

УДК 629.3+504

КОНЦЕПТУАЛЬНІ РІШЕННЯ СТВОРЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

О.П. Смирнов, доцент, к.т.н., ХНАДУ

Анотація. Наведено теоретичне обґрунтування проблеми створення екологічно чистих автотранспортних засобів з електроприводом. Розглянуто різні принципи побудови гібридних силових установок автотранспортних засобів, проаналізовано сучасні накопичувачі енергії.

Ключові слова: автотранспортний засіб, гібридний автомобіль, гібридна силова установка, електропривод, накопичувачі енергії.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ СОЗДАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

О.П. Смирнов, доцент, к.т.н., ХНАДУ

Аннотация. Приведено теоретическое обоснование проблемы создания экологически чистых автотранспортных средств с электроприводом. Рассмотрены различные принципы построения гибридных силовых установок автотранспортных средств, проанализированы современные накопители энергии.

Ключевые слова: автотранспортное средство, гибридный автомобиль, гибридная силовая установка, электропривод, накопители энергии.

CONCEPTUAL SOLUTIONS OF ENVIRONMENTALLY CLEAN ELECTRIC DRIVE VEHICLES CREATION

O. Smirnov, Associate Professor, Candidate of Technical Science, KhNAHU

Abstract. The theoretical grounding of the problem of creating environmentally clean vehicles with electric drive is described. Various principles of vehicles hybrid power unit creation are considered. Modern energy storage devices are analyzed.

Key words: vehicle, hybrid car, hybrid power unit, electric drive, energy storage.

Вступ

Автомобіль XXI ст. має бути екологічно чистим. У всіх розвинутих країнах світу реалізуються державні програми з розвитку екологічно чистого, ресурсозберігаючого та економічного транспорту. Наприклад, у США в серпні 2011 р. було прийнято новий закон, який обмежує середню витрату палива легкових автомобілів, які будуть продаватися на ринку США з 2025 р., до 4,32 л на 100 км. Екологічна чистота і паливна економічність автомобілів стають ключовою проблемою розвитку сучасного автомобілебудування. У сучасних автомобілях екологічна та економічна ефективність впроваджується за раху-

нок використання електричного привода. До таких автомобілів відносяться: електромобілі та гібридні автомобілі. Альтернативою традиційному автомобілю з двигуном внутрішнього згоряння в майбутньому стане екологічно чистий автомобіль з нульовими викидами шкідливих речовин на базі електричного привода.

Аналіз публікацій

Аналіз перспективних напрямів розвитку екологічно чистих технологій показав, що існує декілька підходів до створення екологічно чистого та енергозберігаючого автотранспортного засобу (АТЗ). До найбільш

перспективних АТЗ відносять електромобілі. Однак джерела енергії електромобіля – акумуляторні батареї (АКБ) – поки не можуть конкурувати з бензином і дизельним паливом за щільністю енергії. Без якісного стрибка технічних характеристик тягових акумуляторних батарей електромобілі будуть мати обмежене застосування (перевезення за заданими маршрутами, виставкові, паркові та інші закриті зони). Поки вони, порівняно з традиційними автомобілями, поступаються їм за технічними характеристиками, вартістю та зручністю експлуатації.

На сьогодні конкурентоспроможний і порівняно екологічно чистий автомобіль можна сконструювати за схемою гібридної силової установки, яка включає в себе двигун внутрішнього згоряння, тяговий електричний двигун, перетворювач напруги, накопичувач енергії (акумуляторні батареї різних електрохімічних систем, суперконденсатори, водневі паливні елементи, маховики, балони зі стисненим повітрям або рідким азотом, фотоелектричні перетворювачі та ін.). Дослідження, що ведуться в ХНАДУ, підтверджують техніко-економічну доцільність створення автомобіля з гібридною силовою установкою, який більш ніж у два рази є економічнішим та екологічно чистішим, ніж базовий автомобіль із ДВЗ [1–3].

Мета та постановка задачі

Метою даного дослідження є підвищення екологічної чистоти та економічної ефективності автотранспортних засобів за рахунок втілення в базовий автотранспортний засіб гібридної силової установки на базі електропривода та з використанням різних типів накопичувачів енергії.

Задачами дослідження є аналіз і перспективи розвитку екологічно чистих автотранспортних засобів з електроприводом, які використовують різні типи накопичувачів енергії, та визначення концепції створення гібридних силових установок для автомобілів.

