

**Тітова Л.Л.,
Войтюк В.Д.**
Національний університет
біоресурсів і
природокористування
України, м. Київ, Україна
E-mail: titovall@ukr.net

**АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ
БАГАТОРЕЖИМНИХ ГІБРИДНИХ
СИЛОВИХ АГРЕГАТИВ АВТОМОБІЛІВ В
УМОВАХ АГРАРНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

[https://doi. 10.5281/zenodo.15427970](https://doi.org/10.5281/zenodo.15427970)

УДК 629.3.016:629.3.018.7

Тітова Л.Л., Войтюк В.Д. Аналіз застосування багаторежимних гібридних силових агрегатів автомобілів в умовах аграрних підприємств.

Анотація. Розкрито перспективи застосування багаторежимних гібридних силових агрегатів автомобілів в умовах аграрних підприємств. Особливо актуальним питанням є собівартість вантажоперевезень за допомогою автотранспорту, особливо якщо взяти до уваги той факт, що вартість паливної сировини неухильно стає вищою. Як відомо, гібриди чудово демонструють свої переваги на вулицях мегаполісів, там, де їм доводиться дуже часто розганятися та гальмувати. У вантажних гібридних транспортних засобах, що працюють у містах з частими розгонами та гальмуваннями, економія палива сягає 25-35%. В результаті виконання даної роботи було запропоновано використовувати ітеративний процес при моделюванні оптимальної конфігурації автомобіля за рахунок комбінованої оптимізації стратегії управління живленням.

Ключові слова: автомобіль, гібрид, експлуатація, силовий агрегат.

Titova L.L., Voytyuk V.D. Analysis of use of multi -mode hybrid power units of cars in agricultural enterprises.

Abstract. The article describes the prospects for the use of multi -mode hybrid power units of cars in agricultural enterprises.. Particularly relevant is the cost of cargo transportation through vehicles, especially if you take into account the fact that the cost of fuel raw materials is steadily higher. As you know, hybrids show their advantages on the streets of metropolitan areas, where they have to accelerate and slow down very often. In freight hybrid vehicles operating in cities with frequent accelerations and inhibitions, fuel savings reach 25-35%. As a result of this work, it was proposed to use an iterative process in modeling the optimal configuration of the car through a combined optimization of power management strategy.

Key words: car, hybrid, operation, power unit.

Постановка проблеми

Споживання такого ресурсу, як паливо, залежить від багатьох факторів. Мають значення транспортні умови, клімат та якість дорожніх покриттів та, нарешті, характер експлуатації автотранспорту [1]. Можна з упевненістю сказати, що особливості рельєфу місцевості та тип пересування транспортного засобу мають важливий вплив на ефективність використання паливних ресурсів [2]. Методики та нормативна документація визначають оптимальний рівень паливних витрат під час руху

транспортного засобу. Але ці нормативи регламентують витрата на рівних дорогах, які, часто зустрічаються у мережі доріг України. Особливо актуальним питанням є собівартість вантажоперевезень за допомогою автотранспорту, особливо якщо взяти до уваги той факт, що вартість паливної сировини неухильно стає вищою.

Популярність гібридних комерційних автомобілів поки що не помітна. Гібриди чудово демонструють свої переваги на вулицях мегаполісів, там, де їм доводиться дуже часто розганятися та гальмувати. У розвізних гібридних транспортних засобів, що працюють у містах з частими розгонами та гальмуваннями, економія палива сягає 25-35%. Важливим моментом застосування гібридної технології стає збереження корисного навантаження транспортного засобу. Адже споряджена маса комерційного автомобіля трохи зростає після того, як його основний ДВЗ буде агрегований з електротрансмісією та пов'язаним із нею важким блоком акумуляторних батарей. ДВЗ-електричні гібридні приводи можуть регенерувати лише 25 % енергії гальмування. Цей незначний відсоток обумовлений небажанням автовиробників встановлювати ємніші батареї в гібридний автомобіль. Якщо змонтувати ємні АКБ, то різко зменшиться вантажопідйомність машини, а ціна ще зросте. Тому конструкторам гібридних вантажівок завжди потрібно шукати компроміс між економічністю, вартістю і збереженням корисного навантаження [3].

