



Б. С. Карпішен

ХНАДУ, м. Харків, Україна, karpishen.bogdan@gmail.com,
ORCID iD: 0009-0001-1790-9048

ПОКРАЩЕННЯ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ADAS В АВТОНОМНОМУ ВОДІННІ КОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

У статті проведений аналіз тенденцій розвитку технологій енергозбереження та рекуперації на електричному автомобільному транспорті. Розглянуто та визначено перспективні напрямки розвитку технологій енергозбереження зокрема з використанням систем допомоги водієві. Збільшення наповненості автомобілів електронними системами допомоги водієві збільшує загальні витрати енергії. Наведені рекомендації з вибору оптимальних технологій та методів енергозбереження для автотранспорту. Для деяких методів економія спожитої енергії є доповненням до основного напрямку роботи. Поєднання інтелектуальних транспортних засобів та відповідних засобів організації дорожнього руху може сприяти подальшій реалізації транспортних переваг інтелектуальних транспортних засобів.

ЕКОНОМІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ, АВТОНОМНІ АВТОМОБІЛІ, ADAS, ЕКО-ВОДІННЯ, РЕКУПЕРАЦІЯ

B. S. Karpishen. Improving energy consumption with ADAS in autonomous driving communication system. The article analyses the trends in the development of energy saving and recovery technologies in electric motor vehicles. Promising directions for the development of energy saving technologies, in particular with the use of driver assistance systems, are considered and identified. Increasing the occupancy of cars with electronic driver assistance systems increases the overall energy consumption. Recommendations for choosing the optimal technologies and methods of energy saving for motor vehicles are given. For some methods, saving energy is a complement to the main area of work. The combination of intelligent vehicles and appropriate traffic management tools can help to further realise the transport benefits of intelligent vehicles.

ENERGY SAVING, ELECTRIC TRANSPORT, AUTONOMOUS VEHICLES, ADAS, ECO-DRIVING, RECOVERY

Вступ

Перехід від палива з нафтопродуктів, до інших видів палива зумовлений постійно зростаючою кількістю транспортних засобів і сучасною потребою в більш ефективних і екологічно чистих видах палива. Альтернативні види палива, наприклад водень, більше підходять до теперішніх та застарілих видів авто, а заміна ДВЗ електродвигуном більше притаманна новому автопрому та майбутнім ринковим надходженням.

Електрифікація стала одним з основних напрямків розвитку автомобільної промисловості і, як очікується, стане провідним видом енергії для транспортних засобів у майбутньому [1].

Економічні та екологічні міркування спонукають автомобільну промисловість переходити до використання електромобілів. Однак поява та розповсюдження електромобілів невизначені. Розвиток і розповсюдження електромобілів мають певні перешкоди. Серед усіх цих бар'єрів велику увагу привернули дальність і ефективність цих транспортних засобів.

Також це зумовлено підвищенням рівня автоматизації автомобіля, автономні вантажівки і електротаксі, це все несе за собою нові виклики. Підвищення автоматизації веде до збільшення потреби в енергоресурсі на одиницю транспорту [2].

1. Аналіз публікацій

Дослідженням пов'язаним з розробкою та експлуатацією присвячено багато робіт в зарубіжних та вітчизняних виданнях. Це стосується як вантажних і легкових автомобілів так і особливо електротранспорту за принципом доставки останньої милі.

Питання споживання енергії можна вирішити або шляхом підвищення ефективності електродвигунів, за рахунок підвищення ККД акумуляторів шляхом термоконтролю, контролю процедури зарядки, роблячи їх ефективнішими за допомогою електричних компонентів і напівпровідників з кращою потужністю [3]. Інший підхід до підвищення ефективності електромобілів полягає в оптимізації споживання енергії за допомогою стратегій управління енергією під час різних циклів руху.

У міру того, як електромобілі набувають популярності, виробники все частіше використовують функції Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) для вирішення проблем, унікальних для електричної мобільності [4].

Автономність транспортного засобу досягається завдяки використанню функцій ADAS, які вимагають безперервних вимірювань і обчислень у транспортному засобі. Функції ADAS включають адаптивний круїз-контроль, класифікацію об'єктів, виявлення перешкод, картографування, планування шляху та одночасну локалізацію та картографування

(SLAM). Ці програми зазвичай покладаються на камери, LiDAR і радарні датчики, які також генерують великі обсяги необроблених даних для розрахунку і аналізу обчислювальними блоками транспортного засобу. Також вони можуть використовувати зв'язок між іншим транспортним засобом (V2V) і зв'язок між інфраструктурою (V2I). Автомобіль оснащений цими потужними технологіями, може мати доступ до великої кількості даних і може взаємодіяти з іншими автомобілями.

