

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.03.048>

УДК 656.027:621.644

В.Ю. Скосар, <https://orcid.org/0000-0002-2151-3417>

С.В. Бурилов, <https://orcid.org/0000-0001-8070-6764>

В.О. Дзензерський, <https://orcid.org/0000-0002-5504-4524>

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

E-mail: skosarslava@gmail.com

Перспективи застосування електромагнітного транспорту

Представлена академіком НАН України А.Ф. Булатом

Розглянуто технічні характеристики електромагнітного транспорту, зокрема, електромобілів, високошвидкісних магнітолевітаційних потягів, надвисокошвидкісних магнітолевітаційних потягів у вакуумованому трубопроводі, рейкотронів. Наведено технічні характеристики акумуляторних батарей, які використовуються як джерела живлення для електромобілів. Проаналізовано перспективи розвитку електромагнітного транспорту.

Ключові слова: електромобіль, акумуляторна батарея, паливний елемент, магнітна левітація, вакуумований трубопровід.

Вступ. Електромагнітні транспортні системи — електромобілі, Maglev-потяги, вакуумований надшвидкісний транспорт — є найбільш енергоефективними та екологічними. Вони практично позбавлені таких недоліків, як шкідливі викиди в атмосферу і сильний шум, що характерно для транспорту з двигунами внутрішнього згоряння. Що стосується електромагнітних прискорювачів макротіл (рейкотронів), то вони мають інші цінні характеристики, які дають можливість застосовувати їх у наукових дослідженнях, у космічній сфері, а також, можливо, у військовій справі.

Перспективи електромобілів, з одного боку, та рейкотронів, з іншого боку, сильно залежать від успіхів у розвитку джерел живлення, що використовуються в них. У першому випадку це літій-іонні, літій-твердотільні, або акумуляторні батареї іншого типу, а також паливні елементи. У другому випадку — батареї суперконденсаторів, або інші імпульсні джерела електричної енергії.

Проведене дослідження стосується механіки і машинознавства та розвитку електромагнітних транспортних систем і технологій.

Цитування: Скосар В.Ю., Бурилов С.В., Дзензерський В.О. Перспективи застосування електромагнітного транспорту. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2025. № 3. С. 48—60. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.03.003>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Мета дослідження — виявлення перспектив електромагнітного транспорту, зокрема, електромобілів, магнітолевітаційних потягів, вакуумованого надшвидкісного транспорту, рейкотронів. Робота продовжує дослідження, проведені за участю авторів раніше [1, 2].

1. Електромобілі. В електромобілях електрична енергія джерела живлення перетворюється на механічну енергію обертання коліс за рахунок роботи електродвигуна, де використовуються силові електромагнітні поля. Перспективи електромобілів істотно залежать від успіхів у розвитку джерел живлення. Можна говорити, що електродвигун і джерело живлення є серцем електромобіля.

Сьогодні як джерело живлення широко використовують літій-іонні акумуляторні батареї. В них відбувається процес інтеркаляції та деінтеркаляції іонів літію в активних матеріалах електродів, що забезпечує високу питому енергію акумуляторів — до 250 Вт·год/кг (таблиця), тому літій-іонні акумулятори найбільш ефективні як в електромобілях, так і в багатьох інших електротехнічних пристроях і системах [3]. У найпоширеніших типах літій-іонних акумуляторів застосовуються катоди LiCoO_2 і вуглецеві аноди, або (замість кобальту) катоди LiNiO_2 , LiMn_2O_4 , $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_w$, LiFePO_4 і вуглецеві аноди [4]. Системи керування акумуляторними батареями зі штучним інтелектом покращують оцінку стану заряду, баланс напруги, керування температурою. Це підвищує безпеку і надійність їх використання [5].

Вартість електромобіля істотно залежить від вартості акумуляторної батареї, однак сьогодні літєві батареї ще досить дорогі.

У 2024 р. створено літій-твердотільні акумулятори, в яких рідкі електроліти замінено на твердотільні електроліти. Це дало змогу ущільнити конструкцію, збільшити питому енергію, підвищити безпеку [5]. Максимум питомої енергії досягається у літій-металевих акумуляторів з твердотільним електролітом (літій-твердотільних з металевим літєвим анодом). Японська корпорація Honda Motor заявила, що має намір до кінця 2020-х рр. подвоїти запас ходу своїх електромобілів, коли вони почнуть використовувати літій-твердотільні батареї, а також збільшити річне виробництво електромобілів до понад 2 млн одиниць [6, 7]. Один з найбільших китайських автовиробників SAIC оголосив про початок масового виробництва літій-твердотільного акумулятора другого покоління (SSB) з питомою енергією 400 Вт·год/кг у 2026 р. (див. таблицю). SAIC конкурує з Chery, GAC, CATL, BYD, GWM та іншими компаніями [8].

Дефіцитність кобальту і відносна дефіцитність літію створюють їх стратегічно важливими і обмеженими ресурсами (див. таблицю). Тому в останні роки значні зусилля спрямовано

Характеристики джерел живлення електромобілів [3, 4, 8, 12]

Характеристика	Тип батарей		
	Сучасні літій-іонні	Літій-твердотільні	Натрій-іонні
Питома енергія, Вт·год/кг	250	400	до 200
Наявність ресурсів металів для виробництва	Обмежені ресурси літію. Дуже обмежені ресурси кобальту	Обмежені ресурси літію	Багаті ресурси. Гарні перспективи
Екологічність виробництва та утилізації	Проблеми з добуванням кобальту та інших металів, з утилізацією відпрацьованих батарей	Зменшено екологічні проблеми з добуванням металів	Відсутність екологічних проблем. Гарні перспективи

