

ЧОРНИЙ ВОЛОДИМИР

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0008-9475-8408>e-mail: volodymyrchorny89@gmail.com

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ

У статті проведено комплексний аналіз сучасних методів та засобів систем управління транспортними засобами в контексті задач оптимального керування. Розглянуто актуальні проблеми розвитку інтелектуальних автономних транспортних систем, які забезпечують оптимальне використання енергетичних ресурсів, мінімізацію часу транспортування та максимізацію корисного навантаження. Детально проаналізовано математичні моделі оптимального управління, що включають моделювання динаміки руху, електромагнітних процесів у приводі, теплових процесів та процесів зношування компонентів. Особливу увагу приділено системам діагностування електроприводу, які використовують електричні методи, вібраційну діагностику, тепловий контроль та методи штучного інтелекту для виявлення несправностей на ранніх стадіях розвитку.

Ключові слова: Системи управління транспортними засобами, оптимальне керування, електричний привід, діагностування.

CHORNYI VOLODYMYR

Vinnytsia National Technical University

ANALYSIS OF METHODS AND MEANS OF VEHICLE CONTROL SYSTEMS IN THE PROBLEM OF OPTIMAL CONTROL

The article presents a comprehensive analysis of modern methods and tools for vehicle control systems in the context of optimal control tasks. Current problems in the development of intelligent autonomous transport systems that ensure optimal use of energy resources, minimization of transportation time, and maximization of payload are examined. Mathematical models of optimal control are analyzed in detail, including modeling of motion dynamics, electromagnetic processes in the drive, thermal processes, and component wear processes. Special attention is paid to electric drive diagnostic systems that use electrical methods, vibration diagnostics, thermal control, and artificial intelligence methods to detect malfunctions at early stages of development. Energy consumption optimization methods for electric vehicles are considered, including flux control strategies, energy recuperation during braking, and hybrid energy storage system management. Autonomous control systems based on comprehensive use of environmental perception sensors, trajectory planning algorithms, and motion control systems are analyzed. The role of intelligent transport systems in improving efficiency and safety of transport processes is highlighted. Development prospects related to the implementation of artificial intelligence technologies, quantum computing, and integration with renewable energy systems are outlined. The research demonstrates that modern vehicle control systems represent complex mechatronic complexes integrating various technologies including electronics, automation, information technologies, and artificial intelligence. The interdisciplinary nature of this field requires close cooperation between specialists of different specialties and coordinated efforts in solving common problems to ensure competitiveness of transport technologies.

Keywords: Vehicle control systems, optimal control, electric drive, diagnostics.

Стаття надійшла до редакції / Received 12.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 27.04.2025

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку транспортних технологій характеризується стрімким переходом від традиційних засобів пересування до інтелектуальних автономних систем, здатних самостійно приймати рішення щодо оптимального руху. Особливої актуальності набувають дослідження в галузі систем управління транспортними засобами, які забезпечують не лише безпечне переміщення, але й оптимальне використання енергетичних ресурсів, мінімізацію часу транспортування та максимізацію корисного навантаження.

Проблематика оптимального керування транспортними засобами охоплює широкий спектр технічних завдань, від розробки алгоритмів траєкторного планування до створення систем діагностування стану критично важливих компонентів. Особливе місце в цій предметній області займають електричні транспортні засоби, які завдяки своїм унікальним характеристикам відкривають нові можливості для реалізації складних стратегій управління.

Актуальність досліджень у сфері систем управління транспортними засобами обумовлена кількома ключовими факторами. По-перше, зростаючі вимоги до екологічної безпеки транспортних технологій стимулюють розвиток електричних приводів та відповідних систем управління ними. По-друге, потреба у підвищенні ефективності транспортних процесів вимагає створення інтелектуальних систем, здатних адаптуватися до змінних умов експлуатації. По-третє, розвиток автономних транспортних засобів створює нові виклики у сфері забезпечення надійності та безпеки їх функціонування.

