УДК 621.43.068:629.33:620.91

В.М. Корендій, О.Й. Коцюмбас, Р.Г. Літвін, Л.С. Угрин, Н.О. Гембара, А.М. Кучеренко
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В СУЧАСНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ТА ТРАНСПОРТНО-ДОРОЖНІХ СИСТЕМАХ: ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ

У роботі проведено всебічний аналіз сучасних технологій рекуперації енергії в автомобільному транспорті. Досліджено системи рекуперативного гальмування (RBS), рекуперативної підвіски (RSS), утилізації відпрацьованого тепла (WHR) за допомогою термоелектричних генераторів (TEG) та органічного циклу Ренкіна (ORC), а також механічні маховики (KERS). Встановлено, що RBS забезпечує до 30% повернення енергії в міському циклі, тоді як RSS здатна генерувати понад 300 Вт потужності на нерівних покриттях. Визначено потенціал гібридних систем рекуперації, що підвищують загальну енергоефективність на 8–12%. Дослідження підкреслює критичну роль рекуперації для досягнення цілей щодо скорочення викидів CO_2 на понад 30% до 2035 року.
***Ключові слова**: рекуперація енергії, енергоефективність, рекуперативне гальмування, рекуперативна підвіска, термоелектричні генератори, органічний цикл Ренкіна, гібридні автомобілі.*

The paper provides a comprehensive analysis of modern energy recovery technologies in road transport. Systems of regenerative braking (RBS), regenerative suspension (RSS), waste heat recovery (WHR) using thermoelectric generators (TEG) and the organic Rankine cycle (ORC), and mechanical flywheels (KERS) are investigated. It is established that RBS provides up to 30% energy recovery in the urban cycle, while RSS is capable of generating over 300 W of power on uneven surfaces. The potential of hybrid recovery systems, which increase overall energy efficiency by 8–12%, is determined. The study highlights the critical role of recovery in achieving CO_2 emission reduction targets of over 30% by 2035.
***Key words**: energy recovery, energy efficiency, regenerative braking, regenerative suspension, thermoelectric generators, organic Rankine cycle, hybrid electric vehicles.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасна парадигма розвитку автомобільної галузі визначається жорсткими вимогами до екологічної безпеки та енергетичної ефективності (рис. 1). Глобальні кліматичні зміни та вичерпність викопних енергоресурсів змушують світову спільноту переглядати підходи до проектування транспортних засобів. Згідно з актуальними регуляторними актами, викиди CO_2, що будуть зареєстровані до 2035 року, повинні бути скорочені на 37,5% для легкових авто та 31% для комерційного сегменту [1]. Така динаміка ставить перед інженерною думкою завдання не просто вдосконалення існуючих систем, а розробки принципово нових механізмів управління енергетичним балансом автомобіля.

Проблема енергоефективності в транспортному секторі є багатовекторною. Традиційний автомобіль з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ) є вкрай неефективною системою з погляду використання первинної енергії палива. Статистичні дані свідчать, що лише близько 20% хімічної енергії палива в кінцевому підсумку перетворюється на корисну механічну роботу, необхідну для руху транспортного засобу [2]. Решта енергії – понад дві третини – безповоротно втрачається у вигляді відпрацьованого тепла через вихлопну систему, радіатори охолодження, а також внаслідок механічного тертя та вібрацій [3]. Навіть у випадку з електромобілями (EV) та водневими транспортними засобами на паливних елементах (HPEV), де ККД перетворення енергії значно вищий, проблема обмеженого запасу ходу та деградації накопичувачів енергії залишається ключовим бар'єром для масового впровадження [4].

Рекуперація енергії, як процес повернення частини потужності, що традиційно розсіюється, назад у систему для повторного використання, є найбільш перспективним шляхом вирішення окреслених проблем. В автомобілі існують три основні домени, де енергія втрачається в значних обсягах: кінетична енергія під час гальмування, механічна енергія коливань підвіски при русі по нерівностях та теплова енергія відпрацьованих газів [5]. Кожен із цих доменів вимагає специфічних технологічних рішень для ефективного збору енергії.