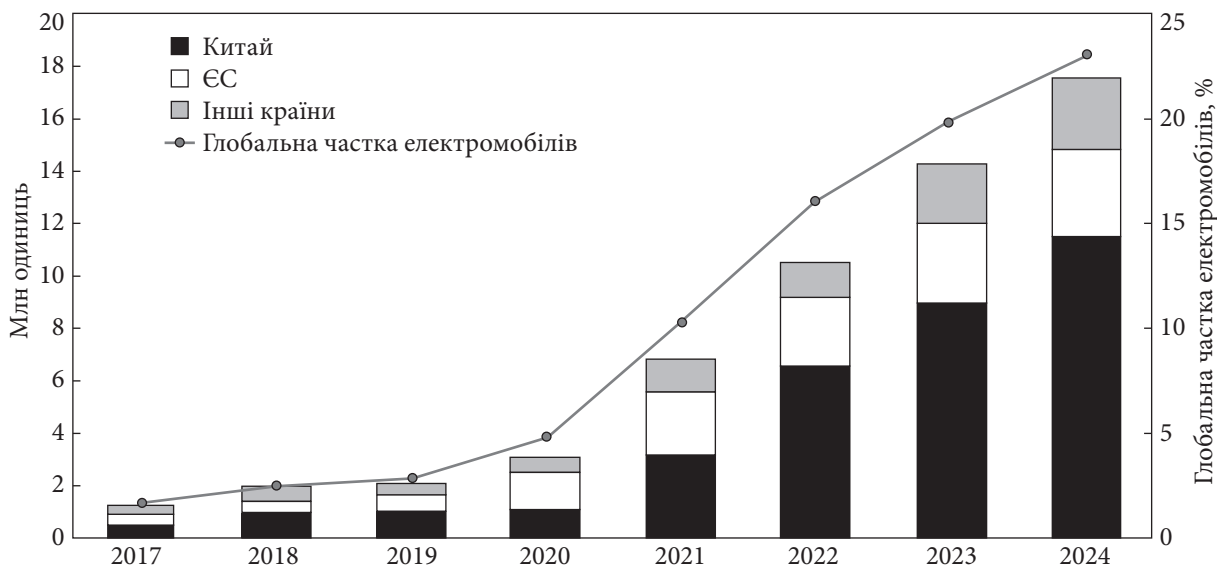


Рис. 1. Продажі електромобілів за країнами та частка електромобілів від усього продажу автомобілів [14]

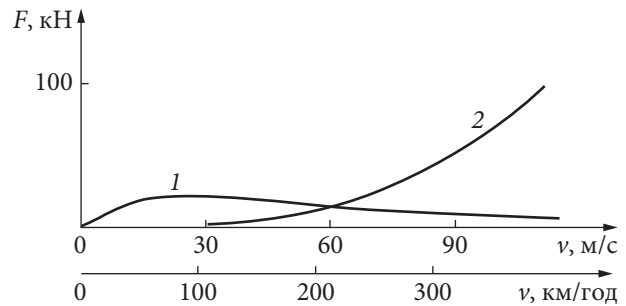
на розробку новітніх натрій-іонних акумуляторів [9, 10]. Перші натрій-іонні акумулятори, які характеризувалися задовільно стабільними характеристиками, було розроблено у 2017 р. [11]. Натрій є достатньо розповсюдженим металом і приблизно в 50 разів він дешевший за літій. Принцип роботи натрій-іонного акумулятора аналогічний до принципу роботи літій-іонного акумулятора, а його питома енергія досягає 150—200 Вт·год/кг (див. таблицю). Натрій-іонні акумуляторні батареї не страждають від повного розряду до нуля, а також безпечні при зберіганні. Крім того, натрій-іонні акумулятори не повинні створювати таких екологічних ризиків, як літєві акумулятори [12]. У січні 2024 р. китайська фірма JAC розпочала продавати невеликий електромобіль Yiwei із натрій-іонною батареєю фірми Hina Battery. Китайська фірма JMEV почала випуск нового мініатюрного електромобіля JMEV EV3 із запасом ходу 250 км із натрій-іонною батареєю. Розробкою натрій-іонних акумуляторних батарей займаються шведська компанія Northvolt, британська Faradio, а також китайська CALT [10].

Окрім акумуляторних батарей в електромобілях можуть застосовуватися киснево-водневі паливні елементи з твердополімерним електролітом і платиновими каталізаторами. Але інфраструктура водневої енергетики поки що недостатньо розвинена [13]. Крім того, такі метали, як літій, кобальт, платина (використовується як каталізатор) достатньо дорогі. Отже, покращення технічних і екологічних характеристик акумуляторних батарей і паливних елементів, а також їх здешевлення значно покращать перспективи використання електромобілів.

Наведемо діаграми продажу електромобілів в основних країнах, які їх виробляють (рис. 1).

Таким чином, глобальний тренд продажу електромобілів демонструє швидке зростання, що засвідчує перспективи розвитку цього виду транспорту. Важливою є екологічна проблема, що пов'язана зі створенням рентабельної і ефективної технології утилізації відпрацьованих літєвих акумуляторів і отриманням вторинного літію та інших цінних металів; крім того, ринок електромобілів може швидко досягти насичення, тому що цей транспорт залишається ще відносно дорогим (дорогі джерела живлення).

Рис. 2. Магнітний опір (1) і аеродинамічний опір (2) для моделі Maglev-потягу в реальному масштабі [1]



2. Maglev-потяги. Магнітолевітаційні потяги, нажаль, поки що не стали розповсюдженими у світі. Цьому є декілька причин. Основні причини — необхідність великих капіталовкладень у шляхову структуру й високі технічні вимоги до неї. Крім того, високошвидкісний колісний залізничний транспорт поки ще економічно більш вигідний, ніж високошвидкісні Maglev системи. Водночас високошвидкісні Maglev-потяги вже транспортують пасажирів в Японії та Китаї. Але технології магнітної левітації там відрізняються: в Китаї використовують електромагнітний підвіс, а в Японії — електродинамічний підвіс. Існують також не високошвидкісні комерційні Maglev-потяги, які працюють в трьох країнах: Китаї, Японії та Південній Кореї.

