

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

СМИРНОВ ОЛЕГ ПЕТРОВИЧ



УДК 629.3

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІБРИДНИХ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація
та ремонт засобів транспорту

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Бажинов Олексій Васильович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри автомобільної електроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шаша Ігор Костянтинович,
Національна академія Національної гвардії України, професор кафедри експлуатації та ремонту автомобілів та бойових машин;

доктор технічних наук, професор
Далека Василь Хомич,
Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, професор кафедри електричного транспорту

доктор технічних наук, доцент
Клец Дмитро Михайлович,
Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», професор кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури

Захист відбудеться «5» жовтня 2016 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Петровського, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (61002, Україна, м. Харків, вул. Петровського, 25)

Автореферат розісланий «2» вересня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Павленко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дисертаційна робота вирішує важливу науково-прикладну проблему підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів за рахунок раціонального використання двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електричного двигуна. Перспективним напрямком розвитку автомобілебудування є створення електромобілів. Але на сьогодні електромобілі в порівнянні з автомобілями з ДВЗ поступаються за вартістю, технічними характеристиками та зручністю експлуатації, а джерела їх енергії – тягові акумуляторні батареї (ТАБ) – поки не можуть конкурувати з бензином за щільністю енергії. Тому на сучасному етапі доцільно розробляти гібридні транспортні засоби, які об'єднують позитивні якості ДВЗ й електричних двигунів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» і є складовою частиною науково-дослідної роботи кафедри автомобільної електроніки ХНАДУ.

Дисертація спрямована на поліпшення паливо-економічних показників дорожніх транспортних засобів за рахунок розроблення науково-прикладних основ підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів. Наукові положення, розробки, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, використані при виконанні господарсько-договірних науково-дослідних робіт (НДР) та НДР, виконаних у відповідності з Державним замовленням (ДЗ) та держбюджетними НДР МОН України:

– «Модернізація автомобіля ЗАЗ у гібридний варіант» (2015–2016 рр.), № держ. реєстрації 0115U003266 (поточна), відповідальний виконавець;

– «Моделювання режимів роботи гібридної силової установки для транспортних засобів» (04.2013–06.2013), № держ. реєстрації 0113U007635, керівник;

– «Розробка гібридної силової установки дорожнього транспортного засобу» (2012–2013 рр.), № держ. реєстрації 0112U001241, відповідальний виконавець, ефективність використання бюджетних коштів – 1,526;

– «Розроблення тягового електропривода для легкових автомобілів» (12.2013–11.2014), № держ. реєстрації 0115U002659, відповідальний виконавець;

– «Створення синергетичних систем електромобіля» (2009–2010 рр.), № держ. реєстрації 0109U001352, відповідальний виконавець;

– «Розробка та дослідження універсальної теорії управління екологічно чистими транспортними засобами з різноманітними схемами» (2006–2008 рр.), № держ. реєстрації 0106U001363;

– «Розробка адаптивних систем керування трансмісій транспортних машин» (2008–2009 рр.), № держ. реєстрації 0108U001282;

– ДЗ/306-2008 «Створення та впровадження інтелектуальної системи управління трансмісією автомобіля», (2008–2009 рр.), № держ. реєстрації 0108U007435;

– ДЗ/96-2006 «Розроблення та дослідження екологічно чистого автомобіля з гібридною силовою установкою» (2006–2007 рр.), № держ. реєстрації 0106U003934.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів за рахунок раціонального використання ДВЗ та електричних двигунів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку завдань:

- визначити перспективні тенденції застосування альтернативних силових установок і джерел енергії, обґрунтувати стратегічний напрям дослідження, виявити проблеми і недоліки існуючих гібридних силових установок;
- запропонувати принципово нову класифікацію гібридних силових установок, що на відміну від існуючих, визначає основний принцип їх побудови: економічний, енергетичний, екологічний;
- розробити концептуальні рішення щодо підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів за рахунок створення гібридних силових установок, що відповідають економічному принципу;
- виробити рекомендації щодо вибору потужності тягового електричного двигуна і енергоємності блоку тягових акумуляторних батарей в залежності від маси, швидкості і дальності пробігу в режимі «тільки електрика»;
- запропонувати стратегію функціонування системи управління гібридними транспортними засобами за рахунок раціонального використання ДВЗ і електричних двигунів на різних швидкостях руху;
- провести натурне підтвердження основних положень дослідження на модернізованому у гібридний варіант ЗАЗ Ланос Пікап, порівняти його характеристики з кращими зарубіжними аналогами, наприклад, Toyota Prius;
- визначити перспективи розвитку транспортних засобів, провести розробку та розрахунок альтернативних енергозберігаючих та екологічно чистих технологій для транспорту.

Об'єкт дослідження – процес підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів.

Предмет дослідження – гібридні транспортні засоби, силові установки яких побудовані за економічним принципом та мають режим «тільки електрика».

Методи дослідження передбачали використання сертифікованого обладнання лабораторії комп'ютерної діагностики кафедри автомобільної електроніки для випробування серійних та розроблених гібридних транспортних засобів. Ця лабораторія атестована на проведення вимірювань у сфері поширення державного метрологічного нагляду згідно з галуззю атестації. При проектуванні окремих систем і агрегатів гібридних транспортних засобів використовувалися: методи комп'ютерного імітаційного моделювання за допомогою високорівневої мови технічних розрахунків Mathworks Matlab (ліцензія № 901531), методи теоретичних основ електротехніки, теорії автоматичного управління, математичний апарат аналізу і синтезу тягово-швидкісних властивостей автомобіля, методи експертних оцінок. Для оформлення

дисертаційної роботи та автореферату використовувалася програма Microsoft Office Standard 2010 (ліцензія № 60887029).

Основними методами при проведенні експериментальних досліджень були: методи, засоби та комп'ютерне забезпечення обладнання лабораторії комп'ютерної діагностики. Достовірність отриманих результатів та висновків підтверджується проведенням натурних випробувань гібридних транспортних засобів у реальних умовах експлуатації. При обробці експериментальних даних використовувались методи математичної статистики. При визначенні перспектив розвитку дослідження застосовувались методи штучного інтелекту.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів. Наукова новизна базується на використанні нових методів розв'язання науково-прикладної проблеми за рахунок застосування оригінальних ідей та концепцій.

Наукова новизна визначається наступними положеннями:

вперше одержано:

– нову класифікацію гібридних силових установок, яка на відміну від відомих визначає основний принцип їхньої побудови: економічний, енергетичний або екологічний;

– концептуальні рішення щодо підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів, які на відміну від існуючих реалізуються за економічним принципом побудови гібридних силових установок, при цьому демонструється висока економічність у порівнянні із зарубіжними аналогами;

– тривимірну залежність витрати електричної енергії тяговими акумуляторними батареями від маси транспортного засобу і встановленої швидкості його руху;

– тривимірну залежність відносної дальності пробігу транспортного засобу від маси транспортного засобу і встановленої швидкості його руху при ідентичному запасі енергії в блоці тягових акумуляторних батарей;

удосконалено:

– стратегію функціонування системи управління гібридних транспортних засобів, побудованих за економічним принципом;

– рекомендації щодо вибору потужності тягового електропривода і енергоємності блоку акумуляторних батарей залежно від маси транспортного засобу, швидкості і дальності пробігу в режимі «тільки електрика»;

набули подальшого розвитку:

– методи створення гібридних транспортних засобів із маховичним та конденсаторним накопичувачем енергії;

– принцип роботи системи управління механічної коробки передач в автоматизованому режимі.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність одержаних результатів підводить науково-практичну базу для вирішення важливої науково-прикладної проблеми, що пов'язана з підвищенням ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів на принципово новому рівні.

Розробка концептуальних рішень, експериментальні дослідження, комп'ютерне моделювання та натурні випробування гібридних транспортних засобів підводять науково-технічну базу вдосконалення існуючих та розробки перспективних гібридних транспортних засобів. Проведені дослідження надають розробникам гібридних транспортних засобів практичні рекомендації щодо вибору потужності тягового електричного двигуна і енергоємності блоку тягових акумуляторних батарей.

Підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів вирішує низку економічних, екологічних та соціальних проблем сучасності як на рівні України, так на світовому рівні. Це пов'язано в першу чергу з вирішенням проблем енергозалежності транспортних засобів від паливних енергоресурсів. Використання гібридного транспортного засобу, створеного за економічним принципом побудови гібридних силових установок, дозволяє знизити витрати енергоносіїв та зробити його конкурентоспроможним як на ринку України, так і у світі.

Дисертаційна робота включає всі стадії єдиного інноваційного процесу «наука–техніка–виробництво», тому що науково-технічні розробки впроваджені на підприємствах, що займаються енергозберігаючими технологіями для транспортних засобів та їх обслуговуванням, а саме:

- Міжнародному консорціуму «Енергозберігання», стратегія функціонування гібридної силової установки у різних режимах руху, оптимальне використання ДВЗ та електричних двигунів на різних швидкостях;
- «Укравтопроект», експериментальні дослідження тягового електричного двигуна гібридної силової установки;
- «Українське конструкторське бюро трансмісій і шасі», математична модель для проведення аналізу енергетичних показників гібридних транспортних засобів, електромобілів та автомобілів з ДВЗ;
- ТОВ «Технік-центр» мережі ДП «АВТО Інтернешнл», концептуальні рішення щодо підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів;
- ТОВ НВП «Т.О.Р.», рекомендації щодо вибору потужності тягового електродвигуна та параметрів блоку ТАБ в залежності від швидкості, маси автомобіля і пробігу на електроприводі;
- АСЦ АТЛ, гібридна силова установка автомобіля, що запропонована автором, може бути реалізована за економічним критерієм у бюджетному сегменті гібридних автомобілів.

Результати досліджень упроваджені в навчальний процес ХНАДУ при підготовці бакалаврів за напрямом 0507 «Електромеханіка», спеціалістів та магістрів 8.05070202 «Електричні системи та комплекси транспортних засобів».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно та проводились у ХНАДУ. Конкретний особистий внесок автора в опубліковані зі співавторами наукові праці, в яких наведені ідеї та результати розробок, що використані в дисертації:

- підготував розділи 2, 3, 4, 5, 6, в яких провів класифікацію та визначив характерні режими гібридних силових установок, сформулював концепцію їх побудови, дослідив особливості конструкції Toyota Hybrid System (THS), проаналізував системи VDIM, EBD, TRC, VSC, HAC та ін., описав принцип роботи гібридної трансмісії Lexus GS450h, провів математичне моделювання тягово-динамічних характеристик модернізованого у гібридний варіант ЗАЗ Таврія [1, 5];
- підготував розділи 1, 2, 4, 5, в яких сформулював синергетичні основи роботи гібридних силових установок, обґрунтував концепцію, провів натурні випробування модернізованого ЗАЗ Таврія [2];
- сформулював концептуальні рішення щодо конструкції гібридної силової установки, провів структурно-параметричну ідентифікацію математичної моделі тягово-швидкісних характеристик гібридного автомобіля ЗАЗ Таврія [6, 7];
- обґрунтував тип електричних машин для їх роботи у складі гібридної силової установки автомобіля [9, 10];
- розробив алгоритми управління гібридної силової установки на базі пневмопривода і ДВЗ та провів натурні випробування гібридного транспортного засобу [11];
- обґрунтував використання іоністорів для забезпечення оптимальних параметрів роботи ТАБ, розробив схему гібридної силової установки [12];
- розробив алгоритм роботи програмного забезпечення контролера при роботі механічної коробки передач в автоматизованому режимі [13];
- обґрунтував схемні рішення створення гібридної силової установки [14, 15];
- провів вибір, обґрунтування та розрахунок вартості комплектуючих для переобладнання автомобіля ЗАЗ Таврія у гібридний варіант [19];
- запропонував концепцію побудови гібридних транспортних засобів [21];
- провів розрахунок еквівалентної витрати палива електромобілів Nissan Leaf та Mitsubishi i-MiEV у циклах ЕРА при їх експлуатації в Україні [23];
- розробив стратегію функціонування системи управління гібридної силової установки автомобіля ЗАЗ Ланос на різних режимах роботи [24];
- визначено напрями підвищення рівня безпеки автомобілів з ТАБ [26];
- провів експериментальні дослідження енергетичних характеристик гібридного автомобіля Toyota Prius у режимі «тільки електрика» [27];
- розробив принципи побудови гібридних силових установок: економічний, енергетичний, екологічний [28];
- провів аналіз еволюції розвитку технічних рішень у Toyota Prius та визначив недоліки та напрями розвитку гібридних транспортних засобів [30];
- проаналізував перспективи розвитку транспортних засобів [31];
- запропонував нейронний метод для адаптивного круїз-контролю [32];
- сформулював основні принципи побудови систем електроживлення мобільних інформаційно-обчислювальних комплексів [33];
- розробив схему інформаційної взаємодії в ергатичній системі та формульний апарат для його розрахунку [34];
- запропонував та розробив методику розрахунку надійності систем електропостачання автомобілів [35];

- провів системний аналіз комп’ютерних та телекомунікаційних технологій та запропонував концепцію роботи студентів з інформацією [39];
- обґрунтував вибір апаратури, засобів діагностування та ремонту гібридних транспортних засобів, провів класифікацію гібридних силових установок [40, 47];
- розробив мехатронний накопичувач енергії для гібридного транспортного засобу та електромобіля, запропонував енергозберігаючі технології для автомобілів [41–45];
- розробив алгоритм роботи системи управління автоматизованої коробки передач автомобіля [50];
- обґрунтував енергозберігаючі технології для транспортних засобів, провів порівняльний розрахунок енергетичних показників Toyota Prius, Chevrolet Volt, Nissan Leaf при виконанні Європейського їздового циклу [51, 52];
- розробив принципи побудови гібридної силової установки [57];
- обґрунтував доцільність використання комп’ютерних та мультимедійних технологій для підготовці електромеханіків автомобільного профілю [60];
- запропонував принцип роботи бортових реєстраторів для ДТЗ [62];
- визначив проблеми та перспективи екологічного транспорту [67].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційних досліджень доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на міжнародних конференціях: XII, XIII, XIV, XVIII науково-технічній конференції з міжнародною участю «Транспорт, екологія – сталий розвиток» (Болгарія, Варна, 2006–2008, 2011); IX, X, XI, XII, XIII, XV Міжнародній науково-технічній конференції «Автомобільний транспорт: Проблеми та перспективи» (Севастополь, 2006–2010, 2012); I, II, III, IV Міжнародній науково-технічній конференції «Автомобіль та електроніка» (Харків, 2009, 2011, 2013, 2015); Міжнародній науково-технічній конференції «Науково-прикладні аспекти автомобільної галузі» (Луцьк, 2010, 2012); Дев’ятій міжнародній науково-практичній конференції «Дослідження, розробка і застосування високих технологій в промисловості», Росія, Санкт-Петербург, 2010); 1, 2 Міжнародній Інтернет-конференції «Мехатроніка транспортних засобів та технологічних машин», (Росія, Губкін, 2010, 2012); Міжрегіональній науково-практичній конференції з міжнародною участю «Інноваційні напрямки розвитку сучасної освіти» (Росія, Москва, 2011); 75-й Міжнародній науково-технічній конференції асоціації автомобільних інженерів (AAI) «Перспективи розвитку автомобілів. Розвиток транспортних засобів з альтернативними енергоустановками» (Росія, Тольятті, 2011); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблема надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (Харків, 2012, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції «6-і Луканінські читання. Рішення енерго-екологічних проблем в автотранспортному комплексі» (Росія, Москва, 2013); Міжнародній науково-практичній конференції «Молодь і науково-технічний прогрес» (Росія, Губкін, 2013); Міжнародній науково-практичній конференції «Модернізація та наукові дослідження в транспортному комплексі» (Росія, Перм, 2013, 2014); Міжнародній наукова-

практичній Інтернет-конференції «Математичне моделювання прикладних задач математики, фізики, механіки» (Харків, 2013); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Наука - освіті, виробництву, економіці» (Республіка Білорусь, Мінськ, 2013), Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології в автомобілебудівництві та транспорті», 15–16 жовтня 2015 р., м. Харків.