Істотне подорожчання автомобіля – це дуже важливий аспект, який сьогодні супроводжує всі гібридні транспортні засоби. Аналітики вважають, що з розвитком нового автомобільного напрямку вдасться знизити ціну, хоча зростання популярності гібридної технології в результаті залежатиме від вартості палива та впровадження більш ефективних приводів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Конструкція силового агрегату, обраного на дослідження, представлена рис. 1. Ця конструкція заснована на рішеннях, описаних у патенті US6478705. Дослідження цієї силової установки представляється цікавим [4].

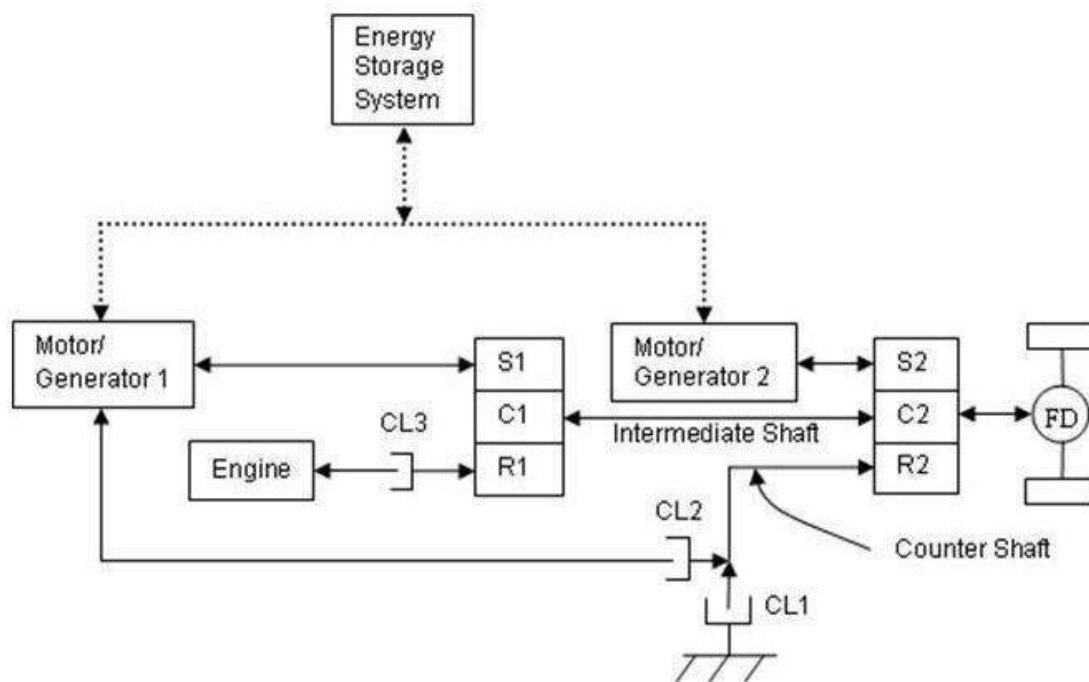


Рис. 1. Структурна схема багаторежимного силового агрегату [US6478705].

Конфігурація багаторежимного силового агрегату містить два пристрої поділу потоків потужності (PSD), три муфти та два мотор-генератори. PSD позначаються мітками "S", "C" і "R" для сонячної шестерні, водила і коронної шестерень відповідно.

У конструкції:

- двигун через муфту (CL3) з'єднаний з коронною шестернею першої планетарної передачі (R1);
- перший мотор-генератор (MG1) безпосередньо з'єднаний із сонячною шестернею першої планетарної передачі (S1), а також через проміжний вал і муфту (CL2) з коронною шестернею другої планетарної передачі (R2);
- перше (C1) та друге (C2) водила безпосередньо з'єднані з карданним валом;
- коронна шестерня другої планетарної передачі (R2) з'єднана з нерухомим елементом через муфту (CL1);
- другий мотор/генератор (MG2) з'єднаний із сонячною шестернею другої планетарної передачі (S2).