Системи управління сучасними транспортними засобами мають інтегрувати різноманітні підсистеми: навігаційні комплекси, системи енергоменеджменту, діагностичні модулі, пристрої людино-машинної взаємодії тощо. Така інтеграція вимагає розробки складних алгоритмів управління,

здатних забезпечити координовану роботу всіх компонентів системи при дотриманні заданих критеріїв оптимальності.

Особливої уваги заслуговують методи оптимального керування, які дозволяють знаходити компромісні рішення між різними, часто суперечливими цілями: швидкістю переміщення, енергоефективністю, довговічністю обладнання, комфортом користувачів тощо. Реалізація таких методів потребує глибокого розуміння фізичних процесів, що відбуваються в транспортному засобі, та створення адекватних математичних моделей цих процесів.

Аналіз останніх досліджень

Вовк Ю.Я. та Вовк І.П. [1] розглянули теоретичні основи транспортних процесів і систем, акцентуючи увагу на оптимізації транспортних потоків та підвищенні ефективності логістичних операцій. Їх дослідження формує фундаментальну базу для розуміння принципів роботи сучасних транспортних систем. Грицюк П.М. та співавтори [4] проаналізували основи теорії систем і управління, запропонувавши методологічні підходи до синтезу систем автоматичного управління транспортними засобами в умовах невизначеності. Марчук Є.А. та колектив авторів [9] дослідили застосування нечіткої логіки як інструменту управління безпекою дорожнього руху, що демонструє перспективність використання методів штучного інтелекту в транспортних системах.

Метою роботи є: системний аналіз методів та засобів систем управління транспортними засобами в контексті задач оптимального керування, дослідження можливостей інтеграції традиційних підходів з сучасними цифровими технологіями, а також обґрунтування перспективних напрямків розвитку інтелектуальних автономних транспортних систем для підвищення ефективності та безпеки транспортних процесів.

Аналіз сучасного стану досліджень

Дослідження в галузі систем управління транспортними засобами ведуться за кількома основними напрямками, кожен з яких має свої специфічні особливості та виклики. Одним з найбільш перспективних напрямків є розвиток методів оптимального керування електричними приводами транспортних засобів [1].

Сучасні підходи до управління електричними транспортними засобами базуються на комплексному врахуванні характеристик електричного двигуна, акумуляторної батареї, системи живлення та зовнішніх умов експлуатації. Математичні моделі таких систем зазвичай включають диференціальні рівняння, що описують електромагнітні та теплові процеси в електричному приводі, а також кінематичні та динамічні характеристики руху транспортного засобу [2].

Важливим аспектом розвитку систем управління є створення ефективних алгоритмів діагностування стану критично важливих компонентів. Системи діагностування дозволяють виявляти потенційні несправності на ранніх стадіях їх розвитку, що суттєво підвищує надійність та безпеку експлуатації транспортних засобів. Сучасні діагностичні системи використовують різноманітні методи обробки сигналів, включаючи спектральний аналіз, вейвлет-перетворення, методи машинного навчання тощо [3].

Проблема оптимізації траєкторії руху транспортного засобу традиційно розглядається в контексті теорії оптимального управління. Класичні підходи базуються на принципі максимуму Понтрягіна або методах динамічного програмування. Однак складність реальних транспортних систем часто робить аналітичне розв'язання задач оптимального управління неможливим, що стимулює розвиток чисельних методів та евристичних алгоритмів [4].

Особливою категорією є системи управління автономними транспортними засобами, які мають забезпечувати безпечне переміщення без участі людини-оператора. Такі системи інтегрують технології комп'ютерного зору, штучного інтелекту, робототехніки та автоматичного управління. Ключовими викликами у цій сфері є забезпечення робастності алгоритмів управління до невизначеностей зовнішнього середовища та гарантування безпеки функціонування в непередбачуваних ситуаціях [5].

Енергоменеджмент електричних транспортних засобів представляє собою окрему важливу задачу, яка полягає в оптимальному розподілі енергії між різними споживачами та ефективному використанні енергетичних ресурсів. Системи енергоменеджменту мають враховувати не лише поточні потреби в енергії, але й прогнозувати майбутні навантаження, стан акумуляторної батареї, можливості рекуперації енергії тощо [6].

