

УДК 621.316

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.141391

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРИВОДУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З АВТОНОМНИМ ЖИВЛЕННЯМ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КОНФІГУРАЦІЇ ДЖЕРЕЛА

Острроверхов М. Я., Трінчук Д. Я.

Об'єктом даного дослідження є електричний транспортний засіб з автономним джерелом живлення. На сьогодні подібні транспортні засоби займають все більшу нішу на автомобільному ринку, витісняючи своїх конкурентів з двигуном внутрішнього згорання за рахунок вищої енергетичної ефективності. І хоча ця перевага над транспортом з двигуном внутрішнього згорання є очевидною, з точки зору електричних систем ККД електромобілів залишається доволі невисоким. Проблемним місцем, яке накладає ці обмеження, є джерело живлення – літій-іонний акумулятор – який має значний внутрішній опір.

Для усунення цього недоліку на прикладі приводу електроскутера з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором досліджувалась схема з підключенням паралельно до акумулятора батареї суперконденсаторів. Суперконденсатори мають значно менший внутрішній опір і тому беруть на себе основне миттєве навантаження при перехідних процесах: розгоні та гальмуванні, коли через джерело протікають найбільші струми.

Дослідження показали, що подібна конфігурація покращує енергетичну ефективність транспортних засобів. Причому існує оптимальне значення необхідної ємності суперконденсатора для досягнення найбільшої ефективності (найменшого споживання енергії). Це пов'язано з тим, що батарея суперконденсаторів є доволі габаритним об'єктом і суттєве збільшення ємності призводить до збільшення маси транспортного засобу і відповідно до збільшення споживання енергії. Додатково була досліджена покращена система живлення, в якій суперконденсатор пришивидшено заряджається під час пауз руху транспортного засобу. Вона дозволила покращити вже отримані результати, ще зменшивши споживання електричної енергії.

У порівнянні з проведеними раніше дослідженням було показано важливість правильного вибору ємності суперконденсаторів та системи контролю живлення. Була доведена наявність точки оптимуму та чисельно продемонстрована різниця показників споживання енергії в цій та в інших точках.

Ключові слова: система приводу електроскутера, літій-іонний акумулятор, паралельне з'єднання суперконденсатора та акумулятора, міський їздовий цикл.

1. Вступ

Нинішня тенденція в галузі транспорту демонструє, що значного розвитку набувають електромобілі, поступово витісняючи свої аналоги на двигуні внутрішнього згорання, оскільки вони є більш енергоефективними та екологічними. Економічний підхід при виборі транспортного засобу показує, що вища ціна покупки електромобілів окупиться значно меншими витратами на паливо. Але з точки зору електромеханічних систем привід електромобілів має все ще доволі низький ККД. Це пов'язано з тим, що окрім втрат у самому двигуні присутні також значні втрати у джерелі живлення. Тому актуальним і перспективним є дослідження з покращення ефективності перетворення енергії в приводі електричних транспортних засобів.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

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

В якості джерела енергії в електромобілях зазвичай використовують літій-іонні або літій-полімерні акумулятори, котрі мають високі показники питомої енергії. Існує низка варіантів при виборі електромеханічного перетворювача для приводу, 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 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. Проте суперконденсатори – це додатковий об'єм та маса, яку доведеться перевозити з собою транспортному засобу, що призведе до додаткового споживання енергії.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є оцінка ефективності використання паралельного з'єднання акумулятора і суперконденсатора 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 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.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Ідея використання суперконденсаторів паралельно з акумуляторами була запропонована в низці робіт. В роботі [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 роботах [2, 3] була показана ефективність такого з'єднання при роботі на електричних двигунах, але без прив'язки до конкретних транспортних засобів. Більш детальні дослідження подібної системі проведені в роботах [4, 5]. Ці дослідження доводять 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, що показано в роботах [6, 7]. Проте лише для приводів з двигунами постійного струму, які на сьогодні зустрічаються рідше, ніж приводи з асинхронними двигунами, що показано в роботі [8].