Трирежимна структура силової установки здатна працювати як електромобіль (EV) або в одному з двох режимів розподілу потужності [5]. Повністю електричний режим (AER) можливий завдяки конфігурації EV. AER обмежується за допомогою електронного блоку управління (ECU) на низьких швидкостях та потужностях для виключення небажаного виснаження системи накопичення енергії (ESS). AER практично завжди використовується виключно для початку руху транспортного засобу. Робота EV активується шляхом відключення муфти CL3 і подачею системи накопичення енергії ESS енергії на другий мотор-генератор MG2, який, у свою чергу, рухає колеса. Двигун і перший мотор-генератор MG1 вимкнено.

Для розділення потоків потужності муфта CL3 включається разом з однією з двох інших муфт. Двигун також запускається та починає виробляти енергію [6].

Два режими поділу потоків потужності охоплюють умови низької та високої швидкості відповідно. Низько швидкісний режим спрацьовує при включенні муфти CL1 та вимкнення муфти CL2. Ця дія відключає перший мотор-генератор MG1 від другого пристрою поділу потоків потужності PSD, фіксує коронну шестерню другої планетарної передачі R2 і в результаті відбувається поділ вхідного потоку. Цей режим використовується, коли необхідна швидкість не може бути отримана за допомогою AER, але і не є, власне, високою [7].

Дорожня обстановка та бажання водія визначатимуть рівень потужності силового агрегату і, отже, ту швидкість, з якою режими змінюватимуться [8].

Слід зазначити, що на низько-швидкісному режимі схема практично ідентична конструкції автомобіля Toyota Prius THS. Два наявні відмінності в конструкціях полягають у з'єднанні двигуна з коронною шестернею першої зубчастієї передачі і тип вихідного зубчастого зачеплення: у конструкції General Motors використовується PSD з нерухомим коронним зубчастим колесом, а в THS використовується звичайна зубчаста передача [9].

Високошвидкісний режим включається при перевищенні швидкості, позначеної як V-перекл., шляхом відключення муфти CL1 та увімкнення муфти CL2. Це з'єднує перший мотор-генератор MG1 з коронною шестернею другої планетарної передачі R2. Цей режим має два вузли, перший із яких є загальним для низько-швидкісного режиму, а другий, позначений як VS3, має більш високе співвідношення - вихідна/вхідна швидкість. Додатковий вузол забезпечує ефективнішу роботу на високих швидкостях.

Слід зазначити, що представлені ті режими, що забезпечують рух транспортного засобу вперед, хоча також можливі і режими із заднім ходом автомобіля [10].

Режим заряджання системи накопичення енергії ESS, у якому відсутня рух, досягається шляхом застосування механічних гальм для запобігання будь-якому переміщенню. Дві інші важливі швидкості при високошвидкісному режимі позначені як VS2 та VS4. VS2 - це швидкість, де другий мотор-генератор MG2 починає працювати як генератор. VS4 - це та швидкість, після якої обидва мотор-генератори працюють як мотори [11]. Активація цих двох швидкостей залежатиме від стану заряду (SOC) батареї; якщо рівень заряду батареї залишається досить високим, обидва мотор-генератори можуть працювати як мотори для отримання додаткової потужності [12].

Формулювання мети досліджень

Метою даної роботи було розкрити перспективи застосування багаторежимних гібридних силових агрегатів автомобілів в умовах аграрних підприємств.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Дослідження гібридних трансмісій транспортних засобів зосереджено на розробці їх віртуальних прототипів [13].

Інструменти комп'ютерного моделювання, що використовуються для дослідження, є пакетами програмного забезпечення. Так, програмне забезпечення MATLAB від компанії The Math Works застосовують для комп'ютерного моделювання. Це програмне забезпечення широко використовується багатьма галузями промисловості для наукових досліджень. Програмне забезпечення має опціональний набір оптимізації інструментів, який використовується для математичної оптимізації.

