

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ВЕСЕЛА МАРІЯ АНАТОЛІВНА

УДК 629.113

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ СИЛОВОЮ
УСТАНОВКОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З БОРТОВОЮ ПІДЗАРЯДКОЮ В
УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація
та ремонт засобів транспорту

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бажинов Олексій Васильович
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідуючий кафедрою автомобільної електроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шаша Ігор Константинович
Національна академія Національної гвардії,
м. Харків, професор кафедри експлуатації автомобілів і бойових машин;

кандидат технічних наук, доцент
Сергієнко Микола Єгорович,
Національний технічний університет НТУ «ХП»,
м. Харків, професор кафедри автомобіле-
та тракторобудування.

Захист відбудеться «20» березня 2019 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Автореферат розісланий «11» лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.П. Смирнов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Актуальність роботи пов'язана економічними і соціальними проблемами сучасності та обумовлена необхідністю створення електромобілів, що мають високу якість і пристосованість до зовнішніх умов експлуатації.

В умовах експлуатації до автомобілів пред'являють жорсткі вимоги в плані паливної економічності, безпеки руху, екологічності, періодичності та вартості технічного обслуговування і ремонту. Це зумовлює необхідність використання автомобілів, що мають високу якість і пристосованість до умов експлуатації в Україні.

Зміна клімату, погіршення екології та забруднення зовнішнього середовища – проблеми, які потребують активного рішення. Відповідно Паризького рішення по клімату розглянуто обмеження глобального потепління в межах 2 градусів Цельсія (по відношенню до показників доіндустріальної епохи). Таким чином, використання електромобілів дозволяє знайти рішення в боротьбі зі зміною клімату, а також покращенню якості повітря в містах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Робота виконана відповідно до «Концепції розвитку транспортно-дорожнього комплексу України на середньостроковий період до 2020 року», затверджений наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 8 січня 2008 року і є складовою частиною науково-дослідної роботи кафедри автомобільної електроніки.

Наукові положення, розробки, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, використані для виконання господарсько-договірних та держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України:

– «Модернізація автомобіля ЗАЗ у гібридний варіант» (2015–2016 рр.) № державної реєстрації 0115U003266;

– «Моделювання режимів роботи гібридної силової установки для транспортних засобів» (2013), № державної реєстрації 0113U007635;

«Розроблення тягового електропривода для легкових автомобілів» (12.2013–11.2014), № державної реєстрації 0114U002659.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності використання електромобілів за рахунок методів адаптації управління силовою установкою до умов експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

– провести дослідження по удосконаленню методів моделювання та оптимізації управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою на підставі системного аналізу підвищення економічності витрат енергії;

– розробити теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей силової установки електромобіля з підзарядкою:

– розробити концепцію багатокритеріальної оптимізації управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою в умовах експлуатації на основі використання методів математичного програмування та нейро-нечіткого управління;

– провести експериментальні дослідження для оцінки ефективності розробленого методу моделювання і оптимізації управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою.

Об'єкт дослідження – процес управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою по розподілу потужності заряду тягової акумуляторної батареї (ТАБ) для заданих умов експлуатації.

Предмет дослідження – методи управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою на етапі експлуатації.

Методи дослідження. Вирішення поставленої задачі забезпечується використанням системного підходу та раціонального поєднання теоретичних і експериментальних досліджень, узагальнення та аналізу відомих наукових результатів, а також використання методів диференціального обчислювання, сучасної теорії автоматичного управління. Для аналізу експериментальних даних використовувалися методи математичної статистики, інтелектуального аналізу даних і нейромережева апроксимація. Для формального описування окремих алгоритмів управління силовою установкою електромобіля використовувалися методи теорії нечітких множин, нечіткої логіки і нейро-нечіткого регулювання.

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-прикладне завдання, що створює умови для ефективного використання електромобіля з підзарядкою за рахунок удосконалення управління силовою установкою на етапі експлуатації.

Наукова новизна визначається такими положеннями:

вперше одержано:

– метод управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою, який на відміну від відомих, забезпечує зниження витрат енергії на основі використання методів математичного програмування та нейрон-нечіткого управління поза залежності від схеми будови та конструктивних особливостей;

удосконалено:

– метод структурної і параметричної ідентифікації математичної моделі силової установки електромобіля, яка на відміну від відомих, віддзеркалює її тягово-швидкісні характеристики, а також параметри ТАБ на підставі використання апарата штучних нейронних мереж;

набули подальшого розвитку:

– методи оцінки конструктивних рішень електромобілів з підзарядкою, які на відміну від відомих, враховують наукове обґрунтування базових

параметрів і характеристик силової установки на підставі проведених обчислювальних експериментів при використанні розроблених математичних моделей.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що отримані наукові результати становлять єдиний комплекс досліджень (концепція, принципи, критерії, методи та математичні моделі), запропонована методика адаптації стратегії управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою до умов експлуатації і визначені конструктивні параметри і параметри потужності силової установки електромобіля з підзарядкою на експлуатаційні властивості.

Отримані результати були використані при розробці метода оцінки енергетичного балансу силової установки за допомогою обчислювального експерименту і визначені науково обґрунтовані рекомендації для аналізу конструктивних рішень силової установки електромобіля з підзарядкою.

За результатами досліджень запропоновано алгоритм та процедуру раціонального поетапного вибору варіанту придбання автотранспортних засобів на етапі експлуатації. Розроблені методики впроваджені в ТОВ «Укравтопроект», ТОВ «ІНТЕРСТИЛ», спеціалізоване СТО «Ампера Моторс», а також використовуються в навчальному процесі ХНАДУ.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно та викладено у роботах [1-15]. Робота [12] опублікована без співавторів. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: розробка параметрів вибору акумуляторної батареї для електросилових установок електромобілів [1-3]; математична модель системи керування тягового електроприводу [4]; використання нейромережової апроксимації характеристик бортової електростанції [5,7]; оцінка технічних рішень електрохімічної системи електромобіля [6,13]; залежності для оцінювання параметрів надійності технічного стану електромобілів [8]; постановка задачі та обробка результатів [9]; залежності для оцінювання технічних рішень силової установки електромобілів від умов експлуатації [10,11]; підходи для оцінювання екологічності легкових автомобілів [14,15].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи виголошено й ухвалено на конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Шляхи забезпечення якості підготовки фахівців транспортної галузі» (м. Харків, 2015 р.); I-III Міжнародні науково-технічні конференції «Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві – освіта, наука, практика» (м. Херсон, 2015-2017 рр.); IV Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» (м. Харків, 2015); V Міжнародна науково-технічна конференція студентів та молодих вчених ДВНЗ «НГУ» «Наукова Весна» (м. Дніпро, 2016 р.), IV Краковська польська конференція о науках транспорту, (м. Краків, 2017).