Дослідження [5] показує необхідність складних розрахункових схем для точного контролю та забезпечення ефективної роботи нових надійних та економічно ефективних напівпровідникових технологій. ADAS системи мають потенціал для значного підвищення енергоефективності та можуть зайняти цю нішу.

Тим часом збільшення наповненості автомобілів електронними системами допомоги водієві збільшує загальні витрати енергії особливо зі збільшенням кількості і комплексності самої системи за кількістю технологій і загальною обчислювальною потужністю. Звісно зі збільшенням рівня автоматизації потреба в енергії також зростає [6].

Дослідження [7] показують, що бортове споживання енергії перевищує 1000 Вт, а загальне споживання енергії одним умовним автоматизованим транспортним засобом, що об'єднує всі три категорії, може становити близько 2500 Вт-год на 100 км водіння. Високе бортове споживання енергії зумовлене використанням алгоритмів і пристроїв обробки, які потребують інтенсивних обчислень, таких як графічні процесори, необхідні для перцептивних і візуальних програм.

2. Мета та постановка задачі

Метою роботи є аналіз та обґрунтування сучасного електротранспорту та висвітлення різних методів економії енергії, їх переваг та недоліків та оцінки потенційного впливу на розвиток і впровадження електромобілів.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати перспективні підходи до енергозбереження в з урахуванням використання сучасних технологій;
- визначити переваги і недоліки кожного з підходів;
- зробити висновки, що до доцільності використання та майбутні перспективи кожного методу.

3. Класифікація підходів енергозбереження

Надалі пропонуються підходи до енергозбереження які базуються на автономному транспорті (АТ) та деякі підходи до їх вирішення.

- Дорожня карта і оптимізація маршруту. Інформація про прогнозування доріг може допомогти

АТ оптимізувати споживання енергії на основі інформації про дорожній рух, кривизни дороги та висоти за допомогою 3D-карт доріг. Дані передаються через зв'язок V2I. Їх можна детально проаналізувати, щоб зменшити споживання енергії. В мінімальному випадку можна використовувати заздалегідь завантажену карту навігатора.

– Часовий трафік і гармонізація дорожнього руху. Кожен транспортний засіб у парку або в трафіку може оптимізувати свій цикл водіння, щоб зменшити кількість операцій гальмування та прискорення. Існує кілька підходів для планування транспортних засобів у русі або перед перехрестями. Перший заснований на зміні швидкості та прискорення, але він може бути досягнутий лише шляхом передбачення без співпраці. Другий метод заснований на оптимізації споживання енергії під час попутного руху, для якого підходить транспортний засіб, оскільки виїзд автомобіля на іншу смугу вплине на рух попереду. В цьому можуть допомогти зв'язок V2I та радари. Ідеальний сценарій має на увазі кооперативний метод керування [8, 9].

– Слідування за автомобілем. Існує велика кількість рішень круїз-контролю з функцією слідування за автомобілем попереду. Тому в цьому випадку потрібно приділити увагу кооперативному адаптивному круїз-контролю. Системи мають потенціал для збільшення пропускної здатності руху, дозволяючи зменшити прохід між транспортними засобами та узгодити їх швидкість. Хоча це більш важливо для вантажівок, оскільки ці транспортні засоби страждають від високого коефіцієнта лобового опору через їхні габарити. Однак ця технологія добре підходить і для громадського транспорту великих міст та шосе.

– «Ідеальне» перехрестя. Завдяки попередженню кожен транспортний засіб отримує часовий сигнал з перехрестя і може зменшити витрату енергії. Цього можна досягти за рахунок меншої кількості непотрібних прискорень і гальмувань. У режимі співпраці система керування перехрестям також може зробити набагато більше для керування попутним транспортом, зменшивши час очікування. У найкращому випадку, при наявності 100% АТ на перехресті, червоне світло може бути пропущене за допомогою зв'язку V2I і V2V.

– Формування корисних навичок. Впровадження автономного транспорту дозволить простіше впроваджувати і навчати водіїв корисним звичкам економічного водіння. Еко-водіння один з таких принципів, що дозволить автономному транспорту отримуючи інформацію про навколишню обстановку оптимізувати дорожній рух. Якщо транспортний засіб, долучений до мережі, може передбачати швидкість і наміри інших транспортних засобів через зв'язок V2V, він зможе робити це більш ефективно. Отримавши інформацію

про час руху, швидкість автомобіля та пройдено відстань, можна оптимізувати споживання енергії.

– Внутрішня комплектація. Вибір апаратної частини комплектації є важливою складовою подальшого використання енергії транспортом. Технології рекуперації енергії допоможуть отримувати енергію від самого автомобіля наприклад під час спуску, кочення, гальмування і т. д. Правильне налаштування роботи приладів та оптимізація їх роботи допоможе використувати їх максимально ефективно та економічно.