В роботах [9, 10] проводилися дослідження системи незалежного живлення електричних транспортних засобів із суперконденсатором на прикладі трамвая, який має свої особливості порівняно з електромобілями. Окрім того, в цих роботах вся увага концентрувалася виключно на джерелі живлення, а електромеханічний перетворювач енергії не брався до уваги.

Тому в даній роботі проводиться оцінка ефективності використання енергії транспортним засобом, в якому в якості електромеханічного перетворювача енергії взято асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, для різних конфігурацій джерела живлення: з суперконденсаторами різної ємності та без них.

5. 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 HCP603650N2C (Китай): номінальна напруга – 370 В, ємність – 1,25 А·год, внутрішній опір 13 Ом, маса – 2,1 кг;

- батарея суперконденсаторів Nesscap ESHSR-0100C0-002R7 (Південна Корея), що складається зі 136-ти послідовно з'єднаних елементів, ємність яких варіюється для різних точок досліджень в межах 25-200 Ф на один елемент.

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

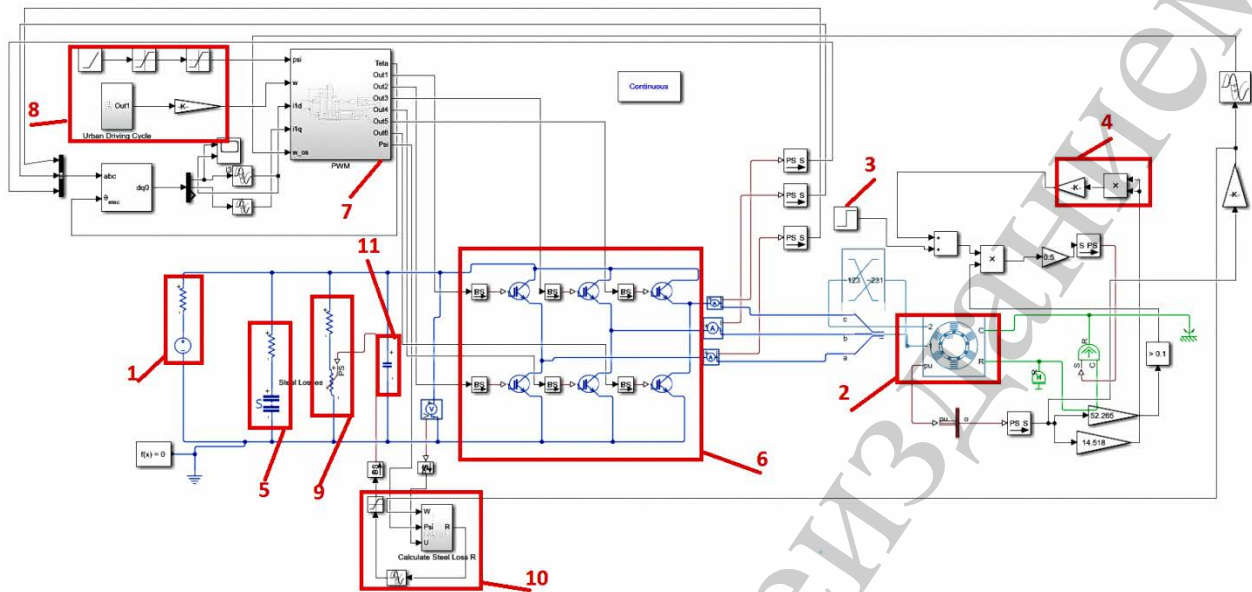


Рис. 1. Модель привода електроскутера в програмному пакеті Matlab/Simulink: 1 – літій-іонний акумулятор; 2 – асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором; 3 – блок завдання постійного моменту навантаження (сила тертя кочення); 4 – схема обчислення моменту опору, пропорційного до квадрату швидкості (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 – ємнісний фільтр перетворювача з боку джерела

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.