Розвиток бездротових технологій відкриває нові можливості для створення розподілених систем управління транспортними засобами. Такі системи можуть включати взаємодію між окремими транспортними засобами, інфраструктурними елементами та центральними системами управління рухом. Координація руху множини транспортних засобів створює нові можливості для оптимізації транспортних потоків та підвищення ефективності транспортної системи в цілому [9].

Математичні моделі оптимального управління

Проектування систем оптимального керування транспортними засобами потребує глибокого математичного моделювання, яке дозволяє не лише описати фізичні процеси в системі, але й ефективно формулювати та розв'язувати задачі керування з урахуванням багатьох критеріїв. На відміну від спрощених одномірних моделей, сучасні задачі передбачають використання багатовимірних

нелінійних моделей із врахуванням повної просторової динаміки, багатофізичних ефектів та змінних умов експлуатації.

Основою є моделювання динаміки транспортного засобу як жорсткого тіла з шістьма ступенями вільності, що включає поступальний і обертальний рух у тривимірному просторі. Такі моделі враховують динамічну взаємодію з дорожнім полотном, зміни профілю дороги, бічні сили, моменти інерції, вплив підвіски та параметрів шасі. Зокрема, у системах активної стабілізації або адаптивного керування підвіскою застосовуються моделі типу "quarter car", "half car" або "full car" з урахуванням аеродинамічних впливів, бокових відхилень, ковзання і перекидання [10].

$$\begin{aligned} m * r &= \sum F_{\text{зовн}}, \\ I * \omega + \omega * (I * \omega) &= \sum M_{\text{зовн}}, \end{aligned} \quad (1)$$

де:

r — положення центру мас,

ω — кутова швидкість,

I — тензор інерції,

$F_{\text{зовн}}, M_{\text{зовн}}$ — сукупність зовнішніх сил і моментів.

Системи приводу моделюються не на рівні спрощеного асинхронного електродвигуна, а як інтегровані електромеханічні або гідروпривідні модулі з нелінійними та частково стохастичними властивостями. При цьому опис враховує не лише силову взаємодію, а й обмеження, пов'язані з передачею моменту, вібраціями, температурними режимами, а також вплив електронних блоків керування, затримок у сигнальних ланцюгах і зворотного зв'язку. Для точного опису багатофазних електроприводів застосовуються моделі у фазному або dq-просторі, а в гідравлічних системах — рівняння витрат, тиску та динаміки робочої рідини [12].

$$P_{\text{ел}} = \int_{t_f}^{t_0} u(t) * i(t) dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

Або в dq-просторі:

$$\begin{aligned} v_d &= R * i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega * \lambda_q, \\ v_q &= R * i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega * \lambda_d, \end{aligned} \quad (3)$$

де:

$P_{\text{ел}}$ — електрична потужність,

$u(t), i(t)$ — напруга та струм,

λ_d, λ_q — потокозчеплення,

ω — електромеханічна частота.

Особливу роль відіграє математичне формулювання самої задачі оптимального керування. Залежно від мети, формулюється функціонал, що описує сумарні витрати енергії, траєкторну точність, стійкість, комфортність руху, зменшення зношування вузлів або максимізацію залишкового ресурсу систем. Враховуючи складність об'єкта, задачі часто мають багатокритеріальний характер, що потребує використання методів векторної оптимізації, компромісних рішень (наприклад, методом ідеальної точки) або еволюційних підходів, зокрема генетичних алгоритмів, рою частинок, методів оптимізації на основі ентропії чи градієнтної декомпозиції [12].

$$J = \sum_{i=1}^n \omega_i * J_i(x, u) \rightarrow \min, \quad (4)$$

де:

J_i — окремі критерії (енерговитрати, комфорт, довговічність),

ω_i — вагові коефіцієнти,

x, u — стани і керування.