4. Споживання енергії

Першим кроком у визначенні споживання енергії транспортним засобом є визначення рівняння, що лежить в основі. Основне енергетичне рівняння для автомобіля $E_t = E_c$, де E_t – тягова енергія, що генерується мотором або двигуном і передається на колеса, а E_c – енергія, споживана автомобілем.

Загальне споживання енергії визначається як:

$$E_c = E_{пов} + E_{коч} + E_{пр} + E_v, \quad (1)$$

де $E_{пов}$ – аеродинамічна енергія, $E_{коч}$ – енергія, що витрачається на подолання сили опору коченню; $E_{пр}$ – енергія, що витрачається на прискорення транспортного засобу; E_v – енергія, що витрачається на зміну висоти транспортного засобу, а саме, на підйом транспортного засобу [8].

В автомобілях з електродвигуном ця формула виглядає трохи інакше через те що через інерційний ефект частина енергії може бути збережена в умовах рекуперативного гальмування

$$E_c = E_{пов} + E_{коч} + E_{пр} + E_v - E_{рг}, \quad (2)$$

де $E_{рг}$ – відновлена енергія за допомогою рекуперативного гальмування. Кількість відновленої енергії може бути ключовою для вирішення та мінімізації споживання енергії транспортним засобом.

Наприклад для зменшення аеродинамічних втрат середня швидкість та її відхилення є єдиними параметрами, які можуть мінімізувати цей енергетичний елемент за допомогою динаміки автомобіля. Варто зазначити, що мінімізація середньої швидкості призведе до збільшення часу в дорозі та зменшення транспортного потоку, що в більшості випадків небажано, але зменшення відхилення швидкості є більш доцільним.

5. Дорожня карта і оптимізація маршруту

Планування маршруту руху було і досі залишається ефективним способом економії палива та енергії. Важливим етапом планування маршруту є так звані доставки останньої милі, бо вони в логістиці вважаються найдорожчими. У логістиці ці питання вирішуються за допомогою перегляду варіантів доставки та оцінкою компромісів, пов'язаних із конкретним маршрутом [10, 11].

Іншим варіантом економії живлення може слугувати система контролю відстеження траєкторії руху, для зменшення відхилення поперечного та поздовжнього положення між фактичною траєкторією руху та еталонною траєкторією. Якщо відхилення занадто велике, це призведе до більших витрат електроенергії силової батареї та скорочення запасу ходу.

Побудована [12] модель показує деяке зменшення енергоспоживання батареї та підвищення точності відстеження траєкторії. Хоча різниця зекономленої енергії доволі мала, перевагами цього методу є те, що він підходить до автомобілів різного рівня автоматизації. Це також не є його основною задачею, а лише доповненням до контролю положення.

6. Часовий трафік і гармонізація дорожнього руху

Протягом останніх кількох років розглядалися різні аспекти технології формування автоколон. Транспортні засоби у взводі можуть отримати вигоду від підвищення ефективності за рахунок зменшення сили лобового опору, методів оптимізації споживання палива на основі даних з V2V і V2I з'єднань, а також від співпраці при формуванні парку транспортних засобів.

Деякі роботи, такі як [13], показують підвищення паливної ефективності при моделюванні 100%-го ефекту колони до 10 машин з використанням модельного прогнозованого управління (МПУ), що зображено на рис. 1. Повідомляється про збільшення ефективності електродвигунів до 50% у деяких їздових циклах.

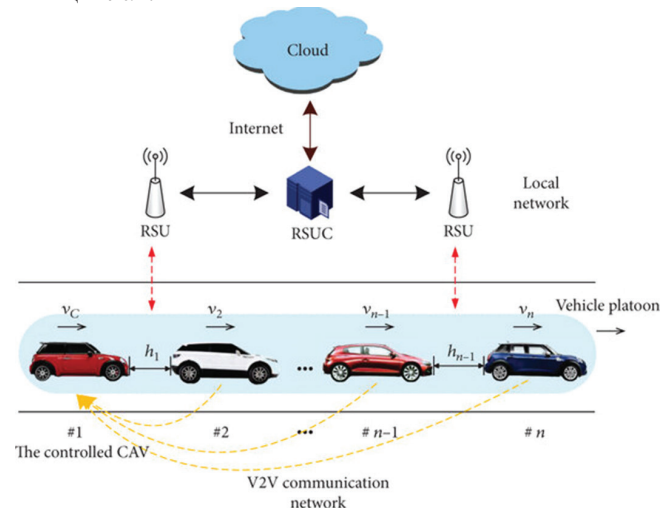


Рис. 1. Автоколонна авто об'єднаних в одну мережу з використанням V2V зв'язку

Гармонізація руху зменшить випадки гальмування і призведе до більш плавного циклу руху з дуже невеликою різницею в швидкості прискорення та меншого відхилення від середньої швидкості.