Результати досліджень апробовані на міжнародних та всеукраїнських конкурсах та виставках: на XVII спеціалізованій виставці-ярмарці «АВТО. Спецавтотехніка–2008», з отриманням Диплому за просування науково-дослідних розробок по гібридних автомобілях, Харків, 16–19 жовтня 2008 р.; на 2 спеціалізованій виставці «Енергоефективність та енергозбереження» нагороджені Дипломом Торгово-промислової палати України за розробку «Електромобіль з мехатронним накопичувачем енергії», Київ, 20–22 квітня 2011 р.; на Міжнародному конкурсі інноваційних та інвестиційних проектів «Харківські ініціативи» нагороджені Медаллю та Дипломом переможця в номінації «Кращий інвестиційний проект «Транспортно-логістичного кластеру» за проект «Створення наукового парку ХНАДУ» та Дипломом фіналіста в номінації «Кращий інноваційний проект у сфері високотехнологічного машинобудування» за проект «Конверсія базового автомобіля в електромобіль», Харків, 7 вересня 2012 р.; на I Всеукраїнському конкурсі винаходів «УХ, інвент!» нагороджені Дипломом за бізнес-проект «Модернізація легкового автомобіля в гібридний», Харків, 21 лютого 2013 р.; на Міжнародному конкурсі інноваційних та інвестиційних проектів «Kharkiv initiatives» нагороджені Дипломом фіналіста в номінації «Кращий інноваційний проект у сфері високотехнологічного машинобудування» за бізнес-проект «Модернізація легкового автомобіля у гібридний», Харків, 6 вересня 2013 р. та багато ін.

У повному обсязі дисертаційна робота обговорювалася і схвалена на міжкафедральному семінарі кафедр технічної експлуатації та сервісу автомобілів ім. проф. М.Я. Говоруценка, технології машинобудування та ремонту машин, автомобілів, автомобільної електроніки, інформаційних технологій і мехатроніки, організації та безпеки дорожнього руху, фізики, прикладної математики (Харків, 27.04.2016 р.).

Публікації. Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно і повністю опубліковані у 67 наукових працях. Серед них 2 монографії, 37 статей, що входять до фахових видань України (зокрема в електронних виданнях – 7 статей), 14 наукових праць опубліковані у закордонних виданнях, 4 публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз. За матеріалами дослідження отримано 5 патентів України та опубліковано 23 тези доповідей міжнародних наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 426 сторінок, у тому числі 3 додатки на 92 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 299 сторінок, 132 рисунки, 39 таблиць. Список використаних джерел налічує 294 найменування на 35 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, наведений зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета і задачі, об'єкт і предмет, методи дослідження, визначена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, наведені дані про апробацію і публікації.

У першому розділі проведений огляд літератури та вибір напрямів дослідження. Розглянута наукова ретроспектива створення автомобілів, визначені основні напрями підвищення ефективності транспортних засобів, проведено дослідження сучасних електромобілів та гібридних транспортних засобів, визначена постановка проблеми дослідження.

Гібридний транспортний засіб має не менше двох різних перетворювачів енергії і двох різних (бортових) систем акумулявання енергії для цілей приведення до руху транспортного засобу. Ефективність експлуатації гібридних транспортних засобів визначається комплексом показників: технічними, екологічними, економічними та ін.

Для оцінки екологічної ефективності пропоную використовувати три показники. Перший з них характеризує ступінь використання екологічно чистого двигуна в швидкісному інтервалі руху як відношення максимальної швидкості в режимі «тільки електрика» V_{el} до максимальної швидкості автомобіля V_{max} :

$$k_V = \frac{V_{el}}{V_{max}}. \quad (1)$$

Другий показник характеризує ступінь використання екологічно чистого джерела енергії як відношення максимальної відстані, яку можна подолати в режимі «тільки електрика» S_{el} до максимально пройденого шляху S_{max} на одному заряді:

$$k_S = \frac{S_{el}}{S_{max}}. \quad (2)$$

Третій показник характеризує ступінь використання енергії з зовнішніх та внутрішніх екологічно чистих джерел як відношення енергії, необхідної для здійснення руху E_{el} , до енергії, яку автомобіль може отримати під час руху E_{ext} :

$$k_E = \frac{E_{el}}{E_{ext}}. \quad (3)$$

Автором першого гібридного транспортного засобу був відомий конструктор Фердинанд Порше, який у 1899 р. запатентував гібридний двигун та встановив на самохідний електричний екіпаж систему ДВЗ-генератор, яка була джерелом енергії для електродвигуна. Дослідження, пов'язані з використанням електропривода, проводились в СРСР ще в 30-х роках минулого століття академіком Є.О. Чудаковим. Він проводив порівняльне дослідження

характеристик різних двигунів та дійшов до висновку, що ДВЗ краще за швидкістю та за запасом ходу, проте за надійністю і ККД електродвигун виявився кращим. Екологічні проблеми на той час не розглядалися.

У сучасній автомобільній історії гібридна технологія стала фігурувати з 1995 р. з появою перших виставкових моделей – Honda Insight й Toyota Prius. Перший серійний легковий автомобіль Prius з гібридною силовою установкою випустила корпорація Toyota Motor Corporation наприкінці 1997 р. Автомобіль Toyota Prius сконструйований за оригінальною гібридною бензоелектричною технологією Hybrid Synergy Drive, обладнаний бензиновим, двома електричними машинами (стартер-генератор і тяговий двигун), механічним дільником потужності, тяговими високовольтними акумуляторними батареями нікель-метал-гідридного типу. Докладне дослідження Hybrid Synergy Drive наведено в додатку А дисертації.

Порівняльний аналіз найбільш поширених серійних гібридних транспортних засобів показав, що вони побудовані за різними схемами. Корпорація General Motors упроваджує послідовну гібридну схему в автомобілях Chevrolet Volt. Міжнародна промислова компанія Honda Motor Company розробляє автомобілі Insight, Civic Hybrid, CR-Z за паралельною гібридною технологією (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики гібридних транспортних засобів

Основні характеристики		Prius-1	Prius-3 PHV	Chevrolet Volt	Honda CR-Z
Початок продажів, р.		1997	2012	2010	2010
Тип гібридної технології		послідовно-паралельна	з зовнішнім зарядом PHV	послідовна з PHV	паралельна
Пробіг на електроприводі, км		2	20	60	0
Кількість місць		5	5	4	2+2 або 2
ТАБ	Тип	NiMH	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion
	Енергоємність, кВт·год	1,73	4,4	16	н/д
	Маса, кг	57	80	198	н/д
	Напруга, В	288	345,6	360	144
Електро-двигун	Потужність, кВт	30	60	111	10
ДВЗ	Потужність, кВт	43	73	63	83
	Макс. оберти, рад/с(об/хв)	419 (4000)	544 (5200)	502 (4800)	628 (6000)
	Об'єм, см ³	1498	1798	1398	1497
Загальна потужність, кВт		58	100	111	91
Макс. швидкість, м/с (км/год)		44,4 (160)	50 (180)	44,44 (160)	55,55 (200)
на електроприводі, м/с (км/год)		11,1 (40)	19,4 (70)	44,44 (160)	0 (0)
Час розгону до 27,78 м/с, с		15,5	10,8	8,5	9,9
Споряджена маса, кг		1240	1525	1750	1147
Викид CO ₂ , г/км		108	49	60	117
Витрата палива, кг (л)/100км		3,8 (5,1)	1,64 (2,2)	3,725 (5)	3,725 (5)
Мінімальна вартість у США, \$		24 200	29 999	41 685	19 995

У результаті проведених досліджень встановлено, що є низка невирішених проблем і недоліків гібридних силових установок, а саме:

- висока складність і маса установки призводить до збільшення вартості, яку практично неможливо компенсувати за рахунок отриманої економії палива;
- невисокий ККД перетворення енергії палива в електричну енергію та висока маса гібридного транспортного засобу (Volt);
- низька ефективність використання тягових акумуляторних батарей (Prius);
- екологічна чистота установки, хоча і краще, ніж у звичайних автомобілів з ДВЗ, однак завдає шкоди навколишньому середовищу і цим процесом водій не може управляти (Prius).

У ХНАДУ розробкою гібридних транспортних засобів, які використовують силові установки різного типу (криогенні, пневматичні, електричні) займаються д.т.н., проф. А.М. Туренко, д.т.н., проф. В.О. Богомоллов, д.т.н., проф. В.П. Волков, д.т.н., проф. О.В. Бажинов та багато інших вчених.

У другому розділі наводяться методологічні основи підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів, досліджуються альтернативні джерела енергії для автомобілів та описується матеріальна база для дослідження, розроблення й діагностики гібридних транспортних засобів.

Аналіз сучасного стану розвитку автомобілебудування показав, що на теперішній час розвиваються такі альтернативні джерела енергії: паливні елементи на водні, інерційні накопичувачі (маховики), іоністори, акумуляторні батареї. Дослідження демонструє, що перспективними є паливні елементи на водні, питома енергоємність яких перевищує щільність енергії бензину в 5...7 разів (табл. 2).

Таблиця 2 – Питома енергоємність накопичувачів енергії для транспорту

Джерело енергії	Макс. ККД установки, %	Питома енергоємність, кВт·год/кг	Питома енергоємність з урахуванням ККД, кВт·год/кг
Бензин	25...30	13...14	3,25...4,2
Водень	50...60	38	20...23
Маховики різного типу	80...95	0,05...4,17	0,04...3,9615
Електричні іоністори	90...98	0,003...0,006	0,003...0,006
Свинцево-кислотна ТАБ	50...60	0,025...0,04	0,0125...0,024
Нікель-метал-гідридна ТАБ	70...80	0,06...0,08	0,042...0,064
Літєва ТАБ	80...95	0,09...0,15	0,072...0,1425
Натрій-метал-хлоридна ТАБ	80...90	0,08...0,12	0,064...0,108

Розробку автомобілів з паливними елементами на водні проводять автомобілебудівні компанії Honda, Hyundai, DaimlerChrysler, Toyota та ін. Але відсутність інфраструктури заправних станцій та сервісних центрів не дозволяє поки розвинути цьому напрямку автомобілебудування.

Застосування маховичних накопичувачів енергії має певні перспективи розвитку на автомобільному транспорті. Запасена в маховику енергія використовується практично на 95 %. Актуальним є використання маховичних накопичувачів енергії у спортивних та гоночних автомобілях (Jaguar XF, Porsche GT3 R Hybrid та ін.), а також у міських автобусах. Вагомий внесок у розвиток маховичних двигунів та варіаторів вніс відомий винахідник маховиків проф. Н.В. Гуліа.

Нами розроблена маховична система для гібридного транспортного засобу та електромобіля, яка підвищує ефективність рекуперативного гальмування та розгону. Шляхом оптимізації системи рекуперативного гальмування збільшується ресурс та довговічність ТАБ, ККД силової установки, забезпечується економія палива (рис. 1).

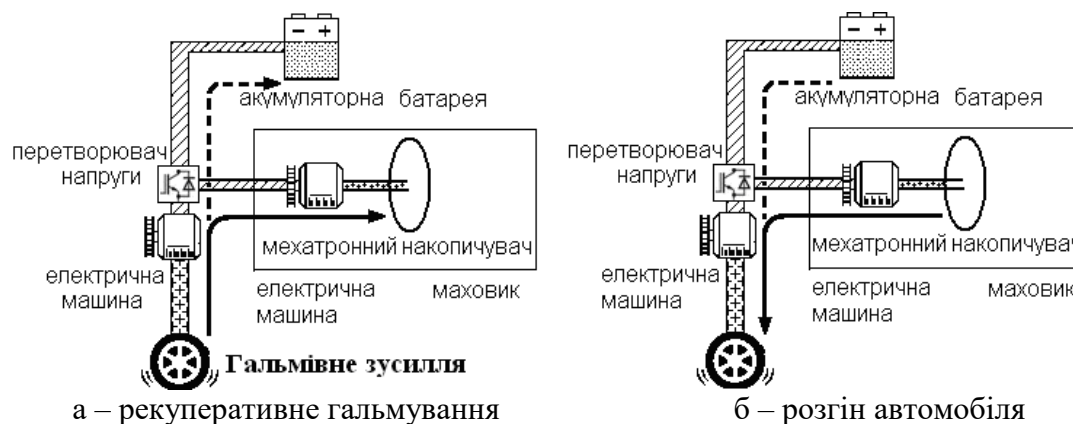


Рисунок 1 – Схема роботи мехатронного накопичувача енергії

Прогресивні виробники транспортних засобів розглядають перспективи застосування іоністорів (суперконденсаторів) для накопичення електричної енергії.

На кафедрі автомобільної електроніки у 2006–2008 р. при виконанні держбюджетної НДР МОНУ України був розроблений повноприводний гібридний транспортний засіб на базі ЗАЗ Таврія Пікап, електропривод якого отримує живлення від свинцево-кислотних акумуляторних батарей та іоністора ІКЕ 40-28 ємністю $C = 100 \text{ Ф}$ (рис. 2). Застосування іоністорів дозволяє збільшити термін служби ТАБ.

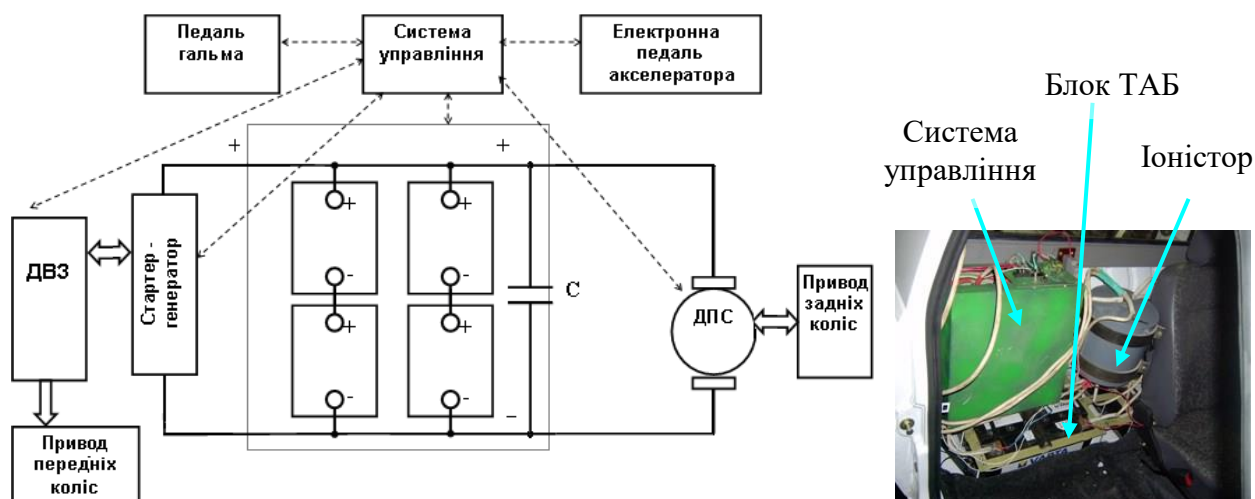


Рисунок 2 – Схема структурна та блок живлення гібридної силової установки

Проведений аналіз показав, що транспортні засоби з електроприводом протягом останніх 20 років оснащувалися акумуляторами різних електрохімічних систем: свинцево-кислотними (Pb), нікель-метал-гідридними (NiMH), літій-іонними (Li-Ion), а також натрій-метал-хлоридними (ZEBRA) (табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняння акумуляторів різних електрохімічних систем

Параметр акумуляторів	Pb	NiMH	Li-Ion	ZEBRA
Енергоємність, Вт·год/кг	25...40	60...80	90...150	80...120
Питома потужність, Вт/кг	180	1000	5000	200
Напруга елемента, В	2,10	1,2	3,6	2,58
Ресурс, кількість повних циклів	2000	3000	5000	2500
Швидкий заряд, год	6...8	2...4	0,5	6...8
Саморозряд, % за місяць	5	30	5...10	100
Температурний діапазон, °С	-30...+60	-20...+60	-20...+60	+270...+350

Апаратура та методи дослідження передбачали застосування сертифікованого діагностичного та ремонтного обладнання лабораторії комп'ютерної діагностики кафедри автомобільної електроніки. Матеріально-технічна база достатньо обладнана для проведення НДР у галузі енергозберігаючого автомобілебудування.