Важливою частиною проблеми є також постійне зростання маси сучасних транспортних засобів. Прагнення виробників забезпечити високий рівень пасивної та активної безпеки (системи

ADAS), комфорту та інформаційної насиченості призводить до збільшення ваги шасі, кузовних елементів та електроніки. Наприклад, лише джгути електропроводки в сучасних автомобілях можуть важити близько 70 кг [6]. Збільшення маси, з одного боку, погіршує паливну економічність, але з іншого – створює більший потенціал для рекуперації кінетичної енергії гальмування, оскільки обсяг доступної для збору енергії прямо пропорційний масі автомобіля [7]. Це створює складну інженерну дилему, що вимагає багатокритеріальної оптимізації.

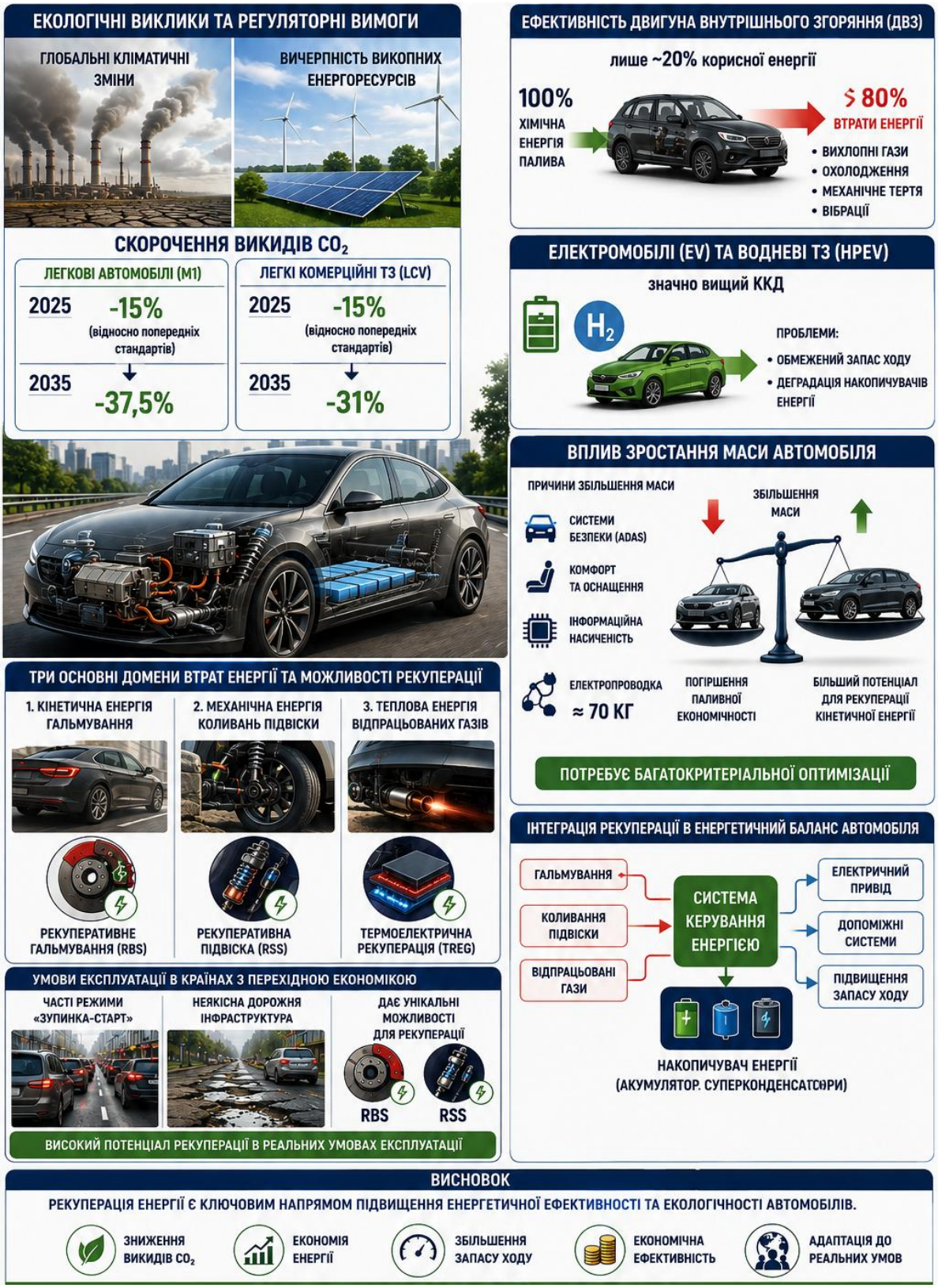

Рис. 1. Структура сучасної парадигми розвитку автомобільної галузі

Окремого розгляду потребує контекст країн з перехідною економікою та регіонів з недосконалою дорожньою інфраструктурою. В таких умовах автомобілі часто експлуатуються в режимах частих циклів «зупинка-старт» та зазнають значних вібраційних навантажень через нерівності покриття. Це створює унікальні можливості для використання систем рекуперативного гальмування (RBS) та рекуперативної підвіски (RSS), які зазвичай менш ефективні на ідеальних швидкісних магістралях розвинених країн [8]. Таким чином, дослідження можливостей рекуперації має не лише загальнотехнічне, а й глибоке прикладне значення для оптимізації транспорту в специфічних експлуатаційних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останнього десятиліття спостерігається інтенсифікація досліджень у сфері автомобільних енергозберігаючих технологій. Наукова література охоплює широкий спектр систем: від традиційних систем рекуперації кінетичної енергії (KERS) до складних термоелектричних перетворювачів на основі нанотехнологій [9].