Науково-практична конференція «Службово-бойова діяльність Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми та перспективи» (м. Харків, 2018).

Публікації. Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно і повністю опубліковані в 15 наукових роботах. Серед них, 7 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав (з них 2 – у міжнародних виданнях, 1 – в журналі, що входить до науково-метричної бази Scopus). За матеріалами досліджень опубліковано 8 тез у збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Дисертація складає 185 сторінок, у тому числі 3 додатка на 28 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 118 сторінок, 49 рисунків, 2 таблиці. Список використаних джерел складає 101 найменування на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи; обґрунтовано актуальність теми; сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження; описано застосовані методи дослідження та зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами; визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів; надано інформацію про апробацію та публікацію результатів дисертаційних досліджень.

У **першому** розділі проведено аналіз літературних джерел, що стосується задачі, дослідженої в дисертаційній роботі. Встановлено, що перспективним напрямком підвищення ефективності та екологічної безпеки транспортних засобів є використання електричних силових установок (ЕСУ), котрі мають комбінацію різних фізичних принципів акумулювання і перетворювання енергії в межах енергетичної установки. Аналіз конструктивних рішень ЕСУ електромобіля визначає особливості математичних моделей і методів синтезу системи управління.

Експлуатаційні показники електромобілів в значній мірі визначаються характеристиками системи автоматичного управління (САУ). Є три підходи до синтезу управління ЕСУ: використання логічних правил вибору стратегії, використання методів теорії оптимального управління та алгоритмів адаптації до поточного їздового циклу. Підвищення енергозбереження та екологічної безпеки ЕСУ можливо на підставі підвищення ефективності методів чисельної оптимізації за рахунок нових способів зменшення розміру оптимізаційних задач та визначення адекватного рівня ідеалізації математичних моделей, використання можливостей нейромережевого і нейро-нечіткого управління. За результатами першого розділу сформульовано завдання дослідження.

Другий розділ роботи присвячено теоретичним дослідженням методів управління силовою установкою електромобіля.

Задачу оптимізації управління силовою установкою електромобіля сформулюємо таким чином.

Для їздового циклу, визначуваного заданою функцією зміни швидкості автомобіля $V_{zd}(t)$, $t \in T$, знайти управління $\mathbf{u}^*(t)$, яке доставляє мінімум функціоналу $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$ і задовольняє прийнятним обмеженням на можливі стани, допустимі управління і обмеженням у вигляді неголономних зв'язків

$$J_{SV}^* = J_{SV}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, T) = \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad (1)$$

$$\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}, \quad \mathbf{u}^* \in \mathbf{U}, \quad f_c(\dot{\mathbf{x}}^*, \mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) = 0, \quad \forall t \in T. \quad (2)$$

При цьому значення J_{SV}^* називатимемо оптимальним значенням функціонала, а векторну функцію

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad (3)$$

що доставляє функціоналу оптимальне значення – оптимальним управлінням.

Обмеження у вигляді неголономних зв'язків $f_c(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$ обумовлені динамічними властивостями власне електромобіля, силової установки і апаратури управління. Вони визначаються кінематичною схемою силової установки електромобіля.

В залежності від умов руху привід ведучих коліс виконується за рахунок тягового електроприводу, отримуючи енергію від ТАБ і генераторної установки. В якості тягового електроприводу використовується зворотна електрична машина. Працюючи в генераторному режимі при гальмуванні електромобіля, електрична машина створює необхідний гальмівний момент, забезпечує одночасно рекуперацію залишків енергії.

Після того, як зменшилася ємність ТАБ, включається бортова електростанція, яка виробляє електроенергію і надає її на електродвигун тягового електроприводу, а також на зарядку ТАБ.

Керування розглянутого тягового електроприводу з зарядкою від бортової електростанції виконується на підставі наступних керуючих впливів:

– сигнал керування крутним моментом або гальмівним моментом зворотної електричної машини тягового електроприводу ($\beta\omega_w$);

Область допустимих режимів роботи вентильного електродвигуна (ВЕД) обмежена співвідношеннями

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{\max}; \quad \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq U_{\max}, \quad (4)$$

де I_{\max} – максимально-допустимий струм фази, обумовлений особливостями ВП або тепловими обмеженнями;

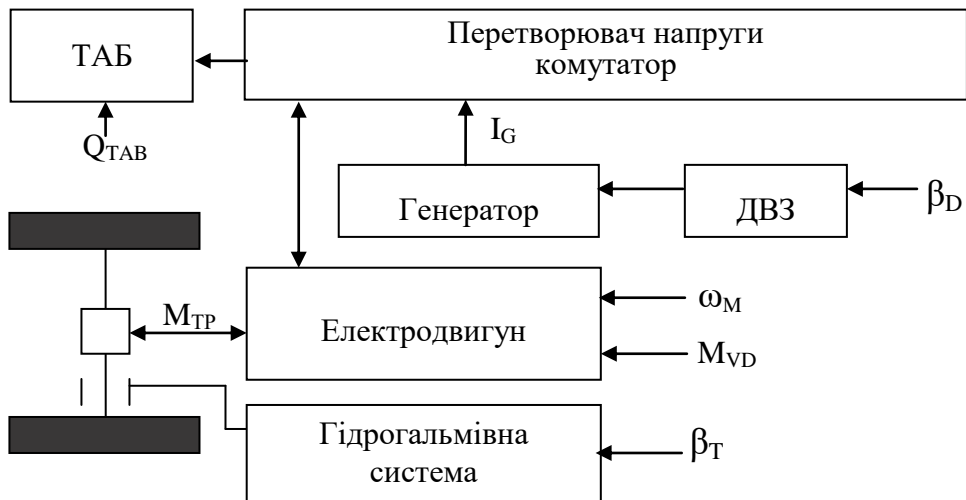


Рисунок 1 – Схема тягового електроприводу з зарядкою від бортової електростанції

U_{\max} – максимально-допустима напруга фази $U_{\max} = \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$;

U_{DC} – постійна напруга тягової бортової мережі.

На високих швидкостях обертання ротора ВЕД для задоволення обмежень області допустимих режимів часто виявляється необхідним використовувати, так званий, режим «ослаблення поля». Даний режим припускає збільшення негативної складової вектору струму i_d з метою компенсації ЕРС обертання $E = \omega_e \psi_{mag}$ за допомогою складової напруги статора $\omega_e L_{1d} i_d$. Таким чином, в загальному випадку $[i_d^*, i_q^*] = f(M_{VD}, \omega_M)$.