У **третьому розділі** розроблені синергетичні основи підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів, проведений порівняльний аналіз характеристик ДВЗ та електричних двигунів. Термін «синергія» (від грец. συνεργія synergos – (syn) сумісна, (ergos) дія, діяльність) – у дослівному перекладі з грецької означає «сумісна дія» або «сумарний ефект». Синергічний ефект – зростання ефективності діяльності в результаті з'єднання, інтеграції окремих частин в єдину систему. У гібридних силових установках виявляється синергетичний ефект, коли комбінована взаємодія ДВЗ та електричного двигуна підвищує економічні, екологічні та динамічні властивості транспортного засобу.

Порівняння тягових електроприводів з різними типами електричних двигунів (постійного струму, асинхронного, вентильного та ін.) показує, що найбільш перспективним для приводу транспортних засобів є вентильний двигун з порушенням від постійних магнітів, який в 2...3 рази легше, ніж інші типи двигунів, має максимальний ККД і кращі регульовальні характеристики (табл. 4).

Таблиця 4 – Основні порівняльні характеристики тягових електроприводів

Параметри	ДПС	Асинхронний двигун	Вентильний двигун
Максимальна потужність, кВт	30	30	30
Максимальний струм, А	400	500	500
Максимальна частота, рад/с (об/хв)	628 (6000)	837 (8000)	1361 (13000)
ККД, %	75	85	95
Маса двигуна, кг	70	50	25
Маса перетворювача, кг	6	6	6
Вартість двигуна, тис. грн	20	15	30
Вартість перетворювача, тис. грн	10	15	20

Основна задача тягового електричного двигуна в приводі автомобіля полягає у формуванні необхідної тягової характеристики з необхідними енергетичними показниками. Механічна характеристика тягових електричних

двигунів, які функціонують у складі гібридних силових установок Toyota Prius (THS і THS II), реалізує максимальний момент на невеликій частоті обертання, на відміну від ДВЗ. Тому навіть відносно невисока додаткова потужність електричного двигуна дозволяє значно покращити динамічні характеристики транспортного засобу (рис. 3).

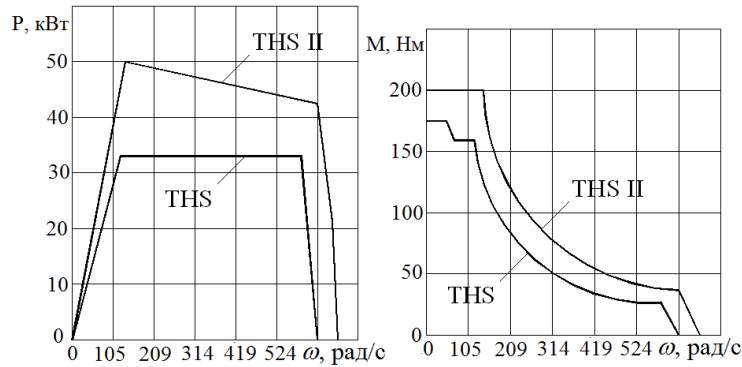


Рисунок 3 – Механічні характеристики електродвигунів THS і THS II

Для аналізу перехідних і квазісталих режимів роботи вентиляного електричного двигуна використовується система рівнянь записана в перпендикулярних координатних осях (d, q) :

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q; \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Psi_m; \\ M = \frac{3}{2} p [i_q \Psi_m + i_d i_q (L_d - L_q)]; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_0, \end{cases} \quad (4)$$

де u_d, u_q – проекції векторів напруги статора на осі (d, q) ; R_s – активний опір обмотки статора; i_d, i_q – проекції векторів струмів статора на осі (d, q) ; ω, p – кутова частота обертання ротора, кількість пар полюсів; L_q, L_d – подовжня та поперечна індуктивність статора; Ψ_m – потікозчеплення обмотки статора з обмоткою ротора; J – сумарний момент інерції; M, M_0 – електромагнітний момент, момент навантаження на валу двигуна.

Рівняння переходу струмів від трифазної до ортогональної системи координат мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} i_d = \frac{3}{2} \left[i_A \cdot \cos \gamma + i_B \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\ i_q = \frac{3}{2} \left[i_A \cdot \sin \gamma + i_B \cdot \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \cdot \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right], \end{cases} \quad (5)$$

де i_A, i_B, i_C – струми у відповідних обмотках статора, $i_A + i_B + i_C = 0$; γ – кут між магнітною віссю фази A і подовжньою віссю ротора.

Індуктивності обмоток статора є періодичними функціями кута між магнітною віссю фази і поздовжньою віссю ротора із періодом, рівним π . Нехтуючи полями вищих гармонік і моментами досить враховувати не більше двох складових

$$\begin{aligned} L_A &= l_0 + l_2 \cdot \cos 2\gamma_A = l_0 + l_2 \cdot \cos 2\gamma; \\ L_B &= l_0 + l_2 \cdot \cos 2\gamma_B = l_0 + l_2 \cdot \cos\left(2\gamma + \frac{2\pi}{3}\right); \\ L_C &= l_0 + l_2 \cdot \cos 2\gamma_C = l_0 + l_2 \cdot \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Взаємні індуктивності є парними періодичними функціями кута між віссю ротора і лінією, проведеною між магнітними осями фаз

$$\begin{aligned} M_{AB} &= m_0 + l_2 \cdot \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right); \\ M_{AC} &= m_0 + l_2 \cdot \cos\left(2\gamma + \frac{2\pi}{3}\right); \\ M_{BC} &= m_0 + l_2 \cdot \cos 2\gamma, \end{aligned} \quad (7)$$

де m_0 – постійна складова взаємної індуктивності.

Таким чином, індуктивності та взаємні індуктивності, що визначають потокозчеплення, є періодичними функціями кута γ .

У системі рівнянь (4) індуктивності по поздовжній та поперечній осях визначаються за наступними формулами:

$$L_d = l_0 - m_0 + \frac{2}{3}l_2; \quad (8)$$

$$L_q = l_0 - m_0 - \frac{2}{3}l_2 \quad (9)$$

Складові напруги індуктивності по поздовжній та поперечній осях U_d і U_q можуть бути визначені за допомогою формул перетворення за відомими залежностями реальних фазних напруг

$$\begin{aligned} u_d &= U_m \cdot \cos(\omega_0 t - \gamma + \delta_0); \\ u_q &= U_m \cdot \sin(\omega_0 t - \gamma + \delta_0), \end{aligned} \quad (10)$$

де δ_0 – початкова фаза вмикання напруги мережі.

Синергетична дія ДВЗ та двох тягових електричних двигунів досліджена на прикладі гібридної силової установки Lexus RX400h. Передачу потужності від ТАБ $P_{ТАБ}$ до агрегатів гібридної силової установки у режимі «тільки електрика» відобразимо у вигляді формули перетворення енергії:

$$P_{ТАБ} = \begin{cases} U_{п} I_{д1} \rightarrow M_{д1} \omega_{д1} \rightarrow M_{пм} \omega_{пм} \leftrightarrow M_{о} \omega_{о} \\ U_{п} I_{д2} \rightarrow M_{д2} \omega_{д2} \leftarrow \text{-----} \nearrow \end{cases}, \quad (11)$$

де $U_{п}$ – напруга з перетворювача; $I_{д1}$, $I_{д2}$ – струм, який споживають електричні двигуни 1 та 2; $M_{д1}$, $M_{д2}$ – обертовий момент електричних двигунів 1 та 2; $\omega_{д1}$, $\omega_{д2}$ – кутова частота обертання електричних двигунів 1 та 2; $M_{пм}$ – обертовий момент планетарного механізму; $\omega_{о}$, $\omega_{пм}$ – кутова частота обертання коліс та планетарного механізму; $M_{о}$ – момент опору коліс із дорожнім покриттям (рис. 4, а).

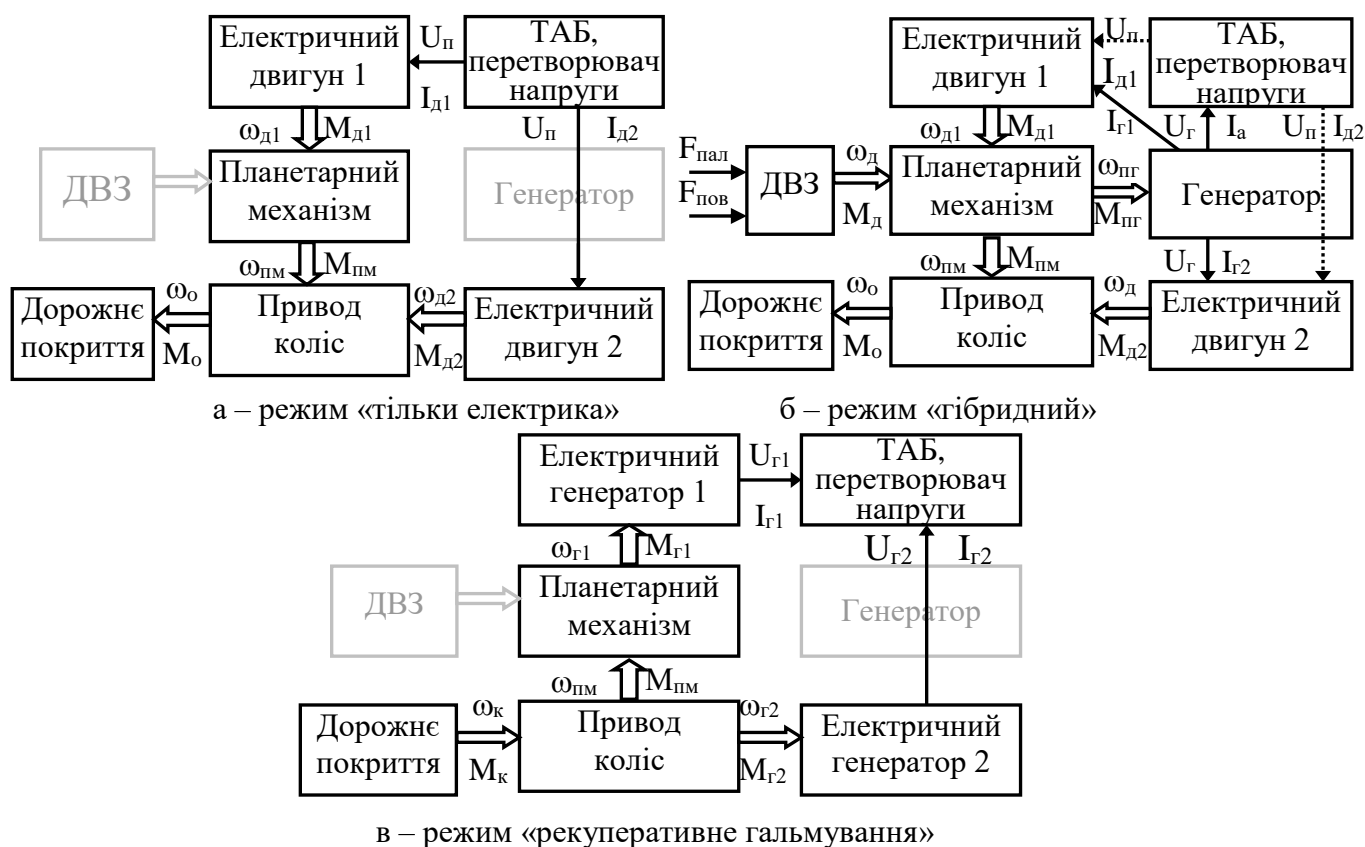


Рисунок 4 – Схема розподілу енергетичних потоків

Якщо при русі в режимі «тільки електрика» запрошуване тягове зусилля збільшується, то вмикається стартер, який запускає ДВЗ. ДВЗ буде запущений також у тому випадку, коли контролер кола високої напруги знайде відхилення від норми таких параметрів, як електричне навантаження, рівень заряду/розряду ТАБ, температура батареї, температура охолоджувальної рідини. Використовуючи електричний зв'язок, частина електричної енергії прямує на тяговий електричний двигун для створення додаткового тягового зусилля (рис. 4, б). Передачу потужності від ДВЗ $P_{ДВЗ}$ через планетарний механізм у «гібридному» режимі можна представити у вигляді формул перетворення:

$$P_{ДВЗ} = f(F_{пал}, F_{пов}) = M_{ДВЗ} \omega_{ДВЗ} \rightarrow \begin{cases} M_{пг} \omega_{пг} \\ M_{пм} \omega_{пм} \rightarrow M_{о} \omega_{о} \end{cases}, \quad (12)$$

$$M_{\text{ПГ}} \omega_{\text{ПГ}} \rightarrow \begin{cases} U_{\text{Г}} I_{\text{Г1}} \rightarrow M_{\text{Д1}} \omega_{\text{Д1}} \rightarrow M_{\text{ПМ}} \omega_{\text{ПМ}} \leftrightarrow M_{\text{О}} \omega_{\text{О}} \\ U_{\text{Г}} I_{\text{Г2}} \rightarrow M_{\text{Д2}} \omega_{\text{Д2}} \leftarrow \hspace{1.5cm} \uparrow \\ U_{\text{Г}} I_{\text{а}} \end{cases}, \quad (13)$$

де $F_{\text{пал}}$, $F_{\text{пов}}$ – витрата палива та повітря ДВЗ; $M_{\text{д}}$, $\omega_{\text{д}}$ – обертовий момент та кутова частота ДВЗ; $U_{\text{Г}}$ – напруга генератора; $I_{\text{Г1}}$, $I_{\text{Г2}}$, $I_{\text{а}}$ – струм, який споживають електричні двигуни 1 і 2 та ТАБ; $M_{\text{ПГ}}$, $\omega_{\text{ПГ}}$ – обертовий момент і кутова частота планетарного механізму, яка надається генератору.

Під час гальмування кінетична та потенційна енергія автомобіля обертає електричні машини 1 і 2, що переходять у генераторний режим, та заряджає ТАБ (рис. 4, в). Передачу рекуперативної потужності у режимі «рекуперативне гальмування» можна представити у вигляді:

$$P_{\text{к}} = M_{\text{к}} \omega_{\text{к}} = \begin{cases} M_{\text{ПМ}} \omega_{\text{ПМ}} \rightarrow M_{\text{Г1}} \omega_{\text{Г1}} \rightarrow U_{\text{Г1}} I_{\text{Г1}} \\ M_{\text{Г2}} \omega_{\text{Г2}} \rightarrow U_{\text{Г2}} I_{\text{Г2}} \rightarrow U_{\text{а}} I_{\text{а}} \leftarrow \end{cases}, \quad (14)$$

де $M_{\text{к}}$, $\omega_{\text{к}}$ – обертовий момент та кутова частота обертання коліс; $M_{\text{ПМ}}$, $\omega_{\text{ПМ}}$ – обертовий момент і кутова частота планетарного механізму, яка надається генератору 1; $M_{\text{Г1}}$, $M_{\text{Г2}}$, $\omega_{\text{Г1}}$, $\omega_{\text{Г2}}$ – обертові моменти та кутові частоти генераторів 1 та 2; $U_{\text{Г1}}$, $U_{\text{Г2}}$, $I_{\text{Г1}}$, $I_{\text{Г2}}$ – напруга та струм генераторів 1 та 2 для заряду ТАБ; $U_{\text{а}}$, $I_{\text{а}}$ – напруга та струм заряду ТАБ.

Проведений аналіз структурних принципів побудови гібридних силових установок показав широку різноманітність їх схемних рішень. У кожного з них визначені недоліки та переваги.

У четвертому розділі сформульовані концептуальні рішення підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів, визначено принципи побудови гібридних силових установок, проведено математичне моделювання та вироблено рекомендації щодо вибору потужності тягового електричного двигуна і енергоємності блоку ТАБ в залежності від маси, швидкості і дальності пробігу у режимі «тільки електрика». Проведений розрахунок та розробка системи живлення тягового електропривода для легкового автомобіля.

З точки зору ефективності експлуатації визначені три принципи побудови гібридних силових установок: економічний, енергетичний, екологічний (рис. 5).