Аналіз публікацій за період 2020–2025 років дозволяє виділити кілька ключових трендів. По-перше, значна частина робіт присвячена вдосконаленню систем рекуперативного гальмування (RBS) для електромобілів. Дослідники зосереджуються на розробці складних алгоритмів керування, таких як нечітка логіка (fuzzy control) та прогнозоване моделювання (MPC – model predictive control), з метою максимізації повернення енергії без шкоди для стабільності та безпеки руху [9]. Важливим аспектом останніх досліджень є вивчення впливу зовнішніх факторів на ефективність RBS. Зокрема, встановлено, що при низьких температурах навколишнього середовища ефективність рекуперації суттєво знижується через обмеження швидкості хімічних реакцій у літій-іонних батареях [9].

Другим важливим напрямком є дослідження рекуперативних систем підвіски (RSS). На відміну від RBS, які діють лише під час сповільнення, RSS здатні збирати енергію безперервно під час руху автомобіля [10]. Публікації останніх років класифікують такі системи за принципом дії на електромагнітні, гідравлічні та п’єзоелектричні [11]. Значний внесок у розуміння потенціалу RSS зробили праці, що пов’язують вихідну потужність системи з мікропрофілем дороги. Доведено, що потужність рекуперації зростає експоненціально залежно від класу нерівності покриття (від A до E за класифікацією ISO) [11].

Третій домен досліджень охоплює рекуперацію відпрацьованого тепла (WHR). Тут домінують дві технології: термоелектричні генератори (TEG) та органічний цикл Ренкіна (ORC). Дослідження в галузі матеріалознавства призвели до створення нових термоелектричних матеріалів, таких як скуттерудити та наноструктуровані сплави, які мають високий показник добротності (ZT) у діапазоні температур вихлопних газів [12]. Щодо ORC, останні роботи фокусуються на підборі оптимальних робочих тіл (фреонів та сумішей) та розробці малогабаритних розширювальних машин для інтеграції в легкові автомобілі [13].