У ролі накопичувача енергії тягового електроприводу найчастіше виступають електрохімічні джерела струму – тягові акумуляторні батареї (ТАБ). Є велика кількість типів акумуляторів, придатних для використання в ТАБ електромобілів. Однак жоден з цих типів в повній мірі не відповідає всім вимогам, що пред'являються до ТАБ, і не існує однозначної критерію вибору оптимального акумулятора.

Акумуляторна батарея електромобіля повинна володіти високими питомими значеннями енергії і потужності, високим ККД, великим числом циклів «заряд-розряд», низькою вартістю, безпекою в експлуатації, надійністю, низькою вартістю технічного обслуговування, малим часом заряду.

Якщо уявити еквівалентну схему заміщення ТАБ у вигляді послідовного з'єднання еквівалентної ЕРС ($E_{ТАБ}$) і еквівалентного внутрішнього опору ($R_{ТАБ}$), напруга ТАБ можна визначити з виразу

$$U_{ТАБ} = E_{ТАБ} - I_{ТАБ} \cdot R_{ТАБ} \quad (5)$$

Цей вираз не враховує динамічні властивості ТАБ, якими при дослідженні властивостей тягового електроприводу можна знехтувати. У загальному випадку $E_{ТАБ}$ і $R_{ТАБ}$ є функціями ступеня зарядженості ТАБ, температури електроліту ($t_{ТАБ}^0$), величини і напрямку струму ($I_{ТАБ}$)

$$E_{ТАБ} = E_{ТАБ}(\theta_{ТАБ}, I_{ТАБ}, t_{ТАБ}^0), \quad R_{ТАБ} = R_{ТАБ}(\theta_{ТАБ}, I_{ТАБ}, t_{ТАБ}^0) \quad (6)$$

Потужність, що віддається або споживана акумуляторною батареєю, визначається виразом

$$P_{ТАБ} = U_{ТАБ} \cdot I_{ТАБ} = (E_{ТАБ} - I_{ТАБ} \cdot R_{ТАБ}) \cdot I_{ТАБ} \quad (7)$$

Отже,

$$I_{ТАБ} = \frac{1}{2 \cdot R_{ТАБ}} \cdot \left(E_{ТАБ} - \sqrt{E_{ТАБ}^2 - 4 \cdot R_{ТАБ} \cdot P_{ТАБ}} \right) \quad (8)$$

Негативне значення підкорінного виразу в останній формулі відповідає випадку $P_{ТАБ} > P_{ТАБ,max}$, де $P_{ТАБ,max}$ – максимальна потужність, ТАБ. Отже,

$$P_{max} = \frac{E_{ТАБ}^2}{4 \cdot R_{ТАБ}} \quad (9)$$

Третій розділ присвячено адаптивному управлінню силової установки електромобілів. Характеристики системи управління представлені у вигляді параметричних даних, які задані апроксимуючими функціями, а настройку виробляють шляхом ітеративної оптимізації параметрів. При цьому система автоматичного керування силовою установкою електромобіля повинна мати в своєму складі блок адаптації, що забезпечує асимптотичне наближення $J_{SV} \rightarrow J_{SV}^*$ і при $t \rightarrow \infty$ шляхом налаштування параметрів регулятора (рис. 2).

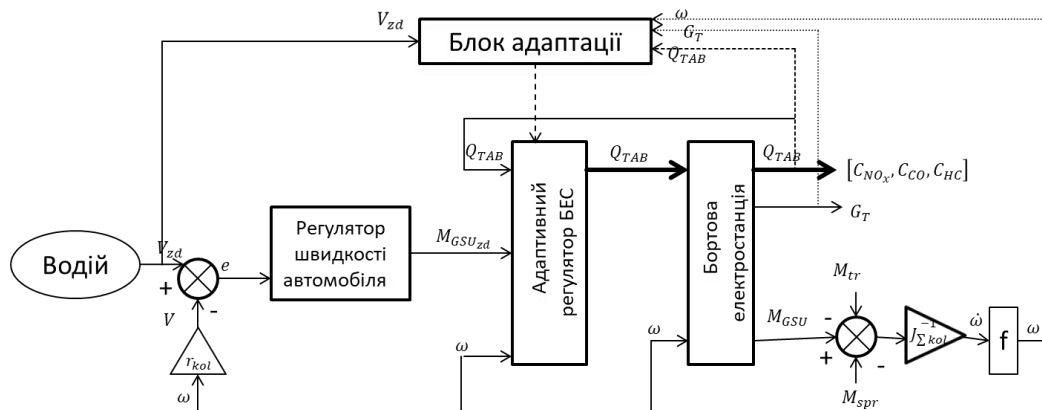


Рисунок 2 – Система адаптивного керування силовою установкою електромобіля.

Дана САУ забезпечує отримання управління оптимального або близького до оптимального за рахунок замикання системи по змінним стану і не вимагає апріорної інформації про впливи, що задають та обурюють. В структурній схемі САУ міститься блок Критик, що оцінює якість роботи всієї системи управління. Даний підхід передбачає адаптацію стратегії управління ЕСУ на основі концепції навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning).

Структура адаптивного регулятора ЕСУ, який реалізує концепцію нейромережевого управління з нейромережевим критиком і моделлю об'єкта управління, наведено на рис. 3.