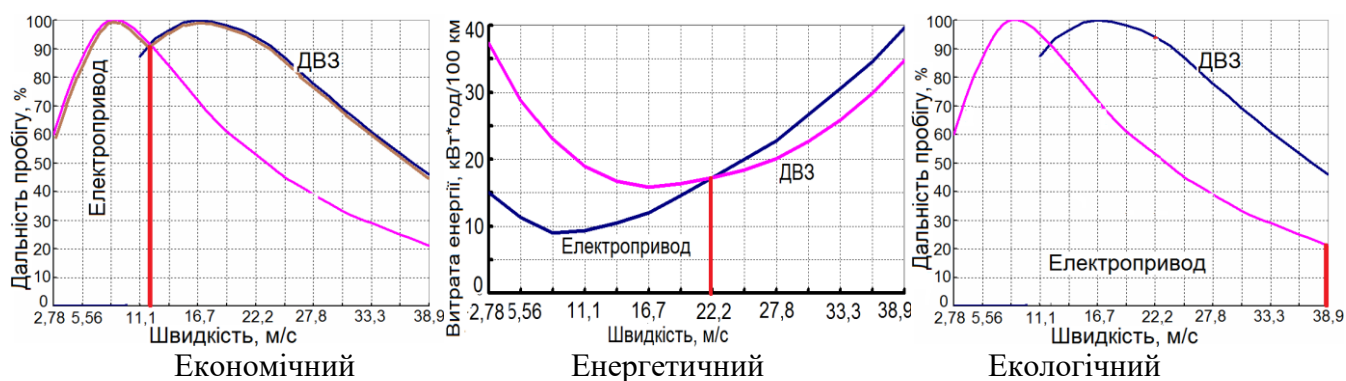


Рисунок 5 – Принципи побудови гібридних силових установок

Економічний принцип передбачає побудову гібридної силової установки у бюджетному сегменті зі співвідношенням потужності електричного двигуна до потужності ДВЗ у межах $1/3 \dots 1/2$, при цьому всі позитивні якості гібридного транспортного засобу, такі як рух у режимі «тільки електрика», заряд блоку ТАБ від зовнішнього джерела енергії, зберігаються. За економічним принципом побудовані декілька модифікацій гібридних транспортних засобів, що створені на кафедрі автомобільної електроніки на базі ЗАЗ Таврія Пікап та Ланос Пікап.

Енергетичний принцип розглядає рух гібридного транспортного засобу з точки зору оптимальної витрати енергії (бензину та електроенергії) з урахуванням ефективного ККД ДВЗ та електричного двигуна (див. рис. 6). При цьому співвідношення потужності електричного двигуна до потужності ДВЗ складає в межах $1/2 \dots 1/1$. До автомобілів, побудованих за енергетичним принципом, відносяться всі модифікації Toyota Prius та інші гібридні транспортні засоби, що побудовані за технологією Hybrid Synergy Drive.

Екологічний принцип характеризує властивість транспортного засобу здійснювати рух за рахунок екологічно чистого двигуна, який отримує живлення від екологічно чистого джерела енергії. При побудові гібридної силової установки за екологічним принципом рух відбувається переважно у режимі «тільки електрика», а система ДВЗ – генераторна установка підключається при вичерпанні енергії у блоці ТАБ. Для здійснення екологічного принципу необхідно використовувати електричні двигуни високої потужності, тому співвідношення потужності електричного двигуна до потужності ДВЗ може бути у межах $1/1 \dots 2/1$. Типовим прикладом автомобіля, побудованого за екологічним принципом, є гібридний електромобіль Chevrolet Volt.

Основні концептуальні рішення підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів реалізовані за рахунок створення гібридних силових установок, що відповідають економічному принципу їх побудови:

– для створення гібридного транспортного засобу при конвеєрному виробництві доцільно обрати найбільш масовий автомобіль. Для України це може бути, наприклад, ЗАЗ Ланос або ін. При цьому сам транспортний засіб та його існуюча силова установка залишається практично без змін, лише доповнюється екологічно чистим двигуном, екологічно чистим джерелом енергії, перетворювачем напруги, системою управління, системою заряду блоку ТАБ та ін. (рис. 6);

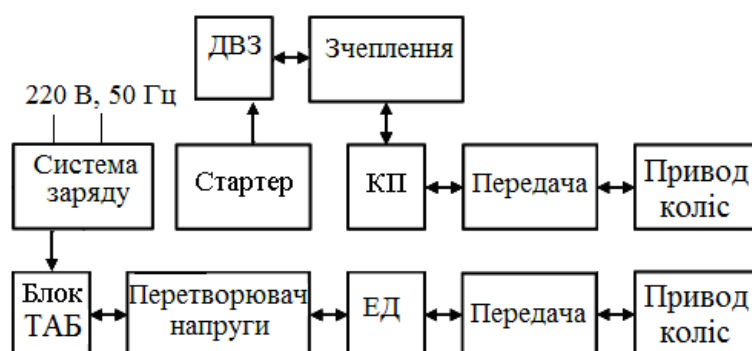


Рисунок 6 – Приклад схеми структурної гібридної силової установки

– як екологічно чистий двигун на сучасному етапі розвитку науки та техніки раціонально застосовувати тяговий електричний двигун потужністю до 30 кВт, на якому транспортний засіб може здійснювати рух до швидкості 11,1 м/с (40 км/год);

– як екологічно чисте джерело енергії раціонально застосовувати блок ТАБ невисокої напруги (до 200 В). Енергоємність блоку ТАБ обирається споживачами в залежності від бажаної відстані, яку можна подолати у режимі «тільки електрика» (в межах 20...50 км), виходячи з того, що приблизно 15 кВт·год витрачається на 100 км пробігу автомобіля масою до 1000 кг. Для подолання на електроприводі максимальної відстані, на відміну від Toyota Prius, пропоную більш ефективно використовувати запас енергії у ТАБ (за принципом електромобіля);

– для підвищення ефективності експлуатації (зниження витрат на енергоносії та підвищення екологічної складової) заряд блоку ТАБ варто здійснювати від зовнішньої електричної мережі 220 В, 50 Гц за допомогою системи заряду (див. рис. 6). З урахуванням ККД зарядного пристрою для подолання 100 км шляху у режимі «тільки електрика» автомобілем масою 1000 кг необхідно отримати 18 кВт·год від електричної мережі. Собівартість експлуатації гібридного транспортного засобу на Україні в режимі «тільки електрика» у 15...20 разів нижче собівартості експлуатації базового транспортного засобу. Заряд тягових акумуляторних батарей відбувається також у режимі рекуперації кінетичної та потенційної енергії автомобіля. Додатковий заряд ТАБ можна отримувати від системи ДВЗ–генераторна установка;

– завдяки використанню енергоємних накопичувачів електричної енергії, гібридний транспортний засіб можна використовувати не тільки для руху, але і для отримання принципово нових функціональних можливостей, наприклад, для автономного підключення різноманітних зовнішніх електричних пристроїв, таких як освітлювальні прилади, зварювальний апарат, обігрівальні елементи, мобільні пристрої тощо.

При розрахунку перехідних процесів у потужних вентильних електричних двигунах, що отримують живлення від високовольтних тягових акумуляторних батарей, необхідно враховувати не тільки опір обмотки та взаємну індуктивність фаз, але й опір відкритого каналу транзистора (рис. 7).

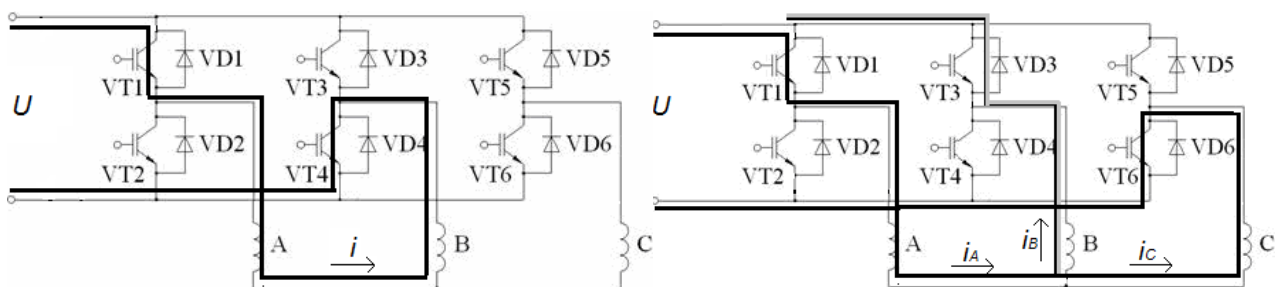


Рисунок 7 – Схеми підключення фаз обмотки на різних інтервалах комутації

На першому і другому інтервалі комутації система рівнянь представляється у вигляді

$$\begin{cases} u = 2 \cdot (L + M) \frac{di}{dt} + 2 \cdot (R + R_{VT}) \cdot i + e_A + e_B \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_o - M_{втр} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{cases}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} 0 = (L + M) \cdot \left(\frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt} \right) + (R + R_{VT}) \cdot i_A + (R + R_D) \cdot i_B + e_A + e_B \\ u_{вх} = (L + M) \cdot \left(\frac{di_A}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) + (R + R_{VT}) \cdot i_A + (R + R_{VT}) \cdot i_C + e_A + e_C \\ i_A = i_B + i_C \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_o - M_{втр} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{cases}, \quad (16)$$

де u – напруга живлення; $L = L_A = L_B = L_C$, M – індуктивність фаз A , B , C , взаємна індуктивність фаз; i_A, i_B, i_C – струми у фазах A , B , C ; $R = R_A = R_B = R_C$ – опір фаз A , B , C ; R_{VT}, R_D – опір відкритого каналу силового транзистора та діода; e_{AB}, e_{AC} – проти-ЕРС у фазах AB і BC ; J, α – сумарний момент інерції, кут повороту ротора; $M_{дв}, M_o, M_{втр}$ – електромагнітний момент двигуна, момент навантаження на валу двигуна, момент втрат у двигуні.

Для чисельного рішення систем рівнянь (15) і (16) необхідно їх представити у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U - 2 \cdot (R + R_{VT}) \cdot i - e_{AB}}{2 \cdot (L + M)} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_e - M_o - M_{втр}}{J} \\ i_A = i_B + i_C \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_o - M_{втр} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{cases}, \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = -\frac{1}{3 \cdot (M + L)} \left[(R + R_{VT}) \cdot (2 \cdot i_A + i_C) + (R + R_{DVT}) \cdot i_B + e_{AC} + e_{AB} - U \right] \\ \frac{di_B}{dt} = -\frac{1}{3 \cdot (M + L)} \left[(R + R_{VT}) \cdot (i_A - i_C) + U - e_{AC} + 2 \cdot e_{AB} + 2 \cdot (R + R_{DVT}) \cdot i_B \right] \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{3 \cdot (M + L)} \left[2 \cdot U - 2 \cdot e_{AC} + e_{AB} - (R + R_{VT}) \cdot (i_A + 2 \cdot i_C) + (R + R_{DVT}) \cdot i_B \right] \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_e - M_o - M_{втр}}{J} \\ i = i_A + i_B + i_C \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{array} \right. (18)$$

Рішення систем диференціальних рівнянь (17), (18) при різних навантажувальних моментах дозволяють отримати механічну характеристику вентильного електричного двигуна, а також розрахувати перехідні процеси під час його пуску (рис. 8).

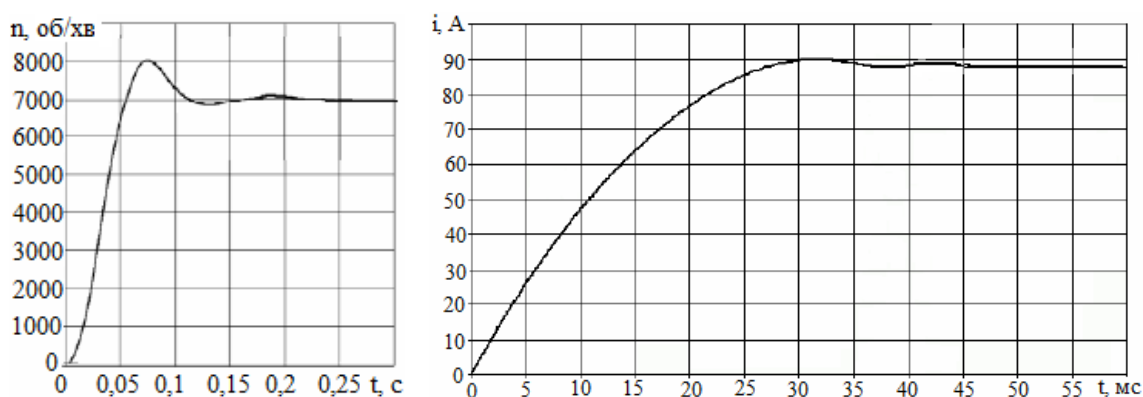


Рисунок 8 – Характер зміни швидкості ротора та струму двигуна

Як екологічно чистий накопичувач енергії доцільно використовувати літій-залізо-фосфатні ТАБ, наприклад, типу TS-LFP90АНА. Широке застосування літій-іонних акумуляторних батарей у транспортних засобах з електроприводом заснована на наступних перевагах:

- найбільша енергоємність серед усіх типів акумуляторів;
- можливість швидкого заряду (до 80 % можна зарядити за 0,5 год);
- високий показник ресурсу (понад 10000 циклів розряду/заряду);
- низький показник саморозряду (до 5 % за місяць);
- висока напруга на елементі (3,6 В), що в 3 рази вище, ніж у нікель-метал-гідридних і в 1,6 разів вище, ніж у свинцево-кислотних акумуляторів.

Недоліки, які були притаманні літій-іонним акумуляторам перших поколінь, зараз практично усунені. Вони стали безпечними при механічному ушкодженні або перезарядженні, підвищився строк їх служби (гарантія дається до 10 років), поступово знижується вартість (вартість 1 А·год наближується до 20 грн).

Для надання розробникам електромобілів та гібридних транспортних засобів практичних рекомендацій щодо вибору потужності тягового електричного двигуна і енергоємності блоку ТАБ, а також визначення синергетичної дії ДВЗ та електропривода розроблена універсальна математична модель гібридного транспортного засобу у ліцензійному середовищі MATLAB. У зв'язку з великим об'ємом формульного апарату та математичних блоків: «engine» (ДВЗ), «gearbox» (коробка перемикавання передач), «U0» (головна передача), «Rk» (ведучі колеса), «driver» (водій – система керування), «automobile» (автомобіль) (рис. 9) «electric motor» (електричний двигун), «necessary power» (потрібна потужність) універсальна математична модель гібридного автомобіля наведена в додатку В.

