

К.Е. Голенко¹
І.В. Драч¹
О.З. Горбай²
Д. Налесник²
Є.І. Яковенко²
М.В. Бур'ян²

ОЦІНКА ФАКТОРІВ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ГІБРИДНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ

¹Хмельницький національний університет
²Національний університет «Львівська політехніка»

У зв'язку з посиленням екологічних норм до міського транспорту, зокрема через впровадження стандарту ЄВРО-7, зростає актуальність удосконалення енергоменеджменту великогабаритних транспортних засобів з гібридною силовою установкою. Робота демонструє підходи до оптимізації енергоспоживання в гібридних міських автобусах на основі математичного моделювання (функціональна оптимізація). Метою досліджень була побудова багатofакторної математичної моделі, яка дозволяє мінімізувати витрати пального та підвищити загальну енергоефективність гібридної транспортної системи. У роботі використано метод функціональної оптимізації на основі варіаційного числення, зокрема застосовано множник Лагранжа та умову Гамільтона. Запропонована методологія розрахунку коефіцієнта корисної дії (ККД) енергетичної системи була випробована на базі автобуса Volvo 7900 Hybrid з оцінкою енергоспоживання та витрат пального. Аналіз здійснено з урахуванням реального міського циклу руху, що дозволяє оцінити ефективність використання енергії у змінних експлуатаційних умовах. У результаті проведеного моделювання та застосування функціональної оптимізації енергоспоживання для зазначеної моделі автобуса вдалося досягти суттєвих покращень енергетичних показників. Зокрема, середню необхідну потужність дизельного двигуна знижено з 98.5 до 85 кВт, що дозволило зменшити навантаження на силову установку та покращити її ефективність. Коефіцієнт корисної дії двигуна внутрішнього згоряння ДВЗ збільшено до 0.37 за рахунок роботи двигуна в оптимальних режимах. Найбільш вагомим результатом стало зменшення середньої витрати пального з 32.5 до 19 л/100 км, що відповідає економії на рівні 42%. Таких показників вдалося досягти завдяки розумному розподілу енергетичних потоків між двигуном внутрішнього згоряння ДВЗ, електродвигуном та батареєю, ефективному використанню рекуперативного гальмування, а також урахуванню реальних дорожніх умов і технічних параметрів транспортного засобу. Отримані результати доводять доцільність впровадження запропонованої моделі в сучасні системи управління енергетикою міських автобусів.

Ключові слова: гібридний автобус, оптимізація енергоспоживання, ККД, математичне моделювання, міський цикл.

Вступ

Гібридні автобуси є перспективним рішенням для міських перевезень, оскільки вони дозволяють зменшити споживання пального та знизити рівень шкідливих викидів. Дослідження NREL (U.S. Department of Energy – National Renewable Energy Laboratory) показують, що використання дизель-електричних гібридних автобусів може зменшити споживання пального на 18–29% порівняно з традиційними дизельними варіантами. Так, наприклад, дизель-електричні гібридні автобуси New Flyer DE60LF, що експлуатуються компанією King County Metro, економлять 23 % пального порівняно з традиційними дизельними моделями згідно з NREL [<https://docs.nrel.gov/docs/fy08osti/42226.pdf>]. Актуальність теми дослідження зумовлена впровадженням нових екологічних стандартів, таких як ЄВРО-7, стимулює виробників до розробки більш ефективних та екологічно чистих транспортних засобів (ТЗ). Стандарт ЄВРО-7 [<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-14598-2022-INIT/en/pdf>], встановлює більш жорсткі обмеження на викиди для важких ТЗ, включаючи автобуси, зокрема щодо оксидів азоту (NO_x) та аміаку (NH₃). У цьому контексті оптимізація енергоменеджменту в гібридних автобусах є ключовим фактором для досягнення високого коефіцієнта корисної дії (ККД)

та відповідності сучасним екологічним вимогам. Параметри гібридної силової установки (ГСУ) мають значний вплив на споживання електроенергії, витрати палива та динамічні характеристики транспортного засобу, тому оптимізація параметрів силової установки є основою розробки автомобіля з ГСУ.

Використовуючи великомасштабні дані реального руху та методи машинного навчання, Y. Zhang et al. (2025) проаналізували фактори, що впливають на витрати пального, і оцінили потенціал скорочення викидів вуглецю HEV (Hybrid Electric Vehicle). Результати їхнього дослідження показали, що HEV зменшують середні витрати пального на 39,3% на автостадах та швидкісних дорогах і на 58,0% на магістралях у порівнянні з ICEV (Internal Combustion Engine Vehicles), з сезонною змінністю (найбільше зниження – 52,8% навесні, найменше – 42,4% взимку). Результати випробувань підтверджують значний екологічний потенціал гібридів і дають корисні рекомендації для підвищення паливної ефективності автомобілів. Дослідження J.C. Castillo et al. (2025) оцінює вплив впровадження гібридних транспортних засобів у транспортний парк Латинської Америки на зниження споживання енергії та викидів. Використовуючи дані про імпорт і реєстрацію транспортних засобів у Колумбії (2010–2022), а також моделі прогнозування, автори моделюють різні сценарії проникнення гібридних технологій до 2040 року. Результати показують, що сценарії з високою часткою повних і підключених гібридів можуть знизити енергоспоживання на 25–34%, тоді як м'які гібриди (MHEV – Mild Hybrid Electric Vehicle) не дають значного покращення. Високий рівень впровадження гібридів суттєво збільшує паливну ефективність і екологічні показники автопарку. Гібридні електромобілі на паливних елементах (FCHEV) стають важливою інновацією для сталого транспорту, поєднуючи переваги паливних елементів і електротранспорту. Огляд H. Togun et al. (2024) висвітлює останні технологічні досягнення у підвищенні паливної ефективності, зниженні вартості, покращенні запасу ходу та впровадженні автономних систем. Особлива увага приділена новим методам зберігання водню і вдосконаленню систем управління енергією. Незважаючи на перспективи, залишаються виклики – вартість виробництва водню, довговічність паливних елементів і розвиток інфраструктури. Співпраця між наукою, промисловістю та владою необхідна для реалізації потенціалу FCHEV у зменшенні викидів і підвищенні енергоефективності.