Оскільки транспортні засоби, що їдуть попереду, можуть отримувати інформацію про умови дорожнього руху через V2V, транспортні засоби, що їдуть

позаду, можуть адаптуватися до дорожніх умов. Зменшений інтервал між автомобілями в колоні призведе до меншого аеродинамічного опору.

Ці фактори призведуть до зниження споживання енергії та викидів порівняно з транспортними засобами без V2V [14].

Слід зазначити, що зниження споживання енергії для групи з кількох транспортних засобів на великій відстані є більш ефективним, ніж зменшення споживання енергії на короткій відстані лише для обмеженої кількості транспортних засобів.

7. Слідування за автомобілем

Адаптивний круїз контроль автомобілів може скоротити середній час у дорозі та зменшити середнє споживання енергії для одного транспортного засобу в більшості сценаріїв. Встановлено [15], що АТ (рівня 2 і вище [16]) можуть скоротити середній час у дорозі та зменшити середнє споживання енергії в більшості сценаріїв у перерахунку на один транспортний засіб. Але що стосується загальних переваг, то спостерігається негативний вплив на споживання енергії через збільшення фактичної пропускної здатності доріг, що приблизно еквівалентно збільшенню інтенсивності руху. Коли потік трафіку перевищує межу насичення, досягаються позитивні економічні вигоди, які стають все більшими в міру розповсюдження на ринок АТ.

Хоча середнє споживання енергії в багатьох сценаріях зменшується, зростання інтенсивності руху збільшує загальне споживання енергії, що нівелює переваги енергозбереження.

Однак тема може бути розширена глобальними і локальними стратегіями регулювання адаптивного круїз-контролю, що теоретично [17] перетворюється на реальність, оскільки електромобілі поступово стають все більш популярними в міру підвищення рівня автоматизації.

Коли рівень автоматизації підвищується до 90%, результати моделювання змішаної моделі кращі, ніж результати моделі без АТ. Таким чином, в умовах одного виїзду, при використанні локальної стратегії прокладання маршруту, модель змішаного транспортного потоку спрямована на поліпшення умов руху на дорозі, а частка автономних транспортних засобів також є умовною. Лише коли частка автономних транспортних засобів перевищує 90%, гібридна модель транспортного потоку може покращити ефективність руху та енергоспоживання краще, ніж традиційні моделі транспортних засобів.

Подальші розробки в безпілотних автомобілях включають використання нейронних мереж на основі навчання з підкріпленням для зменшення коливань трафіку, спричинених водіями, та покращення споживання енергії. Експериментальні результати показують, що модель на основі навчання з підкріпленням значно

зменшує обмеження симуляції та має можливості самонавчання та само коригування. Ефективність подорожей підвищиться шляхом пом'якшення негативних наслідків коливань трафіку та зниження середнього споживання електроенергії [18].

8. «Ідеальне» перехрестя

Перехрестя є одним з найскладніших ділянок дороги, доволі часто такі ділянки стають епіцентрами дорожніх небезпек і заторів. Максимально ефективне проходження ділянки дасть найбільший ефект плавності поїздки, а отже і економічний ефект. Успішний прохід перехрестя потребує великої кількості даних, що потребує розрахункової потужності, наприклад загальної мережі керування або локального серверу перехрестя для обробки даних та спілкування з АТ.

Для ефективного подолання перехрестя можна використовувати оптимізацію методом змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP) [19]. За допомогою цього методу було зафіксовано зниження споживання енергії до 20%. За допомогою MILP контролер створює реальне зображення перехрестя на основі з'єднання V2V, швидкості та місцезнаходження кожного транспортного засобу та завчасно надає доступ кожному транспорту, щоб мінімізувати споживання енергії. У [19] бажаний час прибуття транспортних засобів на перехрестя додається до мети оптимізації, щоб уникнути затримок і покращити продуктивність і безпеку перехрестя.

Однак реалізація потребує футуристичного середовища та максимального розповсюдження АТ та підключених користувачів. Що і нівелює хороші результати.

9. Формування корисних навичок

Одним із способів покращити економію палива є використання зворотного зв'язку водія для формування ефективних звичок (еко-водіння). Імплементация ADAS в автотранспорт допоможе в просуванні екологічного водіння.