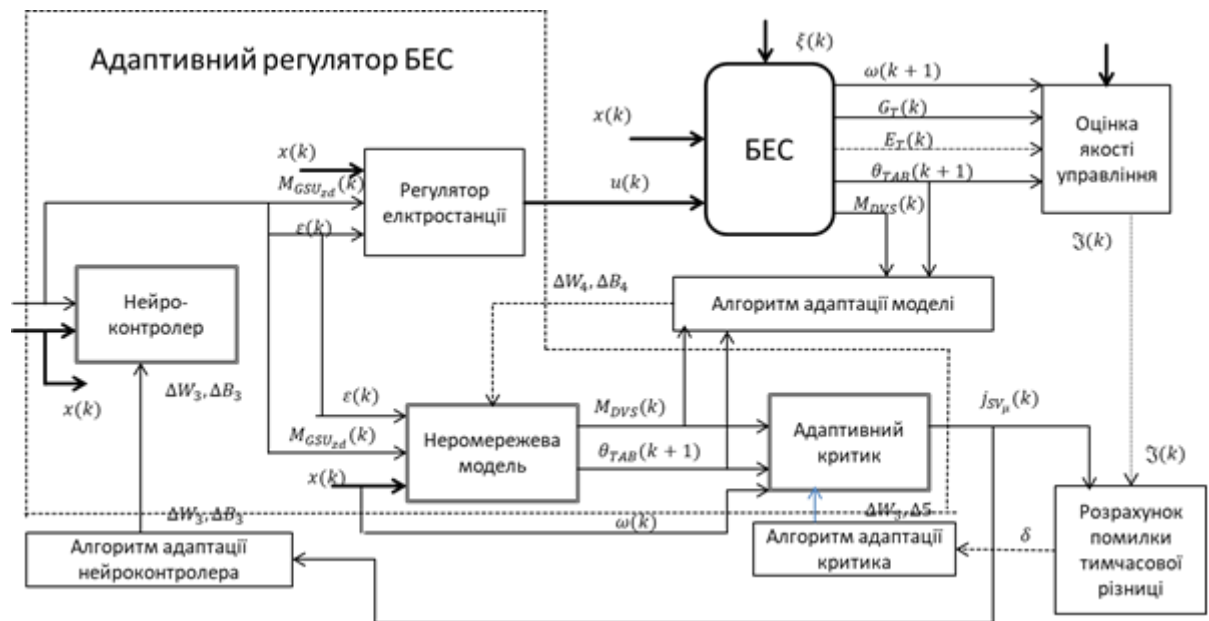


Рисунок 3 – Адаптивний регулятор електросилової установки

Блок адаптації забезпечує параметричну настройку ІММ нейроконтролера, моделі і адаптивного критика шляхом налаштування відповідних матриць вагових коефіцієнтів і векторів зсувів нейронів.

Метою навчання нейроконтролера є формування таких керуючих впливів ГСУ, які б сприяли зменшенню квадратичного значення оцінки функціонала якості управління

$$E_{NC} = \frac{1}{2} \cdot \hat{J}_{SV\mu}^2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

Корекція параметрів ІММ адаптивного критика здійснюється з умови мінімізації квадратичної помилки

$$E_{NC} = \frac{1}{2} \cdot \hat{J}_{SV\mu}^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Згідно виразами

$$W_{5i}(k+1) = W_{5i}(k) + \Delta W_{5i}(k) \quad (12)$$

$$B_{5i}(k+1) = B_{5i}(k) + \Delta B_{5i}(k), i = \overline{1, 2}, \quad (13)$$

де

$$\Delta W_{5i}(k) = v_{KR} \cdot \Delta W_{5i}(k-1) + \lambda_{KR} \cdot (1 - v_{KR}) \cdot \left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial W_{5i}} \right|_{W_{5i} = W_{5i}(k)} \quad (14)$$

$$\Delta B_{5i}(k) = v_{KR} \cdot \Delta B_{5i}(k-1) + \lambda_{KR} \cdot (1 - v_{KR}) \cdot \left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{5i}} \right|_{B_{5i} = B_{5i}(k)} \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{52}} \right|_{B_{52} = B_{52}(k)} = \delta(k); \quad \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{51}} = W_{52}^T \cdot \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{52}} * (1 - N_{51}^2); \quad (16)$$

$$\frac{\partial E_{KR}}{\partial W_{52}} = \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{52}} \cdot N_{51}^T \quad (17)$$

$$\left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial W_{41}} \right|_{W_{51} = W_{51}(k)} = \left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} \right|_{B_{51} = WB_{51}(k)} \cdot \begin{bmatrix} \bar{M}_{GSU.zd} \\ \bar{\theta}_{ТАБ}(k+1) \\ \bar{\omega}(k) \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

λ_{KR} і v_{KR} – коефіцієнти швидкості і інерційності навчання ІНС адаптивного критика відповідно.

Таким чином, на кожному кроці поліпшується закон управління шляхом навчання нейроконтролера, а також підвищується здатність системи оцінювати поточну ситуацію внаслідок навчання ІНМ адаптивного критика і моделі. Корекція параметрів нейронних мереж триває до тих пір, поки не буде досягнутий мінімум функціоналу якості управління $J_{SV\mu}$ або буде отримана прийнятна стратегія управління для заданого їздового циклу.

ІНМ нейроконтролера, моделі і адаптивного критика можуть бути ініційовані випадковими значеннями вагових коефіцієнтів і зсувів нейронів, рівномірно розподіленими в діапазоні $[-1, 1]$. В цьому випадку допустимі управління при довільних впливах, що задають і обурюють, гарантуються урахуванням обмежень області припустимих режимів в регуляторі ЕСУ $u = f_{GSU.rg}(\varepsilon, M_{GSU.zd}, V)$.

Однак для прискорення адаптації доцільно провести попереднє «off-line» навчання нейроконтролера і нейромережевої моделі з використанням еталонної моделі управління (рис. 4)

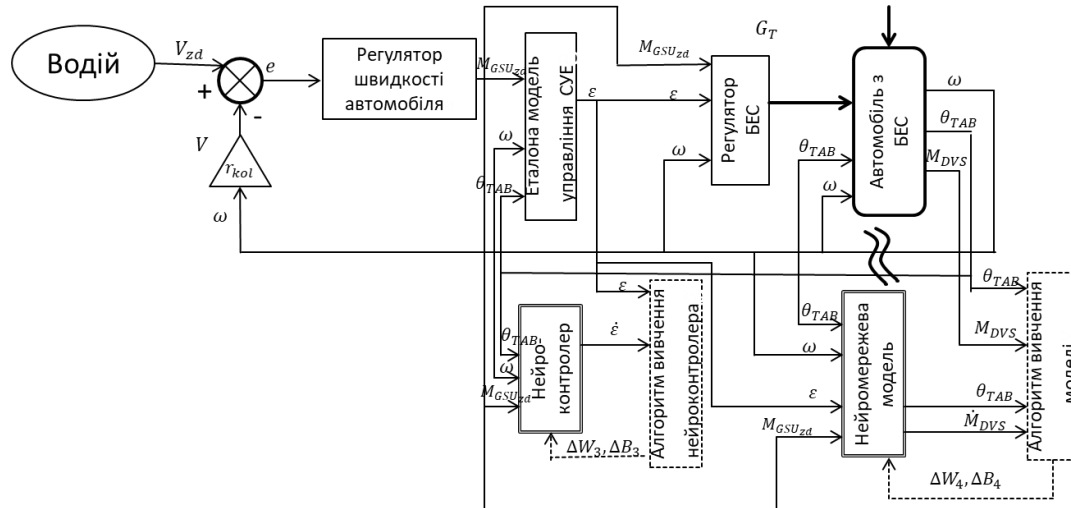


Рисунок 4 – Навчання нейроконтролера і нейромережевої моделі з використанням еталонної моделі управління

При неможливості передчасного навчання нейроконтролера адаптивної САУ СУЕ з використанням еталонної моделі розрахунку коефіцієнта використання електростанції може бути реалізовано на базі нейро-нечіткого контролера, що реалізує алгоритм Менделя-Ванга для нечіткого висновку заключень.