Друге програмне забезпечення розроблене Національною лабораторією відновлюваної енергії (NREL) у 1994 році (і постійно вдосконалюється за допомогою процесу з відкритим вихідним кодом) для моделювання та оптимізації транспортних засобів, відомого як ADvanced VehIcle SimulatOR (ADVISOR). ADVISOR був заснований на платформі MATLAB/Simulink, що робить його використання гнучким для поєднання процедур оптимізації. Програмне забезпечення ADVISOR було відкритим вихідним кодом, в якому велика кількість дослідницьких груп зробила свій внесок у бібліотеки моделей, що дозволило інструменту стати галузевим стандартом.

Третій інструмент проектування – LSVTF, у якому можна виконати експериментальну перевірку результатів моделювання та симуляції. Засіб дозволяє відтворювати точні результати контрольованого середовища [14].

Щоб порівняти та проаналізувати продуктивність багаторежимної конфігурації, було проведено імітаційне моделювання, в якому багаторежимна модель порівнювалася з моделями THS, гібридного та звичайного силового агрегату.

Конфігурації транспортних засобів були змодельовані з використанням мови програмування MATLAB/Simulink та за допомогою інтегрованого комплексу для симуляції та аналізу руху автомобіля ADVISOR. Версія, що використовується - це версія 2002 року з відкритим вихідним кодом. ADVISOR дозволяє виконувати стаціонарне моделювання, яке не здатне імітувати перехідні процеси. Тому динамічні процеси не враховуються, і поведінка компонентів між станами, що встановилися, не може бути нами проаналізовано.

ADVISOR містить велику бібліотеку різних типів транспортних засобів, у тому числі можна вибрати необхідний. Базові моделі для THS, гібрида з паралельним проводом та стандартного силового агрегату були прийняті за основу, і згодом змінені, щоб продемонструвати бажані характеристики транспортних засобів, що досліджуються. Багаторежимну модель було розроблено шляхом значної модернізації

моделі THS.

Кузов транспортного засобу, вибраного для моделювання, заснований на вантажівці Kenworth T400, типовому комерційному транспортному засобі. Характеристики автомобіля, включаючи всі компоненти, крім компонентів силової передачі, наведено у таблиці 1. Дві різні ваги базового транспортного засобу розглядаються для випадків, коли транспортний засіб має корисне навантаження (завантажений) або не має корисного навантаження (не завантажений).

Таблиця 1

Характеристики модельованого автомобіля

Компонент	Характеристика
Колісна база	9,75 м
Радіус колеса	0,5 м
Вага транспортного засобу (не завантажена)	5933 кг
Вага транспортного засобу (завантажена)	11333 кг
Коефіцієнт опору коченню	0,00938
Аеродинамічний коефіцієнт	0,7
Площа лобового опору	8,55 м ²

Всі чотири конфігурації, що моделюються, використовують двигун із запаленням від стиснення (CI) з меншим розміром двигуна для трьох гібридних моделей. Моделі багаторежимні та THS мають практично однакові компоненти силових установок, а при паралельній конфігурації включені ті ж моделі двигуна і мотор-генератора.

Оскільки чотири різних конфігурації матимуть різну вагу, була спроба врахувати ці відмінності. У дослідженні, проведеному науково-дослідним інститутом електроенергетики, вага силового агрегату звичайного транспортного засобу була на 20% меншою, ніж у силової установки гібридного транспортного засобу з паралельною схемою. Ця різниця була врахована у цьому дослідженні. Крім того, передбачалося, що силові установки THS та багаторежимні силові установки були важчими, ніж у стандартного транспортного засобу на 25 % та 27 % відповідно. Останні два припущення про вагу були зроблені дещо довільно; однак припущення відображають оцінки ваги додаткових мотор/генераторів (MG), силової електроніки та пристрої розподілу потоків потужності (PSD). Також необхідно звернути увагу, що представлені значення потужності двигунів є номінальними, а не піковими.