На сьогодні рекорд швидкості Maglev-потягів досягає порядку 600 км/год [1, 2]. Але з пасажирями на існуючих відносно коротких трасах працює тільки китайський Maglev-потяг Transrapid (траса Шанхай-Пудун, довжина 30,5 км), його експлуатаційна швидкість 431 км/год [1]. На таких швидкостях аеродинамічний опір повітря вже створює проблему. З рис. 2 видно, що при швидкості понад 220 км/год аеродинамічний опір для реальних Maglev-потягів вже перевищує опір магнітний і різко зростає з подальшим підвищенням швидкості. При швидкості, близької до швидкості звуку у повітрі (1225 км/год), аеродинамічний опір стане неприпустимо великим [1, 2]. Тому, задля досягнення максимальних швидкостей та зменшення аеродинамічного опору потрібна розробка вакуумованого надшвидкісного транспорту (див. нижче), щоб істотно зменшити вплив повітря [15]. Що стосується Maglev систем, то, можливо, швидкості 600—700 км/год є максимально припустимими для Maglev-потягів, тому що при більших швидкостях різко зростатимуть також й енерговитрати на рух.

Сьогодні у світі планується будівництво нових трас для Maglev-потягів, наприклад, в Японії вже розпочато роботи зі створення траси Токіо—Нагоя—Осака довжиною 286 км, яку планують ввести в експлуатацію у 2027 р. [1]. Дослідники з різних країн вдосконалюють системи керування рухом або підвісом Maglev, системи тягового двигуна, системи екстреного гальмування, окремі елементи Maglev [16—19]. Також актуальним є питання вдосконалення джерел бортового живлення для Maglev-потягів. Тому фахівці Інституту транспортних систем і технологій НАН України працюють над розробкою і вдосконаленням літєвих акумуляторів і киснево-водневих паливних елементів для електромагнітного транспорту, включаючи Maglev-потяги й електромобілі [3, 20, 21].

Maglev-потяги з електродинамічним підвісом використовують потужні надпровідні електромагніти, що істотно впливає на технічні характеристики транспорту. Тому перспективи систем Maglev можуть значно покращитися, якщо у галузі високотемпературної над-

провідності відбудуться науково-технічні прориви, що дасть нові технічні рішення і здешевлення цього електромагнітного транспорту. Поки що прихильники Maglev-транспорту підвищують зацікавленість до своєї технології за рахунок будівництва міських не високошвидкісних трас, а також (у перспективі) в якості заміни трамваїв і метро.

3. Вакуумований надшвидкісний транспорт. Вакуумований надшвидкісний транспорт сьогодні розвивається за конструктивною схемою «Maglev у вакуумованому трубопроводі». Проект Ілона Маска «Hyperloop» фактично закритися, оскільки спочатку планувалося розробити поїзд на повітряній подушці в умовах розрідженого повітря у трубопроводі. Але це було невдалою ідеєю через нестійкість руху вагонів у таких умовах. Водночас Maglev-потяг на магнітній подушці у вакуумованому трубопроводі може прискорюватися практично до швидкості звуку у повітрі — до 1200 км/год. При цьому у трубопроводі повинен бути форвакуум 100 Па (0,001 атм.) для запобігання впливу аеродинамічного опору [1, 2]. Але питання економічної доцільності тиску повітря в трубопроводі (0,001, або 0,01, або 0,1 атм) ще не вирішене. Також не вирішена проблема безпеки пасажирів у разі раптової розгерметизації вакуумованого трубопроводу [1, 2].

На рис. 3 схематично зображені витрати на підтримку часткового вакууму у трубопроводі і на подолання аеродинамічного опору при русі потяга на середній (1) і максимальній (2) швидкостях, а також відповідні сумарні витрати (4 і 5). Для нас важлива частка площини, яка обмежена між кривими сумарних витрат (4 і 5). Реальні витрати укладені у цій частині площини.

З рис. 3 видно, що мінімальні витрати відповідають тиску 0,1 атм, але за таких умов навряд чи транспорт зможе досягти швидкості 1200 км/год, оскільки виникнуть ефекти генерації ударних хвиль поблизу швидкості звуку і різке зростання аеродинамічного опору (на графіках не вказано) [15]. Водночас забезпечення тиску 0,001 атм потребує дуже великих витрат. Вірогідно, раціональний тиск дорівнює приблизно 0,01 атм [1]. Але це потребує експериментальної перевірки на макетах.

Сьогодні лідером в галузі розробки вакуумованого надшвидкісного транспорту є Китай. Дослідники з Китаю провели випробування магнітолевітаційного транспорту у вакуумованому трубопроводі у лютому 2024 р. Прототип транспорту розігнався до 623 км/год у трубопроводі довжиною 2 км. Але дослідники мають мету досягти 1000 км/год [22]. Також стверджується, що в ході тестів надшвидкісний надпровідний Maglev-транспорт досяг контрольованої навігації, стабільної підвіски та безпечної зупинки. Випробування показали, що максимальна швидкість та висота підвіски магнітолевітаційного транспорту відповідали заданим параметрам. Були перевірені ключові технології, такі як створення та підтримка великомасштабного вакуумного середовища, надпровідне керування навігацією, а також координація між різними системами в умовах низького вакууму. Також повідомляється, що будівництво транспортної системи UHS Maglev розпочалося у квітні 2022 р. Система поєднує у собі аерокосмічні технології з технологіями наземного залізничного транспорту, що дозволяє досягати швидкості до 1000 км/год. У перспективі ця система може використовуватися для перевезень між мегаполісами Китаю: Пекіном та Шанхаєм [22].

Фахівці Інституту транспортних систем і технологій НАН України продовжують роботи щодо розробки і вдосконалення вакуумованого надшвидкісного транспорту. Запропоновано технічне рішення (рис. 4) щодо енергопостачання всієї транспортної системи від відновлюваних джерел енергії [1, 23].