Мережу Ванга-Менделя розглянуто як систему нечіткого висновку Мамдамі з сингтонними функціями приналежності термів заключень бази правил при використанні дефазифікації відносно середнього центру та застосуванні алгебраїчного добутку для визначення результатів нечіткої кон'юкції при агрегуванні.

У четвертому розділі дисертаційної роботи викладено експериментальні дослідження силової установки електромобіля.

Для визначення потоків енергії в силовій установці електромобіля з бортовою зарядною станцією були проведені експериментальні дослідження на гібридному автомобілі Toyota Prius з метою визначення зміни напруги та струму. Це дозволило визначити в умовах експлуатації межі зміни зарядного струму та напруги ТАБ і бортової зарядної станції в залежності від режиму роботи електромобіля.

Для дослідження потоків енергії в гібридній силовій установці автомобіля Toyota Prius був розроблений бортовий вимірювальний комплекс. Основою вимірювального комплексу (рис. 5) є АЦП з інтерфейсом ISA типу PCL-711. В якості програмного забезпечення був обраний пакет Advantec Genidaq 4.1. Крім того, для вимірювання таких параметрів, як час впорскування палива, масова

витрата повітря, оберти електричних машин був використаний мотортестер MODIS.

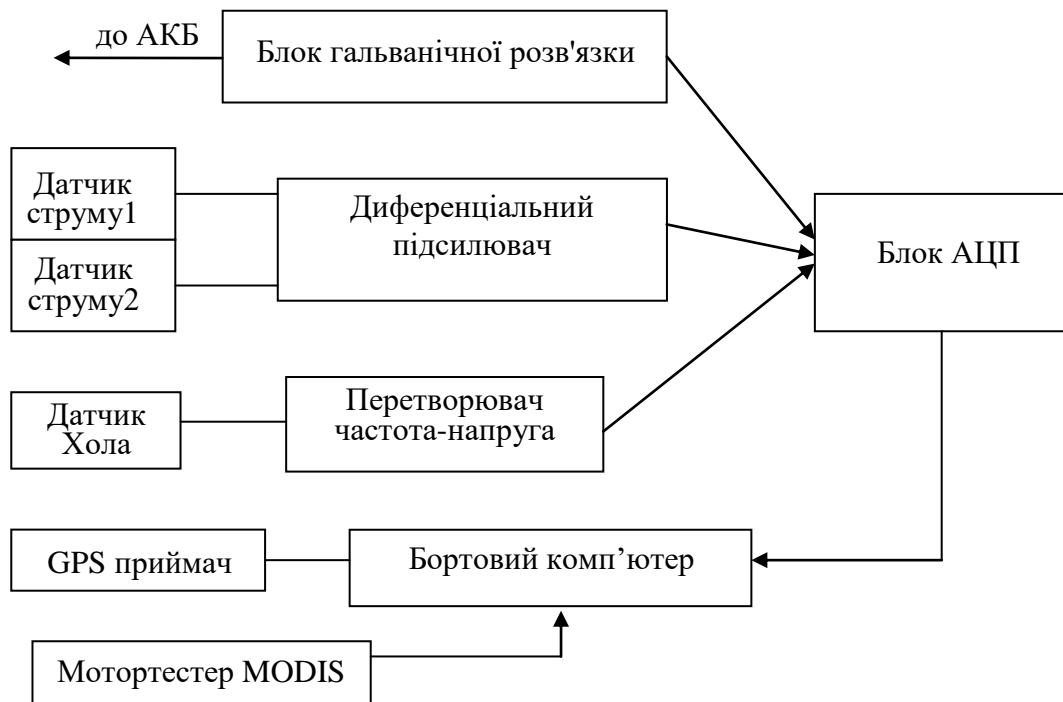


Рисунок 5 – Структурна схема вимірювального комплексу

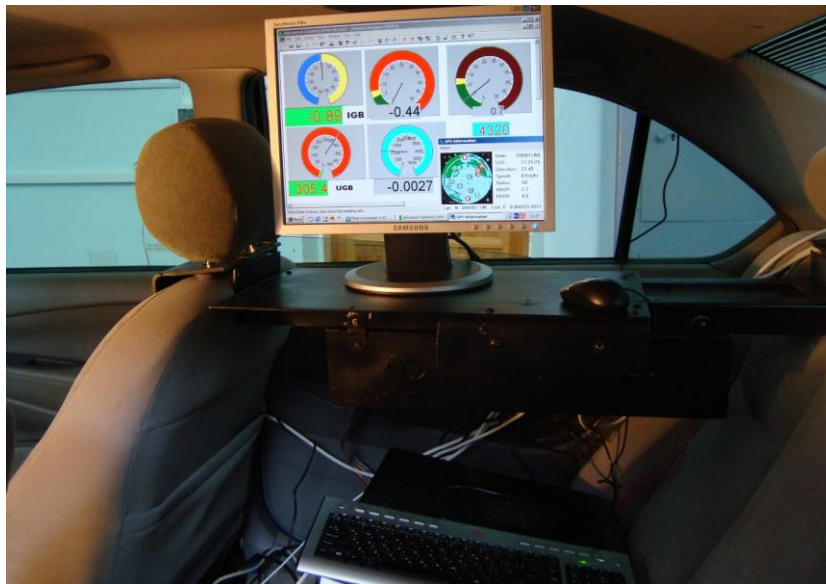
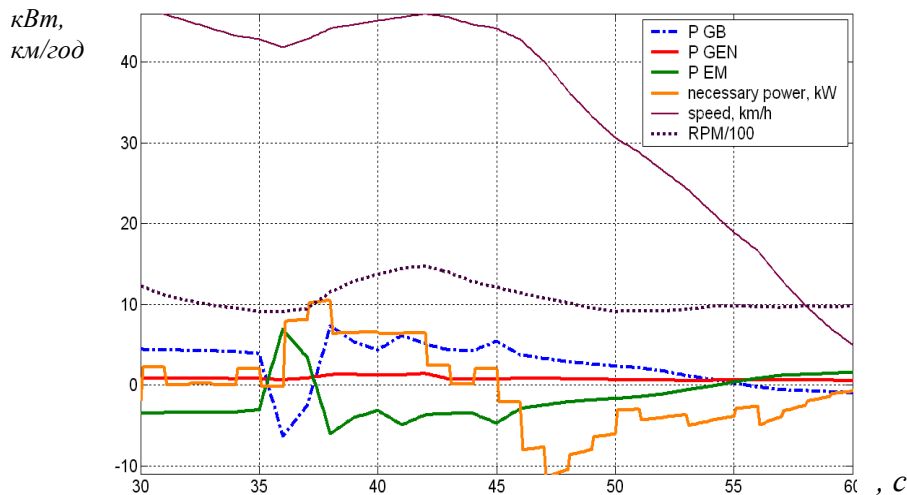