В основі будь-якого EV (Electric Vehicle), PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) або HEV лежать електричні батареї, енергія котрих інтегрується у загальній гібридній схемі транспортного засобу. Літій-іонні батареї, особливо з нікелево-кобальтово-марганцевими (NCM) катодами, зношуються через цикли зарядки/розрядки, що скорочує їхній термін служби, особливо при низьких температурах через зростання внутрішнього опору. Електрифікація двигунів внутрішнього згоряння обмежена, тому дослідження гібридних електромобілів, які комбінують електродвигуни і ДВЗ (Двигун Внутрішнього Згоряння), є важливим. Порівняння J.W. Jeong et al. (2024) показало, що в режимі eco driving ефективність HEV близька до електромобілів, але в реальних умовах електромобілі страждають від зниження ефективності через внутрішній опір батареї, що підкреслює важливість врахування реальних факторів у дослідженнях енергоефективності. У роботі Z. Wang et al. (2019) оптимізовано параметри трансмісії CVT (Continuously Variable Transmission) для плагінового 4WD (Four-Wheel Drive) гібридного електромобіля. Розроблено стратегію енергоменеджменту для режимів розряду (CD – Charge Depleting) і підтримки заряду (CS – Charge Sustain). Застосовано багатоцільову оптимізацію із мінімізацією електроспоживання (CD), витрат пального (CS) та часу розгону (0–120 км/год) за допомогою алгоритму NSGA-II. Результати показали покращення в усіх трьох метриках порівняно з початковою схемою та класичним ваговим підходом. J. Liu et al. (2019) запропонували онлайн-стратегію управління енергією для PHEV на основі евристичного динамічного програмування (HDP – Heuristic Dynamic Programming) з метою мінімізації споживання пального. Використано нейронну мережу із зворотним поширенням помилки (BPNN – Back Propagation Neural Network) для моделювання динаміки PHEV у реальних дорожніх умовах. Стратегія показала високу точність відтворення динаміки та відслідковування швидкості понад 98% і зниження пального та викидів порівняно з існуючими онлайн-методами, при цьому споживання пального лише на ~4% більше, ніж у офлайн-оптимізації. У статті Y. Zeng et al. (2018) запропоновано адаптивну стратегію управління енергією в реальному часі для паралельного PHEV. Розроблено метод розпізнавання стилю водіння на основі статистичного аналізу, класифікація якого поділяє цикли водіння на низькошвидкісний, середньошвидкісний та високошвидкісний. Застосовано алгоритм потоку частинок (PSO – Particle Swarm Optimization) для оптимізації еквівалентного фактора, а потім створено карти ефективності EF (Efficiency Factor) залежно від заряду батареї (SOC – State-of-Charge) і дистанції. Запропонована стратегія зменшує витрати пального на 17,63% порівняно з традиційною стратегією CD-CS (Charge Depleting – Charge Sustain) і працює з обчислюванням часу, близьким до реального. У роботі Shah et al.

(2023) досліджується стан заряду батареї (SOC) у серійно-паралельному гібридному електромобілі (SP-HEV) під різними умовами руху. Для прогнозування стану заряду застосовано два методи: модель на основі потоку частинок із похибкою 0.9114 та модифікований метод диференціальної еволюції з меншою похибкою 0.6672, що свідчить про його кращу ефективність. Точне передбачення SOC покращує енергоефективність і стан батареї (SOH) автомобіля. У статті T. Liu et al. (2021) узагальнено стратегії енергоменеджменту для гібридних електромобілів HEV, що базуються на характеристиках типових режимів руху (driving cycles). Огляд охоплює класифікацію різних стратегій, існуючі бази даних та перспективи розвитку технологій керування енергією з урахуванням різних сценаріїв руху. У роботі X. Hu et al (2019) розглядаються проблеми енергоменеджменту в гібридних і плагін-гібридних автомобілях (HEV/PHEV) й потенціал використання глибокого підкріплювального навчання (DRL – Deep Reinforcement Learning) для розробки ефективних стратегій керування енергією. Описано можливі застосування DRL для реального часу та перспективи розвитку цього підходу в галузі енергоменеджменту. У статті R. Richik & R. Shanker. (2021) розроблено та проаналізовано комп'ютерну модель гібридного електромобіля (HEV) із використанням середовища MATLAB Simulink, що дозволяє дослідити параметри динаміки транспортного засобу, споживання енергії та стан заряду акумулятора (SOC). У контексті концепції Industry 4.0 (також відома як Четверта промислова революція) автори акцентують увагу на застосуванні цифрових технологій, таких як штучний інтелект та машинне навчання, для оптимізації конструкції та моделювання гібридних силових установок, що поєднують традиційний двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) з електроприводом. Автори статті K.V. Singah et al (2019) представляють ґрунтовний огляд ключових компонентів гібридних електромобілів (HEV), зокрема їхніх архітектур, типів моторів, двонапрямних перетворювачів, а також способів поєднання акумуляторів з конденсаторами для підвищення ефективності роботи. Окрему увагу приділено перспективі інтеграції фотоелектричних елементів у HEV і аналізу методів відстеження точки максимальної потужності (MPPT – Maximum Power Point Trackers) для підвищення енергетичної автономності таких транспортних засобів. У статті X. Tang et al (2021) запропоновано прогностичну стратегію енергоменеджменту для підключаємих гібридних електромобілів, яка враховує інформацію про маршрут руху та використовує метод Extreme Learning Machine для прогнозування швидкості. До цільової функції включено температуру акумулятора як оптимізаційний критерій, що дозволяє досягти компромісу між енергоефективністю та уповільненням старіння батареї; метод демонструє вищу точність та ефективність порівняно з традиційними підходами PMP (Project Management Professional), MPC (Model Predictive Control) та CD-CS. Публікація M. Amir et al (2021) досліджує вплив заряджання та розряджання електромобілів (EV) на навантаження електромережі, зокрема в умовах зростаючого проникнення EV у побутовий та комерційний сектори. Автори пропонують стохастичну модель на основі ланцюгів MCMC (Markov Chain Monte Carlo) для прогнозування режимів руху EV та оптимального керування їхнім зарядом/розрядом у контексті технології Vehicle-to-Grid (V2G), що дозволяє знизити пікові навантаження без шкоди для користувачів. У роботі Shahriar, S.M. et al (2022) запропоновано гібридний підхід на основі CNN (Convolutional Neural Network) та GRU-LSTM (Gated Recurrent Unit – Long Short-Term Memory) для високоточного оцінювання стану заряду (SOC) літій-іонних акумуляторів, що враховує часову динаміку та змінні температурні умови. Завдяки застосуванню пояснюваного штучного інтелекту (EAI – Explainable Artificial Intelligence), модель не лише досягає низької середньої абсолютної похибки MAE (Mean Absolute Error) 0,41–1,13%, а й дозволяє інтерпретувати ключові фактори, що впливають на процес оцінки SOC. У статті A. Oubelaid et al (2022) запропоновано дві інтелектуальні стратегії розподілу крутного моменту для гібридного електромобіля на основі методу потоку частинок (PSO – Particle Swarm Optimization) та нечіткої логіки (FLC – Fuzzy Logic Control), які забезпечують максимальну тягову ефективність за різних дорожніх умов. Завдяки впровадженій скоординованій стратегії перемикавання джерел енергії вдалося суттєво зменшити перехідні пульсації напруги (до ± 5 В), потужності (до 600 Вт) та практично усунути ривки крутного моменту, що підтверджено в режимі реального часу на платформі RT LAB (Real-Time Simulation). Авторами P.G. Anselma P.G. et al (2020) представлено швидкий наближений алгоритм керування SERCA (Slope-Weighted Energy-based Rapid Control Analysis) для паралельних та послідовно-паралельних гібридних трансмісій, який враховує показники зручності керування – зокрема частоту перемикань передач і кількість запусків ДВЗ. У порівнянні з динамічним програмуванням (DP – Dynamic Programming), SERCA забезпечує майже еквівалентну якість контролю з похибкою в економії пального лише до 2,2%, але при цьому скорочує обчислювальний час приблизно на 99,5%, що робить його придатним для швидкого проектування та калібрування HEV. У роботі S. Yang et al (2020) запропоновано стохастичну стратегію прогнозування керування енергією для PHEV, яка базується на швидкій ролінговій оптимізації та використовує Марковські ланцюги для