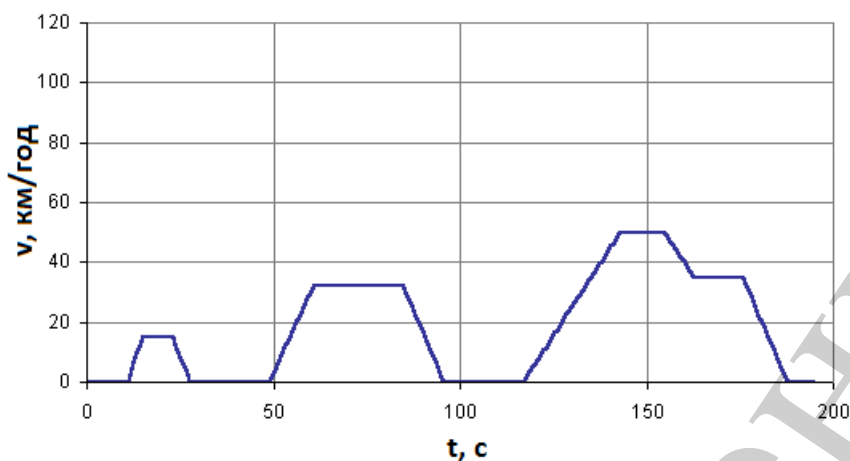


Рис. 2. Міський їздовий цикл The UN/ECE Elementary Urban Cycle

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

6. Результати досліджень

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

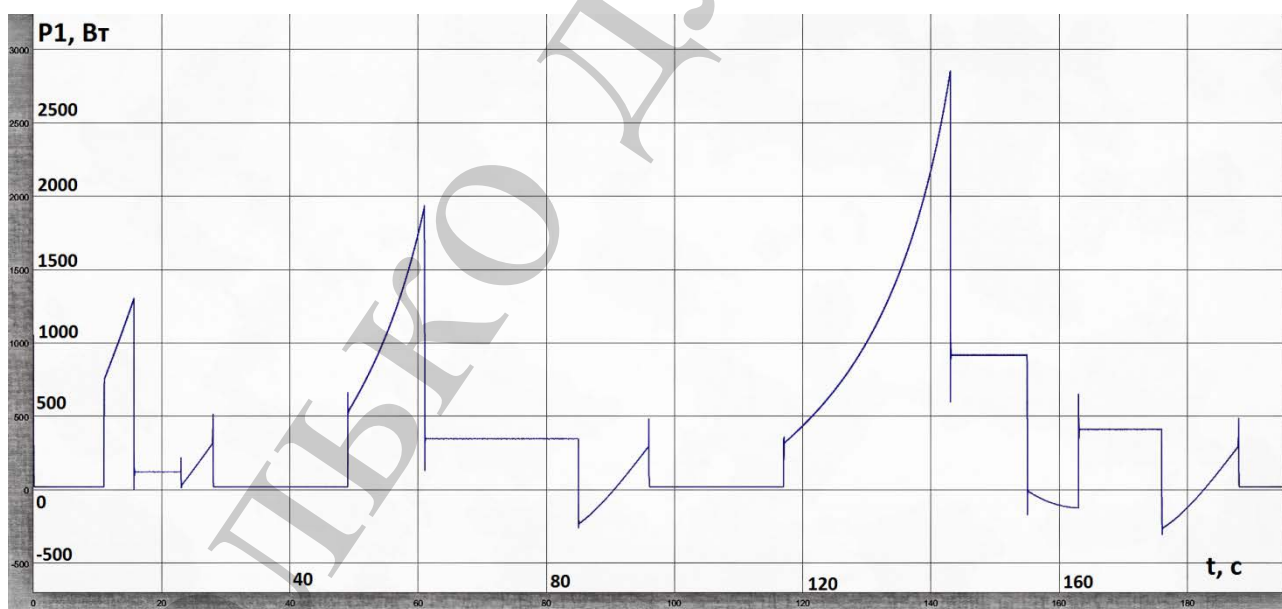


Рис. 3. Залежність споживаної електроскутером потужності від часу з джерелом живлення без суперконденсатора

Як видно з рис. 3, найбільше споживання електроенергії, а відповідно, і найбільші втрати спостерігаються під час розгону транспортного засобу. Підключення суперконденсатора дозволить йому «взяти на себе» навантаження під час розгону та проводити більш ефективне рекуперативне гальмування.