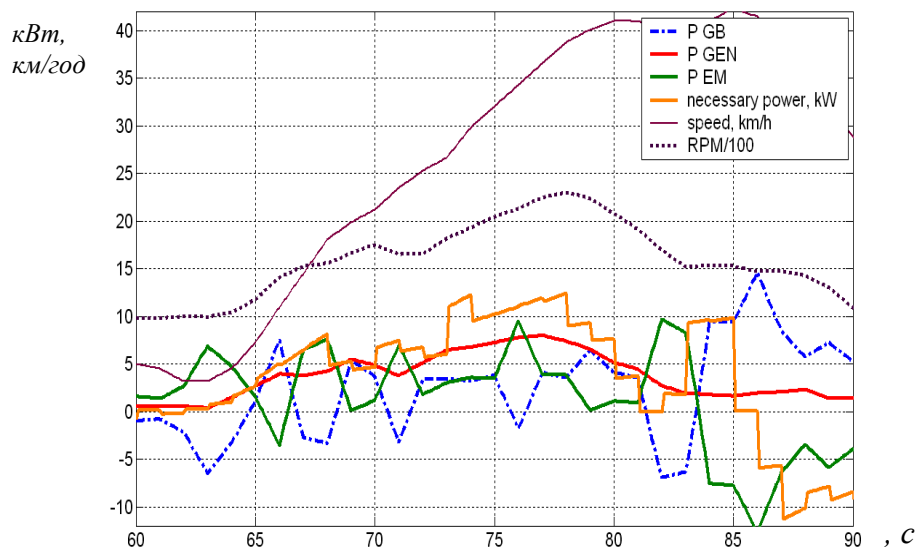
Рисунок 6 – Вимірювальний комплекс на автомобілі

Типові приклади оброблених вимірювань розподілів потоків енергії при різних режимах руху наведено на рис. 7, 8.



P_{GB} – потужність ТАБ, кВт; P_{GEN} – потужність генератора, кВт; P_{EM} – потужність електродвигуна, кВт; necessary power - потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість, км/год; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 7 – Розподіл потоків енергії з 30 по 60 секунду руху



P_{GB} – потужність АКБ, кВт; P_{GEN} – потужність генератора, кВт; P_{EM} – потужність електродвигуна, кВт; necessary power - потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість, км/год; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 8 – Розподіл потоків енергії з 60 по 90 секунду руху

Для підвищення ефективності функціонування електромобіля розроблена і впроваджена в рамках модернізації силової установки інтелектуальна інформаційно-керуюча система інваріантної різним автомобілям, що дозволяє оперативно виробляти керуючий вплив, який мінімізує енерго- або ресурсоспоживання в динамічних режимах і мінімізує втрати якості і продуктивності в заданих умовах експлуатації.

Вирішення питання підвищення ефективності експлуатації будь-якого транспортного засобу, в тому числі і транспортного засобу з бортовою

електростанцією, багато в чому залежить від рівня технічного стану окремих вузлів і агрегатів цього засобу, який має місце в поточний момент часу. Одним з таких вузлів є тягова акумуляторна батарея, що входить до складу бортової системи електропостачання транспортного засобу.

Питання обмеження величини зарядного струму ТАБ на максимальному допустимому рівні, величина якого в А, як правило, становить 10% від ємності батареї в А*год., при стаціонарних умовах зарядки вирішується досить просто за допомогою існуючих технічних засобів. При здійсненні ж зарядки (заряджання) батареї на борту автомобіля з працюючим двигуном для обмеження величини зарядного струму необхідна наявність спеціальних технічних засобів, якими повинна бути укомплектована штатна бортова система електропостачання автомобіля і яких в даний час не існує.

Все сказане вище робить вельми актуальною розробку спеціальних технічних засобів обмеження зарядного струму ТАБ, включення яких до складу штатної системи електропостачання автомобіля, дозволило б істотно продовжити життя ТАБ, що, в свою чергу, дозволило б підвищити ефективність експлуатації електромобіля.

На рис. 9 представлений можливий варіант структури бортового обмежувача зарядного струму ТАБ (надалі - обмежувача),

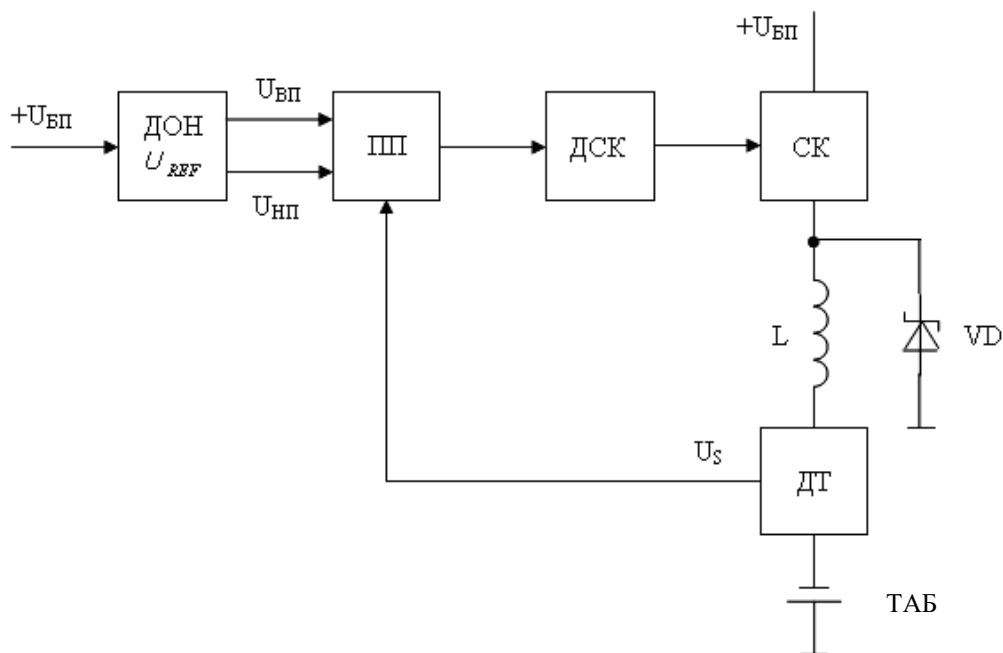


Рисунок 9 – Структура обмежувача зарядного струму ТАБ бортової електростанції

Цей варіант структури бортового обмежувача, розроблений на основі "buck" - перетворювача, до складу якої входять: джерело опорної напруги (ДОН), пристрій порівняння (ПП), драйвер силового ключа (ДСК), силовий ключ (СК), датчик струму (ДТ), індуктивний накопичувач енергії (L);

зворотний діод (VD).