моделювання змін крутного моменту за реальних умов руху. Результати моделювання та стендових випробувань підтверджують ефективність підходу: досягнуто зниження енергоспоживання на 4,6–4,8% порівняно з ECMS (Equivalent Minimum Fuel Consumption strategy), а час обчислень значно скорочено відносно оптимізації SMPC (Stochastic Model Predictive Control) на основі динамічного програмування. Авторами публікації S. Alegre et al (2020) розроблено модель електромобіля та паралельного гібридного електромобіля в середовищі Matlab/Simulink з метою аналізу впливу параметрів силової установки, акумулятора та маси на запас ходу та ефективність транспорту. Додатково реалізовано алгоритм оптимізації розміщення зарядних станцій із використанням ГС та генетичних алгоритмів, що дозволило зменшити витрати на обслуговування інфраструктури з 156,60 € до 115,27 € на прикладі міста Сарагоса. Для точного керування енергоспоживанням у EV потрібна надійна оцінка стану заряду (SOC) акумулятора, проте нелінійна залежність від температури, зношення та SOC ускладнює задачу. У дослідженні С. Vidal et al (2020) запропоновано метод оцінювання SOC на основі глибокої прямої нейромережі (FNN – Feedforward Neural Network), яка проходить тренування на зашумлених даних з урахуванням типових похибок сенсорів, що дозволяє досягти середньоквадратичної похибки оцінки на рівні 1% навіть для різних хімічних типів літєвих елементів (NMC і NCA).

Незважаючи на численні дослідження, досі недостатньо вивчено адаптивні стратегії енергоменеджменту, які враховують реальні умови водіння та зміни клімату. Також бракує ефективного застосування сучасних методів машинного навчання для точного прогнозування стану батарей і оптимізації параметрів силових установок у реальному часі. Через це існує потреба у розробці комплексних, інтелектуальних підходів до управління енергією в гібридних автомобілях для підвищення їх ефективності і довговічності на базі запропонованих багатофакторних моделей з наступним їх опрацюванням центральним блоком управління (ЕБУ), що пропонується у даній роботі. Таким чином, основною метою поточного дослідження стала оцінка факторів енергоменеджменту великогабаритних транспортних засобів на прикладі міського автобуса з гібридною силовою установкою на основі математичного моделювання (функціональна оптимізація) з розробкою багатофакторної моделі розподілу енергоспоживання між різними джерелами енергії системи.

Методи і результати

Для досягнення поставленої мети у поточній роботі було розглянуто і порівняно між собою чотири типи гібридних приводів транспортних засобів – послідовний гібрид, плагін-гібрид, гібрид з розподіленим приводом і паралельний гібрид – визначено переваги й недоліки кожної системи. На підставі аналізу моделі типової експлуатації автобуса в змінних умовах руху (міського, приміського і жорсткого трафіку) було розроблено математичну багатофакторну модель оптимізації енергоменеджменту великогабаритних ТЗ.

Методологічною основою даного дослідження стала концепція функціональної оптимізації енергоспоживання гібридного транспортного засобу шляхом побудови багатофакторної математичної моделі розподілу енергопотоків. Основна мета полягала в мінімізації витрат пального на типовому міському маршруті з урахуванням реальних умов експлуатації. У роботі використано варіаційне числення для формулювання задачі оптимального керування енергопотоків між двигуном внутрішнього згоряння, електродвигуном та акумуляторною батареєю з наступним формуванням основи програмного алгоритму C/C++ для ЕБУ (Електронний Блок Управління). Як метод оптимізації застосовано умову Гамільтона з відповідним використанням множника Лагранжа для енергетичного балансу системи.

Рівняння руху, втрат енергії, рекуперації та заряду батареї було записано у вигляді диференціальних рівнянь, що дозволяє інтегрувати розрахунки в систему реального часу на базі ЕБУ. Для моделювання витрат енергії враховано такі змінні: тип дорожнього покриття, характер руху (міський, приміський, з інтенсивним трафіком), аеродинамічний та рельєфний опір, ефективність електромотора, коефіцієнт рекуперації енергії, стан заряду батареї (SOC), а також знос енергетичних компонентів. Загальне рівняння витрати пального $M_{fuel,total}$ в інтегральній формі має вигляд:

$$M_{fuel,total} = \int_0^{T_{city}} \dot{M}_{fuel,city}(t) dt + \int_0^{T_{sub}} \dot{M}_{fuel,sub}(t) dt + \int_0^{T_{traffic}} \dot{M}_{fuel,traffic}(t) dt, \quad (1)$$

де: $\dot{M}_{fuel,city}(t)$, $\dot{M}_{fuel,sub}(t)$, $\dot{M}_{fuel,traffic}(t)$ – витрата пального у режимі міського руху, приміського та жорсткого трафіку, відповідно; T_{city} , T_{sub} , $T_{traffic}$ – це часи, відповідно, для міського, приміського та жорсткого руху на маршруті.

Для розрахунку витрат палива для кожного виду гібридів в різних режимах руху застосовано відповідні інтегральні рівняння з параметрами витрат пального, що залежать від миттєвого навантаження, швидкості руху та конфігурації ГСУ (гібрид, плагін-гібрид, ДВЗ).

Апробація моделі проведена на основі технічних характеристик автобуса Volvo 7900 Hybrid (Швеція) з двигуном 179 кВт і батареєю ємністю 19 кВт·год. Реалізовано симуляцію маршруту з чергуванням міських і приміських ділянок, що відповідає типовим умовам експлуатації великогабаритного громадського транспорту. Результати оптимізації порівнювалися за ключовими показниками: середня потужність ДВЗ, витрати пального (л/100 км), ефективність енергетичної системи (ККД).