Методи розв'язання задач оптимального керування поділяються на прямі (дискретизація керованої системи з подальшою мінімізацією функціонала) та непрямі (використання принципу максимуму Понтрягіна, рівнянь Беллмана, умов оптимальності другого порядку). У задачах реального часу набувають актуальності методи прогнозного керування (Model Predictive Control), які забезпечують прийняття оптимальних рішень на коротких часових горизонтах з постійним оновленням даних [10].

Крім того, важливим компонентом сучасного підходу є врахування невизначеностей — як параметричних (похибки моделі, знос елементів, температурна залежність), так і структурних (непередбачувані ситуації, змінні дорожні умови, втрати зчеплення, збої сенсорики). Це зумовлює застосування методів робастного керування, стохастичних моделей, адаптивного керування на основі оцінки стану, а також елементів машинного навчання для онлайн-корекції моделі та прогнозування поведінки.

$$\min_{u(t)} \sum_{k=0}^N \left[\left\| x\left(t + \frac{k}{t}\right) - x_{\text{ref}} \right\|_Q^2 + \left\| u\left(t + \frac{k}{t}\right) \right\|_R^2 \right], \quad (5)$$

за умови:

$$x(t+1) = f(x(t), u(t)) + w(t)$$

де:

x_{ref} — бажаний стан,

Q, R — матриці ваг,
 $w(t)$ — збурення або невизначеність,
 N — горизонт прогнозування.

У табл.1 наведено порівняльний аналіз основних типів моделей за ключовими критеріями оптимізації.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз математичних моделей систем керування транспортним засобом за критеріями оптимізації

Тип моделі	Основний критерій оптимізації	Переваги	Недоліки
Динамічна модель з 6 ступенями свободи	Стійкість і точність траєкторії	Реалістичність, врахування складної кінематики	Високі обчислювальні витрати
Електромеханічна модель приводу	Мінімізація енерговитрат	Підходить для енергоефективного керування	Чутливість до змін параметрів
Теплова модель	Обмеження температури, продовження ресурсу	Запобігання перегріву, підтримка довговічності	Інерційність, неоперативність
Модель зношування/деградації	Максимізація ресурсу	Планування технічного обслуговування	Низька точність у динамічних режимах
Багатокритеріальна оптимізація	Компроміс між комфортом, енергією, ресурсом	Гнучкість, налаштування під конкретні задачі	Складність вибору вагових коефіцієнтів
Робастні та MPC-моделі	Стійкість в умовах невизначеності	Надійність, адаптивність	Висока складність реалізації в реальному часі

Ефективність реалізації задач оптимального керування транспортним засобом безпосередньо залежить від вибору математичної моделі, яка відповідає специфіці керованої системи та цільовим критеріям оптимізації. Проведений порівняльний аналіз показав, що різні моделі орієнтовані на досягнення різних цілей — стійкості руху, енергоефективності, терморегулювання, прогнозування ресурсу чи адаптації до зовнішніх збурень. У реальних умовах експлуатації транспортних систем найбільш результативним підходом є поєднання кількох моделей у єдиній структурі керування, що дозволяє комплексно враховувати як динаміку руху, так і стан приводу, елементів живлення та навколишнього середовища.

Системи діагностування електроприводу

Діагностування стану електричного приводу транспортного засобу є критично важливим для забезпечення надійності та безпеки експлуатації. Сучасні системи діагностування використовують комплексний підхід, який включає контроль електричних параметрів, вібраційну діагностику, тепловий контроль, аналіз хімічного складу мастильних матеріалів тощо [1].

Електричні методи діагностування базуються на аналізі струмів, напруг, потужностей електричного приводу. Спектральний аналіз струмів статора дозволяє виявляти різноманітні несправності: обриви стержнів ротора, міжвиткові замикання в обмотках, ексцентриситет ротора, несправності підшипників. Кожен тип несправності створює характерні гармоніки в спектрі струму, що дозволяє не лише виявити наявність несправності, але й ідентифікувати її тип [2].