Цей принцип на сьогоднішній день є важливим впровадженням який є основою для збереження енергії. Вищий рівень автоматизації відповідно дає кращий рівень еко-водіння особливо в містах завдяки більш плавному водінню. Також рівень економії електродвигунів зберігається вищим ніж у бензинових при низьких швидкостях. До основних прийомів можна віднести:

- уникання надмірного прискорення та різкого гальмування;
- запобігання холостому ходу;
- дотримання стабільного швидкісного режиму;
- оптимізоване планування маршруту;
- мінімізація коротких зупинок.

Параметр еко-водіння можна розрахувати використовуючи так званий «фактор агресивного водіння» [20].

$$AF = \frac{1}{D} [E_w - E_w^*] = \frac{\int (Av + Bv^2 + Cv^3 + Mav)^+ dt}{\int v dt} - (A + B\bar{v} + C\bar{v}^2), \quad (3)$$

$$E_{wheel} = \int (Av + B\bar{v}^2 + C\bar{v}^3 + Mav)^+ dt, \quad (4)$$

$$E_{wheel}^* = (Av + B\bar{v}^2 + C\bar{v}^3) dt = (A + B\bar{v} + C\bar{v}^2) \int \bar{v} dt. \quad (5)$$

де AF – різниця в споживанні енергії на колесах між дотриманням профілю руху E_{wheel} і руху зі сталою середньою швидкістю E_{wheel}^* нормалізовано за відстанню шляху D . Зі зменшенням AF росте екологічність водіння.

$A(N)$, $B(N)$, $C(N)$ – коефіцієнти вибігу, що відповідають коефіцієнтам кочення, обертання та аеродинамічного опору відповідно. Коефіцієнти вибігу це специфічні параметри надані базою даних палива «Агентства з охорони навколишнього середовища» [21]. Надалі a (м/с^2), v (м/с) і \bar{v} (м/с) – миттєве позитивне прискорення, швидкість і середня швидкість у дорозі відповідно. M (кг) маса транспортного засобу. Для прикладу було створено три варіанти сценаріїв еко-водіння (низький, середній, високий рівні), що порівнювались зі звичайним водінням.

Сценарій з низьким рівнем екологічного водіння зменшує параметр агресивного водіння на 29% (середнє значення) завдяки плавній їзді, але не змінює середню швидкість у дорозі. Середній сценарій зменшує AF на 38% і збільшує середню швидкість поїздки на 10% порівняно з вихідними профілями швидкості. Сценарій високого рівня зменшує автофокус на 61% і збільшує середню швидкість поїздки на 20% (рис. 2).

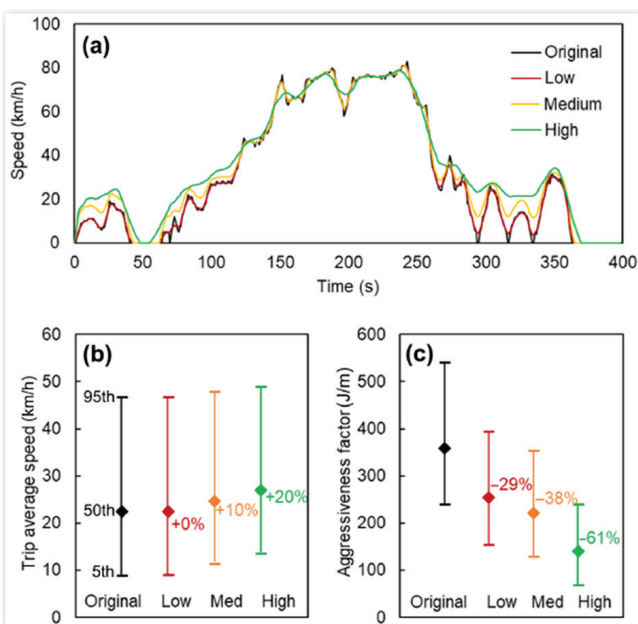


Рис. 2. Данні сценаріїв еко-водіння.

Данні показують середні значення показників AF для близько 8000 поїздок [22]

Вплив автоматизації на енергоспоживання менший для електромобілів, ніж для бензинових, але різниця в перевагах екологічного водіння відносно невелика. Відомо, що автоматизовані транспортні засоби витрачають до 20% більше енергії на низьких швидкостях порівняно з неавтоматизованими електромобілями. Ця динаміка стає меншою зі збільшенням швидкості.

За деякими розрахунками [20] еко-водіння може зменшити потребу в енергії на 10 – 21% для електромобілів в залежності від рівня «агресивності» водіння.

10. Внутрішня комплектація

Традиційний ADAS відстежує та використовує дані, які можуть допомогти визначити ситуації, коли транспортному засобу може знадобитися сповільнити швидкість. Майбутній поворот зазвичай свідчить про зниження швидкості. Значні повороти на дорозі або повороти на 90° гарантують зниження швидкості, що робить функцію повороту необхідною для оптимального прогнозування маршруту.