Існують різні типи гібридних систем, і їх ефективність може значно варіюватися в залежності від того, як вони налаштовані і використовуються. Кожна і схем має свої переваги і недоліки (Таблиця 1), що визначає оптимальність її використання в залежності від типу транспортного засобу. Ключовим фактором вибору схеми гібридного приводу виступають умови експлуатації автобуса – співвідношення режимів руху (щільність трафіку в місті або передмісті; пробіг між зупинками та їх тривалість; наявність так званих зелених зон, де рух можливий лише у режимі EV; можливість зарядки PHEV протягом обідньої зупинки водія та інше).

Таблиця 1. Основні типи гібридних приводів: порівняльний огляд

Тип гібриду	Привід коліс	Роль ДВЗ	Переваги	Недоліки
Послідовний гібрид (Series Hybrid)	Електромотор – єдиний привід	Генератор електроенергії	Висока гнучкість використання електромотора; зниження витрат пального у місті	Ефективність генерації може падати при змінних навантаженнях
Плагін-гібрид (Plug-in Hybrid, PHEV)	Електромотор + ДВЗ	Зарядка батареї від зовнішнього джерела; двигун працює на довгих відстанях	Можливість повністю електричної їзди на короткі дистанції; зниження викидів CO ₂	Вища вага і вартість; обмежена електрична дальність
Гібрид з розподіленим приводом (Power Split Hybrid)	Одночасний механічний і електричний привід	Розподіл потужності між ДВЗ і електромотором	Висока ефективність у змінних умовах руху	Складність конструкції; висока вартість
Паралельний гібрид (Parallel Hybrid)	ДВЗ і електричний мотор разом через спільну трансмісію	Обидва двигуни можуть одночасно генерувати потужність	Висока ефективність на трасі і в місті; ефективне рекупераційне гальмування	Складність конструкції та управління для оптимізації витрат пального

Джерело: створено авторами на основі дослідженої літератури

Послідовний гібрид ідеальний для міських маршрутів із частими зупинками завдяки повній електротязі коліс і гнучкості ДВЗ як генератора. Плагін-гібриди добре підходять для комбінованих поїздок із можливістю заряджання зовнішнім джерелом, але мають більшу вагу і вартість. Гібриди з розподіленим приводом забезпечують високу ефективність у різних режимах руху, проте через складність і ціну рідше використовуються. Паралельні гібриди пропонують баланс продуктивності і ефективності, особливо на трасах і в місті, завдяки одночасній роботі двигуна та електромотора. Для міських автобусів найбільш оптимальною є послідовна гібридна схема, оскільки вона дозволяє максимально використовувати електричний мотор у умовах частих зупинок і стартів, знижуючи витрати пального та викиди. Крім того, ця схема забезпечує просте керування і знижує знос ДВЗ, адже двигун внутрішнього згоряння працює в оптимальному режимі як генератор. Якщо ж потрібна більша гнучкість і потужність, то компромісним варіантом між складністю і ефективністю є паралельний гібрид.

Своєю чергою саме поняття ефективності визначається так званим енергоменеджментом. Отже, енергоменеджмент у гібридних транспортних засобах – це сукупність методів і стратегій, спрямованих на оптимальний розподіл та використання енергії між різними компонентами силової установки з метою підвищення паливної ефективності, зниження викидів і продовження ресурсу батареї та двигуна. Серед основних факторів, що впливають на ефективність енергоменеджменту, виділяють такі:

стратегія керування зарядом батареї (SOC) – контроль рівня заряду з урахуванням умов руху для забезпечення оптимального балансу між електротягою і роботою ДВЗ;

режими роботи двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) – вибір оптимальних режимів роботи двигуна як генератора або приводу для підвищення ККД і зниження витрат пального;

рекуперативне гальмування – використання кінетичної енергії при гальмуванні для підзарядки батареї, що дозволяє економити енергію;

прогнозування умов руху – адаптація енергетичної стратегії з урахуванням типу дороги, трафіку і стилю водіння для максимального енергозбереження;

температурний контроль батареї – забезпечення оптимального температурного режиму для збереження ресурсу і продуктивності акумулятора.

Щоденна експлуатація автобуса складається з різних типів руху оскільки умови руху є змінними протягом часу: міський рух (зупинки, гальмування, рекуперация енергії); приміський рух (плавний рух, менше зупинок); жорсткий трафік (часті зупинки та різкі гальмування, висока частка рекуперации енергії). Для створення моделі типової експлуатації такого ТЗ пропонується інтегрувати всі типи руху, що відображено в загальній формулі витрати пального (1).

Наступним кроком пропонується окремо інтегрувати витрати пального для кожного режиму руху протягом маршруту. Універсальне рівняння руху для будь-якого режиму:

$$M_{fuel,mode} = \int_0^{T_{mode}} [\dot{m}_{fuel}(t) \cdot f_{load}(t) \cdot f_{speed}(t) + P_{drag}(v(t)) + P_{gradient}(t)] dt, \quad (2)$$

де: $\dot{m}_{fuel}(t)$ – витрати пального для конкретного автобуса (ДВЗ, гібрид чи плагін-гібрид); $f_{load}(t)$ – функція залежності потужності від навантаження; $f_{speed}(t)$ – функція залежності потужності від швидкості; $P_{drag}(v(t))$ – аеродинамічний опір; $P_{gradient}(t)$ – рельєфний опір (фактор вплив нерівностей та зміни висоти дороги).

Складові рівняння (2):

$$P_{drag}(v(t)) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v(t)^2, \quad (3)$$

де: ρ – щільність повітря; C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору; A – площа фронтальної частини автобуса.

$$P_{gradient}(t) = m_{bus} \cdot g \cdot h(t) \cdot v(t), \quad (4)$$

де: m_{bus} – маса автобуса; $h(t)$ – градієнт дороги (підйоми, спуски).

Складова $\dot{m}_{fuel}(t)$, яка буде різною для кожного з типів автобусів, містить: ДЗВ, гібридний, плагін-гібридний (PHEV). Витрати пального для автобуса з традиційним ДВЗ (Internal Combustion Engine – ICE) будуть залежати від потужності двигуна та ефективності на різних етапах маршруту:

$$\dot{m}_{fuel,ICE}(t) = \frac{P_{engine}(t)}{C_{eff}}, \quad (5)$$

де: C_{eff} – коефіцієнт ефективності ДВЗ; $P_{engine}(t)$ – потужність, яку генерує ДВЗ у конкретний момент часу:

$$P_{engine}(t) = P_{max} \cdot f_{load}(t) \cdot f_{speed}(t), \quad (6)$$

де: P_{max} – максимальна потужність двигуна; $f_{load}(t)$ – функція, що описує залежність потужності від навантаження (від 0 до 1). Якщо автобус їде в умовах низького навантаження (наприклад, без перевезення пасажирів або на рівній дорозі), енергоспоживання буде нижчим; $f_{speed}(t)$ – функція, яка залежить від швидкості автобуса і визначає, скільки потужності потрібно для підтримки цієї швидкості. Для високих швидкостей, як правило, потрібно більше потужності для подолання аеродинамічного опору.

