покращення енергоефективності існує така ємність суперконденсатора, при якій зменшення споживання енергії максимізується і складає 5,1 %. Дослідження показали, що збільшення ємності не завжди призводить до покращення ефективності, адже разом із ємністю росте і маса транспортного засобу. Таким чином, продемонстрована важливість правильного вибору необхідної ємності суперконденсатора.

Була запропонована система розподілення живлення, при якій суперконденсатор пришивдшено заряджається під час пауз руху. Ця система допомогла покращити економію енергії до 5,23 % не потребуючи при цьому встановлення додаткових силових елементів.

Список використаної літератури**References**

1. Шидловский, А. К., Павлов, В. Б., Попов, А.В., Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте [Текст] / Технічна електродинаміка – Київ, 2008 – С. 79.
2. 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 [Text] / 35th Chinese Control Conference – 2016 – P. 8727–8731.
3. Cristina Pitorac, Using Li-Ion accumulators as traction batteries in the automotive industry. Cost reduction using ultra-capacitors [Text] / International Conference on Development and Application Systems – 2016. P – 212–218.
4. Островерхов, М. Я., Реуцький, М. О., Трінчук, Д. Я., Дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення в транспортних засобах на прикладі привода електроскутера [Текст] / Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика – 2016. Вип. 1 – С. 75–77.
5. 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 [Text] / IEEE Transactions on Transportation Electrification – 2015. Vol. 1. Iss. 3 – P. 245–254.
6. Victor Isaac Herrera, Haizea Gaztañaga, Aitor Milo, Andoni Saez-de-Ibarra, Ion Etxeberria-Otadui, Txomin Nieva, Optimal Energy Management and Sizing of a Battery--Supercapacitor-Based Light Rail Vehicle With a Multiobjective Approach [Text] / IEEE Transactions on Industry Applications – 2016. Vol. 52. Iss. 4 – P. 3367–3377.
7. Ostroverkhov, M., Trinchuk, D., Study into Energy Efficiency of the Drive of Electric Vehicles with an Independent Power Supply Depending on the Configuration of the Power Source [Text] / Technology Audit and Production Reserves – 2018. Vol. 4 Iss. 1 – P. 45–50.

1. Shidlovskiy, A., Pavlov, V., Popov, A. (2008), Supercapacitor usage in independent accumulator electric vehicles [Primenenie superkondensatorov v avtonomnom akkumulyatornom elektrotransporte]. Technical electro-dynamics, 4, p. 43–47.
2. 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, p. 8727–8731.
3. Pitorac, C. (2016), Using Li-Ion accumulators as traction batteries in the automotive industry. Cost reduction using ultra-capacitors. International Conference on Development and Application Systems, p. 212–218.
4. Ostroverkhov, M., Reutsky, M., Trinchuk, D. (2016), Study of operation modes of nonlinear electric circuit with independent power supply in vehicles by example of an electric scooter [Doslidzhennia robochih rezhymiv neliniynoho elektrychnoho kola z avtonomnym dzerelom zhyvlennia v transportnyh zesobah na prykladi pryvoda elektroskuteru]. Problems of energy and resource saving in electrical systems. Science, education, and practice, 1, p. 75–77.
5. 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, p. 245–254.
6. Victor Isaac Herrera, Haizea Gaztañaga, Aitor Milo, Andoni Saez-de-Ibarra, Ion Etxeberria-Otadui, Txomin Nieva. (2016), Optimal Energy Management and Sizing of a Battery-Supercapacitor-Based Light Rail Vehicle With a Multiobjective Approach. IEEE Transactions on Industry Applications, 52 (4), p. 3367–3377.
7. Ostroverkhov, M., Trinchuk, D (2018), Study into Energy Efficiency of the Drive of Electric Vehicles with an Independent Power Supply Depending on the Configuration of the Power Source. Technology Audit and Production Reserves, 4(1), p. 45–50.

**STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE ELECTRIC VEHICLE DRIVES WITH
INDEPENDENT POWER SUPPLY WITH SUPERCAPACITORS IMPLEMENTING
DC-DC CONVERTER**

M. Ostroverkhov, D. Trinchuk

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

Abstract. *The electric vehicle drive with an independent power supply with supercapacitor battery and dc-dc converter is the object of this study. Electric vehicles nowadays become more and more popular, competing with the internal combustion engine vehicles. However, the electric vehicle drives have some considerable drawbacks. Even though the efficiency of the electric motor is significantly greater than the one of internal combustion engines, other elements of the drive such as power supply produce heat losses as well. Reducing these losses will lead to decreasing of energy consumption of electric vehicles and therefore will help them to become more competitive on the vehicle market. The Li-Ion accumulators, which are used as the power supply, have large impedance that leads to significant energy losses on this element. The solution of this problem can be found by connecting a supercapacitor battery in-parallel to the accumulator, which will help reducing these losses. It is important, though, to know the exact magnitude of the battery capacitance needed for the drive due to the expensiveness and big weight of supercapacitors. In order to find this optimal capacitance for a specific electric vehicle – electric scooter – a Matlab Simulink model of the electric drive was created in this study. The modeling has shown that there is indeed the specific magnitude of the capacitance, using which the least possible energy consumption is achieved. Moreover it is possible to reduce the losses even more by implementing in the circuit a supercapacitor recharging system, created, modeled, and described in this work. This system does not require any additional power components in the electric drive scheme and therefore does not increase the cost and energy consumption of the whole drive. It was calculated in this study that with usage of both the correct supercapacitor and the recharging system the energy consumption of the electric scooter working on the urban drive cycle can be decreased by 5.23%.*

Keywords: *electric scooter, induction motor, Li-Ion accumulator, supercapacitor, dc-dc converter.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИВОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ С СУПЕРКОНДЕНСАТОРОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Н. Я. Островерхов, Д. Я. Тринчук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»

Аннотация. *В статье приведено исследование электропривода транспортных средств с автономным питанием с использованием преобразователя постоянного тока. Исследования проводились для питания от аккумулятора, а также от аккумулятора и суперконденсатора. Было показано, что для минимизации потребления энергии необходимо правильно выбрать ёмкость суперконденсатора, а также применить систему дозаряда суперконденсатора во время пауз движения.*

Ключевые слова: *электроскутер, асинхронный двигатель, литий-ионный аккумулятор, параллельное соединение суперконденсатора и аккумулятора, преобразователь постоянного тока.*

Отримано 01.11.2018



Островерхов Микола Якович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, E-mail: n.ostroverkhov@hotmail.com, тел. +38-050-254-10-67

Mykola Ostroverkhov, Dr. of Science, Professor, Head of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremohy ave., Kyiv, Ukraine, 03056, E-mail: n.ostroverkhov@hotmail.com, tel. +38-050-254-10-67

ORCID ID: 0000-0002-7322-8052



Трінчук Данило Ярославович, аспірант кафедри Теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, E-mail: d.trinchuk@gmail.com, тел. +38-097-254-29-31

Danylo Trinchuk, postgraduate, Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremohy ave., Kyiv, Ukraine, 03056, E-mail: d.trinchuk@gmail.com, tel. +38-097-254-29-31

ORCID ID: 0000-0001-6022-9323