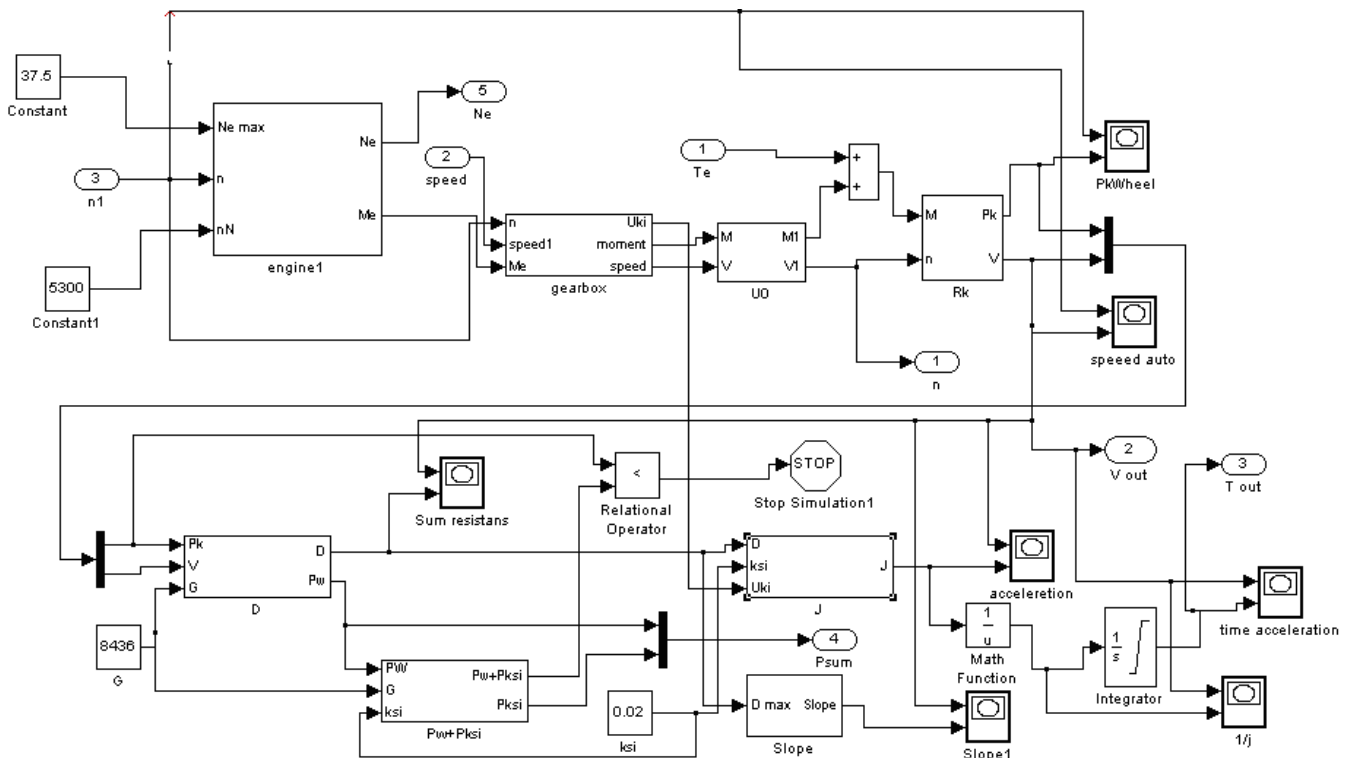


Рисунок 9 – Схема структурна системи «automobile»

У результаті моделювання тягово-швидкісних властивостей транспортних засобів визначаються залежності прискорення, часу розгону та потужності на колесах від швидкості руху автомобіля ЗАЗ Таврія (рис. 10).

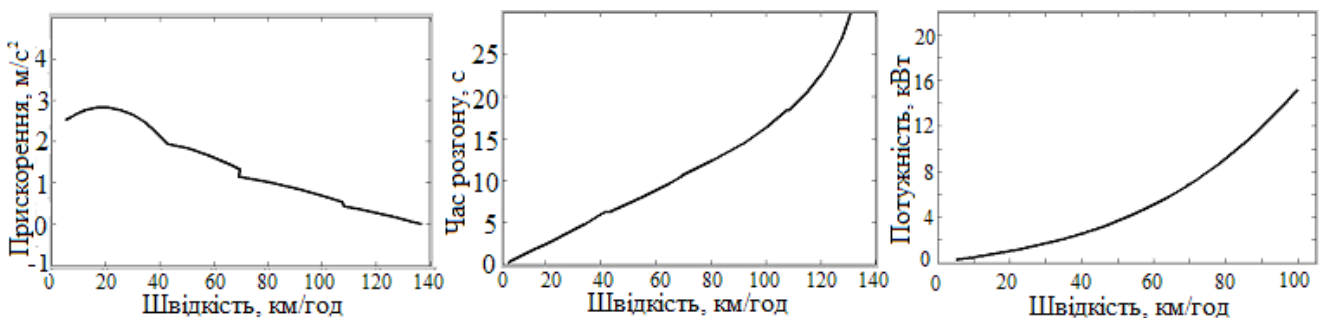


Рисунок 10 – Результати математичного моделювання для ЗАЗ Таврія

Порівняльна характеристика динаміки розгону базового транспортного засобу ЗАЗ Таврія з гібридним аналогом, показує, що, незважаючи на збільшення маси гібридного транспортного засобу та відносно малої потужності електричного двигуна (4 кВт), час розгону гібридного автомобіля до швидкості 27,78 м/с (100 км/год) знизився на 2 с. Результати порівняльного моделювання показують, що автомобіль з гібридною силовою установкою здатний подолати дорожній опір на 10 % більший, ніж базовий автомобіль (рис. 11)

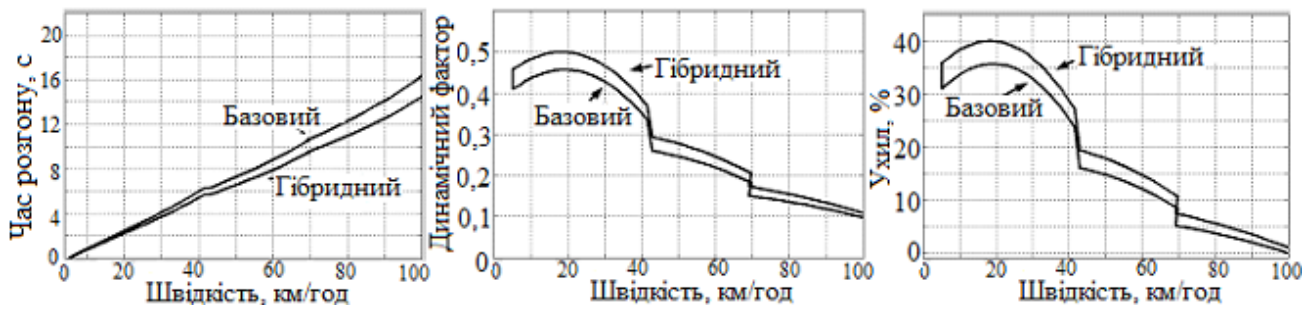


Рисунок 11 – Динамічні характеристики базового та гібридного автомобілів

На основі проведеного математичного моделювання і натурних випробувань транспортних засобів з електроприводом вироблені рекомендації щодо вибору потужності тягового електричного двигуна і енергоємності блоку тягових акумуляторних батарей залежно від маси автомобіля і швидкості його руху. Ці рекомендації представлені у вигляді тривимірних залежностей потужності тягового електричного двигуна та витрати електричної енергії тяговими акумуляторними батареями від маси транспортного засобу і встановленої швидкості його руху (рис. 12).

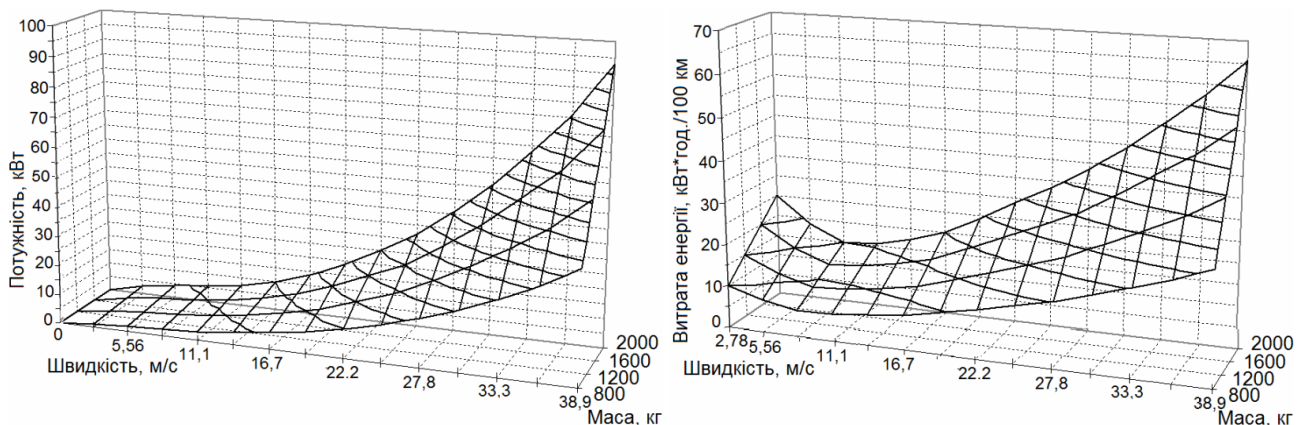


Рисунок 12 – Рекомендації щодо вибору потужності електричного двигуна і енергоємності ТАБ

З метою підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів за рахунок раціонального використання ДВЗ та електричних двигунів побудовані тривимірні залежності відносної дальності пробігу в режимі «тільки електрика» і еквівалентної витрати палива від маси і швидкості (рис. 13).

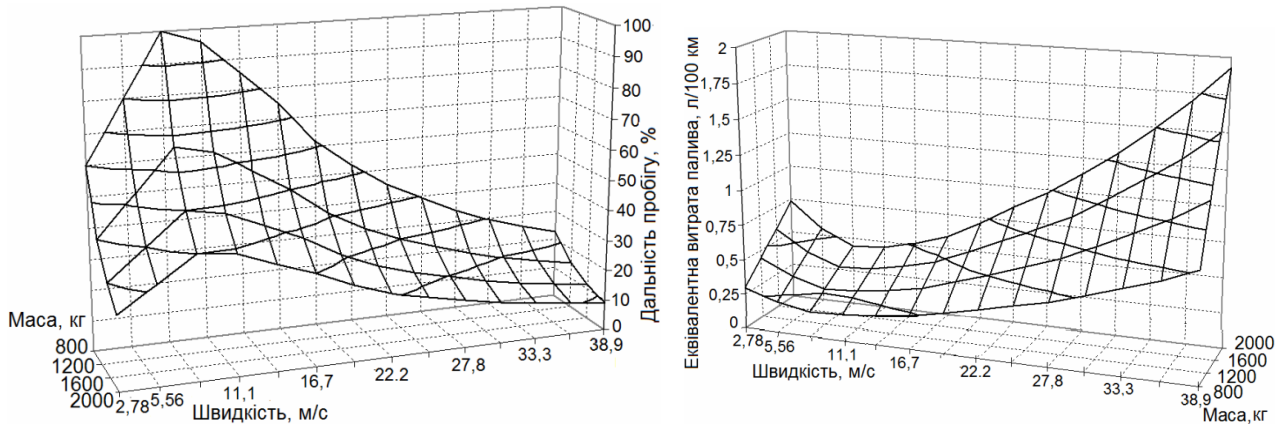


Рисунок 13 – Пробіг в режимі «тільки електрика» і еквівалентна витрата палива

Еквівалентна витрата палива розрахована за цінами на бензин та електричну енергію станом на 02.2015 р., л/100 км

$$C_{\text{Екв}(100\text{км})} = \frac{W_{\text{АКБ}} \cdot C_{\text{кВт}}}{C_{\text{палива}} \cdot \eta} \quad (19)$$

де $W_{\text{ТАБ}}$ – витрата електроенергії ТАБ у режимі електромобіля, кВт·год/км; $C_{\text{кВт}}$ – тариф на електроенергію, грн/кВт·год; η – ККД зарядного пристрою; $C_{\text{палива}}$ – вартість палива, грн/л.

Стратегія функціонування системи управління гібридної силової установки, створеної за економічним принципом:

– режим «тільки електрика»: старт з місця, початок руху, прискорення та рух на швидкості до 11,1 м/с (40 км/год) здійснюється на електричному двигуні. Дальність пробігу на одному заряді ТАБ раціонально прийняти у межах 20...50 км, що згідно з аналізом середньодобового пробігу легкових автомобілів задовольнить 80 % автомобілістів (рис. 14);



Рисунок 14 – Стратегія функціонування системи управління силової установки

– режим «тільки паливо»: при подальшому наборі швидкості або при недостатньому запасі енергії в блоці ТАБ підключається ДВЗ;

– режим «рекуперативне гальмування»: при гальмуванні автоматично відключається ДВЗ, а електричний двигун починає працювати у режимі генератора, забезпечуючи рекуперацію гальмівної енергії автомобіля. Отримана

електрична енергія здійснює заряд ТАБ. Для підвищення енергетичної ефективності силової установки можливе застосування інших енергозберігаючих та екологічно чистих технологій (застосування фотоелектричних перетворювачів, рекуперация енергії підвіски, передпусковий підігрів ДВЗ і салону та ін.);

– режим «стоянка-заряд»: на стоянці заряд ТАБ відбувається від стаціонарної мережі 220 В, 50 Гц. Це підвищує паливну економічність та знижує витрати за використання транспортного засобу. Тому навіть на короткочасних стоянках, наприклад, під час вантажно-розвантажувальних робіт, доцільно заряджати ТАБ. Час повного заряду відбувається за 3...4 год;

– «гібридний» режим у міському циклі: при русі автомобіля в умовах міського циклу на відстань до 80...100 км тяговий електричний двигун у складі гібридної силової установки є основним, тому що під час простою в пробках, руху з місця та початковому прискоренні використовується тільки електричний привод. Саме на цих режимах ДВЗ має підвищену витрату палива, яка компенсується витратою недорогої електричної енергії акумуляторних батарей, отриманої з електричної мережі. Розрахункова витрата палива при цьому зменшується у 3,5...4 рази в порівнянні з базовим аналогом;

– гібридний режим у заміському циклі: при русі автомобіля в умовах заміського циклу на відстань більше 80...100 км двигун внутрішнього згоряння у складі гібридної силової установки стає основним силовим агрегатом, а електричний привод – допоміжним. Витрата палива гібридного транспортного засобу з ростом пробігу експоненціально наближається до витрати палива базового автомобіля.

Результати дослідження дозволяють сформулювати рекомендації розробникам транспортних засобів з електроприводом щодо вибору кількості використаних батарей типу TS-LFP90АНА залежно від бажаного пробігу в режимі «тільки електрика», швидкості і маси автомобіля. Ці рекомендації представлені у вигляді тривимірних залежностей (рис. 15).

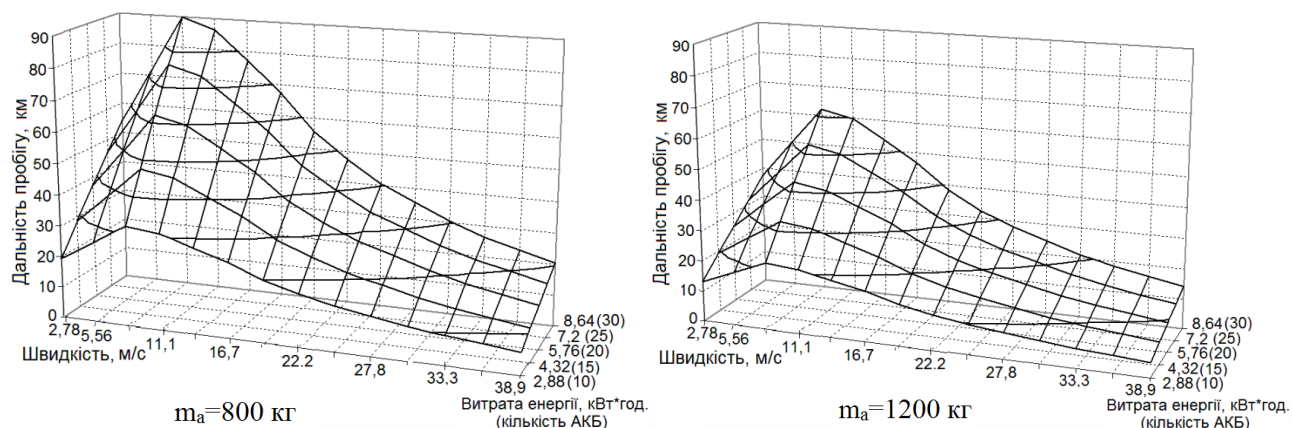


Рисунок 15 – Залежність дальності пробігу від енергоємності ТАБ та маси автомобіля

Проведено моделювання залежності пробігу в режимі «тільки електрика» модернізованого ЗАЗ Ланос Пікап при використанні 20 акумуляторів батарей TS-LFP90АНА і питомої витрати енергії від швидкості і маси (рис. 16).