Гальмівна система відома як джерело розсіювання енергії транспорту. Двигун, який можна застосовувати як електродвигун і генератор, має чотири квадрантні робочі функції. Коли двигун працює в другому або четвертому квадранті (тобто в режимі генератора), інші форми енергії можуть бути перетворені в електричну; наприклад, під час рекуперативного гальмування кінетична енергія перетворюється на електричну енергію, а рекуперация відпрацьованого тепла, що виділяється вихлопним газом, перетворюється на електричну енергію. Використання двигунів у системах підвіски також перетворює механічну та вібраційну енергію в електричну.

Рекуперативна гальмівна система (РГС) може збільшити запас ходу транспортних засобів і зменшити кількість енергії, яка розсіюється в навколишнє середовище у вигляді тепла. РГС може зберігати регеновану енергію в різних формах, наприклад, у вигляді маховика, що обертається, або у вигляді гідравлічної чи пружинної системи. Однак найбільш поширеною і розвинутою формою рекуперативної енергії є система накопичення енергії, яка може легко виробляти електричну енергію для подальшого використання. Суперконденсатори та акумулятори можуть зберігати та видавати електричну енергію з високою ефективністю. Гібридна конструкція, що використовує як батареї, так і супер/ультраконденсатори, є одним з підходів до підвищення ефективності зберігання регенованої енергії [23].

Послідовне гальмування з максимальною рекуперативною енергією: У цьому методі комбінованого гальмування метою є максимальна рекуперация енергії. Тому, коли гальмівне зусилля менше за максимально

можливе, автомобіль використовує гальмівне зусилля РГС на ведених колесах (у більшості випадків передніх). Якщо гальмівного зусилля РГС недостатньо для забезпечення необхідного гальмівного сповільнення, задіюється механічна гальмівна система на задніх колесах, щоб забезпечити додаткове зусилля, необхідне для досягнення бажаного сповільнення.

Ефективність роботи системи значно залежить від типу дорожнього полотна, початкової швидкості гальмування та маси автомобіля. Таким чином регенерація енергії при максимально ефективному сценарії доходить до 78% у випадку низької автоматизації [24].

ADAS відкривають нові можливості для більш ефективного використання регенераційних гальм. На ранньому етапі транспортний засіб (водій або автоматизована система водіння) має бути проінформований про майбутні події чи ситуації. У дослідженні в [25] була введена система енергетично оптимального уповільнення для посилення рекуперативних гальм. Він показав 33% покращення ефективності рекуперативного гальмування для CAV порівняно з люди-ми-водіями.

Іншим технологічним рішенням виступає електромагнітна активна підвіска, може значно покращити динамічні характеристики автомобіля з точки зору комфорту їзди та стабільності керування. Також технологія відновлення енергії вібрації може зменшити споживання енергії транспортним засобом на 7% – 10% [26], компенсувати споживання енергії активною підвіскою та підвищити ефективність використання джерела живлення автомобіля для досягнення мети енергозбереження.

Процес рекуперації енергії існуючих активних підвісок повітряного та гідравлічного типу відносно складний: енергію вібрації необхідно перетворити у внутрішню, а потім за допомогою двигуна перетворити в електричну. Обидва потребують додавання допоміжних установ, що ускладнює контроль і знижує ефективність перетворення енергії [27].

Електромагнітна підвіска використовує струм як робоче середовище для полегшення лінійного керування. У той же час, відповідно до характеристик

самого двигуна, енергія вібрації може бути безпосередньо перетворена в електричну енергію, яка має характеристики компактної структури та можливості регенерації енергії. Таким чином, система рекуперації електромагнітної енергії підвіски, яка враховує характеристики активної динаміки та регенерації енергії, відповідає потребам розробки майбутніх шасі та поступово стає гарячою точкою для вивчення вчених з різних країн.

Висновки

У підсумку запропоновані підходи мають потенціал для розвитку і є важливими в контексті сучасних інтелектуальних транспортних систем. Кожен з методів має свої переваги та недоліки, хоча не потрібно робити вибір одного, тому майже всі методи можуть працювати сумісно у рамках однієї інтелектуальної системи. Це стосується і напрямку розвитку. Для деяких методів економія спожитої енергії є доповненням до основного напрямку роботи. Однак поєднання інтелектуальних транспортних засобів та відповідних засобів організації дорожнього руху може сприяти подальшій реалізації транспортних переваг інтелектуальних транспортних засобів. Результати огляду методів можна побачити в табл. 1. Оцінка ризиків і питання безпеки є одними з найважливіших питань у розробці автономного транспорту. Варто зазначити, що кожен з методів повинен враховувати безпеку як важливе питання. Автоматизація транспорту та сприяння використанню відновлюваної енергії не є самоціллю, а частиною необхідної відповіді – з точки зору стратегії та скоординованих інструментів для побудови стійкої мобільності. Окрім безпеки, ADAS також відіграє важливу роль в оптимізації ефективності електромобілів, що є ключовим моментом у широкому впровадженні стійкої мобільності. Завдяки динамічному регулюванню енергоспоживання ADAS максимізує ефективність електромобілів, усуваючи проблеми із запасом ходу та максимізуючи відстань, яку можна подолати на одному заряді. Вкрай важливо підвищити швидкість встановлення модулів V2X на транспортні засоби та прискорити інтелектуальну модернізацію транспортної інфраструктури.