Результати досліджень

Для порівняння було обрано різні цикли при їзді, які представляють типові умови роботи важких комерційних автомобілів. Витрата палива вимірювали протягом циклів, представлених на рисунку 1, та описані в посібнику з програмного забезпечення ADVISOR. Ці цикли при їзді включають:

- 1) Міський трафік руху для транспортних засобів великої

вантажопідйомності (UDDSHDV), що представляє ідеалізований міський трафік руху для важких транспортних засобів. Цикл включає середньо або високошвидкісний рух з періодичними повними зупинками. Пікова швидкість циклу становить 93,3 км/годину, а середня швидкість 30,3 км/годину за інтервал 1061 с. Пікове прискорення становить 2,0 м/с².

2) Міський приміський маршрут для важких транспортних засобів (CSHVR) – сукупність коротких поїздок, типових для транспортних засобів великої вантажопідйомності. Швидкості варіюються від повільних приміських швидкостей до найвищих міських швидкостей. Пікова швидкість циклу становить 70,5 км/год та середня швидкість 21,8 км/год. Пік прискорення становить 1,2 м/с², а тривалість циклу 1781 с.

Результати дослідження показують, що багаторежимні зміни є перспективними для використання у важких транспортних засобах з різним ступенем корисного навантаження. Результати моделювання витрати палива представлені рисунку 3.2 для випадку без навантаження і рисунку 3.3 випадку з навантаженням. Як видно з малюнків, модель багаторежимного транспортного засобу перевершила автомобілі THS та автомобілі зі звичайними силовими агрегатами у всіх циклах їзди та за всіма умовами завантаження.

Середня відсоткова різниця між витратою палива, досягнутим у багаторежимному та звичайному виконанні, становить 22,4%, при цьому найбільша різниця спостерігається при CSHVR (при завантаженні) – 57,8%.

Середня відсоткова різниця між витратою палива, досягнутим у багаторежимному та THS-виконанні, становить 65,1%, при цьому найбільша різниця спостерігається для CSHVR (без завантаження) – 88,1%.

Мультирежим не дозволяє знизити витрату палива в середньому порівняно з гібридом із паралельним приводом. Середня відсоткова різниця між багаторежимним та паралельним виконанням становить 3,3%, при цьому найбільша різниця спостерігається для NYCT (з навантаженням) – 20,1%.

Тим не менш, багаторежимне виконання перевершує паралельне у чотирьох випадках: UDDSHDV (без навантаження) – 1,2%; CSHVR (без навантаження) – 11,6%; HWFET (без навантаження) – 9,6%; та HWFET (завантажений) – 4,7%. Таким чином, багаторежимне виконання силової установки є найкращим для пересування шосе.

Паралельна схема гібридного транспортного засобу як найбільш поширена конструкція гібрида для комерційних транспортних засобів продемонструвала найкращу загальну продуктивність і середню відсоткову різницю у витраті палива на 25,6% порівняно зі звичайною конструкцією силового агрегату.

Моделювання багаторежимної конфігурації також необхідно детально проаналізувати. Як приклад було обрано цикл приводу CSHVR із завантаженими та незавантаженими умовами роботи. На рисунку 1 показано потужність двигуна протягом усього циклу їзди. Як і очікувалося, вимоги до потужності двигуна значно вищі за повного завантаження - в середньому на 18,9 кВт.

На рисунку 2 показано потужність другого мотор-генератора MG2 протягом усього циклу руху. Тут також навантажений автомобіль вимагає від мотор-генератора більшої потужності – у середньому на 6,8 кВт вище.