Концепція створення гібридних автомобілів з електроприводом

Для визначення концепції створення автотранспортних засобів з електроприводом проведемо аналіз розвитку екологічно чистих транспортних засобів і розглянемо перспек-

тиви їх вдосконалення. Створення сучасних автомобілів, з метою зниження викидів токсичних речовин і підвищення економічності силових енергоустановок, йде різними шляхами. Це і вдосконалення систем упорскування і згоряння палива традиційних ДВЗ, застосування каталізаторів і нейтралізаторів, це і розробка новітніх енергозберігаючих технологій та систем на транспорті, і створення альтернативних енергоустановок, які містять екологічно чисті двигуни і накопичувачі енергії.

Проте заходи щодо вдосконалення ДВЗ виявилися не дуже ефективними, особливо при експлуатації автомобілів у великих мегаполісах у заторах. Середня швидкість автомобілів на завантажених ділянках дороги не перевищує 20 км/год, а потужність ДВЗ використовується менш ніж на 10%. Крім того, сам характер руху в місті є послідовністю прискорень і гальмувань. В результаті кінетична енергія автомобіля розсіюється в гідравлічних гальмівних системах.

Необхідність створення силової установки з електроприводом, який дозволяє використовувати рекуперацію гальмівної енергії, назріла вже давно, але була обмежена, з одного боку, неминучим зростанням вартості автомобіля, з іншого – недостатнім технологічним рівнем розвитку екологічно чистих технологій для автомобільного транспорту та відсутністю енергоємних накопичувачів енергії.

Основна ідея гібридної технології на автотранспорті полягає в тому, щоб мати не одну, а дві чи більше енергетичних установок, які синергетично оптимізовані для виконання прискорення, економічного руху на постійній швидкості і рекуперації енергії при гальмуванні. ДВЗ у звичайному автомобілі, з одного боку, повинен забезпечувати достатню потужність для декількох секунд прискорення, підтримувати крейсерську швидкість на автостраді і при цьому економічно працювати. Тому великий об'єм ДВЗ, необхідний для інтенсивного прискорення, стає надмірним на трасі, оскільки ДВЗ меншого об'єму є економічно ефективним та ідеально підходить для замського циклу. Використання гібридних силових установок задовольняє ці протиріччя та дозволяє підвищити екологічні, економічні та динамічні характеристики автотранспортних засобів.

Гібридна силова установка автомобіля – система ефективної синергетичної взаємодії ДВЗ і тягових електричних машин. Завдяки комбінованому використанню потужності ДВЗ і електричних машин гібридні автомобілі мають підвищений енергетичний потенціал і відповідають найжорсткішим екологічним нормам.

Синергетичний підхід до створення силової установки автомобіля дозволяє виконати екологічні вимоги «Євро-5» і навіть більш жорсткі норми, знизити витрату моторного палива, зробити автомобіль більш інтелектуальним і доброзичливим щодо водія і пасажирів, підвищити рівень комфорту і безпеки, поліпшити тягово-швидкісні характеристики автомобіля [4].

Секрет поліпшення паливно-економічних, екологічних та тягово-швидкісних характеристик гібридного автомобіля полягає в тому, що в екстремальних режимах роботи ДВЗ, коли споживання палива і токсичність вихлопу є максимальною, електрична силова установка допомагає або повністю замінює ДВЗ. А традиційна система керування самого ДВЗ налаштовується на економічно-екологічний режим роботи. При гальмуванні або русі під ухил за інерцією тягові електричні машини переходять у генераторний режим і через перетворювач напруги (інвертор) здійснюють заряд високовольтної акумуляторної батареї або іншого накопичувача енергії. Крім того, замість стандартного генератора встановлюють високовольтний стартер-генератор, який при роботі ДВЗ заряджає високовольтну батарею, а за потреби здійснює його автоматичний запуск.

Автомобіль Toyota Prius, найбільш масовий з легкових гібридних автомобілів, сконструйований за оригінальною гібридною бензоелектричною технологією Toyota Hybrid Synergy Drive, забезпечує зниження середньої витрати палива на 43 % (за даними виробника). Цей автомобіль є лідером за кількістю продажів у Японії кілька років поспіль. А по всьому світу реалізовано понад 3 млн автомобілів Toyota Prius різних модифікацій. У гібридних автомобілях Toyota Prius 2010 р. випуску передбачена можливість заряду високовольтних нікель-метал-гідридних акумуляторних батарей від стаціонарних джерел електроенергії, так звана система plug-in hybrid.