Очевидно, це покращить ККД електропривода та зменшить споживання електроенергії.

Чим більша буде ємність суперконденсатора, тим більше енергії 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 136-ти елементів, включених послідовно для того, аби утворити номінальну напругу батареї у 370 В. Проте змінювалась ємність (а разом з нею і активний опір та маса) окремо взятого елемента. Результати досліджень наведені в табл. 1 та на рис. 4.

Таблиця 1
Залежність ККД електропривода від ємності одного суперконденсатора

с, Ф	ККД
0	0,4004
50	0,4167
75	0,4203
100	0,4224
125	0,4231
150	0,4237
200	0,4237

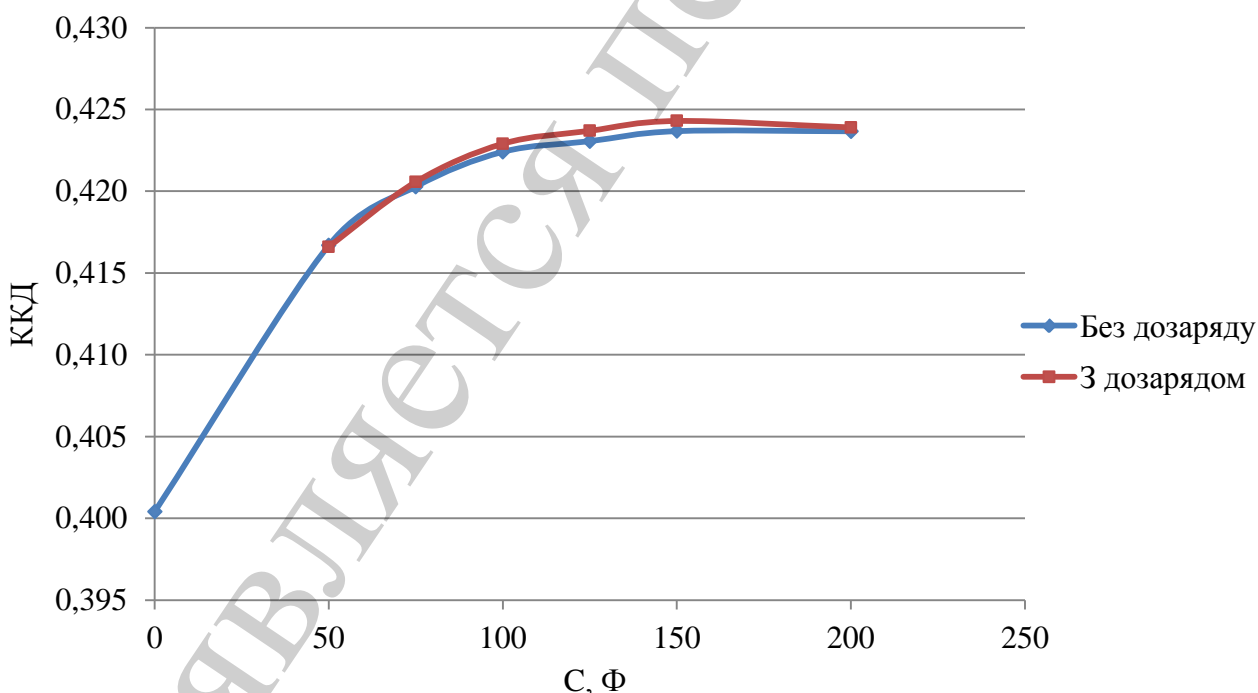


Рис. 4. Залежність ККД електропривода від ємності одного суперконденсатора

Як бачимо з рис. 4, використання суперконденсатора дозволяє покращити усереднене ККД привода електроскутера від 40 % до 42,4 %. Цей результат повністю підтверджує вказані вище припущення. Проте варто зазначити, що для досліджень транспортних засобів ККД не є показовим 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 збільшується, відповідно збільшуючи і «корисне навантаження». Тому більш об'єктивним є показник спожитої енергії за цикл.