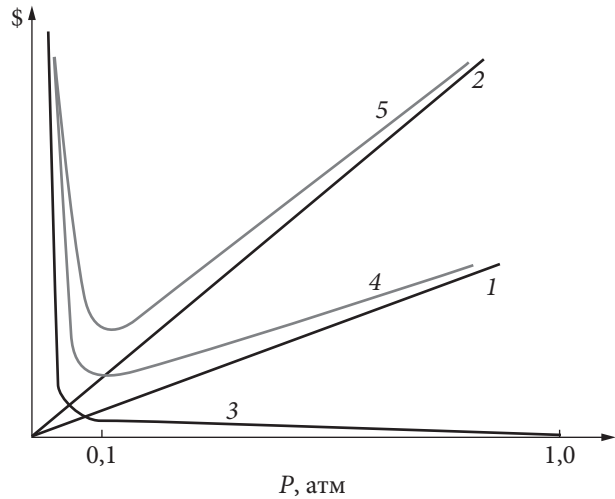


Рис. 3. Графіки витрат на подолання аеродинамічного опору (1 і 2) [1], на підтримку часткового вакууму у трубопроводі (3) [1], а також сумарні витрати (4 і 5)

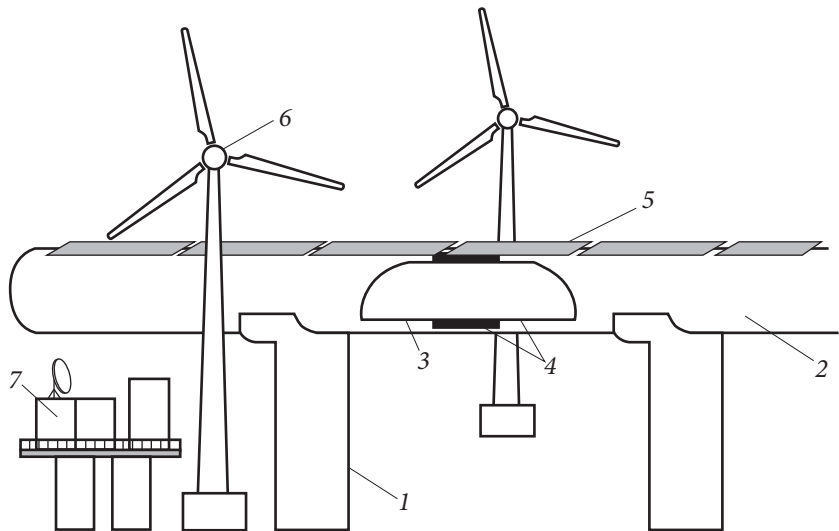


Рис. 4. Загальний вигляд вакуумованого надшвидкісного Maglev-транспорту, розробленого в Інституті транспортних систем і технологій НАН України [1, 23]

Пропонується на опорах 1 зафіксувати вакуумований трубопровід 2, де буде рухатися транспорт 3. Транспорт буде використовувати магнітну подушку 4. Енергоживлення буде забезпечено за рахунок сонячних панелей 5, вітроенергетичних установок 6, і акумуляторних батарей 7.

На нашу думку, з огляду на технічні складності та невирішені питання безпеки перші транспортні лінії надшвидкісного вакуумованого транспорту будуть виключно вантажні. Швидкості потягів можуть досягти 1200 км/год. Але сьогодні неможливо прогнозувати коли це відбудеться. Можливо, тільки через 20 років. Пасажирські лінії можуть з'явитися пізніше. Для таких високих швидкостей необхідно будувати високоякісні вакуумовані шляхопроводи, які ще потрібно регулярно контролювати задля запобігання малих деформацій, пов'язаних з механічними, температурними, сейсмічними та іншими факторами, і регулярно відновлювати.

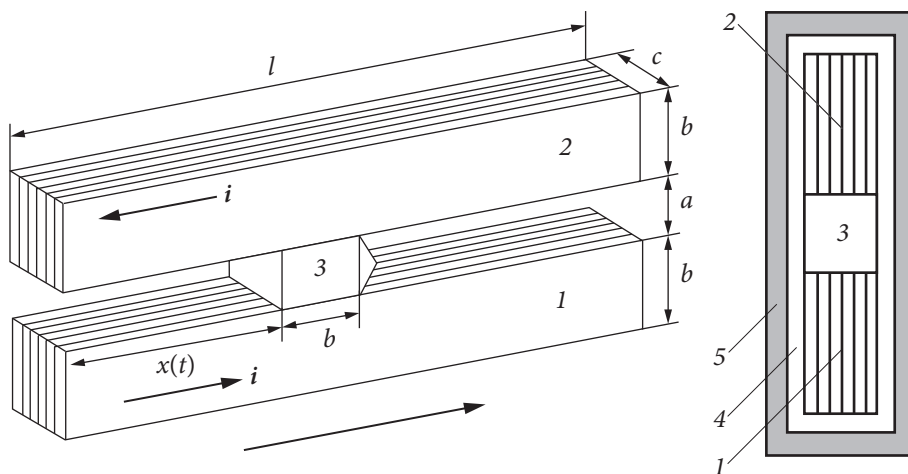


Рис. 5. Найпростіша конструктивна схема рейкотрона, згідно з [2]

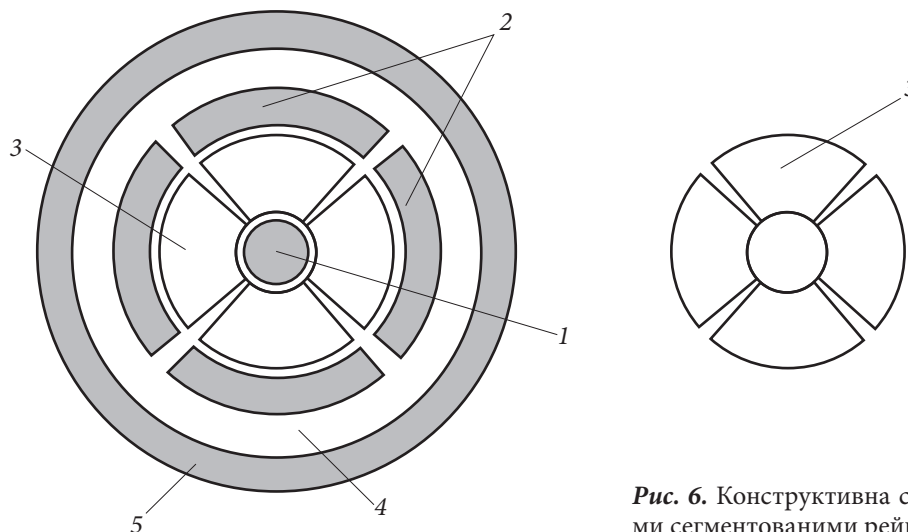


Рис. 6. Конструктивна схема рейкотрона з круглими сегментованими рейками, згідно з [24]

4. Рейкотрони (Railguns). Сьогодні Китай є також лідером в галузі розробки рейкотронів. Рейкотрони є ефективними електромагнітними прискорювачами макротіл (від декількох грам до декількох кілограмів) до швидкостей 2—10 км/с [2]. Принцип дії рейкотрону заснований на розгоні струмопровідного макротіла вздовж двох металевих напрямних за допомогою сили Ампера. Найпростіша його конструкція наведена на рис. 5.