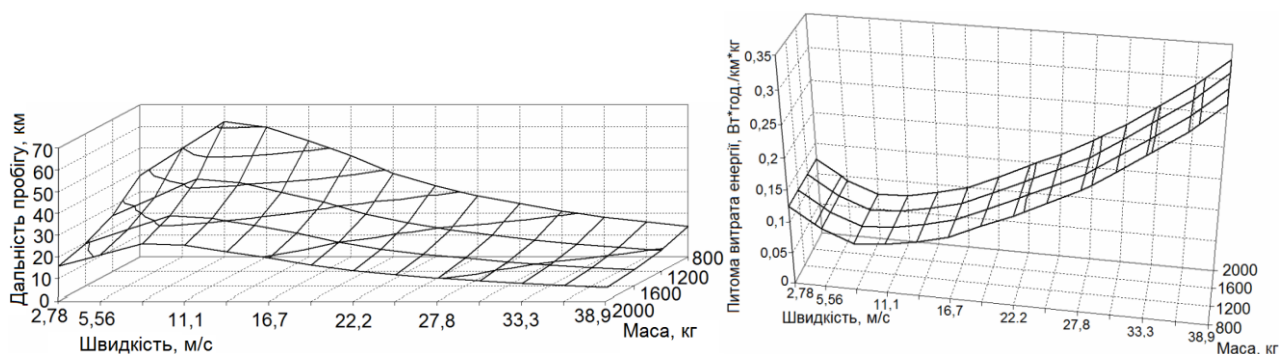


Рисунок 16 – Залежність дальності пробігу і питомої витрати енергії від швидкості і маси автомобіля

У п'ятому розділі проведено натурне підтвердження концептуальних рішень на прикладі розробки декількох модифікацій гібридних силових установок, що практично реалізовані на легкових автомобілях ЗАЗ Таврія Пікап та ЗАЗ Ланос Пікап, проведені їх натурні випробування у реальних умовах експлуатації, розроблена система управління зарядом ТАБ та система управління механічної коробки передач в автоматизованому режимі.

Для перевірки основних положень дослідження на кафедрі автомобільної електроніки у 2009–2010 р. проведена модернізація автомобіля ЗАЗ Таврія Пікап у гібридний варіант, який на відміну від серійних гібридних транспортних засобів працює зі взаємодіючими, але автономними силовими установками (ДВЗ і електропривод). Це підвищує надійність силової установки, тому що виникає можливість при будь-якому несправному блоці в системі електропривода користуватися транспортним засобом як звичайним автомобілем, і відповідно, при несправному ДВЗ користуватися ним як електромобілем.

У результаті модернізації базового автомобіля ЗАЗ Таврія у гібридний варіант, система двигун-трансмсія, що раніше містила ДВЗ, зчеплення, коробку перемикачів передач і головну передачу з'єднану з передніми колесами, була доповнена трифазною синхронною електричною машиною, яка у свою чергу була з'єднана та взаємодіяла з електронними системами управління.

Експериментальні дослідження низки електричних двигунів довели доцільність застосування у складі гібридної силової установки тягового електричного двигуна на основі трифазного синхронного генератора Г290, який доопрацьований під вентильне управління. ККД двигуна складає 85 %, максимальна потужність – 15 кВт. Управління тягою електричного двигуна відбувається від педалі акселератора. Передбачений режим рекуперативного гальмування, режим старт-стоп і перехід у режим руху на високих швидкостях із використанням ДВЗ. Тяговий електричний двигун розміщений в моторному відсіку над коробкою перемикачів передач та передає момент обертання на головну передачу (рис. 17). Блок ТАБ складається з 6 послідовно з'єднаних свинцево-кислотних герметизованих акумуляторів, що розміщені за сидіннями водія та пасажирів. Розроблена система заряду блоку ТАБ передбачає основний заряд від електричної мережі 220 В, 50 Гц та додатковий заряд при рекуперації гальмівної енергії автомобіля.

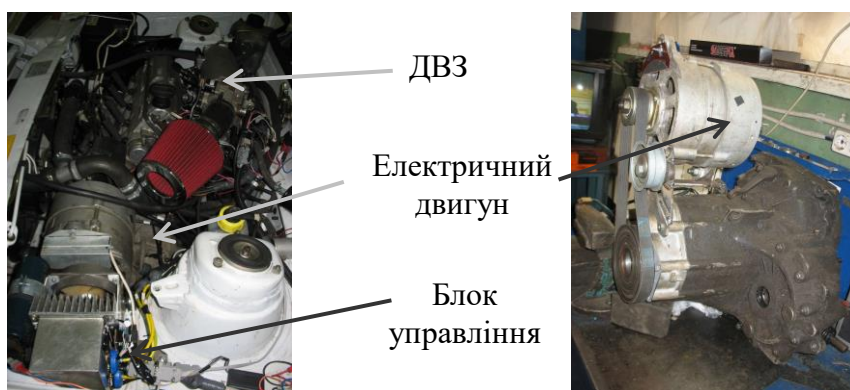


Рисунок 17 – Розташування електричного двигуна

Розроблені схемотехнічні та програмні рішення системи управління гібридною силовою установкою, яка здійснює управління тягово-швидкісними режимами ДВЗ, електроприводом у тяговому і генераторному режимах, і процесом зарядки/розрядки ТАБ. Розроблена система управління механічної коробки перемикачів передач в автоматизованому режимі, яка об'єднує переваги механічної та автоматичної трансмісії.

Натурні випробування модернізованого Таврія Пікап Гібрид, що проходили в реальних умовах експлуатації на вулицях м. Харкова, показали, що витрата палива не перевищує 3,2 кг/100 км (4,3 л/100 км), а електричної енергії – 110 Вт·год/км. У замському циклі руху його експлуатація відбувається у «гібридному» режимі та режимі «тільки паливо», а у міському циклі – в режимі «тільки електрика» та «гібридному» режимі. Рух у режимі «тільки електрика» доцільно використовувати в складських приміщеннях та паркових зонах.

Концептуальні рішення підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів, які відповідають економічному принципу побудови гібридних силових установок, практично реалізована та експериментально підтверджена протягом 2011–2016 р. на прикладі модернізованого у гібридний варіант ЗАЗ Ланос Пікап, що наданий ПАТ «ЗАЗ» для його подальшого впровадження у виробництво. Розроблена система управління гібридною силовою установкою включає: систему управління тягово-швидкісними характеристиками електричного двигуна у тяговому і генераторному режимах, систему управління тягово-швидкісними режимами ДВЗ, систему управління процесом зарядки/розрядки ТАБ. Привод тягового електричного двигуна відбувається на вторинний вал механічної коробки перемикачів передач через полікліновий ремінь, але при серійному виробництві доцільно застосовувати ланцюгову або зубчасту передачу. Для живлення електропривода використовуються 20 послідовно з'єднаних літій-залізо-фосфатних акумуляторів типу TS-LFP90АНА, загальна енергоємність яких складає 5,76 кВт·год, робоча напруга – 56...80 В, маса – 60 кг. Час повної зарядки від мережі 220 В, 50 Гц – 3,5 год, потужність, що споживається від електричної мережі під час заряду, не перевищує 1750 Вт. Блок ТАБ та електронна система балансування розміщені в салоні за сидінням водія (рис. 18).



Рисунок 18 – Привод тягового електричного двигуна та розміщення ТАБ

Проведений розрахунок вартості комплектуючих, які використовуються для модернізації базового автомобіля у гібридний, показав, що їх вартість не перевищує 30 % від вартості базового автомобіля (табл. 5).

Таблиця 5 – Вартість комплектуючих для модернізації базового автомобіля

Комплектуючі	Кількість, шт.	Дослідний зразок, тис. грн	Серійний зразок, тис. грн
Акумулятори (TS-LFP90АНА 3,2V/90Ah)	20	46	33
Вентильний двигун (модернізований Г290)	1	6	4
Інвертор	1	4	2
Система управління	1	4	2
Система заряду акумуляторів	1	4	2
Всього, тис. грн		64	43

Для дослідження робочих процесів гібридної силової установки автомобіля ЗАЗ Ланос Пікап розроблений інформаційно-вимірювальний комплекс (рис. 19).

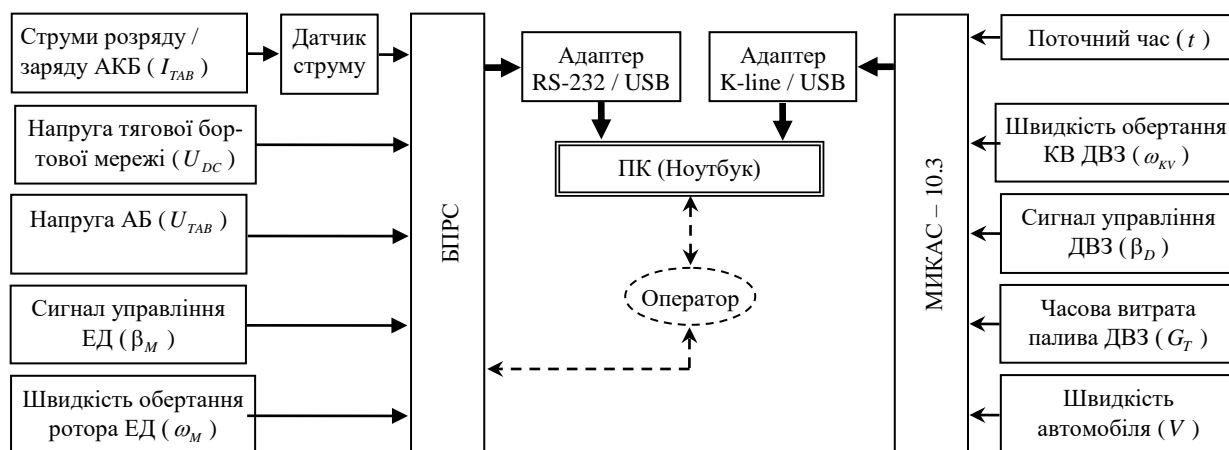


Рисунок 19 – Схема структурна інформаційно-вимірювального комплексу для дослідження робочих процесів гібридної силової установки

Натурні випробування модернізованого ЗАЗ Ланос Пікап проводились у реальних умовах експлуатації на вулицях м. Харків. Багаторазові проїзди на відстань 20...50 км показують, що витрата палива в «гібридному» режимі не перевищує 3 кг/100 км (4 л/100 км), а витрата електричної енергії у режимі «тільки електрика» – 0,13 кВт·год/км. Пробіг на електричній тязі досягає 40 км,

а максимальна швидкість – 11,11 м/с (40 км/год). При вичерпанні енергії у блоці ТАБ рух відбувається у режимі «тільки паливо» (рис. 20).

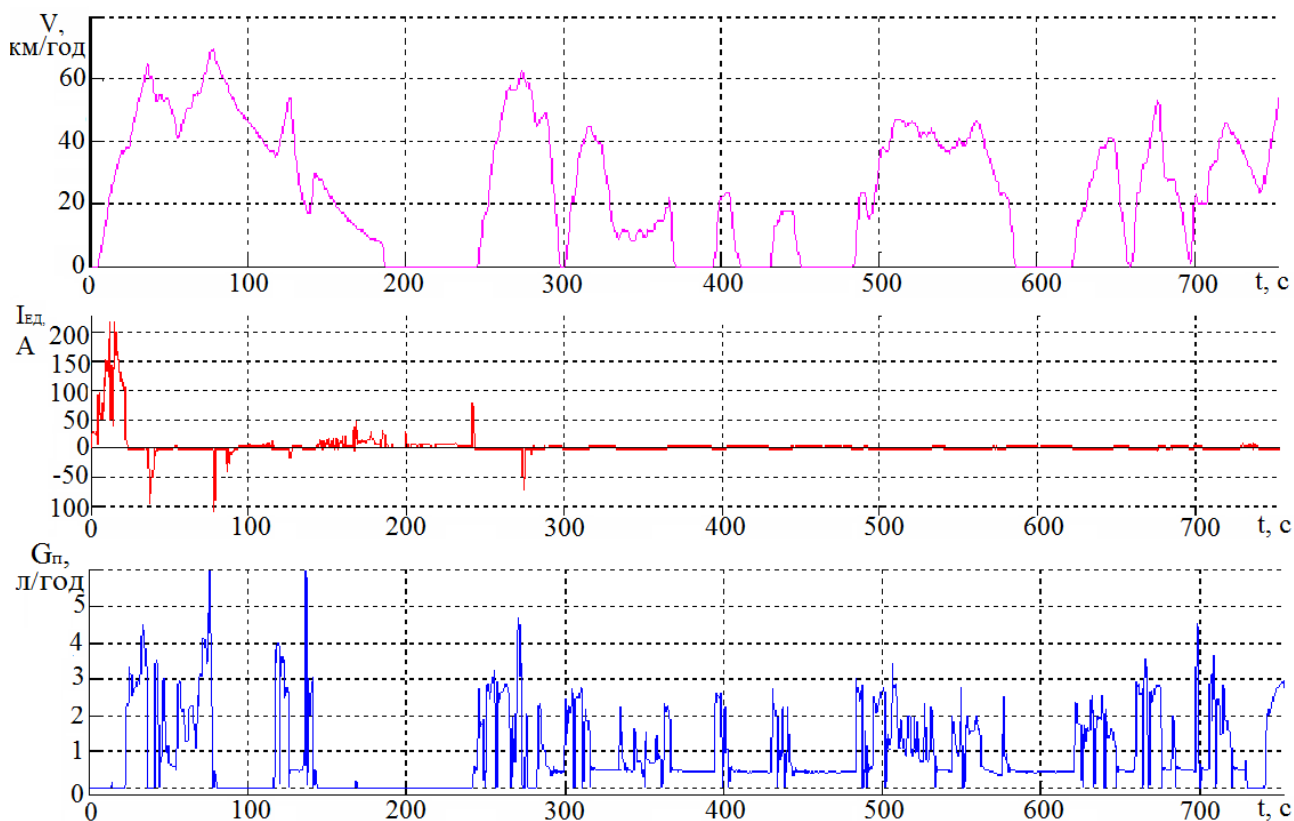


Рисунок 20 – Діаграми швидкості, струму електричного двигуна та годинна витрата палива гібридного транспортного засобу

Проведено порівняльні натурні випробування модернізованого ЗАЗ Ланос Пікап з Toyota Prius-1. Згідно з технічними характеристиками витрата палива Toyota Prius-1 у змішаному режимі руху складає 3,8 кг/100 км (5,1 л/100 км), а пробіг на електроприводі – до 2 км. Його натурні випробування в реальних умовах експлуатації при температурі навколишнього середовища +15...25 °С підтверджують паспортні дані, але слід зазначити, що реальна витрата палива гібридних транспортних засобів значною мірою залежить від температури зовнішнього середовища. Наприклад, при температурі – 20 °С витрата палива при ввімкненому клімат-контролі у Prius зростає майже у 1,6 разів.

Основною перевагою гібридних транспортних засобів, що створені за економічним принципом, є невисока вартість, яка при серійному виробництві буде в 3 рази менше, ніж вартість Toyota Prius. При цьому його технічні характеристики, наприклад, такі як витрата палива і екологічна безпека, не поступаються Prius, а пробіг на електричній тязі перевищує японський аналог у 20 разів.

Розроблені концептуальні рішення щодо підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів, що дозволяють усунути низку невирішених проблем та недоліків існуючих гібридних силових установок:

– за рахунок спрощення побудови гібридної силової установки значно знизилась її вартість. Вартість додаткових систем та агрегатів гібридної силової установки при серійному виробництві складає 43 тис. грн. Термін окупності розробленої гібридної силової установки за рахунок отриманої економії палива складає 2 роки або 21 500 км пробігу;

– підвищилась паливна економічність та відповідно екологічна чистота, тому що у розробленого гібридного транспортного засобу пробіг у режимі «тільки електрика» складає до 40 км. Процесом увімкнення/вимкнення режиму «тільки електрика» водій модернізованого ЗАЗ Ланос Пікап може керувати на свій розсуд, на відміну від Toyota Prius;

– підвищилась ефективність використання ТАБ з 15...20 % до 80...90 %. Нікель-метал-гідридні ТАБ Toyota Prius-1 енергоємністю 1,73 кВт·год виконують функції буфера енергії та неефективно працюють для живлення електропривода. Це пов'язано з тим, що розробник цієї батареї, фірма Panasonic, при такому режимі роботи надає гарантію на 5 млн циклів при 15...20 % розряді/заряді. У модернізованому ЗАЗ Ланос Пікап використовується літій-залізо-фосфатні ТАБ енергоємністю 5,76 кВт·год, які мають високий ресурс за кількістю повних циклів заряд/розряд (до 5 тис. без значного погіршення робочих характеристик). У нікель-метал-гідридних акумуляторів цей показник складає 3 000 циклів. Крім того, питома потужність літій-залізо-фосфатних акумуляторів у 5 разів краще, ніж у нікель-метал-гідридних (5 кВт/кг на відміну від 1 кВт/кг).