Для тих самих параметрів було проведено 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 одного суперконденсатора

C, Ф	W1, Дж
0	75638
50	73223
75	72906
100	72695
125	72888
150	73009
200	73473

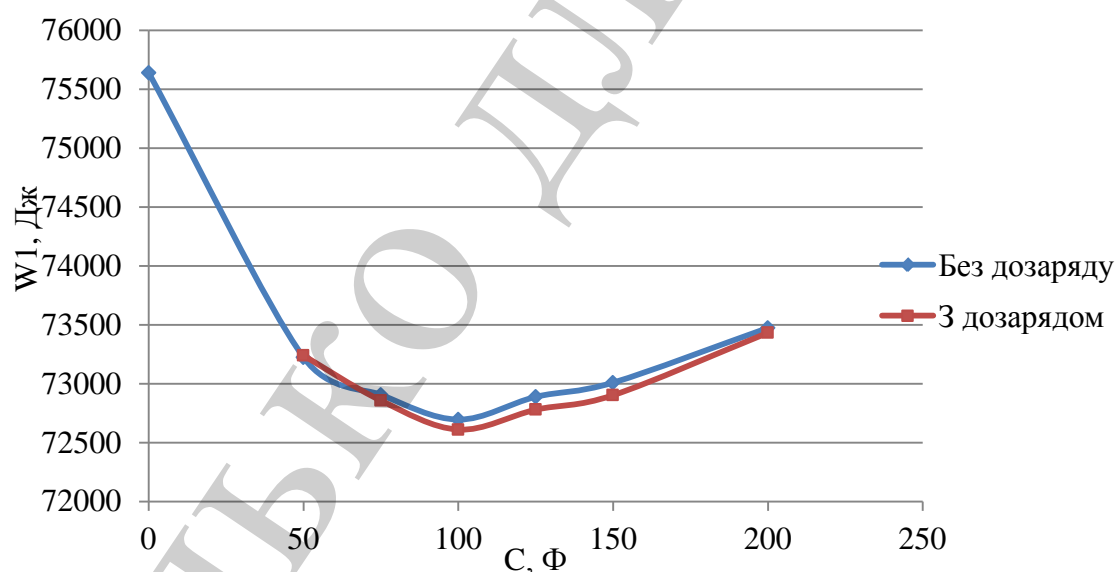


Рис. 5. Залежність спожитої електроприводом енергії від ємності одного суперконденсатора

З рис. 5 очевидно випливає, що існує певне значення ємності, при якому споживання електроенергії транспортним засобом є мінімальним. Для даного електроскутера – це 100 Ф на один елемент або 0,735 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 зображена зміна напруги на суперконденсаторі з часом (при ємності елемента у 100 Ф).