Між струмопровідними рейками (з декілька металевих пластин і діелектричних зазорів кожна) 1 і 2 рухається макротіло 3 в умовах протікання потужного електричного струму i . Напрямок руху макротіла 3 вказано стрілкою (під рейкою 1), координату макротіла позначено $x(t)$. Параметри: l, b, c — довжина, товщина й ширина рейок відповідно; a — відстань між рейками; b, c — довжина й ширина макротіла відповідно. Рейки з макротілом оточені діелектриком 4, а вся конструкція зафіксована міцним кріпленням 5.

Але розробляються більш перспективні конструкції рейкотронів, які дозволяють підвищити ефективність розгону макротіл і знизити витрати енергії. Наприклад, конструкція з круглими і сегментованими рейками (рис. 6).

Між струмопровідними рейками — круглої 1 і сегментованої 2 рухається макротіло 3. Рейки з макротілом оточені діелектриком 4, а вся конструкція зафіксована міцним кріпленням 5. Згідно з розрахунками, така конструкція більш ефективна за рахунок більш рівномірного протікання імпульсного струму крізь рейки та макротіло [24].

Сьогодні Китай в рамках свого проекту Tenguun, розпочатого в 2016 р., працює над використанням електромагнітного прискорювача макротіл для запуску на орбіту пілотованого космічного корабля розміром з Boeing 737 вагою 50 т. Якщо Китай отримає позитивний результат, це стане одним із головних інженерних досягнень 21 ст. Згідно з офіційними ЗМІ Китаю, планується побудувати електромагнітну стартову трасу, яка зможе розганяти космічний літак до швидкості 1,6 Маха або навіть до 5 Махів. Піднявшись у повітря, апарат запускати свої бортові ракетні двигуни. і продовжувати прискорюватися до орбітальної швидкості. Це означає не лише створення космічного корабля, сумісного з такою рейковою гарматою, але й ракети-носія, здатної підтримувати перевантаження, вібрації та інші параметри в межах безпечних допусків для пасажирів. Нова система розробляється Науково-дослідним інститутом технологій літальних апаратів Китайської аерокосмічної науково-промислової корпорації (CASIC). Вже побудовано двокілометровий тестовий трек у Датуні, провінція Шаньсі. Наразі траса може розвивати швидкість 1000 км/год, у найближчі роки довжина випробувального треку буде збільшена, що дозволить досягти максимальної робочої швидкості 5 000 км/год [25].

Однак такий рейкотрон має низку технічних проблем. Одна з проблем полягає в тому, що рейкотрон, який може розвивати швидкість 1,6 Маха з пасажирями на борту, повинен мати довжину щонайменше 8 км. І якщо він хоче досягти 5 Махів, довжина буде набагато більшою. Це не лише велика кількість електромагнітів, які, можливо, потребуватимуть криогенного охолодження, а їх також потрібно буде герметизувати в найбільшій вакуумній камері, яка коли-небудь створювалася, і для підтримки цього вакууму знадобляться величезні насоси. Для цієї камери також знадобиться дуже спеціальний шлюз, щоб транспортний засіб міг вийти на надзвукову швидкість. Якщо це не спрацює ідеально, може статися будь-яка з низки дуже неприємних аварій, пов'язаних із енергією близько 50000 МДж! Також є питання до джерел енергії великої потужності. Рейкотрони, які застосовуються для запуску винищувачів з авіаносця USS Gerald R. Ford, використовують 121 МДж, щоб розігнати літак до 241 км/год. Для прискорення такої ж маси, як 5 Махів, китайському рейкотрону знадобилося б 50000 МДж. А запропонований космоплан має важити як мінімум у 10 разів більше. Це означає, що для роботи космічного рейкотрону потрібна буде атомна електростанція, яка генеруватиме гігаджоулі енергії за секунду, а для накопичення енергії знадобиться абсолютно нова батарея суперконденсаторів. В цій галузі світовим рекордом є досягнення Дрезденської лабораторії високого магнітного поля Hochfeld-Magnetlabor Dresden, яка має найсучаснішу конденсаторну батарею, що витримує 50 МДж. Китайський рейкотрон мав би покращити це у 1000 разів. Це вимагатиме не лише чудових базових інженерних досягнень, а й побудови нової промислової інфраструктури, здатної створювати такі машини. І це навіть не стосується датчиків і комп'ютерних систем, необхідних для моніторингу та керування всіма підсистемами рейкотрону в реальному часі. Китайці стверджують, що якщо рейкотрон буде успішним, це знизить витрати на запуск на орбіту до 60\$ США/кг. Це революційне зниження навіть порівняно з \$3000/кг від SpaceX [25]. Але, наскільки це реально розробити?

На нашу думку, з огляду на технічні складності рейкотрони поки що будуть використовувати в науково-технічній сфері і в космічній техніці для випробувань космічних матеріалів на міцність у разі зіткнення із мікрометеоритами (як це робиться сьогодні). Для значного підвищення ефективності рейкотронів необхідні прориви в галузі нових матеріалів для рейок і макротіл, які б дозволили зменшити видалення речовини з поверхні в екстремальних умовах експлуатації.