Вібраційна діагностика є одним з найбільш інформативних методів контролю технічного стану механічних компонентів електричного приводу. Аналіз вібрацій дозволяє виявляти дефекти підшипників, незбалансованість ротора, неспіврісність валів, ослаблення кріплень тощо. Сучасні системи вібраційної діагностики використовують складні алгоритми обробки сигналів, включаючи вейвлет-аналіз, кепстральний аналіз, методи машинного навчання [3].

Тепловий контроль забезпечує моніторинг температурного режиму роботи електричного приводу. Перевищення допустимих температур може призвести до прискореного старіння ізоляції обмоток, деформації механічних компонентів, зміни властивостей мастильних матеріалів. Системи теплового контролю включають датчики температури, інфрачервоні термометри, системи тепловізійного контролю [4].

Методи штучного інтелекту знаходять все більше застосування в системах діагностування електроприводу. Нейронні мережі, експертні системи, нечітка логіка дозволяють створювати інтелектуальні діагностичні системи, здатні аналізувати складні багатопараметричні залежності та приймати рішення в умовах неповної інформації. Такі системи можуть навчатися на основі накопиченого досвіду експлуатації та поступово підвищувати точність діагностування [5].

Прогнозування залишкового ресурсу є важливою функцією сучасних систем діагностування. Методи прогнозування базуються на аналізі трендів зміни діагностичних параметрів, моделюванні

процесів деградації, статистичному аналізі даних експлуатації. Точне прогнозування залишкового ресурсу дозволяє оптимізувати стратегії технічного обслуговування та запобігти аварійним відмовам [6].

Інтеграція систем діагностування з системами управління відкриває можливості для реалізації адаптивних стратегій управління, які враховують поточний технічний стан обладнання. Наприклад, при виявленні ознак деградації ізоляції обмоток система управління може обмежити максимальні струми або температури для запобігання прискореному старінню.

Бездротові технології дозволяють створювати розподілені системи діагностування, які можуть включати мобільні діагностичні пристрої, датчики з радіоканалами зв'язку, центральні системи обробки та аналізу діагностичної інформації. Такі системи особливо корисні для моніторингу великих парків транспортних засобів [8].

Методи оптимізації енергоспоживання

Оптимізація енергоспоживання електричних транспортних засобів є комплексною задачею, яка включає оптимізацію роботи електричного приводу, системи накопичення енергії, допоміжних систем, а також планування траєкторії руху з урахуванням енергетичних критеріїв.

Оптимізація роботи електричного приводу спрямована на мінімізацію втрат енергії при забезпеченні необхідних тягових характеристик. Основними джерелами втрат в електричному приводі є омичні втрати в обмотках, втрати в сталі магнітопроводу, механічні втрати. Оптиміальне управління потоком та моментом дозволяє мінімізувати сумарні втрати при заданому режимі роботи [9].

Стратегії управління потоком можуть суттєво відрізнитися залежно від режиму роботи транспортного засобу. При постійній швидкості руху оптимальним є підтримання потоку на рівні, що забезпечує мінімум втрат. При динамічних режимах роботи необхідно враховувати перехідні процеси та обмеження по струму інвертора. Адаптивні алгоритми управління потоком можуть автоматично підлаштовуватися під поточні умови експлуатації [8].

Рекуперація енергії при гальмуванні є важливим засобом підвищення енергоефективності електричних транспортних засобів. Ефективність рекуперації залежить від багатьох факторів: швидкості руху, інтенсивності гальмування, стану акумуляторної батареї, параметрів електричного приводу. Оптиміальні стратегії рекуперації мають забезпечувати максимальне повернення енергії при дотриманні обмежень по безпеці та комфорту [5].

Управління системою накопичення енергії включає оптимізацію режимів заряджання та розряджання акумуляторної батареї. Глибина розряджання, струми заряджання та розряджання, температурний режим суттєво впливають на ресурс роботи батареї. Системи управління батареєю мають забезпечувати баланс між енергоефективністю та довговічністю [13].