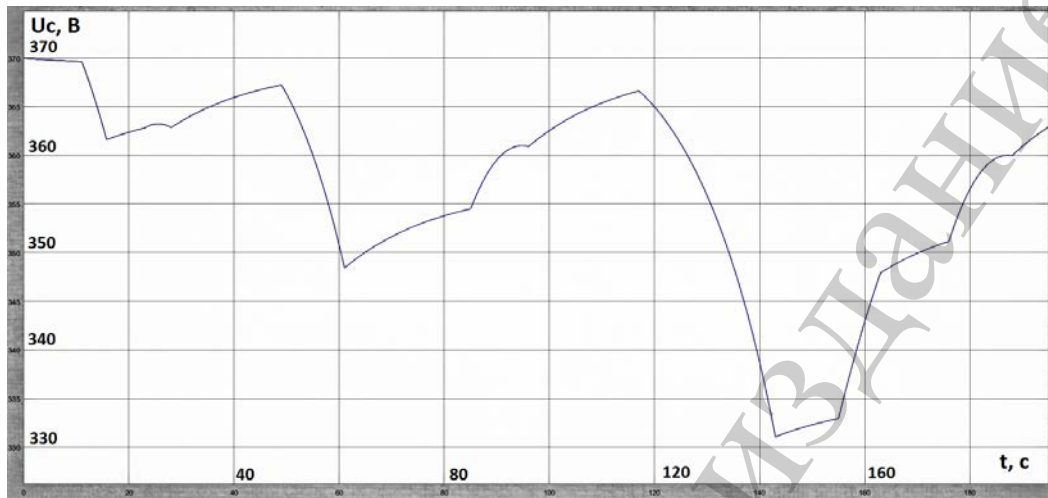


Рис. 6. Залежність напруги на суперконденсаторі від часу при ємності одного елемента 100 Ф

З рис. 6 видно, що під час пауз руху суперконденсатор не встигає дозарядитись до свого початкового значення, 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 тривалістю у 20 секунд (що відповідає усередненим паузам під час руху транспорту містом) до свого номінального значення. На рис. 7 зображена динаміка напруги на суперконденсаторі у такому випадку.

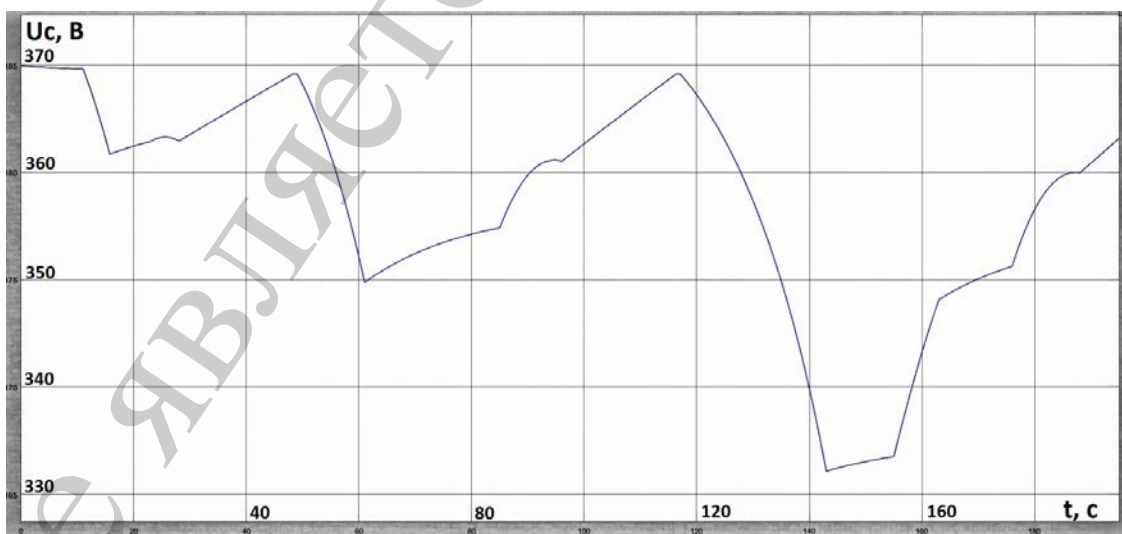


Рис. 7. Залежність напруги на суперконденсаторі від часу при ємності одного елемента 100 Ф при використанні системи дозарядки суперконденсатора під час пауз руху

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

Таблиця 3

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

с, Ф	W1, Дж		dW, %	
	Без дозаряду	З дозарядом	Без дозаряду	З дозарядом
0	75638	-	-	-
50	73223	73239	3,19	3,17
75	72906	72856	3,61	3,68
100	72695	72610	3,89	4,00
125	72888	72779	3,64	3,78
150	73009	72902	3,48	3,62
200	73473	73432	2,86	2,92