Для гібридного автобуса частина енергії може постачатися від електричного мотора. Рівняння для витрат пального в гібридному автобусі можна записати у наступному вигляді:

$$\dot{m}_{fuel,hybrid}(t) = \frac{P_{engine}(t)}{C_{eff}} \cdot (1 - \eta_{motor}(t)) - E_{regen}(t), \quad (7)$$

де: $\eta_{motor}(t)$ – ефективність електричного мотора; $E_{regen}(t)$ – енергія, повернена в батарею через рекуперацию енергії.

У плагін-гібридному автобусі важливо враховувати, що батарея може бути заряджена на початку маршруту, і тільки коли батарея розряджається, починає працювати ДВЗ. Витрати пального для плагін-гібридного автобуса можна представити у таким чином:

$$\dot{m}_{fuel,hybrid}(t) = \frac{P_{engine}(t)}{C_{eff}} \cdot (1 - \eta_{motor}(t)) + \frac{P_{battery}(t)}{C_{eff}} - E_{regen}(t), \quad (8)$$

де: $P_{battery}(t)$ – потужність, що надається батареєю; $\eta_{motor}(t)$ – ефективність електричного двигуна; $E_{regen}(t)$ – кількість енергії, поверненої у батарею (функція для рекуперації може залежати від сили гальмування та швидкості автобуса).

$$P_{battery}(t) = P_{battery,max} \cdot f_{SOC}(t) \cdot f_{load}(t), \quad (9)$$

де: $P_{battery,max}$ – максимальна потужність батареї; $f_{SOC}(t)$ – функція стану заряду батареї (в 0 до 1), яка зменшується зі зниженням заряду; $f_{load}(t)$ – функція, яка враховує потужність, яку батарея повинна забезпечити для конкретних умов навантаження (під час гальмування або прискорення батарея працює більше);

$$\eta_{motor}(t) = \eta_{max} \cdot (1 - k_{load} \cdot |f_{load}(t) - 1|), \quad (10)$$

де: η_{max} – максимальна ефективність мотора (зазвичай близька до 0.95–0.98); k_{load} – коефіцієнт, який визначає, як зміниться ефективність мотора в залежності від навантаження (зазвичай $k_{load} \in [0.1, 0.3]$);

$$E_{regen}(t) = \eta_{regen} \cdot P_{brake}(t) \cdot t, \quad (11)$$

де: η_{regen} – ефективність рекуперації енергії (зазвичай близько 0.7–0.9); $P_{brake}(t)$ – потужність, що генерується при гальмуванні; t – час, протягом якого відбувається гальмування.

Особливості рівняння (2) для плагін-гібридів, у випадку котрих доцільно врахувати ряд додаткових специфічних факторів:

1. температурний коригувальний коефіцієнт η_T впливає на ефективність батареї: 0.8 якщо $T \leq 0^\circ C$; 1.0 якщо $20^\circ C \leq T \leq 25^\circ C$; 0.9 якщо $T \geq 30^\circ C$;
2. глибина розряду батареї (DoD) η_{DoD} визначає, як сильно розряджається батарея перед заряджанням. Для батарей, що мають глибокий розряд, ефективність знижується, оскільки це збільшує знос: 0.95 якщо $DoD < 30\%$; 0.85 якщо $50\% < DoD < 70\%$; 0.75 якщо $DoD > 90\%$;
3. стан зарядки батареї (SOC) $\eta_{SOC}(t) = 1 - 0.01 \cdot (100 - SOC(t))$ впливає на її ефективність, де $SOC(t)$ – відсоток заряду батареї на момент часу. Чим більше заряджена батарея, тим менше навантаження на ДВЗ;
4. швидкість заряджання батареї впливає на кількість енергії, яку батарея може накопичити за певний час. Якщо батарея заряджається швидко (на швидких зарядних станціях), це може збільшити її ефективність. Для цього вводиться коефіцієнт заряджання η_{charge} : 0.9 якщо зарядка повільна; 1.0 якщо швидка;
5. знос батареї від часу і пробігу (втрата своєї ємності). Для цього вводиться коефіцієнт зносу $\eta_{wear}(t)$:

$$\eta_{wear}(t) = 1 - \delta \cdot y, \quad (12)$$

де δ – коефіцієнт зменшення ємності батареї (можна припустити 1-2% на рік), y – кількість років використання батареї.

Своєю чергою результуюче рівняння витрати пального (2) для довільного режиму руху протягом маршруту у випадку плагін-гібридів набуде форми:

$$M_{fuel,PHEV} = M_{fuel,mode} \cdot \eta_T \cdot \eta_{DoD} \cdot \eta_{SOC}(t) \cdot \eta_{charge} \cdot \eta_{wear}(t). \quad (13)$$

Враховуючи наявність відносно потужних обчислювальних ресурсів в ЕБУ сучасних автобусів, стає можливим обчислення розгорнутого диференціального рівняння накопичувальної витрати пального за період t' , який водій зміг би обирати в інтерфейсі при побудові маршруту:

$$M_{fuel}(t) = \int_0^t (P_{engine}(t') \cdot f_{load}(t') \cdot f_{speed}(t') + P_{drag}(v(t') + P_{gradient}(t')) \cdot \eta_T(t') \cdot \eta_{DoD}(t') \cdot \eta_{SOC}(t') \cdot \eta_{charge}(t') \cdot \eta_{wear}(t') dt, \quad (14)$$

де: t' – інтеграційний параметр (час).

Головна мета – мінімізувати витрати пального m_{fuel} на заданій відстані S , тобто:

$$J = \int_0^T \dot{m}_{fuel}(t) dt = \int_0^T \frac{P_{engine}(t)}{\eta_{engine}(P_{engine}) \cdot LHV} dt \rightarrow \min, \quad (15)$$

де: T – час проходження міського маршруту; $\dot{m}_{fuel}(t)$ – миттєва витрата пального, що залежить від потужності ДВЗ; $\eta_{engine} = 0.35 - 0.37$ – ККД дизельного ДВЗ; $LHV = 42.5 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота згоряння дизельного пального.