Таблиця 1

Енергетичний вплив переліку методів

Категорія	Вплив	Опис	Енергетичний вплив
Дорожня карта і оптимізація маршруту	Оптимізація доставки останньої милі	Методи перегляду варіантів та оцінка компромісів	Параметр економії має високу залежність від типу і розміру доставки тому має лише загальні рекомендації до оптимізації
	Система контролю і відстеження траєкторії руху	Точне відстеження транспортним засобом траєкторії є корисним для економії електроенергії та збільшення запасу ходу акумулятора	Біля 1% на 1 милію

Категорія	Вплив	Опис	Енергетичний вплив
Часовий трафік і гармонізація дорожнього руху	Формування автоколони	Використання колони до 10 машин з використанням модельного прогнозованого управління	До 50%
Слідування за автомобілем	Адаптивний круїз контроль	Ефективність залежить від інтенсивності руху	Від 2% до 36%
	Стратегії регулювання маршруту	Вищий рівень автоматизації та більша кількість автономних транспортних засобів можуть зменшити споживання енергії.	До 10%
«Ідеальне перехрестя»	Оптимізація методом змішаного цілочисельного лінійного програмування	MILP контролер та з'єднання V2V надає місцезнаходження кожного транспортного засобу і будує алгоритм ефективного проходження перехрестя	До 20%
Формування корисних навичок	Еко-водіння	Дотримання правил еко-водіння	Від 10% до 21%
Внутрішня комплектація	Рекуперативна гальмівна система	Накопичення енергії отримуючи енергію при гальмуванні	До 78% відновлення енергії
	Електромагнітна гальмівна підвіска	Коливання автомобіля під час руху регульованих можна перетворити	Від 7% до 10%

Список літератури:

- [1] Z. Liu, X. Liu, and F. Zhao, "Research on NEV Platform Development Strategies for Automotive Companies," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 4, p. 201, Dec. 2021, [Online]: <https://doi.org/10.3390/wevj12040201>.
- [2] Rolando Campos Canales, and Gabriel Pérez. "Autonomous Vehicles and Alternative Energies for Logistics in the Wake of the Pandemic." *Facilitation of Transport and Trade in Latin America and the Caribbean*, vol. 4, no. 338, 8 Nov. 2021. ISSN: 1564-4243.
- [3] Yadlapalli, Ravindranath Tagore, et al. "A Review on Energy Efficient Technologies for Electric Vehicle Applications." *Journal of Energy Storage*, vol. 50, June 2022, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104212>
- [4] Shih-Chieh Lin at al. 2018. The Architectural Implications of Autonomous Driving: Constraints and Acceleration. *SIGPLAN Not.* 53, 2 (February 2018), 751–766. <https://doi.org/10.1145/3296957.3173191>
- [5] Sarnago, H.; Lucía, Ó. Popa, I.O.; Burdío, J.M. Constant-Current Gate Driver for GaN HEMTs Applied to Resonant Power Conversion. *Energies* 2021, 14, 2377. <https://doi.org/10.3390/>
- [6] VAN DER AALST, Wil. Six Levels of Autonomous Process Execution Management (APEM). arXiv preprint arXiv:2204.11328, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.11328>
- [7] D. Katare, D. Perino, J. Nurmi, M. Warnier, M. Janssen and A. Y. Ding, "A Survey on Approximate Edge AI for Energy Efficient Autonomous Driving Services," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 4, pp. 2714–2754, Fourthquarter 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3302474.
- [8] Hamed Faghihian, and Arman Sargolzaei. "Energy Efficiency of Connected Autonomous Vehicles: A Review." *Electronics*, vol. 12, no. 19, 29 Sept. 2023. [Online]: <https://doi.org/10.3390/electronics12194086>.
- [9] Jiang Y, Zhao B, Li M, Yao Z. A Two-Level Model for Traffic Signal Timing and Trajectories Planning of Multiple CAVs in a Random Environment. *Journal of Advanced Transportation*. 2021 Apr 26;2021:1–13. [Online]: <https://doi.org/10.1155/2021/9945398>
- [10] Gee, K. Faust, and M. Webber, "A framework for determining energy use in rural food delivery services: capturing system interdependencies through an agent-based discrete-event approach," *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac2b10>.
- [11] Á. Halldórsson and J. Wehner, "Last-mile logistics fulfilment: A framework for energy efficiency," *Research in Transportation Business & Management*, vol. 37, p. 100481, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100481>.
- [12] Ma, Hao, et al. "Battery Energy Consumption Analysis of Automated Vehicles Based on MPC Trajectory Tracking Control." *Electrochem*, vol. 3, no. 3, 1 Sept. 2022, pp. 337–346, www.mdpi.com/2673-3293/3/3/23, <https://doi.org/10.3390/electrochem3030023>. Accessed 3 Dec. 2023.
- [13] Dollar, R.A.; Vahidi, A. Quantifying the impact of limited information and control robustness on connected automated platoons. In *Proceedings of the 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Yokohama, Japan, 16–19 October 2017; pp. 1–7. doi: 10.1109/ITSC.2017.8317604.
- [14] Lee, Jooyong, and Kara Kockelman. *Energy Implications of Self-Driving Vehicles*. The University of Texas at Austin, Jan. 2019. [Online]: https://www.cae.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/TRB19EnergyAndEmissions.pdf
- [15] Song H, Zhao F, Zhu G, Liu Z. Impacts of Connected and Autonomous Vehicles with Level 2 Automation on Traffic Efficiency and Energy Consumption. *Journal of Advanced Transportation*. Apr. 2023;2023:e6348778. [Online]: <https://www.hindawi.com/journals/jat/2023/6348778/> <https://doi.org/10.1155/2023/6348778>