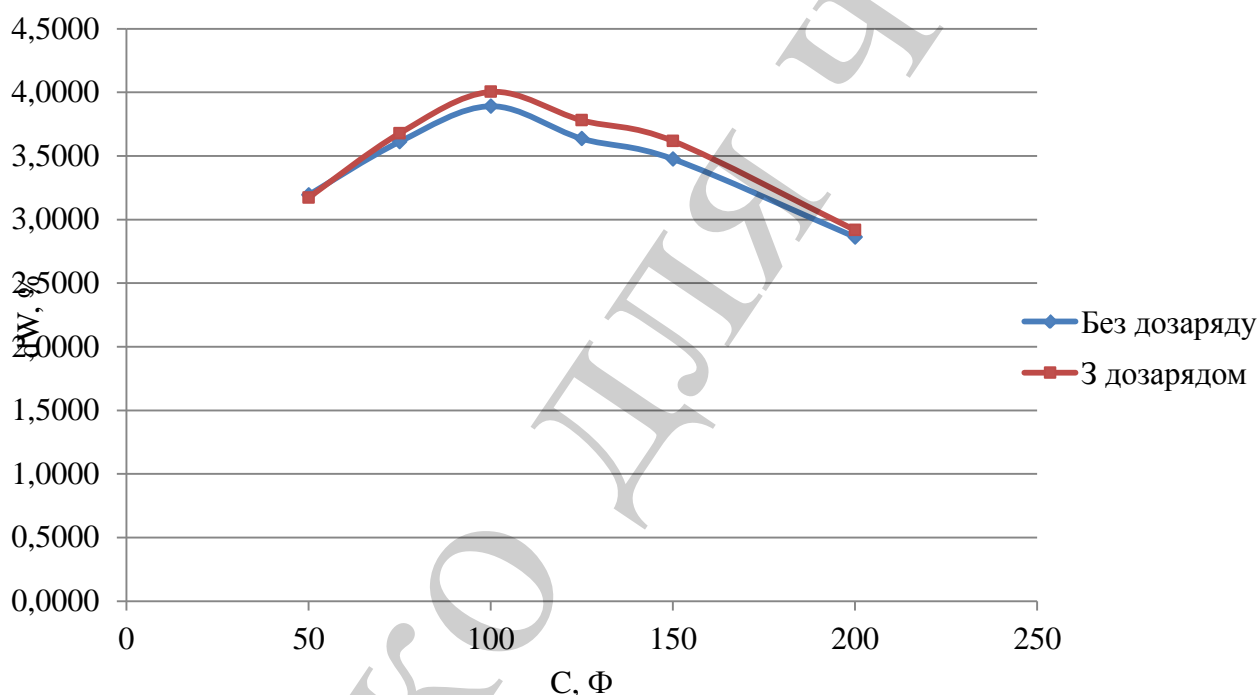


Рис. 8. Залежність зменшення спожитої енергії порівняно з випадком без використання суперконденсатора від ємності елемента використанні системи дозарядки та без неї

З результатів досліджень (рис. 8) видно, що використання системи дозарядки дозволяє трошки зменшити споживання транспортним засобом електроенергії при використанні суперконденсатора. Зазначимо, що ця система не потребує у встановленні додаткових габаритних силових елементів.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Дані дослідження показали, що використання в якості джерела живлення електричних транспортних засобів паралельного з'єднання суперконденсатора та акумулятора дозволяє зменшити споживання енергії до

4,0 % порівняно з живленням виключно від акумулятора при правильному виборі конфігурації джерела.

Weaknesses. Зменшення споживання енергії – не єдина роль, яку суперконденсатор грає в електроприводі. Серед інших також є покращення динаміки транспортного засобу та захист акумулятора від струмів перевантаження. І хоча це тільки підкреслює сильні сторони такого з'єднання, мультизадачність ускладнює вибір оптимальної конфігурації, яка в даній роботі була досліджена виключно з енергетичної точки зору.