Принцип дії обмежувача базується на використанні ШІМ-модуляції величини струму $I_{\text{ЗАР}}$, що протікає в зарядному ланцюзі пристрою.

Пристрій порівняння складається з двох аналогових компараторів, кожен з яких здійснює порівняння вихідної напруги U_s датчика струму з відповідними значеннями порогових напруги верхнього $U_{\text{ВП}}$ і нижнього $U_{\text{НП}}$ рівнів. Результат цього порівняння управляє процесом установки на виході ПП напруги, що відповідає рівню логічної "1" або логічного "0", згідно з наступним алгоритмом.

1. Якщо поточний стан виходу ПП - "одиничний", то це свідчить про те, що в даний момент часу в обмежувачі реалізується цикл накопичення енергії за рахунок зростання зарядного струму, який буде тривати до тих пір, поки не спрацює компаратор верхнього рівня. Відповідна реакція апаратних засобів обмежувача на цю подію буде складатися у наступному: стан виходу ПП зміниться на протилежний, тобто стане "нульовим", відбудеться закриття транзистора силового ключа обмежувача, що свідчить про закінчення циклу накопичення енергії та початку циклу витрачання енергії в обмежувачі.

2. Якщо поточний стан виходу СК- "нульовий", то це свідчить про те, що в даний момент часу в обмежувачі реалізується цикл витрачання раніше накопиченої енергії, що супроводжується спадом зарядного струму, який буде тривати до того моменту, поки не спрацює компаратор нижнього рівня. Відповідна реакція апаратних засобів обмежувача на цю подію буде складатися у наступному: стан виходу ПП зміниться на протилежний, тобто знову стане "одиничним", знову відбудеться відкриття транзистора силового ключа обмежувача, що свідчить про закінчення циклу витрачання енергії і початку циклу накопичення енергії в обмежувачі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення ефективності пробігу електромобіля з бортовою зарядною станцією, що дозволяє збільшити запас ходу і зменшити витрати енергії. Проведені в дисертаційній роботі дослідження дозволили зробити наступні висновки:

1. В дисертаційній роботі вирішена задача підвищення економічності та екологічної безпеки транспортних засобів на підставі нової концепції моделювання і оптимізації управління силовою установкою електромобіля, забезпечуючи єдиний підхід к дослідженням поточних процесів в залежності від схеми будови і конструктивних особливостей силової установки електромобіля (СУЕ), яка використовує нейромережеву апроксимацію характеристик бортової електростанції і опис динаміки заряду-розряду ТАБ при русі електромобіля при використанні узагальнених координат та швидкостей.

2. Ефективність електромобіля значно залежить від обраної стратегії управління СУЕ – відповідно її режиму роботи та управління розподілом

потоків енергії між бортовою електростанцією, акумуляторною батареєю і СУЕ на тягово-швидкісному режимі руху. Метод управління СУЕ, що широко використовується в теперішній час на підставі логічних правил не дозволяє в повній мірі реалізовувати переваги електромобілів. Це визначає необхідність розробки нових методів моделювання та оптимізації управління СУЕ на підставі сучасних досягнень інформаційних технологій.

3. Визначена формальна постановка оптимізаційної задачі управління СУЕ з векторним функціоналом якості управління, що включає критерії точності управління за швидкістю, якості використання енергії ТАБ, економічності бортової електростанції та ступеня токсичності відпрацьованих газів. Надано використання принципу гарантованого результату (мінімаксу) та лінованого звернення векторного критерія в суперкритерій для визначення оптимального управління СУЕ на множині парето-оптимальних управлінь при нерівних критеріях оптимальності.

4. Розроблено теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей тягового електродвигуна та бортової електростанції. Отримано нейромережеву модель ДВЗ бортової електростанції, яка визначає залежність ефективного крутного моменту, витрати палива від швидкості обертання колінвалу та сигналу управління потужністю, динамічна та статистична моделі бортової електростанції на основі ВЕД при оптимальному управлінні струмом статора; математична модель накопичувача енергії.

5. Доказано ефективність розроблених методів математичного моделювання та оптимізації управління силовою установкою електромобіля з бортовою електростанцією, прийнятих способів ідеалізації математичних моделей шляхом проведення експериментальних досліджень. Математичне очікування похибки моделювання параметрів силової установки електромобіля з бортовою зарядною станцією складає понад 4%.

6. Експериментально підтверджено ефективність використання математичних моделей конструктивних рішень електромобілів з бортовою зарядною станцією та науково обґрунтованих базових параметрів та характеристик силової установки і бортової зарядної станції на підставі розрахункового експерименту.

7. Оптимізація стратегії управління електромобілем з бортовою зарядною станцією методом динамічного програмування не наводить на конструктивний шлях для будови САУ. Дані показники слід розглядати як теоретичний максимум ефективності електромобіля з бортовою зарядною станцією при заданих зовнішніх умовах. Отримане оптимальне управління може використовуватися при розробці логічних правил вибору стратегії управління, а також при дослідженні впливу основних параметрів електромобіля на показники витрати енергії.

8. Економічності та екологічної безпеки транспортних засобів на підставі нової концепції моделювання і оптимізації управління силовою установкою

електромобіля, забезпечуючи єдиний підхід к дослідженням поточних процесів в залежності від схеми будови і конструктивних особливостей силової установки електромобіля (СУЕ), яка використовує нейромережеву апроксимацію характеристик бортової електростанції і опис динаміки заряду-розряду ТАБ при русі електромобіля при використанні узагальнених координат та швидкостей.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Бажинова Т.А., Кучерявая М.А. Выбор электрохимической системы для тягового привода электромобиля. Автомобільний транспорт. 2013. Вип. 33. С. 36–39.
2. Bazhinova T.O., Nychytailo J.A., Vesela M.A. The energy estimation of transportation vehicles. Науковий вісник «Національного гірничого університету». 2016. №6 (156). С. 84–88.
3. Бажинов А.В., Веселая М.А. Управление силовой установкой электромобиля с использованием адаптивного критика. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2016. №1 (5). С. 22-25.
4. Бажинов О.В., Весела М.А. Керування силовою установкою електромобіля. Вісник ХНАДУ. 2016. №75. С. 95-99.
5. Бажинов О.В., Весела М.А. Інтелектуальні інформаційні системи для електромобіля. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2016. № 9. С. 54-57. URL: http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE16_1/3.1.pdf
6. Bazhynov A.V., Vesela M.A. Intellectual Drive With Electric Engines On a Stock Car. Mechanics, Materials Science @ Engineering, 2016 – ISSN 2412-5954, 8 pages.
7. Smirnov O.P., Bazhinova T.O., Veselaya M.A. Substantiation of Rational Technical & Economic Parameters of Hybrid Car. Automation, Software Development & Engineering. Vol. 1 URL: <http://seo4u.link /10.2415/ mmse. 59. 12.214>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Бажинова Т.А., Нечитайло Ю.А., Веселая М.А. К вопросу оценки технического состояния транспортных средств. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми та перспективи розвитку технічних засобів транспорту та систем автоматизації» 1–3 жовтня 2014 р., м. Харків. С. 13–14.
9. Бажинов О.В., Кучерява М.А. Обмежування зарядного струму акумуляторної батареї. Міжнародна науково-практична конференція « Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика» 2016 р., м. Херсон. С. 213-217.