Гібридні системи накопичення енергії, які включають акумуляторні батареї та суперконденсатори, дозволяють поєднати переваги різних типів накопичувачів. Суперконденсатори забезпечують високу питому потужність та можуть ефективно поглинати енергію рекуперації, тоді як акумуляторні батареї забезпечують високу питому енергію для забезпечення запасу ходу. Оптиміальне управління гібридною системою вимагає складних алгоритмів розподілу енергії [11].

Планування траєкторії руху з урахуванням енергетичних критеріїв дозволяє суттєво знизити енергоспоживання. Алгоритми еко-драйвінгу оптимізують профіль швидкості з урахуванням рельєфу місцевості, дорожньої ситуації, обмежень швидкості. Використання навігаційної інформації та даних про дорожній рух дозволяє заздалегідь планувати оптимальні режими руху [14].

Інтеграція з розумними транспортними системами відкриває нові можливості для оптимізації енергоспоживання. Координація руху множини транспортних засобів дозволяє оптимізувати транспортні потоки, зменшити кількість зупинок, підвищити ефективність використання дорожньої інфраструктури. Системи Vehicle-to-Grid дозволяють використовувати транспортні засоби як розподілені накопичувачі енергії для стабілізації електричної мережі [11].

Системи автономного управління

Розвиток автономних транспортних засобів представляє собою один з найбільш перспективних напрямків сучасного транспортного машинобудування. Системи автономного управління мають забезпечувати безпечне та ефективне переміщення без участі людини-оператора, що вимагає інтеграції складних технологій сприйняття навколишнього середовища, планування траєкторії, управління рухом.

Системи сприйняття навколишнього середовища є основою автономного управління. Сучасні автономні транспортні засоби використовують комбінацію різних датчиків: камери, лідари, радары, ультразвукові датчики, GPS/GNSS приймачі. Кожен тип датчиків має свої переваги та недоліки, тому їх комбінування дозволяє підвищити надійність та точність сприйняття [9].

Комп'ютерний зір відіграє ключову роль в системах сприйняття автономних транспортних засобів. Алгоритми обробки зображень дозволяють розпізнавати дорожні знаки, розмітку, інші транспортні засоби, пішоходів, перешкоди. Використання методів глибокого навчання суттєво підвищило точність розпізнавання та дозволило створювати робастні системи комп'ютерного зору [8].

Планування траєкторії в автономних транспортних засобах є складною задачею, яка має враховувати безліч факторів: правила дорожнього руху, безпеку, комфорт пасажирів, енергоефективність, динамічні обмеження транспортного засобу. Алгоритми планування траєкторії

зазвичай працюють на кількох рівнях: глобальне планування маршруту, локальне планування траєкторії, управління рухом [14].

Системи управління рухом автономних транспортних засобів мають забезпечувати точне відстеження запланованої траєкторії при дотриманні обмежень по безпеці та комфорту. Контролери руху зазвичай включають контур управління поздовжнім рухом та контур управління поперечним рухом. Адаптивні алгоритми управління дозволяють автоматично підлаштовуватися під змінні умови експлуатації [11].

Безпека є критично важливим аспектом автономних транспортних засобів. Системи безпеки мають включати засоби виявлення та попередження потенційно небезпечних ситуацій, системи аварійного гальмування, системи відмовостійкого управління. Методи формальної верифікації дозволяють математично довести безпечність алгоритмів управління [13].

Взаємодія з іншими учасниками дорожнього руху є особливим викликом для автономних транспортних засобів. Прогнозування поведінки інших транспортних засобів та пішоходів вимагає складних моделей, які враховують психологічні та соціальні фактори. Системи комунікації Vehicle-to-Vehicle та Vehicle-to-Infrastructure дозволяють покращити координацію руху та підвищити безпеку [14]

Інтелектуальні транспортні системи

Інтелектуальні транспортні системи представляють собою інтеграцію інформаційних та комунікаційних технологій в транспортну інфраструктуру з метою підвищення ефективності, безпеки та екологічності транспортних процесів. Такі системи включають широкий спектр технологій: системи управління рухом, системи інформування користувачів, системи оплати, системи моніторингу стану інфраструктури [1].