Нами проведено розрахунки ефективності перетворення енергії рейкотроном для конструкції, згідно з рис. 5, в умовах імпульсу струму прямокутної форми. Ефективність η перетворення енергії рейкотроном дорівнює:

$$\eta = \frac{W_m}{W_L + W_T + W_d + W_m + W_{op}}.$$

де W_m — кінетична енергія макротіла; W_L — залишки енергії магнітного поля в рейкотроні; W_T — омичні втрати; W_d — втрати енергії в електричній дузі; W_{op} — втрати енергії на тертя макротіла об рейки в умовах додаткового підтиску. Зокрема, ефективність перетворення енергії рейкотроном $\eta \approx 0,214$ за таких умов: $m = 0,1$ кг; $l = 1,94$ м; $\tau = 1,25$ мс (тривалість імпульсу); $I_m = 0,89$ МА (струм в імпульсі); $\rho = 3$ г/см³ (тіло з алюмінію). Початкова швидкість макротіла $V_0 = 0,1$ км/с; кінцева швидкість макротіла $V_m = 2,8$ км/с; $W_m = 0,39$ МДж; $W_L = 0,46$ МДж; $W_T = 0,11$ МДж; $W_d = 0,8$ МДж; $W_{op} = 0,06$ МДж.

Це означає, що у рейкотронів найпростішої конструкції тільки ~ 21 % електричної енергії джерела живлення (батареї суперконденсаторів) перетворюється на кінетичну енергію макротіла, що рухається. Тому вдосконалення рейкотронів продовжується.

Висновки.

1. Електромагнітні транспортні системи мають гарні, хоча й обмежені перспективи для подальшого розвитку і використання, зокрема електромобілі, Maglev-потяги, вакуумований надшвидкісний транспорт і рейкотрони. При цьому потрібно розуміти, що перспективи електромобілів сильно залежать від успіхів у розвитку літєвих акумуляторів, натрій-іонних акумуляторів, паливних елементів, або інших джерел живлення; а перспективи рейкотронів сильно залежать від успіхів у розвитку імпульсних джерел живлення, зокрема, батарей суперконденсаторів.

2. Електромобілі мають дуже гарні перспективи подальшого розвитку. Особливо, якщо відбудеться покращення технічних і екологічних характеристик акумуляторних батарей і паливних елементів, а також їх здешевлення. Але й існують проблеми: поки що не розроблена рентабельна і ефективна технологія утилізації відпрацьованих літєвих акумуляторів і отримання вторинного літію та інших цінних металів; ринок електромобілів може швидко досягти насичення, тому що цей транспорт залишається відносно дорогим.

3. Перспективи Maglev-потягів обмежені, але можуть значно покращитися, якщо у галузі високотемпературної надпровідності відбудуться науково-технічні прориви, що призведе до нових технічних рішень і здешевлення цього електромагнітного транспорту. Розвиток комерційного Maglev-транспорту відбувається за рахунок будівництва міських не високошвидкісних трас. Будівництво нових високошвидкісних трас поки що повільне. Крім того, різке зростання мілітаристських тенденцій у всьому світі може призвести до зупинки розвитку Maglev-транспорту. З огляду на технічні складності та

невирішені питання безпеки перспективи надшвидкісного вакуумованого транспорту ще більш обмежені.

4. З огляду на технічні складності рейкотрони поки що будуть використовувати в науково-технічній сфері і в космічній техніці для випробувань космічних матеріалів на міцність. Для значного підвищення ефективності рейкотронів необхідні прориви в галузі нових матеріалів для рейок і макротіл, які б дозволили зменшити видалення речовини з поверхні в екстремальних умовах експлуатації.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Геєць В.М., Волошин О.І., Дзензерський В.О., Никифорок О.І. Розвиток економічних та науково-технічних основ транспорту п'ятого покоління. Київ: Інститут транспортних систем і технологій НАН України, 2020. 254 с.
2. Скосар В.Ю., Бурилов С.В., Дзензерський В.О. Деякі проблеми надшвидкісних транспортних технологій. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 2 (102). С. 5—16. <https://doi.org/10.15802/stp2023/288073>
3. Скосар В.Ю., Бурилов С.В., Дзензерський В.О. Моделювання винахідницького процесу на прикладі літій-іонних акумуляторів. *Прикладні питання математичного моделювання*, 2021. 4, № 1. С. 216—223. <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.1.23>
4. Акумулятори для електромобілів — все, що потрібно знати. LIFE. URL: <https://batterylife.com.ua/news/akkumulyatory-dlya-elektromobilej-vse-chto-nuzhno-znat> (Дата звернення 10.04.2025).
5. Exploring the latest Lithium-ion Battery advancements in 2024. FirstIgnite. URL: <https://firstignite.com/exploring-the-latest-lithium-ion-battery-advancements-in-2024> (Дата звернення 10.04.2025).
6. Li A. Complete knowledge about lithium metal battery. HuntKey|GreVault. URL: <https://www.huntkeyenergystorage.com/lithium-metal-battery> (Дата звернення 10.04.2025).
7. Shiraki M., Komiya K. Honda hopes to double EV driving range with solid-state batteries, R&D chief says. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/honda-hopes-double-ev-driving-range-with-solid-state-batteries-rd-chief-says-2024-11-21/> (Дата звернення 10.04.2025).
8. Bobylev D. SAIC's second-gen solid-state battery mass production to start in 2026. CarNewsChina.com. URL: <https://carnewschina.com/2024/11/25/saics-second-gen-solid-state-battery-mass-production-to-start-in-2026> (Дата звернення 10.04.2025).
9. Doll S. BYD establishes joint venture to begin mass producing its nascent sodium-ion EV batteries. Electrek. URL: <https://electrek.co/2023/06/12/byd-joint-venture-mass-producing-sodium-ion-ev-batteries> (Дата звернення 10.04.2025).
10. Натрій-іонні батареї дозволять здешевити електромобілі. Автоцентр. URL: <https://www.autocentre.ua/news/natrij-ionnye-batarei-pozvoljat-udeshevit-elektromobili-1487857.html> (Дата звернення 10.04.2025).
11. Duchêne L., Kühnel R.-S., Stilp E., Cuervo Reyes E., Remhof A., Hagemann H., Battaglia C. A stable 3 V all-solid-state sodium-ion battery based on a closo-borate electrolyte. *Energy Environ. Sci.* 2017. 10, Iss. 12. P. 2609—2615. <https://doi.org/10.1039/C7EE02420G>
12. Scott A. Challenging lithium-ion batteries with new chemistry. *Chem. Eng. News*. 2015. 93, Iss. 29. P. 18—19. URL: <https://web.archive.org/web/20150822123745/http://cen.acs.org/articles/93/i29/Challenging-Lithium-Ion-Batteries-New.html> (Дата звернення 10.04.2025).
13. Hydrogen fuel cell vs lithium ion — the future of transport. AMS Composite Cylinders. URL: <https://ams-composites.com/hydrogen-fuel-cell-vs-lithium-ion-the-future-of-transport> (Дата звернення 10.04.2025).
14. Ezell S. How innovative is China in the electric vehicle and battery industries? ITIF. URL: <https://itif.org/publications/2024/07/29/how-innovative-is-china-in-the-electric-vehicle-and-battery-industries> (Дата звернення 10.04.2025).
15. Полевой О.Б., Редциц Д.А. Оценка аэродинамических и тепловых нагрузок на корпус капсулы HYPERLOOP в вакуумированном путепроводе. *Системні технології*. 2019. 4, № 123. С. 3—12. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-123-2019-01>
16. Муха А.М., Плаксін С.В., Погоріла Л.М., Устименко Д.В., Шкіль Ю.В. Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 23—31. <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>