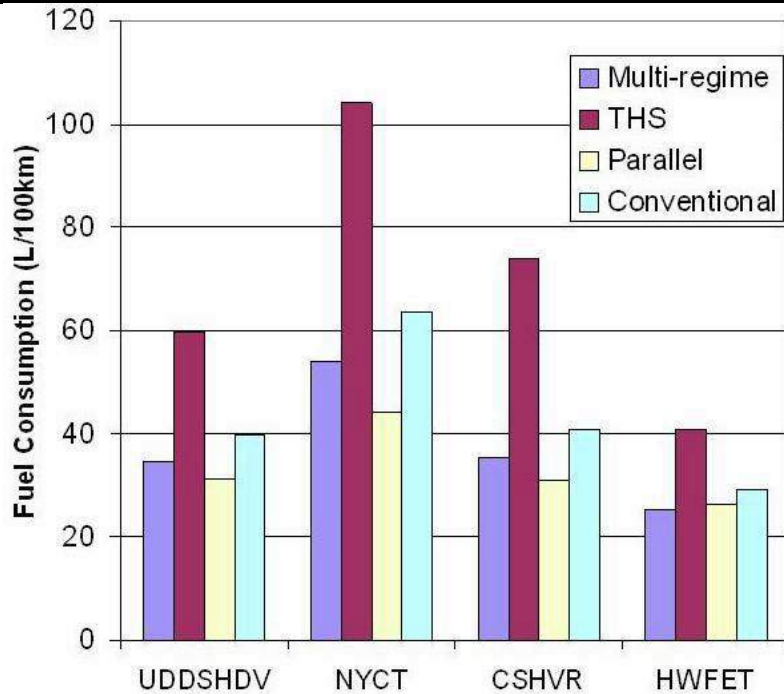


Рис. 1. Результати моделювання ІСЕНV: витрата палива у завантаженому автомобілі.

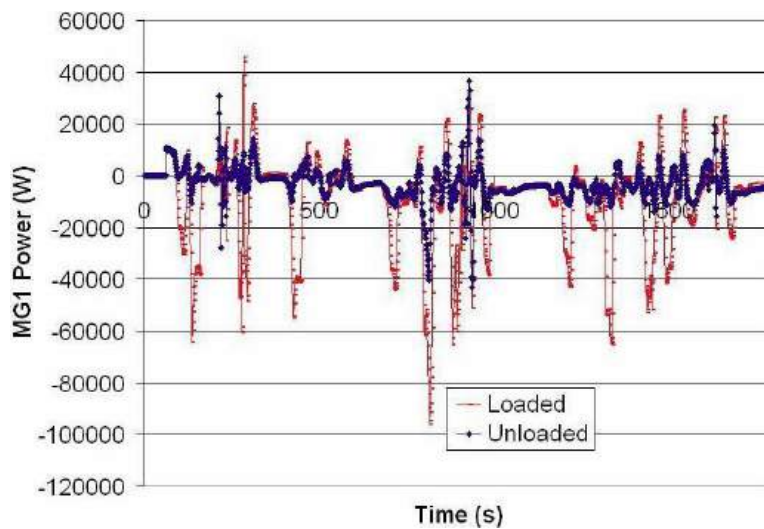


Рис. 2. Результати моделювання ІСЕНV: потужність першого мотор-генератора з багаторежимною конфігурацією силової установки на трасі "Місто-передмістя".

Рис. 3 зображує стан заряду системи накопичення енергії (ESS SOC) протягом усього циклу руху. У цьому випадку середнє значення стану заряду (SOC) для незавантаженого автомобіля несподівано нижче, ніж у завантаженого. Середня різниця між двома випадками становить 1,6%. Невідомо, чи є цей результат похибкою моделювання при керуванні живленням або робота двигуна в незавантаженому автомобілі менш ефективна за умов моделювання.