Автомобілі Toyota Prius 2011 р. комплектуються новими літій-іонними акумуляторними батареями замість нікель-метал-гідридних, при цьому пробіг автомобіля на електротязі збільшився з 2 до 20 км. Для моделі Toyota Prius 2011 р. в якості опції можна придбати сонячну батарею SunRoof, яка додає силовій установці потужності 250 Вт. SunRoof виконано у вигляді звичайного люка, і вона виконує його функції. Сонячний Solar Toyota Prius на 100 км шляху в сонячний день споживає 2–3 л бензину за рахунок використання безкоштовної сонячної енергії замість 3,5–4,5 л звичайного Prius. Тільки на електричній тязі Solar Toyota Prius може подолати вже 32 км. Тому зараз сонячна батарея стає популярною у списку опцій до автомобіля, оскільки обсяг продажів на опцію SunRoof зріс з 2–3 % до 10–12 %.

Екологічна чистота електромобілів та гібридних автомобілів є відносною, тому що тягові акумуляторні батареї заряджаються енергією електростанцій, які самі завдають шкоди навколишньому середовищу. А сонце – це джерело безкоштовної енергії. Тому використання сонячних батарей для руху транспортних засобів відкрило новий напрям автомобілебудування – електромобіль на сонячних батареях (геліомобіль або сонцемобіль). Для живлення тягових електричних двигунів та підзарядки акумуляторів використовуються фотоелектричні перетворювачі. Як звичайний електромобіль сонцемобіль пересувається вночі, а вдень йому вистачає енергії сонця. Але сонячний транспорт буде дійсно конкурувати з традиційним, коли ефективність доступних за ціною сонячних елементів буде хоча б 40–50 %. На сьогодні ККД звичайних фотоелектричних перетворювачів у сонячний день становить 10–15 %.

Проаналізуємо основні недоліки сучасних серійних бензоелектричних гібридних силових установок. Як правило, вони отримують живлення від високовольтних акумуляторних батарей. При цьому особливу увагу приділятимемо процесу рекуперації кінетичної енергії автомобіля в режимі гальмування.

Основними завданнями при створенні екологічно чистих та енергозберігаючих автотранспортних засобів є:

- економія моторного палива;
- підвищення екологічної чистоти;

- можливість отримання додаткової потужності при розгоні автомобіля або при русі на підйом;
- повернення кінетичної енергії автомобіля при гальмуванні за рахунок використання ефективної системи рекуперації;
- економічне використання енергії силової установки в замському режимі руху.

Аналіз сучасного стану розвитку автотранспортних засобів показав, що нині провідними виробниками розроблено низку альтернативних екологічно чистих накопичувачів і джерел енергії, які можна використовувати в силовій установці автомобілів:

- водневі паливні елементи;
- електрохімічні акумулятори енергії (тягові високовольтні акумуляторні батареї);
- суперконденсатори (іоністори);
- інерційні накопичувачі енергії (маховики), в яких енергія запасється у вигляді механічної енергії обертового диска або циліндра.

Спільною особливістю альтернативних екологічно чистих накопичувачів і джерел енергії (крім водневих паливних елементів) є відносно низька питома енергоємність їх акумуляторів, яка має тенденцію до істотного зростання (особливо у літій-іонних акумуляторних батареях). У табл. 1 наведено порівняльний аналіз питомої енергоємності альтернативних джерел та накопичувачів енергії, які можна використовувати для створення екологічно чистих автотранспортних засобів, з урахуванням ККД перетворення енергії.

Питома енергоємність паливних елементів досягає 38 кВт·год/кг, що в 3 рази перевищує енергоємність вуглеводневого палива, а з урахуванням достатньо високого ККД водневих установок щільність енергії в 5–7 разів є вищою, ніж в установках із ДВЗ. Але висока вартість водневих установок і відсутність

інфраструктури заправних станцій не дозволяє сьогодні розвинути цьому напрямку автомобілебудування. Крім того, паливні елементи не мають змоги заряджатися, отже їх не можна застосовувати для рекуперації гальмівної енергії автомобіля.

Акумуляторні батареї не можуть використовувати свою ємність на 100 %. Свинцево-кислотні батареї (Lead Acid) незадовільно переносять розряд більш ніж на 50 %, нікель-метал-гідридні – на 80 %, літій-іонні – на 90 %. Дослідження, проведені в лабораторії гібридних автомобілів кафедри автомобільної електроніки ХНАДУ, показали, що високовольтна нікель-метал-гідридна акумуляторна батарея автомобіля Toyota Prius II використовується всього на 10 %. ДВЗ автоматично включається при зниженні заряду до 80 % від загальної ємності, а відключається при наборі 90 %. Решта 10 % ємності використовується для рекуперації гальмівної енергії автомобіля.