Окрему увагу в сучасній літературі приділено гібридним системам рекуперації. Дослідники стверджують, що комбінування різних методів (наприклад, RBS та RSS) дозволяє досягти синергетичного ефекту, забезпечуючи як високу пікову потужність при гальмуванні, так і стабільне енергоживлення допоміжних систем під час рівномірного руху [10]. Це особливо актуально для водневих транспортних засобів (HPEV), де кожна одиниця збереженої енергії дозволяє суттєво розширити запас ходу та зменшити навантаження на дорогі паливні елементи [4].

Незважаючи на велику кількість робіт, залишаються дискусійними питання компромісу між масою системи рекуперації та її реальною енергетичною вигодою, а також проблеми надійності та довговічності складних електромеханічних вузлів у реальних умовах експлуатації. Саме на цих аспектах фокусується дане дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження можливостей рекуперації енергії в автомобілі вимагає детального аналізу кожної підсистеми окремо, а також їхньої взаємодії в межах єдиної енергетичної мережі транспортного засобу. Сучасний автомобіль слід розглядати як складну термодинамічну та механічну систему, в якій кожен вузол є потенційним джерелом енергії (рис. 2).

Система рекуперативного гальмування (RBS) на сьогодні є найбільш технологічно зрілою та широко впровадженою. Її робота базується на принципі оборотності електричних машин: тяговий електродвигун під час сповільнення переходить у режим генератора, перетворюючи кінетичну енергію руху в електричну. Отримана енергія через інвертор спрямовується до акумуляторної батареї або суперконденсаторів. Ефективність RBS у реальних умовах експлуатації залежить від циклу руху та стратегії керування. У міському циклі (наприклад, за методикою FTP75 або WLTC) спостерігається найбільша кількість циклів сповільнення, що робить RBS критично важливою для гібридів та

електромобілів. Для типового міського електромобіля рекуперація дозволяє повернути до 30% енергії, витраченої на розгін.