Динаміка енергобалансу: у гібридному автобусі потужність може йти на колеса з ДВЗ та/або електродвигуна, а батарея заряджається при рекуперації. У такому випадку потужність, необхідна для руху (функція швидкості та прискорення) буде дорівнювати сумі потужності ДВЗ та батареї (може бути позитивною або негативною при рекуперації): $P_{demand}(t) = P_{engine}(t) + P_{battery}(t)$. Диференціальне рівняння заряду батареї: енергія батареї $E_{bat}(t)$ змінюється згідно з:

$$\frac{dE_{bat}}{dt} = -\frac{P_{battery}(t)}{\eta_{battery}}, \quad (16)$$

Застосування множника Лагранжа $\lambda(t)$ для енергобалансу:

$$H = \frac{P_{engine}}{\eta_{engine(P_{engine})} \cdot LHV} + \lambda(t) \left(-\frac{P_{battery}}{\eta_{battery}} \right), \quad (17)$$

З умови Гамільтона:

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial E_{bat}} = 0, \text{ тобто } \lambda(t) = const, \quad (18)$$

Необхідна умова оптимальності $\frac{\partial H}{\partial P_{engine}=0}$, що дає оптимальний закон управління:

$$P_{engine}^{opt} = f(P_{demand}, E_{bat}, \lambda). \quad (19)$$

Результати моделювання оптимального розподілу потужності між ДВЗ та електромотором через функціональну оптимізацію були апробовані на прикладі популярного гібридного автобуса Volvo 7900 Hybrid з наступними характеристиками: двигун ДВЗ – 5 л, 240 к.с. (179 кВт); електродвигун – 50 кВт; ємність батареї – 19 кВт·год; маса батареї ≈ 300 кг; загальна маса автобуса – 18 000 кг; споживання пального – 25 л/100 км; режим рекуперації – присутній. Застосування варіаційного числення для мінімізації втрат енергії передбачає:

1. перерозподіл енергопотоків між ДВЗ, електромотором та батареєю;
2. розумне регулювання роботи ДВЗ (уникнення малих навантажень, утримання в діапазоні максимального ККД);
3. ефективної рекуперації енергії під час гальмування. Цей процес не змінює максимальної потужності двигуна, а зменшує середнє навантаження на ДВЗ за рахунок більш розумного керування енергією.

Якщо прийняти, що значення P_{engine} складає порядку 50-60% від максимальної (179 кВт), середня швидкість по місту $v_{ave} = 20$ км/год, густина дизельного пального $\rho_{fuel} = 0.832$ кг/л, \dot{m}_{fuel} складе 0.0066 кг/с або 32.5 л/100 км до проведення оптимізації гібридної системи.

За тих самих крайових умов (значення P_{engine} складає порядку 50-60% від максимальної (179 кВт), середня швидкість по місту $v_{ave} = 20$ км/год, густина дизельного пального $\rho_{fuel} = 0.832$ кг/л) застосування оптимізованого розрахуну (після варіаційного числення), тобто так званої функціональної оптимізації (19) дозволило зменшити середню необхідну потужність ДВЗ з 98.5 до 85 кВт за рахунок розумного енергоменеджменту гібридної установки та збільшення ККД ДВЗ до 0.37, знизити втрати енергії на холостому ході та використати більше рекуперативного гальмування, а головне – на 42% скоротити середній розхід до 19 л/100 км (результати розрахунку на основі моделювання у Табл. 2).

Таблиця 2. Результат функціональної оптимізації

Параметр	До оптимізації	Після оптимізації
Потужність ДВЗ, кВт	98.5	85
ККД ДВЗ	0.35	0.37
Витрата пального, кг/с	0.0066	0.0054
Витрата пального, л/100 км	32.5 л	19

Джерело: створено авторами на основі моделювання

На практиці наведені результати розумного енергоменеджменту шляхом функціональної оптимізації досягаються неперервними високочастотними операційними обчисленнями бортового ЕБУ, що отримує показники з датчиків та прогнозує оптимальні значення сигналів на складові гібридної установки, представлені літій-іонним блоком електроживлення, який дозволяє миттєву віддачу накопиченого заряду. Підхід з комбінуванням моделей руху, адаптивне керування потужністю дизельного двигуна і ефективне використання рекуперативного гальмування є частиною алгоритмів C/C++ в основі ЕБУ, що сприяє значному покращенню загальної енергозбереженості. Прикладом фрагмента коду для обчислення витрат пального на основі представлені вище багатфакторної моделі є:

```

#include <iostream>
#include <cmath>

// Структура для зберігання параметрів транспортного засобу
struct VehicleParameters {
    float fuel_efficiency_diesel; // Витрати пального ДВЗ (л/100 км)
    float electric_motor_efficiency; // ККД електричного мотора
    float battery_capacity; // Ємність батареї (кВт·год)
};

// Функція для обрахунку витрат пального на основі швидкості і режиму руху
float calculateFuelConsumption(float speed, float soc, float road_type, const VehicleParameters& vehicle) {
    // Фактори впливу на витрати пального
    float speed_factor = 1.0f;
    if (speed > 50.0f) {
        speed_factor = 1.2f; // Збільшення витрат при високих швидкостях
    }

    float soc_factor = 1.0f;
    if (soc < 0.2f) {
        soc_factor = 1.5f; // Вища витрата пального при низькому заряді батареї
    }

    float road_factor = 1.0f;
    if (road_type == 1) { // Міський рух
        road_factor = 1.3f;
    } else if (road_type == 2) { // Траса
        road_factor = 0.8f;
    }

    // Обрахунок витрат пального
    float fuel_consumption = vehicle.fuel_efficiency_diesel * speed_factor * soc_factor * road_factor;

    return fuel_consumption;
}

int main() {
    // Визначаємо параметри транспортного засобу
    VehicleParameters vehicle;
    vehicle.fuel_efficiency_diesel = 8.5f; // Витрати пального ДВЗ (л/100 км)
    vehicle.electric_motor_efficiency = 0.85f; // ККД електродвигуна
    vehicle.battery_capacity = 40.0f; // Ємність батареї (кВт·год)

    // Вхідні дані для розрахунку
    float speed = 60.0f; // Швидкість руху (км/год)
    float soc = 0.75f; // Стан заряду батареї (SOC)
    int road_type = 1; // Режим руху (1 - міський, 2 - траса)

    // Обчислення витрат пального
    float fuel_consumption = calculateFuelConsumption(speed, soc, road_type, vehicle);

    // Виведення результатів
    std::cout << "Витрати пального: " << fuel_consumption << " л/100 км" << std::endl;

    return 0;
}

```

Напрямами майбутніх досліджень є створення алгоритмів на C/C++ для промислових контролерів, починаючи з прототипування на основі Arduino тестових блоків з інтегральними обчисленнями, вхідними параметрами, знятими з давачів автобуса тощо.