17. Lv G., Zhang Z., Liu Y., Zhou T. Analysis of forces in linear synchronous motor with propulsion, levitation and guidance for high-speed maglev. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2022. **10**, Iss. 3. P. 2903—2911. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3065459>
18. Nagashima K. Update on basic research into superconducting maglev and research on application of maglev technology to conventional railway systems. *Q. Rep. RTRI.* 2020. **61**, № 1. P. 11—15. https://doi.org/10.2219/rtriqr.61.1_11
19. Wang X., Hu X., Wang P., Zheng J., Li H., Deng Z., Zhang W. Numerical simulation and optimization on opening angles of aerodynamic braking plates sets for a maglev train. *Adv. Aerodyn.* 2023. **5**. 8. <https://doi.org/10.1186/s42774-023-00144-2>
20. Спосіб виготовлення літій-полімерного акумулятора: пат. 127334 Україна. МПК H01M 10/052, H01M 10/0563, H01M 10/0567; заявл. 25.08.2021. Опубл. 19.07.2023, Бюл. № 29.
21. Skosar V., Burylov S. Simulation of the process of improving the oxygen-hydrogen fuel cell. *Математичне моделювання.* 2024. № 2 (51). С. 151—160. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.2\(51\)2024.317622](https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(51)2024.317622)
22. China claims new speed record with vacuum-tube maglev train. Ukrainian News. URL: <https://ukranews.com/en/news/983137-china-claims-new-speed-record-with-vacuum-tube-maglev-train> (Дата звернення 10.04.2025).
23. Надшвидкісний наземний транспорт: пат. 121028 Україна. МПК B60L13/10, B60V3/02; заявл. 06.06.2017. Опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22.
24. Ma J., Shi R., Han D., Yue P., Song K. Finite element analysis of current density distribution in the sliding contact interface of electromagnetic railguns: a literature review. *IEEE Access.* 2024. **12**. P. 84088—84109. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3414648>
25. Szondy D. China is building a railgun that can hurl crewed spacecraft into orbit. New Atlas. URL: <https://newatlas.com/space/china-railgun-spacecraft-orbit> (Дата звернення 10.04.2025).

Надійшла до редакції 15.04.2025

REFERENCES

1. Geets, V. M., Voloshin, O. I., Dzenzerskyi, V. O. & Nikiforuk, O. I. (2020). Development of economic and scientific and technical foundations of fifth generation transport. Kyiv: Instytut transportnykh system i tekhnolohii NAN Ukrainy (in Ukrainian).
2. Skosar, V. Yu., Burylov, S. V., Dzenzerskyi, V. O. (2023). Some problems of ultra-high-speed transportation technologies. *Science and Transport Progress*, No. 2 (102), pp. 5-16. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15802/stp2023/288073>
3. Skosar, V. Yu., Burylov, S. V. & Dzenzerskyi, V. O. (2021). Simulation of the invention process on the example of lithium-ion batteries. *Applied questions of mathematical modelling*, 4, No. 1, pp. 216-223 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.1.23>
4. Electric car batteries — everything you need to know. LIFE. Retrieved from <https://batterylife.com.ua/news/akkumulyatory-dlya-elektromobilej-vse-chto-nuzhno-znat>
5. Lithium-ion battery innovations 2024. Exploring the latest Lithium-ion Battery advancements in 2024. FirstIgnite. Retrieved from <https://firstignite.com/exploring-the-latest-lithium-ion-battery-advancements-in-2024>
6. Li, A. (2024). Complete knowledge about lithium metal battery. HuntKey | GreVault. Retrieved from <https://www.huntkeyenergystorage.com/lithium-metal-battery>
7. Shiraki, M. & Komiya, K. (2024). Honda hopes to double EV driving range with solid-state batteries, R&D chief says. Reuters. Retrieved from <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/honda-hopes-double-ev-driving-range-with-solid-state-batteries-rd-chief-says-2024-11-21>
8. Bobylev, D. (2024). SAIC's second-gen solid-state battery mass production to start in 2026. CarNewsChina.com. Retrieved from <https://carnewschina.com/2024/11/25/saics-second-gen-solid-state-battery-mass-production-to-start-in-2026>
9. Doll, S. (2023). BYD establishes joint venture to begin mass producing its nascent sodium-ion EV batteries. Electrek. Retrieved from <https://electrek.co/2023/06/12/byd-joint-venture-mass-producing-sodium-ion-ev-batteries>
10. Natriy-ionni batarei dozvoliat zdesheviti elektromobili. Retrieved from <https://www.autocentre.ua/news/natriy-ionnye-batarei-pozvoljat-udeshevit-elektromobili-1487857.html>