10. Бажинов О.В., Весела М.А. Схемотехнічні рішення керування вентиляційною машиною електромобіля. II Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика» 2015 р., м. Херсон. С. 252-254.

11. Весела М.А., Капський Д.В. Проблема безпеки електромобілей. IV міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» 2015 р., м. Харків. С.38-39.

12. Весела М.А. Математична модель тягової акумуляторної батареї електромобіля. V науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених ДВНЗ «НГУ». Наукова весна 2016 р. (Електронний збірник URL: <http://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/Наукова%20весна%202016.pdf>).

13. Бажинов О.В., Весела М.А. Забезпечення безпеки електромобілів. III Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика» 2017 р., м. Херсон. С.46-49.

14. Smilyk Liliia, Taran Igor, Vesela Marija. On-board battery charging current limiter of electric vehicles. 1V Krakowska ogolnopolska konferencja naukowa transport. 2017 r., Krakow, kwiecien. С. 190-197.

15. Бажинов О.В., Весела М.А. Гібридний автомобіль багатофункціонального призначення. Науково-практична конференція «Службово-бойова діяльність Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми та перспективи», 29 березня 2018 р., м. Харків. С. 6-8.

АНОТАЦІЯ

Весела М.А. Ефективність управління силовою установкою електромобіля з бортовою зарядкою в умовах експлуатації. – Кваліфікаційна наукова праця на умовах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» (275 – транспортні технології (на автомобільному транспорті)). – Харківський національний автомобільно-дорожній університет МОН України, Харків, 2019.

Актуальність роботи пов'язана економічними і соціальними проблемами сучасності та обумовлена необхідністю створення електромобілів, що мають високу якість і пристосованість до зовнішніх умов експлуатації.

У дисертаційній роботі виконано узагальнення і розвиток наукових основ актуальної і важливої науково-технічної задачі з розроблення науково-методичного апарату визначення характеристик системи управління силовою установкою електромобіля. Теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей силової установки електромобіля з підзарядкою від бортової електростанції базуються на системному підході та

раціональному поєднанні теоретичних і експериментальних досліджень, узагальненні та аналізу відомих наукових результатів.

Застосовано адаптивне управління силової установки електромобіля з використанням адаптивного критика, що дозволяє подолати недолік апріорної інформації про параметри зовнішніх умов експлуатації.

Ключові слова: електромобіль, силова установка, акумуляторна батарея, математична модель, методика, нейроконтролер, умови експлуатації.

АННОТАЦИЯ

Веселая М.А. Эффективность управления силовой установкой электромобиля с бортовой зарядкой в условиях эксплуатации. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной задачи повышения эффективности использования электромобилей за счет методов адаптации управления силовой установкой в условиях эксплуатации.

В работе определена формальная постановка оптимизационной задачи управления тяговым электроприводом при векторном функционале качества управления. Компонентами векторного функционала является критерий точности управления по скорости, качества использования энергии тяговой аккумуляторной батареи.

Научно обоснованы структурная и параметрическая идентификация математических моделей силовой установки электромобиля с подзарядкой от бортовой электростанции, которые базируются на системном подходе и рациональном объединении теоретических и экспериментальных исследований, обобщении и анализе известных научных результатов. Для анализа экспериментальных данных использовались методы математической статистики, интеллектуального анализа и нейросетевая аппроксимация. Для формального описания отдельных алгоритмов управления силовой установкой электромобиля использовались методы нечетких множеств, нечеткой логики и нейронечеткого регулирования.

Получена концепция управления силовой установкой электромобиля с подзарядкой от бортовой электростанции, которая обеспечивает единый подход для исследования процессов вне зависимости от схемы устройства и конструктивных особенностей.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные научные результаты составляют единый комплекс исследований, а также предложена методика адаптации стратегии управления силовой установкой электромобиля с подзарядкой на борту к условиям эксплуатации и определены

конструктивные и мощностные параметры силовой установки электромобиля на эксплуатационные свойства. Использование адаптивного управления силовой установкой электромобиля с использованием адаптивного критика позволило преодолеть недостаток априорной информации о внешних условиях эксплуатации. Вычисление коэффициента использования бортовой электростанции реализовано на базе нейро-нечеткого контроллера, который реализует алгоритм Менделя-Ванга для нечеткого вывода выводов.

Ключевые слова: электромобиль, силовая установка, аккумуляторная батарея, математическая модель, методика, нейроконтроллер, условия эксплуатации.

ABSTRACT

M. Vesela. Efficiency of power unit control of an electric vehicle with on-board charging under operating conditions. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of candidate of technical sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 05.22.20 «Operation and repair of transport means» (275 – transport technologies (in motor transport)). – Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2019.

The work urgency is related to the present day economic and social problems and is conditioned by the necessity of creating electric vehicles with high quality and adaptability to external operating conditions.

The generalization and development of scientific fundamentals of the actual and important scientific and technical task of developing a scientific and methodical apparatus for determining the characteristics of the power unit control system of an electric vehicle were performed in the dissertation work.

The theoretical bases of structural and parametric identification of mathematical models of an electric vehicle power unit with recharging from on-board power plant are based on the system approach and the rational combination of theoretical and experimental researches, generalization and analysis of the known scientific results.

Applied adaptive control of power unit electric vehicle using adaptive criticism, which allows overcoming the priori information shortage about the external operating conditions parameters is used.

Key words: electric vehicle, power plant, accumulator battery, mathematical model, method, neuro-controller, operating conditions.

ВЕСЕЛА Марія Анатоліївна

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ СИЛОВОЮ
УСТАНОВКОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З БОРТОВОЮ ПІДЗАРЯДКОЮ
В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Автореферат

Видано в авторській редакції

Підписано до друку 8.02.2019. Формат 60×90/16.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. ар. 0,9.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №598

Видавництво «Літограф»
Ідентифікатор видавця у системі ISBN: 2267
Адреса видавництва та друкарні:
49000, м. Дніпро, вул. ім. М.В. Гоголя, 10/а, оф.38.
тел. : (066) 369-21-55, (056)713-57-25
E-mail: Litograf.dp@gmail.com