Opportunities. Ці дослідження дають можливість обґрунтовано вибирати ємність суперконденсатора для електричних транспортних засобів і відкривають дорогу для економічної оцінки цієї системи. Окрім того, перспективним є дослідження оптимума при врахуванні додаткових задач суперконденсатора, вказаних вище: покращення динаміки транспортного засобу та захист акумулятора від перевантажень.

Threats. Незважаючи на те, що з точки зору енергетичної ефективності ця система є однозначно необхідною, нема гарантії, що цього буде достатньо для переконання побутового споживача, адже більшість транспортних засобів використовуються саме приватними власниками. Наявність додаткової системи керування розподіленим живленням є додатковим послідовним елементом в ланцюжку надійності. І хоча з одного боку суперконденсатор покращує надійність джерела, продовжуючи термін життя акумулятора, додаткова система, яка може вийти з ладу, ймовірно відлякуватиме потенційних споживачів.

8. Висновки

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

2. Проведений аналіз комп'ютерної моделі показав, що використання суперконденсатора само по собі зменшує споживання електричної енергії на величину від 2,9 %. Більше того, для покращення енергоефективності існує оптимальна ємність суперконденсатора, при якій зменшення споживання енергії складає 3,9 %. Дослідження показали, що не завжди збільшення ємності призводить до покращення ефективності, адже разом із ємністю росте і маса транспортного засобу. Таким чином, продемонстрована важливість правильного вибору необхідної конфігурації джерела.

3. Була запропонована система розподілення живлення, при якій суперконденсатор пришвидшено заряджається під час пауз руху. Ця система допомогла покращити економію енергії до 4,0 %

Література

1. Shydlovskiy A. K., Pavlov V. B., Popov A. V. Prymenenye superkondensatorov v avtonomnom akkumuliatornom elektrotransporte // *Tekhnichna elektrodynamika*. Kyiv, 2008. P. 79.
2. A MPC based energy management strategy for battery-supercapacitor combined energy storage system of HEV / Liu S. et. al. // *35th Chinese Control Conference*. 2016. P. 8727–8731. doi: <http://doi.org/10.1109/chicc.2016.7554751>
3. Singh A., Karandikar P. B. 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. doi: <http://doi.org/10.1109/pestse.2016.7516443>
4. Pitorac C. 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. doi: <http://doi.org/10.1109/daas.2016.7492575>
5. Design of a supercapacitor-battery storage system for a waste collection vehicle / Butterbach S. et. al. // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2010. P. 1–6. doi: <http://doi.org/10.1109/vppc.2010.5729238>
6. Ostroverkhov M. Ya., Reutskiy M. O., Trinchuk D. Ya. Doslidzhennia robochykh rezhymiv neliniinoho elektrychnoho kola z avtonomnym dzherelom zhyvlennia v transportnykh zasobakh na prykladi pryvoda elektroskutera // *Problemy enerhoresursozberezhennia v elektrotekhnichnykh systemakh*. Nauka, osvita i praktyka. 2016. Issue 1. P. 75–77.
7. Reutskiy M. O., Trinchuk D. Ia., Deshko A. O. Zastosuvannia superkondensatoriv u pryvodi elektromobilia na bazi dvyhuna postiinoho strumu z nezalezhnym zbudzhenniam: proceedings // *Suchasni problemy elektroenerhotekhniky ta avtomatyky*. Kyiv, 2014.
8. Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications / Yang Z. et. al. // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2015. Vol. 1. Issue 3. P. 245–254. doi: <http://doi.org/10.1109/tte.2015.2470092>
9. Optimal Operation Mode Control and Sizing of a Battery-Supercapacitor Based Tramway / Herrera V. I. et. al. // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2015. P. 1–6. doi: <http://doi.org/10.1109/vppc.2015.7352988>
10. Optimal Energy Management and Sizing of a Battery--Supercapacitor-Based Light Rail Vehicle With a Multiobjective Approach / Herrera V. I. et. al. // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52, Issue 4. P. 3367–3377. doi: <http://doi.org/10.1109/tia.2016.2555790>