11. Duchêne, L., Kühnel, R.-S., Stilp, E., Cuervo Reyes, E., Remhof, A., Hagemann, H. & Battaglia, C. (2017). A stable 3 V all-solid-state sodium-ion battery based on a *closo*-borate electrolyte. *Energy Environ. Sc.*, 10, Iss. 12, pp. 2609-2615. <https://doi.org/10.1039/C7EE02420G>
12. Scott, A. (2015). Challenging lithium-ion batteries with new chemistry. *Chem. Eng. News*, 93, Iss. 29, pp. 18-19. Retrieved from <https://web.archive.org/web/20150822123745/http://cen.acs.org/articles/93/i29/Challenging-Lithium-Ion-Batteries-New.html>
13. Hydrogen fuel cell vs lithium ion — the future of transport (2020). AMS Composite Cylinders. Retrieved from <https://ams-composites.com/hydrogen-fuel-cell-vs-lithium-ion-the-future-of-transport>
14. Ezell, S. (2024). How innovative is China in the electric vehicle and battery industries? ITIF. Retrieved from <https://itif.org/publications/2024/07/29/how-innovative-is-china-in-the-electric-vehicle-and-battery-industries>
15. Polevoy, O. B., & Redchyts, D. A. (2019). Evaluation of aerodynamic and thermal loads on the HYPERLOOP capsule fuselage in a partly evacuated tube. *System Technologies*, 4, No. 123, pp. 3-12 (in Russian). <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-123-2019-01>
16. Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustymenko, D. V. & Shkil, Y. V. (2022). Combined system of synchronized simultaneous control of magnetic plane movement and suspension. *Science and Transport Progress*, No. 1 (97), pp. 23-31 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
17. Lv, G., Zhang, Z., Liu, Y. & Zhou, T. (2022). Analysis of forces in linear synchronous motor with propulsion, levitation and guidance for high-speed maglev. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 10, Iss. 3, pp. 2903-2911. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3065459>
18. Nagashima, K. (2020). Update on basic research into superconducting maglev and research on application of maglev technology to conventional railway systems. *Q. Rep. RTRI*, 61, No. 1, pp. 11-15. https://doi.org/10.2219/rtriqr.61.1_11
19. Wang, X., Hu, X., Wang, P., Zheng, J., Li, H., Deng, Z. & Zhang, W. (2023). Numerical simulation and optimization on opening angles of aerodynamic braking plates sets for a maglev train. *Adv. Aerodyn.*, 5, No. 8, pp. 1-18. <https://doi.org/10.1186/s42774-023-00144-2>
20. Pat. 127334 UA, IPC H01M 10/052, H01M 10/0563, H01M 10/0567, Method of manufacturing a lithium polymer battery, Dzenzerskyi, V. O., Burylov S. V. & Skosar V. Yu., Publ. 19.07.2023 (in Ukrainian).
21. Skosar, V. & Burylov, S. (2024). Simulation of the process of improving the oxygen-hydrogen fuel cell. *Mathematical Modeling*, № 2 (51), pp. 151-160. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.2\(51\)2024.317622](https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(51)2024.317622)
22. China claims new speed record with vacuum-tube maglev train. *Ukrainian News*. URL: <https://ukranews.com/en/news/983137-china-claims-new-speed-record-with-vacuum-tube-maglev-train>
23. Pat. 121028 UA, IPC B60L13/10, B60V3/02, Ultra-high-speed ground transport, Dzenzerskyi, V. O., Burylov S. V. & Skosar V. Yu., Publ. 27.11.2017 (in Ukrainian).
24. Ma, J., Shi, R., Han, D., Yue, P. & Song, K. (2024). Finite element analysis of current density distribution in the sliding contact interface of electromagnetic railguns: a literature review. *IEEE Access*, 12, pp. 84088-84109. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3414648>
25. Szondy, D. (2024). China is building a railgun that can hurl crewed spacecraft into orbit. *New Atlas*. URL: <https://newatlas.com/space/china-railgun-spacecraft-orbit>

Received 15.04.2025

V.Yu. Skosar, <https://orcid.org/0000-0002-2151-3417>

S.V. Burylov, <https://orcid.org/0000-0001-8070-6764>

V.O. Dzenzerskyi, <https://orcid.org/0000-0002-5504-4524>

Institute of Transport System and Technologies of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

E-mail: skosarslava@gmail.com

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC TRANSPORT

The technical characteristics of electromagnetic transport, in particular, electric vehicles, high-speed maglev trains, ultra-high-speed maglev trains in vacuum pipeline, and railguns are considered. The technical characteristics of rechargeable batteries used as power sources for electric vehicles are presented. The prospects for the development of electromagnetic transport are analyzed. It has been concluded that electromagnetic transport systems have good, albeit limited, prospects for further development and use. Electric vehicles have very good prospects for further development, provided that the technical and environmental characteristics of batteries and fuel cells are improved and their cost is reduced. But there are also problems: no economically efficient and effective technology has yet been developed for recycling used lithium batteries and recovering secondary lithium and other valuable metals.

The prospects for Maglev trains are limited, but could improve significantly if scientific and technical breakthroughs occur in the field of high-temperature superconductivity, which will lead to new technical solutions and a reduction in the cost of this transport. The development of commercial Maglev transport is being carried out through the construction of urban non-high-speed routes. The construction of new high-speed routes continues at a slow pace. Given the technical difficulties and unresolved safety issues, the prospects for ultra-high-speed vacuum transport are even more limited. Given the technical complexity, railguns will continue to be used in scientific and technical field and in space technology to test the strength of space materials. To significantly increase the efficiency of railguns, breakthroughs are needed in the field of new materials for rails and macroteils, which would reduce material removal from the surface under extreme operating conditions.

Keywords: *electric vehicle, battery, fuel cell, magnetic levitation, evacuated pipeline.*