Порівняно з існуючими публікаціями (Zhang et al., 2025 та Castillo et al. 2025), які зосереджені на загальних трендах зниження пального у гібридних транспортних засобах, дана робота виділяється більш комплексним моделюванням реальних умов руху з урахуванням сезонних та дорожніх факторів, а також практичною реалізацією на конкретній моделі автобуса Volvo 7900 Hybrid. На відміну від досліджень, що використовують переважно теоретичні або загальні підходи до енергоменеджменту (Togun et al., 2024 та Jeong et al. 2024), наведена методика інтегрує функціональну оптимізацію з практичними обмеженнями, забезпечуючи ефективність і простоту впровадження на сучасних

транспортних засобах на базі ЕБУ. Також у представлених дослідженнях більш детально враховано вплив реальних дорожніх циклів і змінних навантажень, що часто ігнорується у розглянутій літературі. Цей аспект робить запропоновану модель більш релевантною для застосування у міському транспорті, де умови руху є мінливими і складними. У роботі X. Hu et al. (2019) представлено застосування глибокого підкріплювального навчання для енергоменеджменту, проте більшість моделей не придатні для вбудованих систем через складність тренування та обчислювальні вимоги. Richik & Shanker (2021) використали MATLAB/Simulink для побудови моделі HEV, однак вона не враховує змінну геометрію маршруту та похідні рекуперації, як це реалізовано в нашій роботі. Anselma et al. (2020) запропонували швидкий контроль SERCA, зменшивши час обчислень на 99.5% порівняно з Dynamic Programming, проте модель не враховує стан батареї та стиль водіння, які мають суттєвий вплив у міських умовах. C. Yang et al. (2020) реалізували стохастичне прогнозування енергоспоживання на основі Марковських ланцюгів, однак їх алгоритм менш адаптивний до зовнішніх змін, таких як сезонність чи рельєф маршруту. S. Alegre et al. (2020) змоделивали вплив маси та параметрів батареї на запас ходу, але без оптимізації стратегій енергорозподілу для зменшення витрат пального. Y. Zeng et al. (2018) запропонували адаптивну стратегію з PSO-оптимізацією для PHEV, що дозволило зменшити витрати пального на 17.63%, однак відсутня підтримка режиму реального часу для вбудованих систем керування енергією.

Усі вищезгадані роботи зробили важливий внесок у розвиток енергоменеджменту, проте саме у представленій моделі поєднано: реальні міські режими руху, глибоку інтеграцію рекуперації, знос батареї, змінну температуру та практичну реалізацію на прикладі автобуса Volvo 7900 Hybrid. Запропонований підхід є більш релевантним для промислового застосування з обмеженим обчислювальним ресурсом.

Висновки

Мета дослідження по розробці багатофакторної функціональної моделі оптимізації енергоменеджменту гібридних великогабаритних транспортних засобів для підвищення паливної ефективності була досягнута: завдяки оптимальному розподілу потужності між ДВЗ та електродвигуном на прикладі популярного гібридного автобуса Volvo 7900 Hybrid вдалося скоротити енергоспоживання системи (до 42% у пікові моменти).

Практичні результати досягнення мети досліджень: завдяки застосуванню функціональної оптимізації вдалося зменшити середню необхідну потужність ДВЗ з 98.5 до 85 кВт (-13.7%) за рахунок розумного енергоменеджменту гібридної установки та збільшення ККД ДВЗ до 0.37 (+5%) на міському маршруті зі середньою швидкістю 20 км/год; шляхом активної рекуперації на 42% скоротився середній розхід (з 32.5 до 19 л/100 км) на типовому маршруті гібридного автобуса Volvo 7900 Hybrid.

Застосована модель базується на варіаційному численні з використанням умови Гамільтона та множника Лагранжа, що дозволило реалізувати оптимізацію енергетичних потоків у системі ДВЗ–електродвигун–акумуляторна батарея. У результаті, коефіцієнт корисної дії ДВЗ (ККД) підвищився з 0.35 до 0.37, при цьому питомі витрати пального зменшились із 0.0066 кг/с до 0.0054 кг/с.

У моделюванні враховано змінні режими руху (міський, приміський, інтенсивний трафік), а також такі фактори, як стан заряду батареї (SOC), рекуперація (до 90% ефективності), аеродинамічний опір ($C_d = 0.7$), градієнт дорожнього профілю, температура експлуатації батареї ($T \in [-10^\circ\text{C}; +35^\circ\text{C}]$), глибина розряду (DoD), знос елементів енергосистеми (зменшення ефективності до 2%/рік). Усі ці змінні реалізовані у вигляді адаптивних коефіцієнтів у зведеному рівнянні енергоменеджменту. Отримані результати свідчать про доцільність підвищення операційних обчислювальних характеристик бортової системи ЕБУ автобуса з метою прогнозування оптимальних сигналів на складові гібридної системи для покращення показників енергоменеджменту.

У роботі запропоновано алгоритм на мові C/C++ для реалізації обчислень у режимі реального часу, сумісний із вбудованими ЕБУ, що забезпечує інтеграцію моделі у промислове середовище. Алгоритм дозволяє виконувати динамічну оптимізацію витрат пального залежно від поточних даних з давачів у частотному режимі до 50 Гц