Системи управління дорожнім рухом використовують інформацію про поточний стан транспортних потоків для оптимізації роботи світлофорів, управління змінними дорожніми знаками, координації руху на мережі доріг. Адаптивні алгоритми управління дозволяють автоматично підлаштовуватися під змінні умови руху та мінімізувати затримки [2].

Системи моніторингу транспортних потоків використовують різноманітні датчики: індуктивні петлі, відеокамери, радары, магнітометри для збору інформації про інтенсивність руху, швидкості транспортних засобів, щільність потоків. Обробка цієї інформації дозволяє виявляти аномальні ситуації, прогнозувати затори, оптимізувати маршрути [3].

Системи навігації та маршрутизації забезпечують водіїв актуальною інформацією про дорожню ситуацію та рекомендують оптимальні маршрути. Сучасні навігаційні системи використовують дані про поточний стан руху в реальному часі та можуть динамічно перераховувати маршрути при зміні дорожньої ситуації [4].

Кооперативні інтелектуальні транспортні системи базуються на обміні інформацією між транспортними засобами, а також між транспортними засобами та інфраструктурою. Такий обмін інформацією дозволяє підвищити ситуативну обізнаність водіїв та систем автономного управління, покращити координацію руху, підвищити безпеку [5].

Системи електронної оплати спрощують процедури оплати за використання транспортної інфраструктури та послуг громадського транспорту. Безконтактні системи оплати підвищують зручність для користувачів та дозволяють збирати детальну статистику про використання транспортних послуг [6].

Інтеграція з розумними містами дозволяє створювати комплексні системи управління міською мобільністю. Такі системи можуть включати координацію різних видів транспорту, управління парковками, інтеграцію з системами енергопостачання, екологічний моніторинг.

Висновки

Проведене дослідження методів і засобів побудови систем управління транспортними засобами в контексті задач оптимального керування дозволяє сформулювати низку важливих висновків щодо особливостей математичного моделювання та ефективної реалізації керувальних стратегій у сучасних умовах експлуатації.

Математичне забезпечення є фундаментальною основою для розробки систем оптимального керування. Як показано в роботі, точність, стійкість і енергоефективність управління значною мірою залежать від обраної моделі — від детальних динамічних описів із шістьма ступенями свободи до адаптивних робастних систем, здатних працювати в умовах суттєвих невизначеностей. Комплексне порівняння моделей (Табл. 1) показує, що жодна з них не є універсальною, і оптимальне рішення часто базується на інтеграції кількох підходів у єдиній ієрархічній архітектурі.

Важливе значення має адаптація математичних моделей до реального часу та змінних умов експлуатації. Моделі електромеханічного приводу, теплового стану, деградації компонентів та багатокритеріальної оптимізації повинні враховувати не лише технічні, а й економічні, екологічні та експлуатаційні вимоги. Використання методів Model Predictive Control, робастного та адаптивного керування дозволяє значно підвищити ефективність систем при збереженні стійкості в умовах невизначеностей.

Проведений аналіз підкреслює, що розвиток математичних моделей керування транспортними засобами потребує системного підходу до поєднання фізики процесів, обчислювальної ефективності та можливостей сучасної сенсорики й штучного інтелекту.