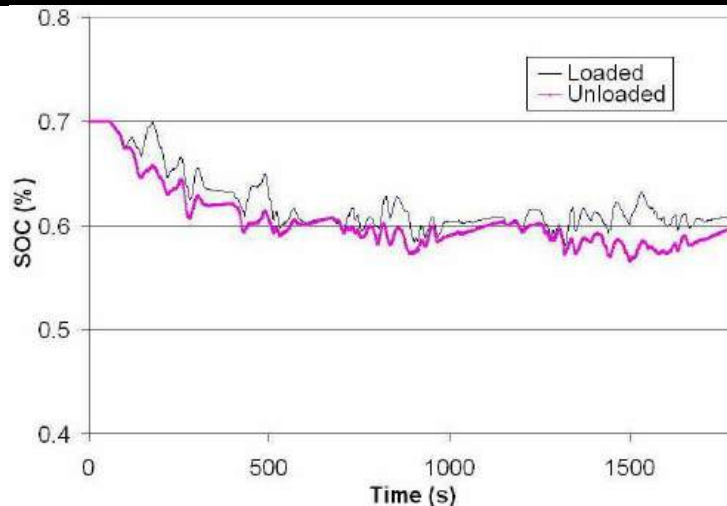


Рис. 3. Результати моделювання ICEHV: ESS SOC-крива з багаторежимною конфігурацією силової установки на трасі "Місто-передмістя".

Результати моделювання показують, що багаторежимна і паралельна конфігурації помітно впливають на поліпшення характеристик витрати палива в порівнянні з базовим стандартним транспортним засобом. Однорежимна конфігурація працює погано на відміну інших трьох. Паралельна конфігурація забезпечує найнижчу витрату палива в цілому, однак рівень, досягнутий при багаторежимній конфігурації в цілому не гірший.

Висновки

1. Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити кілька висновків. По-перше, було показано, що багаторежимна конфігурація є досить перспективним проектом для поліпшення витрати палива, особливо в транспортних засобах з умовами завантаження, що сильно змінюються (наприклад, комерційних вантажівок). Як видно, спроба моделювання показала результати максимально наближені до продуктивності найпоширенішого гібрида з паралельним приводом важких транспортних засобах. Дослідження продемонструвало потенційні переваги вдосконаленої концепції багаторежимного проектування порівняно з однорежимними конфігураціями.

2. По-друге, стратегія керування живленням гібридних транспортних засобів є важливою сферою для потенційного покращення. Оскільки гібриди з паралельним приводом є набагато поширенішими, то і стратегії моделювання та контролю мають мінімальну кількість припущень. Що стосується продуктивності однорежимної конфігурації, то напрошується висновок про те, що існуюча стратегія управління живленням, реалізована в ADVISOR не може бути застосована до великого комерційного транспорту. Результат не говорить про те, що ця конфігурація в принципі не підходить для більш важких транспортних засобів. При правильно вибраній стратегії управління живленням конфігурація може перевершити продуктивність навіть гібрида з паралельним приводом, хоча, ймовірно, вона не зможе покращити витрату палива, досягнуту на гібриді з багаторежимною конфігурацією силової установки.

3. Подальше моделювання має бути зосереджено на розробці стратегії управління живленням багаторежимної конфігурації, тим більше, що вона забезпечує більше можливостей для підвищення продуктивності, ніж однорежимна структура.

Проведені дослідження можуть бути корисними на провідних виробничих майданчиках для вантажних та пасажирських перевезень, які будуть експлуатуватись в

аграрних підприємствах.