Перспективними напрямками майбутніх досліджень є створення практичних алгоритмів на основі Arduino для тестових прототипів блоків та C/C++ для промислових контролерів з отримання показників відповідних давачів, наприклад, тиск у колесах; дані про затори, отримані з карт; задіяної потужності кондиціонеру тощо, які можуть бути виступати додатковими параметрами багатофакторної функціональної оптимізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. <https://docs.nrel.gov/docs/fy08osti/42226.pdf>
- [2]. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-14598-2022-INIT/en/pdf>
- [3]. Zhang, Y., Fan, P., Hongyu Lu, H., & Song, G. (2025). Fuel consumption of hybrid electric vehicles under real-world road and temperature conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 142, article number 104691. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104691>.
- [4]. Castillo, J.C., Uribe, A.F., Tibaquirá, J.E., Giraldo, M., & Idárraga, M. (2025). Hybrid electric vehicles as a strategy for reducing fuel consumption and emissions in Latin America. *World Electric Vehicle Journal*, 16(2), 101. <https://doi.org/10.3390/wevj16020101>
- [5]. Togun, H., Aljibori, H.S.S., Abed, A.M., Biswas, N., Alshamkhani, M.T., Niyas, H., Mohammed, H.I., Rashid, F.L., Dhabab, J.M., & Paul, D. (2024). A review on recent advances on improving fuel economy and performance of a fuel cell hybrid electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 89, 22-47. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.298>.
- [6]. Jeong, J.W., Lee, J., Lee, J., Cha, J., & Lee, K. (2024) Comparison of energy consumption between hybrid and electric vehicles under real-world driving conditions. *Journal of Power Sources*, 618, article number 235190. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235190>.
- [7]. Wang, Z., Cai, Y., Zeng, Y., & Yu, J. (2019). Multi-objective optimization for plug-in 4WD hybrid electric vehicle powertrain. *Applied Sciences*, 9(19), article number 4068. <https://doi.org/10.3390/app9194068>.
- [8]. Liu, J., Chen, Y., Zhan, J., & Shang, F. (2019). Heuristic dynamic programming based online energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(5), 4479-4493. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2903119>.
- [9]. Zeng, Y., Sheng, J., & Li, M. (2018). Adaptive real-time energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle based on simplified-ECMS and a novel driving pattern recognition method. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2018/5816861>
- [10]. Shah, N.L., & Kurchania, A.K. (2023). Comparative analysis of predictive models for SOC estimation in EV under different running conditions. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 5, article number 100207. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100207>.
- [11]. Liu, T., Tan, W., Tang, X., Zhang, J., Xing, Y., & Cao, D. (2021). Driving conditions-driven energy management strategies for hybrid electric vehicles. *A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 151, 111521. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111521>.
- [12]. Hu, X., Liu, T., Qi, X., & Barth, M. (2019). Reinforcement Learning for Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicle Energy Management: Recent Advances and Prospects. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 13, no. 3. <https://doi.org/10.1109/MIE.2019.2913015>.
- [13]. Richik, R., & Shanker, R. (2021). Series-parallel hybrid electric vehicle parameter analysis using matlab. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 9.10: 421-428. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.38433>
- [14]. Singh, K.V., Bansal, H.O. & Singh, D. A. (2019). Comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components. *J. Mod. Transport*, 27, 77–107. <https://doi.org/10.1007/s40534-019-0184-3>
- [15]. Tang, X., Jia, T. Hu, X., Huang, Y., Deng Z. & Pu, H. (2021). Naturalistic Data-Driven Predictive Energy Management for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 2, pp. 497-508, <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3025352>.
- [16]. Amir, M., Zaheeruddin & Haque, A. (2021). Optimal Scheduling of Charging/Discharging Power and EVs Pattern Using Stochastic Techniques in V2G System. *2021 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, New Delhi, India, 2021, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ITEC-India53713.2021.9932455>.
- [17]. Shahriar, S.M., Bhuiyan, E.A., Nahiduzzaman, M., Ahsan, M., & Haider, J. (2022). State of Charge Estimation for Electric Vehicle Battery Management Systems Using the Hybrid Recurrent Learning Approach with Explainable Artificial Intelligence. *Energies* 2022, 15, 8003. <https://doi.org/10.3390/en15218003>
- [18]. Oubelaid, A., Albalawi, F., Rekioua, T., Ghoneim, S. S. M., Taib, N., & Abdelwahab, S. A. M. (2022). Intelligent Torque Allocation Based Coordinated Switching Strategy for Comfort Enhancement of Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 58097-58115, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3178956>.
- [19]. Anselma, P.G., Biswas, A., Belingardi, G., & Emadi, A. (2020). Rapid assessment of the fuel economy capability of parallel and series-parallel hybrid electric vehicles, *Applied Energy*, Volume 275, 2020, 115319, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115319>.
- [20]. Yang, C., You, S., Wang, W., Li, L., & Xiang, C. (2020). A Stochastic Predictive Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles Based on Fast Rolling Optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 11, pp. 9659-9670, Nov. 2020, <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2955398>.
- [21]. Alegre, S., Míguez, J. V., & Carpio, J. (2020) Modelling of electric and parallel-hybrid electric vehicle using Matlab/Simulink environment and planning of charging stations through a geographic information system and genetic algorithms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 74, 2020, 1020-1027. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.041>.
- [22]. Vidal, C., Kollmeyer, P., Naguib, M., Malysz, P. et al. (2020). Robust xEV Battery State-of-Charge Estimator Design Using a Feedforward Deep Neural Network. *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility* 2(5):2872-2880, 2020, <https://doi.org/10.4271/2020-01-1181>.

Голенко Костянтин Едуардович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства

Драч Ілона Володимирівна — д-р техн. наук, доцент кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства
Хмельницький національний університет, Хмельницький;

Горбай Орес Зенонович— д-р техн. наук, професор, професор кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу

Налесник Дмиторо — аспірант кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу

Яковенко Євгенія Ігорівна— канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій.

Бур'ян Михайло Володимирович— канд. техн. наук, доцент кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів;

K.E. Holenko¹
I. V. Drach¹
O.Z Horbay²
D. Nalesnyk²
Ye. I. Yakovenko²
M. V. Burian²

ASSESSMENT OF ENERGY MANAGEMENT FACTORS OF LARGE-SIZED VEHICLES WITH HYBRID POWERTRAIN

¹ Khmelnytskyi National University

²Lviv Polytechnic National University

Due to the tightening of environmental standards for urban transport, in particular due to the introduction of the EURO-7 standard, the relevance of improving the energy management of large-sized vehicles with a hybrid power plant is increasing. The work demonstrates approaches to optimizing energy consumption in hybrid city buses based on mathematical modeling (functional optimization). The purpose of the research is to build a multifactor mathematical model that allows minimizing fuel consumption and increasing the overall energy efficiency of the hybrid transport system. The work uses the functional optimization method based on variational calculus, in particular, the Lagrange multiplier and the Hamilton condition are applied. The proposed methodology for calculating the efficiency of the energy system is tested on the basis of the Volvo 7900 Hybrid hybrid bus with an assessment of energy consumption and fuel consumption. The analysis was carried out taking into account the real urban traffic cycle, which allows assessing the efficiency of energy use in variable operating conditions. As a result of the modeling and application of functional optimization of energy consumption for the specified bus model, it was possible to achieve significant improvements in energy performance. In particular, the average required power of the diesel engine was reduced from 98.5 to 85 kW, which allowed to reduce the load on the power plant and improve its efficiency. The efficiency coefficient of the internal combustion engine was increased to 0.37 due to the engine operating in optimal modes. The most significant result was a decrease in average fuel consumption from 32.5 to 19 l/100 km, which corresponds to a saving of 42%. Such indicators were achieved due to the reasonable distribution of energy flows between the internal combustion engine, electric motor and battery, the effective use of regenerative braking, as well as taking into account real road conditions and technical parameters of the vehicle. The results obtained prove the feasibility of implementing the proposed model in modern energy management systems of city buses.

Keywords: hybrid bus, energy optimization, efficiency, mathematical modeling, urban cycle.

Holenko Kostiantyn Eduardovyc —PhD, Senior Lecturer of the Department of Tribology, Automotive Engineering, and Materials Science

Drach Iлона Volodymyrivna—Dr. Sc., Associate Professor of the Department of Tribology, Automotive Engineering, and Materials Science

Horbay Orest Zebobovych—Dr. Sc., Professor, of the Department of Machine Design and Automotive Engineering

Nalesnyk Dmytro— Post-Graduate Student the Department of Machine Design and Automotive Engineering

Yakovenko Yevheniia Ihorivna— PhD, Associate Professor of the Department of Electronic Devices and Information Technologies

Burian Mykhailo Volodymyrovych— PhD, Associate Professor of the Department of Machine Design and Automotive Engineering