- [16] "SAE: Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems", SAE On-road Automated Vehicles Standards Committee and others, 2021. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/
- [17] Chen B, Chen Y, Wu Y, Xiu Y, Fu X, Zhang K. The Effects of Autonomous Vehicles on Traffic Efficiency and Energy Consumption. *Systems*. 2023 Jul 1;11(7):347. [Online]: <https://www.mdpi.com/2079-8954/11/7/347> doi.org/10.3390/systems11070347
- [18] Qu X, Yu Y, Zhou M, Lin CT, Wang X. Jointly dampening traffic oscillations and improving energy consumption with electric, connected and automated vehicles: A reinforcement learning based approach. *Applied Energy*. 2020 Jan;257:114030. [Online]: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114030>
- [19] S. A. Fayazi and A. Vahidi, "Mixed-Integer Linear Programming for Optimal Scheduling of Autonomous Vehicle Intersection Crossing," in *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 3, no. 3, pp. 287-299, Sept. 2018, doi: 10.1109/TIV.2018.2843163.
- [20] He, Xiaoyi, et al. "Energy Consumption Simulation for Connected and Automated Vehicles: Eco-Driving Benefits versus Automation Loads." *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles*, vol. 6, no. 1, 9 May 2022.[Online]: <https://doi.org/10.4271/12-06-01-0002>.
- [21] U.S. Environment Protection Agency (EPA), "Compliance and Fuel Economy Data for Vehicles and Engines," accessed November 12, 2019, [Online]: <https://www.epa.gov/compliance-and-fuel-economy-data/data-cars-used-testing-fuel-economy>.
- [22] R. Ma, X. He, Y.-L. Zheng, B. Zhou, S.-N. Lu, and Y. Wu, "Real-world driving cycles and energy consumption informed by large-sized vehicle trajectory data," *Journal of Cleaner Production*, vol. 223, pp. 564–574, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.002>.
- [23] Zhao, W.; Wu, G.; Wang, C.; Yu, L.; Li, Y. Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system. *J. Power Sources* 2019, 427, 174–183.
- [24] J. Valladolid, M. Calle, and A. Guiracocha, "Analysis of regenerative braking efficiency in an electric vehicle through experimental tests," *Ingenius*, no. 29, pp. 24–31, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.02>.
- [25] Kim, D.; Eo, J.S.; Kim, Y.; Guanetti, J.; Miller, R.; Borrelli, F. Energy-Optimal Deceleration Planning System for Regenerative Braking of Electrified Vehicles with Connectivity and Automation; Technical Report; SAE:Warrendale, PA, USA, 2020.
- [26] Abdelkareem, M., Lin, X., Ahmed, A., Ahmed, E., Jia, M. et al., "Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review," *Applied Energy*, vol. 229, pp. 672–699, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.030>.
- [27] R. Zhang, X. Wang, and S. John, "A Comprehensive Review of the Techniques on Regenerative Shock Absorber Systems," *Energies*, vol. 11, no. 5, p. 1167, May 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/en11051167>

Надійшла до редакції 10.04.2024