У шостому розділі розглянуто перспективні напрями підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів за рахунок упровадження сучасних енергозберігаючих технологій та штучного інтелекту. Аналіз перспектив розвитку дорожніх транспортних засобів та транспортних систем показує, що вдосконалення автотранспортного комплексу буде розвиватися за наступними основними напрямками:

– підвищення паливної економічності та екологічної чистоти за рахунок розвитку альтернативних силових установок і джерел енергії та вироблення енергії безпосередньо на борту транспортного засобу під час його руху;

– інтеграція автомобіля в єдиний інформаційний простір транспортних систем та застосування штучного інтелекту в транспортних системах;

– підвищення рівня безпеки транспортних засобів та систем.

Підвищення паливно-екологічної ефективності дорожніх транспортних засобів може відбуватися, наприклад, за рахунок втілення енергозберігаючих технологій на базі фотоелектричних перетворювачів. Проведений аналіз доцільності використання сонячних систем на транспортних засобах та розрахунок фотоелектричних перетворювачів показав, що для умов м. Харкова кількість енергії, що може накопичувати система електроживлення на фотоелементах потужністю 250 Вт за рахунок сонячного випромінювання, складає більше 132 кВт·год на рік, а відстань, яку здатен подолати автомобіль з електроприводом на цій енергії, складає 550 км/рік. Застосування штучного інтелекту на транспортних системах розглянуто на прикладі розробки адаптивного круїз-контролю, створеного на базі штучної нейронної мережі.

ВИСНОВКИ

1. Наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів за рахунок раціонального використання ДВЗ та електричних двигунів. Визначені перспективні тенденції застосування альтернативних джерел енергії, обґрунтований стратегічний напрям дослідження та встановлено, що є низка невирішених проблем і недоліків існуючих гібридних силових установок: висока вартість, яку неможливо компенсувати за рахунок економії палива, низька ефективність використання тягових акумуляторних батарей, у водія немає можливості підключати режим «тільки електрика».

2. Запропоновано принципово нову класифікацію гібридних силових установок, що на відміну від існуючих, визначає основний принцип їх побудови: економічний, енергетичний, екологічний. При створенні гібридних транспортних засобів у бюджетному сегменті найбільш перспективним є економічний принцип, який реалізує усі позитивні властивості, а саме: рух у режимі «тільки електрика», заряд тягових акумуляторних батарей від зовнішньої електричної мережі 220 В, 50 Гц тощо. За економічним принципом побудовано декілька модифікацій гібридних транспортних засобів, що створені на кафедрі автомобільної електроніки ХНАДУ на базі ЗАЗ Ланос Пікап та Таврія Пікап.

3. Доведено, що ефективність експлуатації гібридних транспортних засобів заснована на підвищенні паливної економічності та екологічної безпеки. Розроблено концептуальні рішення побудови гібридних транспортних засобів нового типу, що створені за економічним принципом. Такий транспортний засіб має невелику вартість, а за експлуатаційними властивостями перевищує закордонні аналоги. Конкурентоспроможний гібридний транспортний засіб доцільно створювати на базі найбільш масового автомобіля, існуюча силова установка якого залишається практично без змін, лише доповнюється екологічно чистим двигуном та джерелом енергії, системою управління, системою заряду тягових акумуляторних батарей, перетворювачем напруги тощо.

Як екологічно чистий двигун раціонально застосовувати вентильний двигун невисокої потужності ($1/3 \dots 1/2$ від потужності ДВЗ, що складає 20...30 кВт). Як екологічно чисте джерело енергії раціонально застосовувати літій-залізо-фосфатні акумулятори батареї, енергоємність яких визначає відстань, яку транспортний засіб може подолати у режимі «тільки електрика», виходячи з того, що приблизно 150 Вт·год витрачається на 1 км пробігу автомобіля масою 1000 кг. Пробіг у режимі «тільки електрика» на одному заряді тягових акумуляторних батарей може складати у межах 20...50 км. Цю відстань споживач обирає при замовленні гібридного транспортного засобу в залежності від передбачуваного середньодобового пробігу та вартості тягових акумуляторних батарей. Для підвищення ефективності експлуатації гібридного транспортного засобу заряд блоку тягових акумуляторних батарей повинен відбуватись у трьох режимах: «стоянка-заряд» (основний режим), «рекуперативне гальмування», «тільки паливо». Навіть на короткочасних стоянках, наприклад, під час вантажно-розвантажувальних робіт, доцільно заряджати тягові акумуляторні батареї від зовнішнього джерела електричної енергії.

4. Доведено, що підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів ґрунтується на раціональному використанні ДВЗ та електричних двигунів на різних швидкостях руху. Визначена стратегія управління гібридною силовою установкою, яка реалізується у різних режимах наступним чином. У режимі «тільки електрика» реалізується старт з місця, початок руху, прискорення та рух на швидкостях до 11,1 м/с (40 км/год). Саме на цих режимах ДВЗ має підвищену витрату палива, яка компенсується витратою недорогої електричної енергії, отриманої зі стаціонарної електричної мережі. При цьому динамічні властивості автомобіля будуть кращими, ніж у базовому за рахунок високого обертового моменту вентильного двигуна. Режим «тільки паливо» відбувається при подальшому наборі швидкості, коли підключається ДВЗ та здійснюється рух на підвищеній передачі. На відміну від Toyota Prius, водій на свій розсуд може задавати режим «тільки електрика» або режим «тільки паливо». Витрата палива в «гібридному» режимі при дальності пробігу до 60 км зменшується у 3,5 рази в порівнянні з базовим аналогом.

5. Розроблені рекомендації щодо вибору потужності тягового електричного двигуна і енергоємності блоку тягових акумуляторних батарей в залежності від маси, швидкості і дальності пробігу в режимі «тільки електрика» у вигляді тривимірних залежностей. Найбільш економна стала швидкість складає 6,94...8,33 м/с (25...30 км/год). Модернізований у гібридний варіант ЗАЗ Ланос Пікап масою 1240 кг (з водієм та електроприводом) при використанні 20 акумуляторів типу TS-LFP90АНА має максимальну дальність пробігу 42 км при усталеній швидкості 8,3 м/с (30 км/год) та споживає 9,4 кВт·год/100 км. Збільшення швидкості з 8,33 м/с (30 км/год) до 38,89 м/с (100 км/год) зумовлює збільшення витрати електричної енергії у 2,4 рази для будь-якої маси транспортного засобу.

Обґрунтовано, що завдяки використанню енергоємних накопичувачів електричної енергії, гібридний транспортний засіб можна використовувати не тільки для руху, але і для отримання принципово нових функціональних можливостей, наприклад, для автономного підключення різноманітних зовнішніх електричних пристроїв, таких як освітлювальні прилади, зварювальний апарат, обігрівальні елементи, мобільні пристрої тощо.

6. Доведено, що перспективними напрямками підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів є наступні: підвищення паливної економічності та екологічної чистоти за рахунок застосування енергозберігаючих силових установок та джерел енергії (фотоелектричних перетворювачів, рекуперації енергії підвіски, маховичних або конденсаторних накопичувачів енергії тощо), інтеграція автомобіля у єдиний інформаційний простір транспортних систем та застосування штучного інтелекту, підвищення рівня безпеки транспортних засобів та систем.

7. Натурне підтвердження основних положень дослідження проведено на модернізованому в гібридний варіант ЗАЗ Ланос Пікап, що застосовує екологічно чистий двигун на базі вентильного двигуна (потужність 15 кВт, ККД 85 %), екологічно чисте джерело енергії (20 послідовно з'єднаних літій-залізо-фосфатних акумуляторів TS-LFP90АНА загальною енергоємністю 5,76 кВт·год

та масою 64 кг). Натурні випробування модернізованого ЗАЗ Ланос Пікап у реальних умовах експлуатації на вулицях м. Харків визначили наступні характеристики: пробіг у режимі «тільки електрика» – до 40 км, швидкість на електричній тязі – до 11,11 м/с (40 км/год), витрата палива у «гібридному» режимі при дальності пробігу до 60 км – до 3,8 л/100 км, витрата електричної енергії у режимі «тільки електрика» в міських умовах руху – 13 кВт·год/100 км, час заряду акумуляторних батарей від електричної мережі 220 В, 50 Гц – 4 год, потужність, що споживається під час заряду, не перевищує 1750 Вт.

Розрахунок вартості комплектуючих, які застосовуються для побудови тягового електропривода, показав, що в умовах серійного виробництва їх вартість складає 43 000 грн, в умовах дослідного виробництва – 64 000 грн. Основною перевагою розробленої гібридної силової установки є невисока вартість гібридного транспортного засобу, яка при серійному виробництві буде в 3 рази меншою, ніж вартість Toyota Prius. При цьому за економічністю й екологічною безпекою модернізований Ланос Пікап не поступається Prius, а за пробігом у режимі «тільки електрика» перевищує у 20 разів. Ефективність використання акумуляторних батарей підвищилась з 15...20 % до 80...90 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бажинов О.В. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, А.В. Гнатів, А.В. Колесніков. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 327 с.
2. Бажинов О.В. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, В.Я. Двандненко. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
3. Смирнов О.П. Тенденція створення екологічно чистого транспортного засобу / О.П. Смирнов // Автомобильный транспорт. – 2005. – № 17. – С. 103–105.
4. Смирнов О.П. Аналіз схемних рішень побудови автомобіля з гібридною енергетичною установкою / О.П. Смирнов // Вестник ХНАДУ. – 2006. – № 32. – С. 41–43.
5. Смирнов О.П. Характерні режими роботи гібридної енергетичної установки автомобіля / О.П. Смирнов, В.І. Калмиков // Автомобильный транспорт. – 2006. – № 18. – С. 13–15.
6. Бажинов А.В. Концепция создания экологически чистого автомобиля / А.В. Бажинов, О.П. Смирнов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2006. – № 7. – С. 15–19.
7. Смирнов О.П. Математичне моделювання тягово-швидкісних характеристик гібридного автомобіля / О.П. Смирнов, В.С. Боженів // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2006. – № 2(8). – С. 46–49.
8. Смирнов О.П. Синергетичний підхід до створення силової установки автомобіля / О.П. Смирнов // Вестник ХНАДУ. – 2007. – № 37. – С. 131–133.
9. Смирнов О.П. Обоснование использования вентильных электрических машин в гибридных силовых установках автомобилей / О.П. Смирнов, В.И. Калмыков // Автомобильный транспорт. – 2007. – № 21. – С. 31–33.

10. Смирнов О.П. Исследование функциональных возможностей вентиляционных машин в электроприводе автомобилей / О.П. Смирнов, В.И. Калмыков, В.С. Боженков, А.М. Быков, Д.А. Воробьев. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту «ДонНТУ». – 2007. – № 1(4). – С. 129–132.

11. Бороденко Ю.М. Система керування гібридною силовою установкою з пневмодвигуном / Ю.М. Бороденко, С.А. Серіков, О.П. Смирнов // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту «ДонНТУ». – 2008. – № 1(6), С. 32–38.

12. Смирнов О.П. Використання конденсаторів великої ємності для забезпечення оптимальних параметрів роботи акумуляторних батарей гібридних автомобілів / О.П. Смирнов, О.С. Панікарський, В.С. Боженков, А.О. Смирнова // Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. – 2009. – №3. – С. 50–55.

13. Смирнов О.П. Алгоритм роботи системи керування автоматизованими коробками передач автомобілів / О.П. Смирнов, Г.К. Кальянов, В.Г. Кубата // Автомобильный транспорт. – 2009. – № 25. – С. 33-36.

14. Смирнов О.П. Схемні рішення створення гібридної силової установки на легковому автомобілі / О.П. Смирнов, В.Я. Двадненко, А.В. Колесніков // Наукові нотатки. – 2010. – № 28. – С. 498–502.

15. Смирнов О.П. Шляхи вдосконалення гібридних силових установок автомобілів / О.П. Смирнов, О.І. Репницький // Вестник ХНАДУ. – 2010. – № 49. – С. 26–28.

16. Смирнов О.П. Вдосконалення систем рекуперації кінетичної енергії в автотранспортних засобах з електроприводом / О.П. Смирнов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2010. – № 6(148). – С. 210–213.

17. Смирнов О.П. Концептуальні рішення створення екологічно чистих автотранспортних засобів з електроприводом / О.П. Смирнов // Вестник ХНАДУ. – 2011. – № 55. – С. 52–57.

18. Смирнов О.П. Оцінка економічності електромобілів / О.П. Смирнов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – № 9(180) Частина 1 – С. 30–34.

19. Бажинов А.В. Разработка экологически чистых автотранспортных средств / А.В. Бажинов, О.П. Смирнов, В.Я. Двадненко, М. Хаким // – Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2012. – № 128 – С. 138–142.

20. Смирнов О.П. Енергозберігаючі технології на транспорті на базі фотоелектричних перетворювачів / О.П. Смирнов // Вестник ХНАДУ. – 2012. – № 56. – С. 94–97.

21. Бажинов А.В. Пути снижения стоимости подзаряжаемого гибридного автомобиля / А.В. Бажинов, В.Я. Двадненко, С.А. Серіков, Е.А. Серікова, О.П. Смирнов // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – 2012. – № 134/2012. – С. 36–39.

22. Смирнов О.П. Вибір та розрахунок джерела живлення для електромобіля / О.П. Смирнов // Наукові нотатки. – 2012. – № 36. – С. 260–263.

23. Смирнов О.П. Розрахунок еквівалентної витрати палива електромобілями у різних країнах / О.П. Смирнов, О.Б. Богаєвський, А.О. Смирнова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – 2013. – № 29 (1002). – С. 114–119.

24. Смирнов О.П. Гибридная силовая установка для транспортных средств / О.П. Смирнов, А.Б. Богаевский, А.О. Смирнова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2013. – № 139 – С. 207–211.

25. Смирнов О.П. Перспективні напрями розвитку сучасного автомобілебудування / О.П. Смирнов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – 2014. – № 9 (1052). – С. 61–65.

26. Smurnov O. Especially security systems electric and hybrid cars [Електронний ресурс] / O. Smurnov, S. Poyda // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. – 2014. – № 6. С. 44–47. – ISSN 2226-9266 – Режим доступу к джерелу: http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE14_1/14sopehc.pdf.

27. Smurnov O. Experimental research of power characteristics car TOYOTA Prius in the mode electromobile [Електронний ресурс] / O. Smurnov, S. Klymenko // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. – 2014. – № 6. – С. 94–96. – ISSN 2226-9266 – Режим доступу к джерелу: http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE14_1/14soptme.pdf.

28. Smurnov O. Principles of construction hybrid power installations [Електронний ресурс] / O. Smurnov, S. Klymenko // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. – 2015. – № 8. – С. 27–30. – ISSN 2226-9266 – Режим доступу к джерелу: http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE15_2/2015-8-1.5.pdf.

29. Смирнов О.П. Концептуальні рішення створення екологічно чистих автотранспортних засобів з електроприводом [Електронний ресурс] / О.П. Смирнов // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. – 2012. – № 3. – ISSN 2226-9266 – Режим доступу к джерелу: http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE12_1c/11sopaze.pdf.

30. Смирнов О.П. Эволюция технических решений в гибридном автомобиле Toyota Prius [Електронний ресурс] / О.П. Смирнов, А.А. Дубас, Т.А. Матвиенко // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. – 2012. – № 3. – ISSN 2226-9266 – Режим доступу к джерелу: http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE12_1c/11sopatp.pdf.

31. Смирнов О.П. Проблемы та перспективи розвитку електромобілів [Електронний ресурс] / О.П. Смирнов, О.Б. Богаєвський, Р.І. Пігарєв // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. – 2013. – № 4. – С. 19–23. – ISSN 2226-9266 – Режим доступу к джерелу: http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE13_1/13soppre.pdf.