Ефективність акумуляторних батарей будь-якого електрохімічного типу при рекупераційному гальмуванні автомобіля обмежена неодноразовим перетворенням енергії з однієї форми в іншу:

- кінетична енергія гальмування автомобіля перетворюється в електричну енергію за допомогою тягової електричної машини, яка працює в режимі генератора (рис. 1);
- електрична енергія через інвертор заряджає високовольтну акумуляторну батарею, в якій перетворюється в хімічну енергію;
- при розряді батареї хімічна енергія перетворюється в електричну енергію;
- електрична енергія через інвертор знову подається в електричну машину, що працює вже в режимі двигуна для привода автомобіля, і, таким чином, знову перетворюється в механічну енергію.

Таблиця 1 Питома енергоємність альтернативних накопичувачів енергії

Джерело енергії	ККД, %	Питома енергоємність, кВт·год/кг	Питома енергоємність з урахуванням ККД, кВт·год/кг
Водневі паливні елементи	50–60	38	19–23
Бензин, дизельне паливо, газ	25–30	11–14	2,75–4,2
Свинцево-кислотна батарея	70–85	0,02–0,04	0,014–0,034
Нікель-метал-гідридна батарея	65–80	0,06–0,08	0,039–0,064
Літій-іонна батарея	80–95	0,1–0,22	0,08–0,21
Суперконденсатори	90–98	0,003–0,01	0,0027–0,0098
Маховики різного типу	90–99	0,05–4,17	0,045–4,08

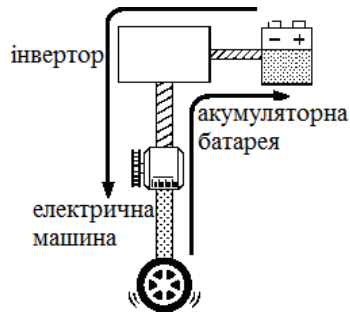


Рис. 1. Перетворення енергії в гібридній силовій установці при рекуперації

В результаті чотирьох перетворень енергії знижується загальний рівень ефективності бензоелектричної гібридної силовій установці синергетичного автомобіля. Наприклад, якщо ККД електричної машини (двигун/генератор) становить 80 % за пікових навантажень, ККД інвертора – 80 %, ККД акумуляторної батареї у процесі заряд/розряд – 75 % за високої потужності, то загальний ККД системи рекуперації гібридного автомобіля складає всього 23 %. Це теорія, а на практиці ефективність системи рекуперації, наприклад, автомобіля Toyota Prius, не перевищує 5 % в міському циклі руху та практично відсутня при русі по автостраді.

Низька ефективність системи рекуперації гібридного автомобіля зумовлена тим, що термін заряду АКБ при рекуперативному гальмуванні на зтяжному ухилі складає максимум декілька хвилин, що зовсім недостатньо для відновлення запасу енергії акумуляторними батареями, тому сама конструкція бензоелектричних гібридних силових установок із хімічними акумуляторними батареями неминуче зазнає суттєвих втрат кінетичної енергії автомобілів.

У російському «Е-мобиле» в якості буферного накопичувача енергії планується використовувати суперконденсатори. Запас ходу від енергії блока суперконденсаторів масою

100 кг становить приблизно 2 км (за даними виробника). Основною перевагою суперконденсаторів є те, що вони можуть швидко накопичувати і віддавати електричну енергію. Ця властивість суперконденсаторів ефективно використовується в режимі рекуперації [5].

Порівняно з акумуляторами, суперконденсатори мають великий ресурс, не вимагають технічного обслуговування, добре працюють у широкому діапазоні температур. Використання суперконденсаторів дозволяє вирішити ряд завдань, які не можуть бути вирішені за допомогою традиційних акумуляторних джерел енергії. У табл. 2 представлено порівняльні характеристики конденсаторів і акумуляторних батарей різних електрохімічних систем.

Основними перевагами накопичувача енергії конденсаторного типу є:

- висока питома вагова й об'ємна потужність;
- стійкість до значних перевантажень за напругою;
- можливість 100 % перезаряду;
- безпека в експлуатації;
- низький рівень саморозряду;
- широкий діапазон робочих температур;
- не вимагає технічного обслуговування (ТО) при експлуатації;
- висока надійність.