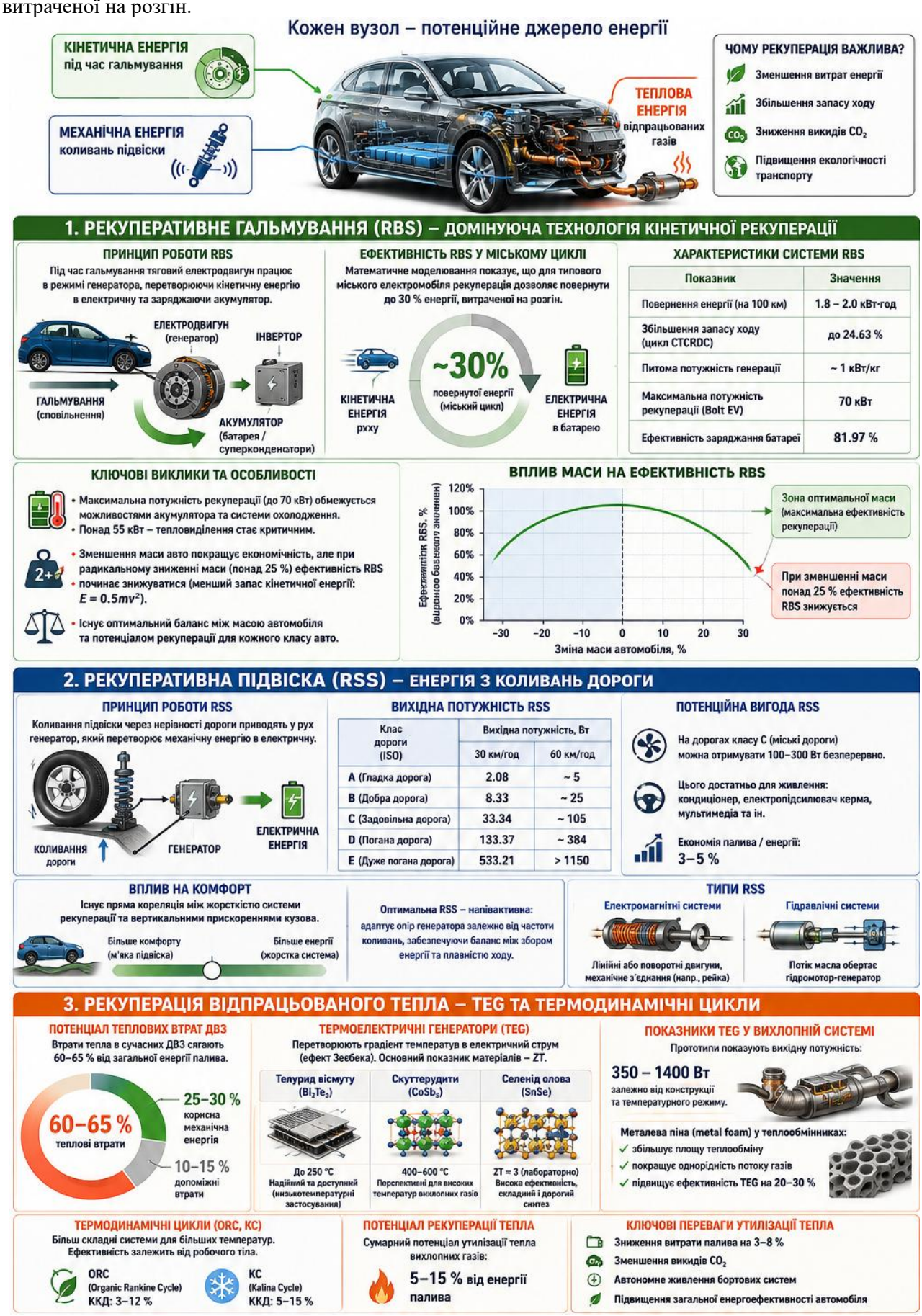

Рис. 2. Структура потенційних джерел енергії в автомобілі

Рекуперативна підвіска (RSS) є інноваційним рішенням, що дозволяє утилізувати механічну енергію, яка зазвичай витрачається на нагрівання робочої рідини в амортизаторах. У процесі руху колеса постійно здійснюють вертикальні коливання через мікронерівності дороги. Традиційна підвіска гасить ці коливання для забезпечення комфорту, тоді як RSS використовує цей рух для вироблення електроенергії [14]. Потужність генерації зростає експоненціально зі збільшенням шорсткості покриття та швидкості руху. Наприклад, на дорогах класу C (типові міські дороги) пасажирський автомобіль може генерувати близько 100-300 Вт енергії безперервно. Хоча це не порівнянно з потужністю двигуна, такої кількості енергії достатньо для живлення систем кондиціонування, електропідсилювача керма або мультимедійного комплексу, що в сукупності дає економію палива на рівні 3–5%.

Втрати тепла в сучасних ДВЗ досягають 60–65% від загальної енергії палива [15]. Утилізація цього тепла є одним із найскладніших інженерних завдань через низьку щільність теплової енергії та складність інтеграції теплообмінників у обмежений простір підкапотного відділення. Прототипи термоелектричних генераторів (TEG), інтегровані у вихлопну систему, показують вихідну потужність від 350 Вт до 1400 Вт залежно від конструкції та температурного режиму. Використання металевої піни (metal foam) у теплообмінниках дозволяє підвищити ефективність збору тепла на 283% порівняно з традиційними трубчастими конструкціями.