32. Смирнов О.П. Применение искусственного интеллекта в транспортных системах [Електронний ресурс] / О.П. Смирнов, А.А. Тропина // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. –

2013. – № 5. – С. 34–37. – ISSN 2226-9266 – Режим доступу к джерелу: http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE13_2/13sopits.pdf.

33. Калмыков В.И. Принципы построения систем электроснабжения мобильных информационно-вычислительных комплексов / В.И. Калмыков, О.П. Смирнов, А.В. Гуляев // Автомобильный транспорт. – 1998. – № 1. – С. 91–93.

34. Алексеев О.П. Характеристики информационного взаимодействия в эргатической системе / О.П. Алексеев, О.П. Смирнов, Д.Л. Ковтун // Автомобильный транспорт. – 1999. – № 3. – С. 95–97.

35. Никитин В.И. Надежность систем электроснабжения автомобилей / В.И. Никитин, В.И. Калмыков, О.П. Смирнов // Вестник ХГАДТУ. – 2000. – № 12, 13. – С. 214–217.

36. Смирнов О.П. Моделирование функционального состояния элементов системы «человек-техника-сред» / О.П. Смирнов // Вестник ХГАДТУ. – 2000. – № 12, 13. – С. 192–195.

37. Смирнов О.П. Мехатроника и эргономика в исследовании проблем анализа и синтеза человеко-машинных систем / О.П. Смирнов // Вестник ХГАДТУ. – 2000. – № 12, 13. – С. 202–205.

38. Смирнов О.П. Принципы информационно-энергетического взаимодействия объектов / О.П. Смирнов // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. – 2000 (9). – № 2. – С. 304–307.

39. Смирнов О.П. Системный анализ WEB-обучения в вузе автомобильного профиля / О.П. Смирнов, С.Н. Неронов // Вестник ХНАДУ. – 2005. – № 29. – С. 17–19.

40. Бажинов О.В. Науково-практичний комплекс підготовки фахівців з розроблення та ремонту гібридних автомобілів / О.В. Бажинов, Ю.В. Батигін, О.П. Смирнов // Новий колегіум. – 2014. – № 4(78). – С. 27–29.

41. Пат. 49349 Україна, (51) МПК (2009) В60К 5/00. Гібридний автомобіль з мехатронним накопичувачем енергії / Бажинов О.В., Смирнов О.П.; заявник та власник патенту Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № у 2009 11647 заявл. 16.11.09; опубл. 26.04.10, Бюл. №8, 2010 р.

42. Пат. 49346 Україна, (51) МПК (2009) В60К 5/00. Електромобіль з мехатронним накопичувачем енергії / Бажинов О.В., Смирнов О.П.; заявник та власник патенту Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № у 2009 11642 заявл. 16.11.09; опубл. 26.04.10, Бюл. №8, 2010 р.

43. Пат. 84028 Україна, (51) МПК (2013.01) В60К 6/00. Система рекуперації енергії автотранспортного засобу / Азаров О.В., Серіков Г.С., Серікова І.О., Смирнов О.П.; заявник та власник патенту Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № у 2013 03980 заявл. 01.04.13; опубл. 10.10.13, Бюл. № 19, 10.10.2013.

44. Пат. 97651 Україна, (51) МПК (2015.01) В60К 6/00. Автомобільне дверне вікно з москітною сіткою / Смирнов О.П., Борисенко А.О.; заявник та власник патенту Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № у 2014 11460 заявл. 21.10.14; опубл. 25.03.15, Бюл. № 6, 25.03.2015.

45. Пат. 97652 Україна, (51) МПК (2015.01) В60К 6/00. Автомобіль з внутрішньою системою заднього виду / Смирнов О.П., Борисенко А.О.; заявник та власник патенту Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № и 2014 11461 заявл. 21.10.14; опубл. 25.03.15, Бюл. № 6, 25.03.2015.

46. Смирнов О.П. Теоретические основы повышения топливной экономичности автомобиля за счет использования гибридной энергетической установки / О.П. Смирнов // Транспорт, экология – устойчиво развитие: XII научно-техническая конференция с международным участием, 18–20 мая 2006 г.: – Варна, Болгария, 2006. – С. 80–85.

47. Смирнов О.П. Схемные решения и особенности построения автомобилей с гибридной силовой установкой / О.П. Смирнов, А.О. Смирнова // Транспорт, экология – устойчиво развитие: XIII научно-техническая конференция с международным участием, 10–12 мая 2007 г.: – Варна, Болгария, 2007. – С. 613–619.

48. Смирнов О.П. Перспективы развития систем электропитания транспортных средств. / О.П. Смирнов // Транспорт, экология – устойчиво развитие: XIV научно-техническая конференция с международным участием, 8–10 мая 2008 г. – Варна, Болгария, 2008. – С. 295–301.

49. Смирнов О.П. Создание экологически чистого автомобиля / О.П. Смирнов // Транспорт, экология – устойчиво развитие: XVIII научно-техническая конференция с международным участием, 19–21 мая 2011 г.: – Варна, Болгария, 2011. – С. 524–529.

50. Смирнов О.П. Разработка системы управления автоматизированной коробкой передач автомобиля / О.П. Смирнов, Г.К. Кальянов // Мехатроника транспортных средств и технологических машин: Сборник статей I-Международной Интернет-конференции. – Губкин: Губкинский институт (филиал) ГОУ ВПО МГОУ, 2010. – С. 29–37.

51. Смирнов О.П. Экологически чистые и энергосберегающие технологии автотранспортных средств / О.П. Смирнов, Т.А. Матвиенко // Мехатроника транспортных средств и технологических машин: Сборник докладов 2-ой международной интернет-конференции. – Губкин: ООО «Айкью», 2012. – С. 53–58.

52. Смирнов О.П. Анализ энергетических показателей экологически чистых автомобилей на основании европейского ездового цикла / О.П. Смирнов, А.А. Дубас // Мехатроника транспортных средств и технологических машин: Сборник докладов 2-ой международной интернет-конференции. – Губкин: ООО «Айкью», 2012. – С. 59–64.

53. Смирнов О.П. Модернизация легкового автомобиля в гибридный / О.П. Смирнов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: Материалы международной научно-практической конференции. Том 1. Модернизация наземных транспортно-технологических машин и комплексов. Транспорт. Теоретические разработки и проектирование. Практика применения, эксплуатация и сервис: г. Пермь, Россия, Изд-во ПНИПУ. – 2013. – С. 336–343.

54. Смирнов О.П. Направления повышения топливной экономичности автотранспортных средств / О.П. Смирнов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: Материалы международной научно-практической конференции. г. Пермь, Россия, Изд-во ПНИПУ. – 2014. – С. 201–204.

55. Смирнов О.П. Разработка гибридной технологии для легкового автомобиля / О.П. Смирнов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. г. Воронеж, Россия, Воронежская государственная лесотехническая академия, ВГЛТА. – 2014. – С. 127–132.

56. Смирнов О.П. Концепция создания автотранспортных средств с альтернативными энергоустановками / О.П. Смирнов // Материалы 75-ой Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Перспективы развития автомобилей. Развитие транспортных средств с альтернативными энергоустановками», 2011. – С. 88–93.

57. Dvadnenko V.J. Ways of reducing the cost of hybrid vehicle electric drive / V.J. Dvadnenko, O.P. Smirnov, T.A. Vazhinova // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте». Г. Орел, Россия, Государственный университет. Изд-во ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». – 2015. – С. 185–188.

58. Смирнов О.П. Конверсия автомобиля в гибридный / О.П. Смирнов // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности: девятая междунар. науч.-практ. конф. 22–23 апреля 2010 г.: сборник трудов. – Санкт-Петербург, Россия, 2010. – Т. 4: под ред. А.П. Кудинова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 414–415.

59. Смирнов О.П. Опыт создания экологически чистого городского автомобиля / О.П. Смирнов // 6-е Луканинские чтения. Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе: тезисы докладов Международной научно-технической конференции, 29 января 2013 г. – МАДИ, Москва – С. 95–96.

60. Гнатов А.В. Використання комп'ютерних технологій для підготовки електромеханіків автомобільного профілю // А.В. Гнатов, О.П. Смирнов // Економіко-правові аспекти і соціальні пріоритети в тенденціях розвитку системи освіти України в умовах інтеграції в світову освітню систему: наук.-метод. конф., 17–18 квітня 2008 р. – Харків – С. 112–115.

61. Смирнов О.П. Альтернативні джерела живлення для екологічно чистих автотранспортних засобів / О.П. Смирнов // Проблеми розвитку транспортних систем і логістики: III-я Міжнародна наук.-практ. конф., 3–8 травня 2012 р. – Крим, Євпаторія – С. 173–175.

62. Смирнов О.П. Повышение уровня безопасности автомобиля за счет применения бортовых регистраторов / О.П. Смирнов, А.О. Смирнова // Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 16–17 квітня 2013 р. – ХНАДУ, Харків – С. 157–159.

63. Смирнов О.П. Моделювання паливної економічності гібридних автомобілів. / О.П. Смирнов // Математичне моделювання прикладних задач математики, фізики, механіки: тези доповідей Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції, 10–25 травня 2013 р. – ХНАДУ, Харків – С. 234–237.

64. Смирнов О.П. Расчет срока окупаемости гибридной силовой установки автомобиля / О.П. Смирнов // Проблемы, перспективы та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві: матеріали V міжнародної науково-практичної конференції; Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, 10–14 червня 2013 р. – Харків – С. 179–180.

65. Смирнов О.П. Оборудование легкового автомобиля ЗАЗ Сенс гибридной силовой установкой / О.П. Смирнов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Одиннадцатой Международной научно-технической конференции (в 4 томах), том 2; Белорусский национальный технический университет, 2013 р. – БНТУ, Минск, Республика Беларусь – С. 25–26.

66. Смирнов О.П. Гибридная силовая установка для автобуса / О.П. Смирнов // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 85-річчю заснування ХНАДУ, 85-річчю заснування автомобільного факультету та з нагоди Дня автомобіліста і дорожника «Новітні технології в автомобілебудівництві та транспорті», 15-16 жовтня 2015 р., ХНАДУ, Харків – С. 55–57.

67. Смирнов О.П. Экологически чистый транспорт – будущее наших городов / О.П. Смирнов, С.И Клименко, О.Г. Гелашвили // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології», 17–19 листопада 2015 р., ХНАДУ, Харків – С. 29–30.

АНОТАЦІЯ

Смирнов О.П. Науково-технічні основи підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет МОН України, Харків, 2016.

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів. Запропоновано принципово нову класифікацію гібридних силових установок, що на відміну від існуючих, визначає основний принцип їх побудови: економічний, енергетичний, екологічний. Розроблені концептуальні рішення щодо підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів за рахунок створення гібридних силових установок, що відповідають економічному принципу. Вироблені рекомендації щодо вибору потужності тягового електричного двигуна і енергоємності блоку тягових акумуляторних батарей в залежності від маси, швидкості і дальності пробігу в режимі «тільки електрика», що представлені у вигляді тривимірних залежностей. Запропоновано стратегію функціонування системи управління гібридними транспортними

засобами, що заснована на раціональному використанні ДВЗ і електричних двигунів на різних швидкостях руху. Проведено моделювання та натурне підтвердження основних положень дослідження на модернізованому у гібридний варіант ЗАЗ Ланос Пікап. Визначені перспективи розвитку транспортних засобів, створені умови для підвищення інноваційної привабливості проведених досліджень.

Ключові слова: гібридний транспортний засіб, паливна економічність, енергозберігаючі технології, гібридна силова установка, електропривод, альтернативні джерела енергії.

АННОТАЦІЯ

Смирнов О.П. Научно-технические основы повышения эффективности эксплуатации гибридных транспортных средств. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет МОН Украины, Харьков, 2016.

В диссертации приведено теоретическое обобщение и новое решение важной научно-прикладной проблемы повышения эффективности эксплуатации гибридных транспортных средств. Предложена принципиально новая классификация гибридных силовых установок, которая в отличие от существующих, определяет основной принцип их построения: экономичный, энергетический, экологичный. Экономичный принцип предполагает построение гибридной силовой установки в бюджетном сегменте с соотношением мощности электрического двигателя к мощности ДВС в пределах $1/3 \dots 1/2$. По экономичному принципу разработаны несколько модификаций гибридных транспортных средств на кафедре автомобильной электроники ХНАДУ, которые созданы на базе ЗАЗ Ланос Пікап и ЗАЗ Таврия Пікап.

Разработаны концептуальные решения по повышению эффективности эксплуатации гибридных транспортных средств за счет создания гибридных силовых установок, соответствующих экономичному принципу. Конкурентоспособное гибридное транспортное средство рационально создавать на базе массового легкового автомобиля. Существующая силовая установка остается практически без изменений, только дополняется экологически чистым двигателем и источником энергии, системой управления, системой заряда и др. Доказано, что в качестве экологически чистого двигателя рационально использовать вентильный электропривод мощностью до 30 кВт, а в качестве накопителя энергии – литий-железо-фосфатные аккумуляторы, энергоемкость которых выбирается потребителями в зависимости от желаемого расстояния, которое автомобиль может преодолеть в режиме «только электричество» (в пределах 20...50 км). Выработаны рекомендации по выбору мощности тягового электропривода и энергоемкости блока ТАБ в зависимости от массы, скорости и дальности пробега в режиме «только электричество», которые представлены в виде трехмерных зависимостей. Для повышения эффективности эксплуатации заряд блока ТАБ следует осуществлять от внешней сети 220 В, 50 Гц.

Стратегия функционирования гибридной силовой установки реализуется следующим образом. В режиме «только электричество» осуществляется старт с места, ускорение и движение на скорости до 11,11 м/с (40 км/ч). Переход на режим «только топливо» происходит при дальнейшем наборе скорости, когда подключается ДВС. В режиме «рекуперативного торможения» отключается ДВС, а электродвигатель переходит в генераторный режим, обеспечивая заряд ТАБ. Расчетный расход топлива в «гибридном» режиме при дальности пробега до 60 км уменьшается в 3,5 раза по сравнению с базовым аналогом.

Натурное подтверждение основных положений исследования получено на модернизированном в гибридный вариант ЗАЗ Ланос Пикап. Основные технические характеристики: дальность пробега на электрической тяге – 40 км, максимальная скорость на электроприводе – 11,11 м/с (40 км/ч), расход электроэнергии в режиме электромобиля – 130 Вт·ч/км, средний расход топлива в смешанном цикле при пробеге до 60 км – до 3 л/100 км, время полного заряда аккумуляторных батарей от электрической сети 220 В, 50 Гц – 4 ч, потребляемая мощность во время заряда не превышает 1750 Вт.

Ключевые слова: гибридное транспортное средство, топливная экономичность, энергосберегающие технологии, гибридная силовая установка, электропривод, альтернативные источники энергии.

ABSTRACT

O. Smyrnov. Scientific and technical basis of increasing the operational efficiency of hybrid vehicles. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Engineering Sciences degree in specialty 05.22.20 – Operation and repair of transport vehicles. – Kharkiv National Automobile and Highway University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The thesis presents a theoretical generalization and new solution to an important scientific and applied problem of increasing the efficiency of operation of hybrid vehicles. There has been proposed a fundamentally new classification of hybrid power plants, which, unlike the existing ones, defines the basic principle of their construction: economic, energy, environmental. Conceptual solutions to improving operational efficiency of hybrid vehicles by creating hybrid power plants that meet the economic principle have been developed. There have been elaborated recommendations on choosing the traction electric motor power and the battery pack capacity depending on the weight, speed and distance run in the “only electricity” mode, which are presented in the form of a three-dimensional dependence. There has been proposed a strategy of the functioning of the hybrid vehicle control system based on a rational use of internal combustion engines and electric motors at different speeds. The simulation and field studies to prove the key provisions of the study using the modernized into a hybrid variant ZAZ Lanos pickup have been carried out. Development prospects of vehicles have been identified, conditions for increasing the innovation attractiveness of the conducted research have been created.

Keywords: hybrid vehicle, fuel efficiency, energy saving technologies, hybrid power plant, electric drive, alternative energy sources.