Маховики, як і суперконденсатори, використовуються в гібридних силових установках автомобілів. Питома вагова потужність сучасних маховиків досягає 3 кВт/кг. Широко використовуватися маховики стали у спортивних і гоночних автомобілях класу «люкс», наприклад, в автомобілях Porsche GT3 R Hybrid, Jaguar XF, Jaguar XJ. Висока ефективність накопичувачів енергії на маховиках дозволяє їх запровадити навіть у знаменитих лондонських двоповерхових автобусах, які почнуть випускати з 2012 р.

Таблиця 2 Порівняльні характеристики накопичувачів електроенергії

Тип джерела енергії Параметр	Акумулятори			Суперконденсатори
	Lead Acid	NiMH	LiIon	
Питома енергоємність, Вт·год/кг	30–60	40–80	100–220	3–10
Питома вагова потужність, Вт/кг	100–300	500–1300	800–3000	1500–12000
Ресурс, циклів розряд-заряд	100–400	300–2000	500–2500	>1 млн
Термін служби, р.	2–8	2–15	5–10	>20
Робоча температура, °C	– 30–45	– 40–60	– 30–60	– 50–70

У перегонах «Формула-1» теж розвивається нове покоління гібридних силових установок з маховиками – це дозволяє гончим болідам бути не тільки динамічними, але й енергетично ефективними та екологічно чистими. Протягом декількох секунд гальмування маховик встигає повністю зарядитися, а при розгоні – ефективно використовувати отриману потужність.

Основні переваги використання маховичних накопичувачів енергії на сучасних АТЗ:

- екологічна чистота силової установки;
- безшумний хід;
- маховики, на відміну від АКБ, мають властивість швидко накопичувати механічну енергію, наприклад, накопичувати рекуперативну енергію автомобіля при гальмуванні; протягом декількох секунд гальмування маховик здатен повністю розігнатися до максимальної швидкості;
- маховики, на відміну від АКБ, мають властивість швидко віддавати механічну енергію, наприклад, для надання прискорення автомобілю при руху з місця, обгоні або на виході з повороту;
- маховики, на відміну від АКБ, мають можливість 100 % віддавати енергію. Дослідження експлуатації гібридних силових установок дозволяють зробити висновок, що на практиці використовується лише 10–20 % ємності АКБ;
- маховики, на відміну від АКБ, мають практично необмежену кількість циклів заряду-розряду;
- маховики, на відміну від АКБ, не обмежені навантаженням;
- сучасні маховики мають високу питому енергоємність;
- відсутність забруднення навколишнього середовища як при експлуатації, так і при утилізації;
- високий ККД (до 99 %);
- тривалий термін служби (більше 20 р.);
- відсутність витрат на ТО.

Висновки

Електромобілі та гібридні автомобілі використовують електричний привод. В якості джерела енергії для електропривода застосовують: водневі паливні елементи, акумулятори різних електрохімічних систем, суперконденсатори і маховики. Використання автомобіля на обмежених відстанях як електромобіля підвищує споживчі якості АТЗ.

Подальшим розвитком ідеї екологічно чистого та енергозберігаючого автомобіля може бути розробка автомобілів нового типу з ДВЗ невеликого об'єму й електросиловою установкою, що одержує живлення від літій-іонних акумуляторних батарей, суперконденсаторів або маховиків.

У перспективі автомобіль стане екологічно чистим з нульовими викидами шкідливих речовин. При цьому всі системи автомобіля (привод, гальма, рульове керування, підвіска та ін.) будуть мати електричне керування.

Література

1. Гібридні автомобілі: монографія // О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, А.В. Гнатов та ін. – Х. : ХНАДУ, 2008. – 328 с.
2. Бажинов А.В. Концепция создания экологически чистого автомобиля // О.В. Бажинов, О.П. Смирнов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СХУ імені В. Даля. – 2006. – №7. – С. 15–19.
3. Смирнов О.П. Теоретические основы повышения топливной экономичности автомобиля за счет использования гибридной энергетической установки / О.П. Смирнов // Транспорт, екологія – сталий розвиток: матеріали XII міжнар. наук.-техн. конф., 18–20 травня 2006 р. – Варна, 2006. – С. 80–85.
4. Смирнов О.П. Синергетичний підхід до створення силової установки автомобіля // О.П. Смирнов // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – Х. : ХНАДУ. – 2007. – Вып. 37. – С. 131–133.
5. Смирнов О.П. Використання конденсаторів великої ємності для забезпечення оптимальних параметрів роботи акумуляторних батарей гібридних автомобілів / О.П. Смирнов, О.С. Панікарський, В.С. Боженів, А.О. Смирнова // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. – 2009. – №3. – С. 50–55.

Рецензент: О.Я. Ніконов, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 5 грудня 2011 р.