Для великих транспортних засобів, таких як магістральні вантажівки та автобуси, більш ефективною є технологія ORC (органічного циклу Ренкіна). Вона передбачає нагрівання робочої рідини теплом вихлопних газів до стану пари, яка потім обертає турбіну або поршневий розширювач. Незважаючи на високу теоретичну ефективність (піковий ККД циклу до 23,7%), системи ORC залишаються дорогими та масивними. Основним драйвером ринку ORC (обсяг якого у 2024 році оцінюється в 18,8 млрд доларів) є промисловий сектор, тоді як в автомобілебудуванні спостерігається стійкий інтерес з боку виробників важкої комерційної техніки, таких як Mitsubishi Heavy Industries.

Механічні системи рекуперації (KERS) використовують масивний маховик, що обертається з високою швидкістю (до 60000 об/хв) у вакуумному корпусі. Енергія під час гальмування передається на маховик через безступінчату трансмісію (CVT). Основною перевагою маховиків є їхня здатність приймати та віддавати велику потужність за дуже короткий час без деградації, властивої хімічним акумуляторам. Це робить їх ідеальними для спортивних автомобілів та міських автобусів. Дослідження показують, що механічний KERS може забезпечити до 39% економії палива в інтенсивних перехідних режимах руху. Маховик дозволяє скоротити час розгону 0–100 км/год на 18,25% та суттєво зменшує навантаження на основну батарею гібрида, подовжуючи її термін служби.

Найбільш перспективним напрямком є створення гібридних систем рекуперації, які об'єднують кілька джерел. Наприклад, комбінація RBS та RSS дозволяє компенсувати недоліки кожної системи. RBS забезпечує високі імпульси енергії при гальмуванні (до 2 кВт на піку в симуляторах), тоді як RSS дає безперервний потік (0,3 кВт·год/100 км), що в сумі покращує енергоефективність на 8–12%.

Висновки. За результатами проведеного дослідження можливостей рекуперації енергії в автомобілі можна зробити такі узагальнюючі висновки:

1. Рекуперативне гальмування (RBS) залишається найефективнішим методом збереження енергії, забезпечуючи до 25-30% економії палива в умовах міського циклу. Основним обмеженням для подальшого зростання ефективності RBS є термічна стабільність акумуляторних батарей при високих струмах заряду та зниження ефективності при від’ємних температурах.

2. Рекуперативна підвіска (RSS) має значний невикористаний потенціал, особливо для транспортних засобів, що експлуатуються на дорогах низької якості. Здатність генерувати до 300 Вт і більше на нерівному покритті дозволяє RSS стати автономним джерелом живлення для допоміжної електроніки, знімаючи це навантаження з тягової батареї.

3. Технології рекуперації відпрацьованого тепла (TEG та ORC) є критично важливими для підвищення ККД автомобілів з ДВЗ та гібридів. Впровадження нових напівпровідникових матеріалів, таких як скуттерудити, та оптимізація теплообмінників дозволяють отримувати понад 1 кВт корисної електричної потужності з тепла вихлопу.

4. Механічні маховики (KERS) демонструють найкращу ефективність у перехідних режимах (до 39% економії палива) і є оптимальним рішенням для інтенсивної експлуатації, оскільки вони не мають обмежень щодо циклів заряду-розряду, характерних для хімічних батарей.

5. Синергія різних методів рекуперації в межах одного транспортного засобу дозволяє досягти комплексного покращення енергоефективності на рівні 15-20 %. Майбутнє галузі належить інтелектуальним системам управління енергією, які використовують дані про дорожній профіль та стан трафіку для динамічної оптимізації процесів збору енергії.

Таким чином, детальний аналіз та впровадження розглянутих можливостей рекуперації є необхідною умовою для створення конкурентоспроможного, екологічного та енергоефективного транспорту наступного покоління, здатного відповідати викликам 2030-х років.

Бібліографія

[1] Candela A., Sandrini G., Gadola M., Chindamo D., Magri P. Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: Review of the main materials and methods // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, No. 8. – Article e29728.

[2] Regenerative braking and suspension system [Електронний ресурс]. – Режим доступу: Scribd document (дата звернення: 15.05.2026).