Список використаних джерел

1. Khateeb, S. Design i simulation of lithium-ion battery with phase change material thermal management system for electric scooter / S. Khateeb, M. Farid, J. Selman, S. Al-Hallaj // *Journal of Power Sources*. 2014. № 128. P. 292-307.
2. Tesla Roadster [Електронний ресурс]. - URL:<https://www.tesla.com/roadster>.
3. Wouk, V. Hybrids є coming! / V. Wouk // *Proceedings of the 2020 17th International Electric Vehicle Symposium*. - Montreal, QC.
4. L. Horrein, A. Bouscayrol, M. El-Fassi. Thermal energetic model of an Internal Combustion Engine for simulation of a thermal vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Seoul, 2012. P. 978–983.
5. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.
6. Wu, J. Toward the optimization of operating conditions for hydrogen polymer electrolyte fuel cells / J. Wu, Q. Liu, H. Fang // *Journal of Power Sources*. 2016. № 156. P. 388-399.
7. Wang, G. Adaptive Response Surface Method - Global Optimization Method Scheme for Approximation-based Design Problems / G. Wang, Z. Dong // *Journal of Engineering Optimization*. 2021. № 33. P. 707-734.
8. Xue, D. Optimal fuel cell system design considering functional performance and production costs / D. Xue, Z. Dong // *Journal of Power Sources*. 2018. № 76. P. 69-80.
9. Godat, J. Optimization of fuel cell system using process integration techniques / J. Godat, F. Marechal // *Journal of Power Sources*. 2016. № 118. P. 411-423.
10. Frangopoulos, C. Розробка моделі для thermoeconomic design i функціонування optimization of PEM fuel cell system / C. Frangopoulos, L. Nakos // *Energy*. 2015. № 31. P. 1501-1519.
11. A. De Luca, G. Oriolo Modelling and control of nonholonomic mechanical systems. *Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems* (J. Angeles, A. Kecskemethy Eds.). Springer-Verlag, 1995. P. 301–305.
12. Geradin M., Cardona A. Kinematics and dynamics of rigid and flexible mechanisms using finite elements and quaternion algebra. *Computational Mechanics*. 1988. Vol. 4. P. 115–135.
13. Wong J. Y. *Theory of ground vehicles*: 4th ed. Wiley, 2008. 592 p.
14. Classification of agricultural tractors according to the energy efficiencies of the engine and the transmission based on OECD tests / J. Ortiz-Cañavate, J. Gil-Sierra, J. Casanova-Kindelán, V. Gil-Quirós. *Applied Engineering in Agriculture*. 2009. № 25 (4). P. 475–480.

References

1. Khateeb, S. (2014). Design i simulation of lithium-ion battery with phase change material thermal management system for electric scooter / S. Khateeb, M. Farid, J. Selman, S. Al-Hallaj // *Journal of Power Sources*. № 128. P. 292-307.
2. Tesla Roadster [Електронний ресурс]. - URL:<https://www.tesla.com/roadster>.
3. Wouk, V. (2000). Hybrids є coming! / V. Wouk // *Proceedings of the 2020 17th International Electric Vehicle Symposium*. - Montreal, QC.

4. L. Horrein, A. Bouscayrol, M. El-Fassi. (2012). Thermal energetic model of an Internal Combustion Engine for simulation of a thermal vehicle. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul, P. 978–983.
5. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.
6. Wu, J. (2016). Toward the optimization of operating conditions for hydrogen polymer electrolyte fuel cells / J. Wu, Q. Liu, H. Fang // Journal of Power Sources. № 156. P. 388-399.
7. Wang, G. (2021). Adaptive Response Surface Method - Global Optimization Method Scheme for Approximation-based Design Problems / G. Wang, Z. Dong // Journal of Engineering Optimization. № 33. P. 707-734.
8. Xue, D. (2018). Optimal fuel cell system design considering functional performance and production costs / D. Xue, Z. Dong // Journal of Power Sources. № 76. P. 69-80.
9. Godat, J. (2016). Optimization of fuel cell system using process integration techniques / J. Godat, F. Marechal // Journal of Power Sources. № 118. P. 411-423.
10. Frangopoulos, C. (2015). Розробка моделі для thermoeconomic design і функціонування optimization of PEM fuel cell system / C. Frangopoulos, L. Nakos // Energy. № 31. P. 1501-1519.
11. A. De Luca, G. (1995). Oriolo Modelling and control of nonholonomic mechanical systems. Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems (J. Angeles, A. Kecskemethy Eds.). Springer-Verlag. P. 301–305.
12. Geradin M., Cardona A. (1988). Kinematics and dynamics of rigid and flexible mechanisms using finite elements and quaternion algebra. Computational Mechanics. Vol. 4. PP. 115–135.
13. Wong J. Y. (20087). Theory of ground vehicles: 4th ed. Wiley, 2008. 592 p.
14. J. Ortiz-Cañavate, J. Gil-Sierra, J. Casanova-Kindelán, V. Gil-Quirós (2009). Classification of agricultural tractors according to the energy efficiencies of the engine and the transmission based on OECD tests. Applied Engineering in Agriculture. № 25 (4). P. 475–480.