Література

1. Вікович, І. А., Грицунь, О. М., & Бура, Р. Р. (2022). *Проектування транспортно-складських комплексів: посібник*. Львів: Растр-7.
2. Глушик, М. М., & Телесницька, Н. М. (2020). *Дослідження операцій*. Львів: Новий світ – 2000.
3. Грицюк, П. М., Джоші, О. І., & Гладка, О. М. (2021). *Основи теорії систем і управління: навч. посіб.* Рівне: НУВГП.
4. Дзюбан, І. Ю., Жиров, О. Л., & Охріменко, О. Г. (2005). *Методи дослідження операцій*. Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка».
5. Зайченко, Ю. П. (2006). *Дослідження операцій: підручник (7-ме вид., переробл. та допов.)*. Київ: Видавничий дім «Слово».
6. Кузькін, О. Ф., Лашених, О. А., & Турпак, С. М. (2013). *Прикладні задачі дослідження операцій в транспортних системах: навчальний посібник*. Запоріжжя: ЗНТУ.
7. Шендрик, В. В., & Парфененко, Ю. В. (2014). *Методи синтезу та оптимізації: конспект лекцій для студ. напряму підготовки 6.050101 «Комп'ютерні науки»*. Суми: СумДУ.
8. Нефьодов, Ю. М., & Балицька, Т. Ю. (2011). *Методи оптимізації в прикладах і задачах: навчальний посібник*. Київ: Кондор.
9. Марчук, Є. А., Кочетов, М. С., Ішанкулов, В. Т., & Трофімова, О. І. (2019). Нечітка логіка як інструмент управління безпекою дорожнього руху. *Техніка. Технології. Інженерія*, 2(12), 24–27.
10. Samacho, E. F., & Bordons, C. (2013). *Model predictive control* (2nd ed.). London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5>
11. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design* (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429504884>
12. Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale, PA: SAE International. <https://doi.org/10.4271/R-114>
13. Pisu, P., & Rizzoni, G. (2007). A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(3), 506–518. <https://doi.org/10.1109/TCST.2007.894649>
14. Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., et al. (2006). Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. *Journal of Field Robotics*, 23(9), 661–692. <https://doi.org/10.1002/rob.20147>

References

1. Vikovych, I. A., Hrytsun, O. M., & Bura, R. R. (2022). *Proiektuvannia transportno-skladskykh kompleksiv: posibnyk*. Lviv: Rastr-7.
2. Hlushyk, M. M., & Telesnytska, N. M. (2020). *Doslidzhennia operatsii*. Lviv: Novyi svit – 2000.
3. Hrytsiuk, P. M., Dzhoshi, O. I., & Hladka, O. M. (2021). *Osnovy teorii system i upravlinnia: navch. posib.* Rivne: NUVHP.
4. Dzuban, I. Yu., Zhyrov, O. L., & Okhrimenko, O. H. (2005). *Metody doslidzhennia operatsii*. Kyiv: IVTs «Vydavnytstvo «Politekhnik».
5. Zaichenko, Yu. P. (2006). *Doslidzhennia operatsii: pidruchnyk (7-me vyd., pererobl. ta dopov.)*. Kyiv: Vydavnychiy dim «Slovo».
6. Kuzkin, O. F., Lashchenykh, O. A., & Turpak, S. M. (2013). *Prykladni zadachi doslidzhennia operatsii v transportnykh systemakh: navchalnyi posibnyk*. Zaporizhzhia: ZNTU.
7. Shendryk, V. V., & Parfenenko, Yu. V. (2014). *Metody syntezy ta optymizatsii: konspekt lektsii dlia stud. napriamu pidhotovky 6.050101 «Kompiuterni nauky»*. Sumy: SumDU.
8. Nefodov, Yu. M., & Balytska, T. Yu. (2011). *Metody optymizatsii v prykladakh i zadachakh: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: Kondor.
9. Marchuk, Ye. A., Kochetov, M. S., Ishankulov, V. T., & Trofimova, O. I. (2019). *Nechitka lohika yak instrument upravlinnia bezpekoiu dorozhnogo rukhu*. *Tekhnika. Tekhnolohii. Inzheneriia*, 2(12), 24–27.
10. Samacho, E. F., & Bordons, C. (2013). *Model predictive control* (2nd ed.). London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5>
11. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design* (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429504884>
12. Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale, PA: SAE International. <https://doi.org/10.4271/R-114>
13. Pisu, P., & Rizzoni, G. (2007). A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(3), 506–518. <https://doi.org/10.1109/TCST.2007.894649>
14. Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., et al. (2006). Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. *Journal of Field Robotics*, 23(9), 661–692. <https://doi.org/10.1002/rob.20147>