[3] Achiței L., Achiței G., Sachelarie D., Popescu A. Thermoelectric generators in automotive applications: a comprehensive review of concepts, materials, and integration strategies // Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine Constructions Section. – 2025. – Vol. 71(75), No. 4. – P. 103–114.

[4] Abe B. T., Fajuke I. D. A systematic review of energy recovery and regeneration systems in hydrogen-powered vehicles for deployment in developing nations // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 16. – Article 4412.

[5] Pan J., Song C., Zhang Y., Zhu Z., Dang T. A review of the overall efficiency of automotive energy recovery systems in extending travel range // Proceedings of the CONF-MCEE 2026 Symposium: Advances in Sustainable Aviation and Aerospace Vehicle Automation. – 2025. – URL: https://doi.org/10.54254/2755-2721/2026.KA27418 (дата звернення: 15.05.2026).

[6] Candela A., Sandrini G., Gadola M., Chindamo D., Magri P. Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: review of the main materials and methods // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, No. 8. – Article e29728.

[7] Liu J., Hu C., Qiu Q., Kang J., Peng X. Comparative evaluation of energy recovery systems for enhanced automotive overall efficiency // Proceedings of the CONF-MCEE 2026 Symposium: Advances in Sustainable Aviation and Aerospace Vehicle Automation. – 2025. – P. 83–96.

[8] Zu E.-H., Shu M.-H., Huang J.-C., Lin H.-T. Energy recovery decision of electric vehicles based on improved fuzzy control // Processes. – 2024. – Vol. 12, No. 12. – Article 2919.

[9] Szumska E. M. Regenerative braking systems in electric vehicles // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 10. – Article 2422.

[10] Rao S., Kumar P., Sharma R., Singh A. Comparative analysis of regenerative braking and suspension energy harvesting systems in electric vehicles // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2025. – Vol. 12, No. 11. – P. 1183–1188.

[11] Lv X., Ji Y., Zhao H., Zhang J., Zhang G., Zhang L. Research review of a vehicle energy-regenerative suspension system // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 2. – Article 441.

[12] Achiței L., Achiței G., Sachelarie D., Popescu A. Thermoelectric generators in automotive applications: a comprehensive review of concepts, materials, and integration strategies // Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine Constructions Section. – 2025. – Vol. 71(75), No. 4. – P. 103–114.

[13] Alharbi S. Balancing efficiency and economics in organic Rankine cycle waste heat recovery systems for marine applications // JMSE (Journal of Marine Science and Engineering). – 2026. – Vol. 14, No. 3. – Article 264.

[14] Demir V. G., Savran E. The role of regenerative suspension in energy-efficient and comfortable electric vehicle driving // Engineering Perspective. – 2026. – Vol. 6, No. 3. – P. 344–353.

[15] Khan M. A., Sharma R., Patel S. A review of thermoelectric generators for automotive waste heat recovery systems // TechRxiv. – 2025. – URL: https://doi.org/10.36227/techrxiv.173921139.97677264 (дата звернення: 15.05.2026).

КОРЕНДІЙ Віталій Михайлович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: vitalii.m.korendii@lpnu.ua

КОЦЮМБАС Олег Йосифович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, НУ «Львівська політехніка», e-mail: oleh.y.kotsiumbas@lpnu.ua

ЛІТВІН Роман Григорович – д-р філософії, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, НУ «Львівська політехніка», e-mail: roman.h.litvin@lpnu.ua

УГРИН Любомир Степанович – к.т.н., доцент, доцент кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: liubomyr.s.uhryn@lpnu.ua

ГЕМБАРА Наталія Олександрівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв, НУ «Львівська політехніка», e-mail: nataliia.o.hembara@lpnu.ua

КУЧЕРЕНКО Анастасія Миколаївна – асистент кафедри технічної механіки та інженерної графіки, НУ «Львівська політехніка», e-mail: anastasiia.m.kucherenko@lpnu.ua